

**Altersabhängige mikrostrukturelle Organisation verbrannter
Skelettfunde**

–

**Beitrag zur Identifikation Erwachsener höheren
Individualalters**



Dissertation der Fakultät für Biologie
der Ludwig-Maximilians-Universität München
vorgelegt von *Larissa Anna-Maria Otto, München 2020*

Erstgutachter: Frau Prof. Dr. Gisela Grupe

Zweitgutachter: Herr Prof. Dr. Martin Heß

Tag der Abgabe: 09.06.2020

Datum der mündlichen Prüfung: 25.11.2020

Dankenswerterweise wurde diese Dissertation in den Jahren 2018 bis 2020 durch ein Promotionsstipendium der **Hanns-Seidel-Stiftung e.V.** (München) gefördert.

Literaturverzeichnis

LITERATURVERZEICHNIS	3
1.) EINLEITUNG	5
1.1) ZIEL UND MOTIVATION DER ARBEIT	5
1.2) LEICHENBRAND ALS BESTATTUNGSRITUS	6
1.2.1) <i>Geschichte der Leichenbranduntersuchung</i>	7
1.2.2) <i>Leichenverbrennung</i>	7
1.2.3) <i>Aktueller Kontext der Leichenverbrennung</i>	10
1.3) MAKROSTRUKTURELLER AUFBAU KOMPAKTEN KNOCHENS	11
1.3.1) <i>Organischer und anorganischer Anteil</i>	12
1.3.2) <i>Knochenbildung</i>	13
1.3.3) <i>Knochenaufbau und Knochenumbau (Modeling und Remodeling)</i>	14
1.3.4) <i>Temperaturinduzierte Änderungen der Knochenstruktur</i>	20
1.4) MIKROSTRUKTURELLER AUFBAU KOMPAKTEN KNOCHENS	23
1.4.1) <i>Knochenmikrostruktur</i>	23
1.4.2) <i>Biomechanik des Knochens</i>	28
1.4.3) <i>Histomorphometrie</i>	31
1.4.4) <i>Äußere Einflüsse auf die Knochenmikrostruktur</i>	33
1.4.5) <i>Taphonomische Prozesse und damit verbundene Degradation der Knochenmikrostruktur</i>	35
1.4.6) <i>Verbrennungsbedingte Veränderungen der Knochenmikrostruktur</i>	36
1.4.7) <i>Histologische Altersbestimmung</i>	37
2.) MATERIAL UND METHODEN	45
2.1) MATERIAL	45
2.1.1) <i>Westfriedhofproben</i>	45
2.1.2) <i>Rechtsmedizinproben</i>	47
2.1.3) <i>Streifundmaterial</i>	47
2.2) METHODEN	48
2.2.1) <i>Mazeration des Rechtsmedizinmaterials</i>	48
2.2.2) <i>Reinigung und Zerkleinerung</i>	49
2.2.3) <i>Soxhlet</i>	50
2.2.4) <i>Verbrennung</i>	51
2.2.4) <i>Einbetten</i>	52
2.2.5) <i>Herstellung der Dünnschnitte</i>	52
2.2.6) <i>Histologische Untersuchung und Fotodokumentation</i>	53
2.2.7) <i>Definition der histomorphometrischen Parameter</i>	54
2.2.8) <i>Histologische Altersbestimmung mit bekannten Formeln</i>	55
2.2.9) <i>Statistik</i>	57
3.) ERGEBNISSE	60
3.1) INTRAINDIVIDUELLE VARIABILITÄT DER KNOCHENMIKROSTRUKTUR AM FEMUR	60
3.2) NACHVERBRENNUNG DES KNOCHENMATERIALS	60
3.3) MAKROSKOPISCHE ÄNDERUNGEN DURCH DEN EINFLUSS DER VERBRENNUNG	61
3.3.1) <i>Farbliche Veränderung</i>	61
3.3.2) <i>Schrumpfung</i>	62
3.4) MIKROSKOPISCHE ÄNDERUNGEN	65
3.4.1) <i>Herstellung und Auswertbarkeit der histologischen Schnitte</i>	65
3.4.2) <i>Überblick über farbliche Veränderungen</i>	66
3.4.3) <i>Test bestehender histologischer Altersbestimmungsformeln</i>	67
3.5) FEMUR	96
3.5.1) <i>Veränderung histomorphometrischer Parameter über die Verbrennungstemperaturen</i>	97
3.5.2) <i>Schrumpfungskoeffizient und Schrumpfung der histomorphometrischen Parameter</i>	105
3.5.3) <i>Statische Auswertung der verbrennungsbedingten Veränderung</i>	109
3.5.4) <i>Erstellung von Regressionsgleichungen</i>	142
3.6) TIBIA	168
3.6.1) <i>Veränderung histomorphometrischer Parameter über die Verbrennungstemperaturen</i>	168

3.6.2)	<i>Statische Auswertung der verbrennungsbedingten Veränderung</i>	174
3.6.3)	<i>Erstellung von Regressionsgleichungen</i>	186
4.)	DISKUSSION	190
4.1)	MAKROSKOPISCHE UND FARBLICHE VERÄNDERUNGEN	192
4.1.2)	<i>Schrumpfung und prozentualer Gewichtsverlust</i>	192
4.2)	MIKROSKOPISCHE VERÄNDERUNGEN	195
4.3)	FEMORA	197
4.3.1)	<i>Test bestehender histologischer Altersbestimmungsmethoden</i>	197
4.3.2)	<i>Veränderungen der histomorphometrischen Parameter</i>	204
4.3.3)	<i>Schrumpfungskoeffizient</i>	216
4.4)	STATISTISCHE AUSWERTUNG	218
4.4.1)	<i>Statistische Tests</i>	218
4.4.2)	<i>Ausreißer</i>	225
4.4.3)	<i>Geschlechtsunterschiede</i>	226
4.4.4)	<i>Vergleich periostal und mittig</i>	230
4.5)	MULTIPLE LINEARE REGRESSIONSMODELLE	231
4.6)	TIBIA	244
4.6.1)	<i>Veränderungen der histomorphometrischen Parameter</i>	245
4.6.2)	<i>Schrumpfungskoeffizient</i>	247
4.6.3)	<i>Statistische Auswertung</i>	248
4.6.4)	<i>Regressionsmodelle</i>	249
5.)	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	251
6.)	LITERATURVERZEICHNIS	254
7.)	ANHANG	266
8.)	DANKSAGUNG	421
9.)	LEBENS LAUF	422
10.)	EIDESSTÄTTLICHE VERSICHERUNG UND ERKLÄRUNG ZUR ARBEIT	427

1.) Einleitung

1.1) Ziel und Motivation der Arbeit

Die Anthropologie beschäftigt sich mit der Bevölkerungsrekonstruktion prähistorischer Populationen. Dabei basieren solche demographischen Untersuchungen auf dem Sterbealter der Individuen.

Da der vorherrschende Bestattungsritus in Europa zwischen der Bronzezeit und dem Ende der römischen Kaiserzeit die Leichenverbrennung war, ist die Rekonstruktion der Bevölkerungsentwicklung in dieser Zeit von Interesse. Aufgrund des langen Zeitraums der Leichenverbrennung als primärer Bestattungsritus, aber auch dadurch, dass die Leichenverbrennung als Bestattungsritus in der heutigen Zeit immer mehr in den Fokus rückt, ist die Entwicklung neuer Sterbealtersbestimmungsmethoden in den letzten Jahren wieder vermehrt in den Fokus gerückt (Großkopf, 2004, Novacek, 2012, Absolonova et al., 2013, Absolonova et al., 2012). Der Informationsgewinn aus prähistorischem Leichenbrandmaterial gestaltet sich oftmals schwierig. Dies wird zum Einen durch die auf den Leichnam einwirkenden Verbrennungstemperaturen und damit einhergehenden Veränderungen des Knochenmaterials bedingt, zum anderen aber auch durch die Vernachlässigung der Entwicklung neuer Bearbeitungsmethoden in der Wissenschaft. Besonders die Individualaltersschätzung ist neben der Geschlechtsdiagnose an verbranntem Knochenmaterial limitiert.

Daher sollte die Verwendung histologischer Altersbestimmungsmethoden an Leichenbrandmaterial dringend in die alltägliche Leichenbranduntersuchung einbezogen werden. Bislang ist oftmals nicht mal eine morphologische Einschätzung des Sterbealters möglich, aufgrund des hohen Fragmentierungsgrades der Leichenbrände, oder wenn sich im rechtsmedizinischen Kontext nur Knochenüberreste (z.B. Vertuschung von Mord, 9/11, Brand im Gotthardtunnel) finden.

Dies würde auch die Erstellung von Sterbetafeln vereinfachen und auch das Simulieren von Bevölkerungsentwicklungen über die Zeit in Anbetracht von Brandgräberfeldern wäre denkbar.

Moderne Altersbestimmungsmethoden fokussieren sich vorwiegend auf die histologische Untersuchung des Knochenmaterials zur Individualaltersschätzung. Auch bei der Altersbestimmung an unverbranntem Knochenmaterial werden oft histologische Methoden zur Unterstützung herangezogen, beispielsweise wenn nur noch fragmentarisches Knochenmaterial vorliegt. Knochen eignet sich auch deshalb zur histologischen Altersbestimmung, da die Knochenmikrostruktur altersbedingten Veränderungen obliegt.

Zwar gewinnt die Histologie am Leichenbrandmaterial an Bedeutung in den letzten Jahren, trotzdem wird leider bei den meisten anthropologischen und archäologischen Untersuchungen eine stiefmütterliche Behandlung von Brandknochenmaterial vollzogen. Ursächlich dafür ist, dass nach wie vor nicht allseits bekannt ist, dass eine histologische Untersuchung an Leichenbrand sowohl vollzogen werden kann als auch zu besseren Ergebnissen im Zuge der Individualaltersschätzung führt.

Eine histologische Altersbestimmung zur Unterstützung der Sterbealtersbestimmung ist demzufolge zum Einen für die Anthropologie von Nutzen, um herauszufinden, welches Alter während der Urnenfelderzeit (ca. 1500) durchschnittlich erreicht werden konnte. Zum Anderen im forensischen Kontext zur Unterstützung der Sterbealtersbestimmung überalterter Individuen.

Daher befasst sich diese Arbeit mit der Etablierung neuer histologischer Methoden zur Individualaltersschätzung anhand von experimentellen Verbrennungsversuchen von Diaphysen(-abschnitten) alters- und geschlechtsbekannter Individuen an Femur und Tibia. Dabei werden die altersbedingten Veränderungen zusammen mit den thermischen Veränderungen der Knochenmikrostruktur untersucht. Dies erfolgt stets im Abgleich mit der Knochenmikrostruktur der zu den jeweiligen Knochenfragmenten korrespondierenden unverbrannten Referenzproben, um den Einfluss hitzebedingter Veränderungen besser quantifizieren zu können.

Ziel der Arbeit ist es, einen Katalog mikrostruktureller Parameter zu erstellen, die Beziehungen und Abhängigkeiten sowie die Relevanz der hitzebedingten Veränderungen der Parameter statistisch aufzuzeigen und die Entwicklung linearer Regressionsmodelle zur histologischen Altersschätzung unter Einbeziehung zuvor quantifizierter bzw. bewerteter histomorphometrischen Parameter.

Im Folgenden werden der zugrunde liegende Hintergrund, die vorherrschende Problematik und deren Lösungsansätze zur Entwicklung *neuer Methoden* dargelegt.

1.2) Leichenbrand als Bestattungsritus

Nicht nur in Mitteleuropa spielte die Leichenverbrennung als vorherrschende Bestattungssitte eine entscheidende Rolle, auch in anderen Regionen der Erde, wie beispielsweise in Mexiko, war die Leichenverbrennung ein prominenter Bestattungsritus. Durch den Bestattungsritus konnte beispielsweise der soziale Status des Toten zeitlebens über die Anwendung verschiedener Verbrennungstechniken angezeigt werden (Duncan et al., 2008). Im alten Griechenland und im alten Rom gab es Zeiten, in denen entweder die Leichenverbrennung oder die Körperbestattung die dominierende Bestattung war und wiederum Jahrhunderte, in denen beide Bestattungsriten koexistierten. In der mittleren bis späten Bronzezeit fand ein Übergang von der Körperbestattung zur Einäscherung mit Urnenbestattung in Mitteleuropa statt (Rebay-Salisbury, 2012). Zwischen dem ersten und vierten Jahrhundert n.Chr. war die Leichenverbrennung in Mitteleuropa eine prominente Bestattungssitte (Polen, Tschechoslowakei, BRD). Damals wurde geglaubt, dass bei einer Brandbestattung die Seele vom Körper getrennt wird und weiterleben kann (Schultze, 1992). Die Leichenverbrennung wurde daher als „Transformierung“ des toten Körpers auf eine geplante und schnelle Art und Weise verstanden, ganz im Gegensatz zur Körperbestattung. Zudem konnten Hinterbliebene eine aktive Rolle in dieser Transformierung einnehmen (Rebay-Salisbury, 2010). Im Jahr 789 wurde die Leichenverbrennung dann durch Karl den Großen verboten, da es sich um eine „heidnische Tradition“ handelte. Erst am Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts wurde die Leichenverbrennung als Bestattungssitte wieder eingeführt. Dies erfolgte aus Gründen der Hygiene und bedingt durch Platzmangel auf Friedhöfen – aber auch durch den Horror vor dem (Ver-)Faulen. Die katholische Kirche selbst hat ihr Verbot von Feuerbestattungen erst 1963 wieder aufgehoben. In der heutigen Zeit wird die Kremation als Bestattungsritus am häufigsten in Großbritannien und Skandinavien praktiziert (~70%). Länder mit katholischer Tradition haben nach wie vor eine eher geringe Zahl an Kremationen (Rebay-Salisbury, 2012).

1.2.1) Geschichte der Leichenbranduntersuchung

Seit dem 16. Jahrhundert gibt es bereits Interpretationen von archäologischen Urnen und von verbrannten Körpern aus Überresten der Leichenverbrennung als Bestattungsform. Im Jahre 1679 gab es erste Leichenbrandbeschreibungen durch Jakob von Mellen, 1719 von A.A. Rhode. Bereits im 17. und 18. Jahrhundert kam im Zuge der Leichenbranduntersuchung die gleiche bis heute fortbestehende Problematik bezüglich der Alters- und Geschlechtsdiagnose, Individuenzahl, dem Umgang mit dem Knochenmaterial und dem Erkennen von Tierknochenfunden auf (Herrmann, 1980). Trotz des Versuchs der katholischen Kirche im 19. Jahrhundert die Leichenverbrennung als Bestattungsritus abzuschaffen, indem sie diese als Vorstufe des unauslöschlichen Höllenfeuer deklarierten, gewann die prähistorische Leichenbranduntersuchung in der Wissenschaft an Bedeutsamkeit (Herrmann, 1980, Wahl, 2008). Die ersten Untersuchungen versuchten sich an einem Informationsgewinn bezüglich der soziologischen und ethnischen Beziehungen der Bestatteten (Wahl, 2001, Wahl, 2008). In den 1920er und 1930er Jahren entstanden erste wissenschaftliche Arbeiten über die Leichenbranduntersuchung (Wahl, 2008, Herrmann, 1980). Seit den 1950er Jahren gewinnen Untersuchungen prähistorischer Leichenbrände immer mehr an Bedeutung (Wahl, 2008). Gejvall hat 1947 einen ersten Handbuchbeitrag zur Leichenbrandbefundung veröffentlicht (Herrmann, 1980). Wells (Wells, 1960) zeigte in seiner Untersuchung Probleme auf, welche die Leichenbrandanalysen erschweren. Darunter fallen u.a. die verbrennungsbedingten Veränderungen am Knochen wie z.B. Verzerrung, Fragmentierung, Schrumpfung und das für eine aussagekräftige Untersuchung teils auch zu geringe Material. Auch er schrieb von der Möglichkeit einer zusätzlichen Fragmentierung der Knochen nach der Kremierung, um eine für die Urne passende Größe zu erzielen (Wells, 1960). In weiteren Beschreibungen drehte es sich u.a. um die Behandlung des Leichenbrandes, die Interpretation der Verbrennungstemperatur, die Umhüllung der Knochen, die Menge an Asche, Kohle und Scheiterhaufenfragmenten (Gejvall, 1963). Zudem wurden Interpretationshilfen zu Fragmentgröße und möglicher vorausgegangener Manipulation der Knochen, Farbe, Identifizierung der Fragmente, Individuenzahl, sowie Alters- und Geschlechtsbestimmung gegeben (Gejvall, 1963).

1.2.2) Leichenverbrennung

Es bestehen zwei Arten von Leichenverbrennung: die Verbrennung im Krematorium oder die auf dem Scheiterhaufen. Letztgenanntes wird bis heute beispielsweise noch in Indien praktiziert. Wichtiger ist an dieser Stelle jedoch der prominente Status der Leichenverbrennung als Bestattungsritus im prähistorischen Kontext. Der Scheiterhaufen wird entzündet und zuerst brennen die direkt entflammbareren Materialien, wie z.B. Schilfrohr, Kleidung und Haare, wohingegen die Baumstämme und der Torso erst später entflammen. Entzündet sich der Torso, verfärbt sich die Haut schwarz, das Fleisch wird zersetzt und Skeletteile sowie innere Organe werden enthüllt. Während der Verbrennung ändern Körper, Scheiterhaufen und Feuer ihre Beschaffenheit (in Form, Farbe, Temperatur, Intensität, Geruch, Geräuschen und Umfang) (Flohr Sørensen und Bille, 2008). Prähistorische Scheiterhaufenverbrennungen erreichten i.d.R. Temperaturen von 400-700 °C, mit Spitzen von bis zu 850 °C (Alunni et al., 2014). Diese standen zudem unter dem Einfluss von Wind, Wetter, der Jahreszeit

und der verwendeten Holzart. Die Verbrennungsdauer betrug ungefähr einen halben bis einen ganzen Tag, das Abkühlen dauerte noch weitere sieben bis zehn Stunden (Wahl, 1981). Während der Scheiterhaufenverbrennung (Abbildung 1) geht die meiste Hitze in der Atmosphäre verloren, weshalb eine konstante externe Heizquelle benötigt wird (McKinley and Tech, 2008). Nimmt die Hitze des Feuers auf dem Scheiterhaufen zu, so wird der Körper oben auf dem Scheiterhaufen platziert, um die größtmögliche Versorgung des Scheiterhaufens mit Sauerstoff zu gewährleisten. Durch den Einfluss von Windstärke und Windrichtung wird der Leichnam allerdings nicht einheitlich verbrannt (McKinley and Tech, 2008). Nach dem Verbrennen des Körpers auf dem Scheiterhaufen wird letztgenannter durch ein Auseinanderziehen der Scheiterhaufenreste oder durch das Ablöschen mit Flüssigkeiten abgekühlt (Schultze, 1992). Das Ablöschen des Scheiterhaufens mit Flüssigkeiten bewirkt eine weitere Fragmentierung der Knochen (McKinley, 1989). Dies kann allerdings auch durch intentionale Fragmentierung, taphonomische Prozesse (Frost, Bodendruck, Wurzeln) oder achtlose Behandlung des Leichenbrandmaterials bei der Bergung erfolgen (Rebay-Salisbury, 2010). Für den Bestattungskontext des Leichenbrandes existierten vier verschiedene Arten: Urnengräber, Brandschüttungsgräber, Brandgrubengräber und Leichenbrandstreuungen (Schultze, 1992). Große römische Friedhöfe enthielten meist eine oder mehrere Ustrinen (Verbrennungsplätze), aus denen nach der Verbrennung von den Hinterbliebenen die Knochenreste aufgesammelt und an einem anderen Ort bestattet wurden. Dabei kam es häufig zur Beimengung der Reste anderer Individuen (aus vorausgegangenen Kremierungen) (Wahl, 2008).



Abbildung 1: Bildliche Darstellung einer prähistorischen Scheiterhaufenverbrennung (<http://www.ancient-origins.net>, 18.11.2019)

Manchmal ist das Knochenmaterial in anatomischer Anordnung in der Urne positioniert, was darauf hinweist, dass die Überreste noch als „der Tote“ bzw. zu dem „Toten gehörig“ angesehen wurden (Großkopf, 2004). Es existieren auch sogenannte „Pars pro toto“-Bestattungen, in denen nur einige Knochenfragmente bestattet werden. Vor der Verbrennung wurden die Leichname meist bekleidet, geschmückt und auf den Scheiterhaufen in gestreckter Position gelegt (Rebay-Salisbury, 2010). Untersuchungen zu Holzarten für die Scheiterhaufenverbrennung im Leichenbrandmaterial zeigten, dass vorwiegend Eiche, Pinie, Birke und Heidekraut verwendet wurden – vermutlich v.a. aufgrund ihrer Verfügbarkeit. Für das Errichten eines Scheiterhaufens wurden sowohl Baumstämme als auch Äste verwendet (Moskal-del Hoyo, 2012).

Auf den meisten Brandgräberfeldern findet sich ein geringer Anteil an Kindern und Jugendlichen (Urnfelderzeit 8,5%, Hallstattzeit 21,1%, römische Kaiserzeit 30,4%). Diese Unterrepräsentierung

könnte beispielsweise daran liegen, dass Kinder oft nicht kremiert wurden, wenn sie zum Todeszeitpunkt noch nicht ihren ersten Zahn hatten (Wahl, 2008).

Entgegen früherer Annahmen kann Leichenbrand relevante Informationen bezüglich demographischer Daten, pathologischer Läsionen oder verschiedener Verbrennungstechniken liefern, trotz der Limitierung im anwendbaren Methodenspektrum (McKinley, 1992).

Verbrennungsprozess

Scheiterhaufenverbrennungen erreichten ähnliche Temperaturen wie im Krematorium bereits innerhalb der ersten halben Stunde und höhere Temperaturen innerhalb einer Stunde (McKinley und Tech, 2008).

Die Leichenverbrennung ist ein Prozess der Dehydratation und Oxidation der organischen Komponenten des Körpers (McKinley, 2000). Eine heutige moderne Kremation dauert etwa eine bis eineinhalb Stunden bei einer durchschnittlichen Temperatur von 890°C (Wells, 1960, McKinley, 2000, Wahl, 1981, Schultz et al., 2008). Luftströmungen zirkulieren dabei die Hitze innerhalb der Verbrennungskammer (McKinley, 2000). Weichkörper und Fettgewebe verwandeln sich dabei wegen des hohen Kohlenstoffgehalts organischer Gewebeanteile zunächst in eine teerartige Masse. Der Weichkörper, sowie Muskeln und Sehnen ziehen sich zusammen und die Bauchdecke fällt ein. Schulter-, Hals- und Beckenbereich sowie die Wirbelsäule bleiben am längsten bestehen (Wahl, 1981). Menschliches Körpergewebe ist generell kein guter Wärmeleiter, subkutanes Fett stellt noch den besten Brennstoff im Körper dar, wobei die Knochen als eine Art „Docht“ für das Fett dienen (McKinley, 2000, DeHaan, 2015).

Das Gehirn ist bis etwa 400 oder 500 °C weitgehend erhalten, ab 700 °C platzt jedoch der Schädel. Dabei brechen die Laminae der Schädelknochen auseinander (Wahl, 1981). Die Schwere der Verbrennungen am menschlichen Körper bzw. Leichnam hängt ab von der einwirkenden Hitze, der Atmosphäre im Verbrennungskontext und der Verbrennungsdauer (DeHaan, 2015). Aber auch der Körperbau spielt eine nicht unwesentliche Rolle. Adipöse Individuen verbrennen schneller, da das am Körper vorhandene Fett einen besseren „Brennstoff“ darstellt, wodurch sehr hohe Verbrennungstemperaturen erzielt werden (Wells, 1960, Schultz et al., 2008). Nach der Verbrennung im modernen Kremationsofen werden medizinische und dentale Prothesen sowie metallene Objekte entfernt (Schultz et al., 2008). Die Kremierung hat zwei Phasen, zum einen die Verbrennung im Kremationsofen und zum anderen die Prozessierung oder Pulverisierung der Überreste (Schultz et al., 2008). In beiden Fällen (Scheiterhaufen und Krematorium) werden die Knochen jedoch, wie gemeinhin angenommen, nicht zu Asche durch den Verbrennungsvorgang (Alunni et al., 2014). Nach der Verbrennung sind in prähistorischen Leichenbränden oftmals große verwertbare Stücke vorhanden. Das Mahlen der Knochen nach der Verbrennung ist neuzeitlichen Ursprungs.

Makroskopische Leichenbranduntersuchung

Durch verbrennungsbedingte Schrumpfung, Deformation und Fragmentierung der Knochen wird das für die Leichenbranduntersuchung anwendbare Methodenspektrum stark eingeschränkt. Die

Dehydrierung der Knochen während der Verbrennung führt zu Sinterung, Fissuren und Verdrehung der Knochen (McKinley, 2000). Fragmentgröße, Fragmentbestimmung, Individuenzahl sowie Alters- und Geschlechtsbestimmung werden, soweit möglich, durchgeführt (Gejvall, 1963). Die Fragmentgröße in einem Leichenbrand kann durch das Aufsammeln des Leichenbrandes aus dem Scheiterhaufen, der Behandlung nach dem Aufsammeln, der Deponierung in der Urne und der Sorgfalt bei der Ausgrabung und anthropologischen Bearbeitung beeinflusst werden (siehe Kapitel 1.2.2 „Leichenverbrennung“) (McKinley, 1994).

Durch die Studien von Wahl (Wahl, 1982) werden auch über die Verfärbung des Knochenmaterials Rückschlüsse auf die bei der Verbrennung vorherrschenden Temperaturen gezogen (Wahl, 2001). Diese wurden allerdings durch Greiner et al. (Greiner et al., 2019) relativiert.

Die Sterbealtersbestimmung erfolgt meist über die Verwachsung der Schädelnähte, die Fusion von Epi- und Apophysen sowie den Zahnstatus. Allerdings können Schädelnähte, welche sich gerade im Stadium der Verwachsung befinden, durch die Hitzeeinwirkung wieder aufplatzen, wodurch es zu einer Verfälschung der Individualaltersbestimmung kommen kann (Wahl, 2008). Die Altersbestimmung juveniler Individuen ist dagegen einfacher, da sie über die Interpretation entwicklungsbedingter morphologischer Indikatoren erfolgt. Die Anwendbarkeit sowohl konventioneller als auch histologischer Altersbestimmungsmethoden an adulten verbrannten Individuen hängt stark vom Grad der Zerstörung und den damit einhergehenden Veränderungen der betreffenden Strukturen durch die Verbrennung ab (Fairgrieve, 2007). Die Anwendung histologischer Altersbestimmungsmethoden ist nur dann sinnvoll, wenn relevante Strukturen sichtbar gemacht werden können (Fairgrieve, 2007). Nach Gatto (Gatto, 2002) existiert bis dato keine zuverlässige Methode zur Individualaltersbestimmung adulter Individuen an Leichenbrandmaterial, es ist nur eine Einteilung in Altersklassen bzw. „Alterskategorien“ möglich. Daher ist das Ziel dieser Arbeit, eine genauere Sterbealtersbestimmung adulter und vor allem seniler Individuen zu ermöglichen.

1.2.3) Aktueller Kontext der Leichenverbrennung

Der aktuelle Kontext von Untersuchungen moderner Leichenverbrennungen beschäftigt sich vorwiegend mit rechtsmedizinischen Fragestellungen. Es besteht vor allem auch im forensischen Kontext ein steigender Bedarf an akkuraten Altersbestimmungsmethoden, durch den zunehmenden Anteil an nicht-identifizierten Toten (Ritz-Timme et al., 2000).

Dabei geht es beispielsweise um die versuchte Entsorgung von Überresten oder illegale Brandbestattung im Zuge eines Verbrechens, damit diese nicht entdeckt werden. Dabei werden die Überreste oft vom Verbrennungsort entfernt. Aber auch die Legung von Waldbränden zur Verschleierung von Tötungsdelikten, sowie Autounfälle, Flugzeugabstürze, Hausbrände oder Massenkatastrophen spielen eine Rolle (Fairgrieve, 2007, Eckert et al., 1988, Alunni et al., 2014, Grévin et al., 1998). Eine Scheiterhaufenverbrennung ist in diesem Kontext eher unüblich, ist zuweilen aber dennoch vorzufinden. In jedem Fall muss untersucht werden, ob ein Tötungsdelikt ausgeschlossen werden kann (Alunni et al., 2014). Hohe Verbrennungstemperaturen bis zur Kalzinierung der Knochen, lassen z.B. häufig auf ein Verbrechen schließen, da der Scheiterhaufen hierfür für mehrere Stunden

brennen und hohe Temperaturen erreichen muss (Alunni et al., 2014). Die Altersbestimmung ist in solchen Fällen durch die Verbrennung der Individuen meist nur in weit gefassten Altersklassen möglich (Fairgrieve, 2007). Durch die Verbrennung kann eine Personenidentifikation verhindert werden, demographische Auswertungen werden erschwert und Beweise für Verbrechen vernichtet (Symes et al., 2008). Dies wiederum erweitert beispielsweise bei der polizeilichen Untersuchung die Liste der verdächtigen Personen. Die Altersbestimmung verbrannter Individuen durch herkömmliche Methoden ist limitiert (Grévin et al., 1998). Eine korrekte Zuhilfenahme spezieller Analysemethoden an verbranntem Material ist daher essenziell (Symes et al., 2008). Mithilfe der Möglichkeit einer genaueren Altersschätzung könnte beispielsweise das Sterbealter des Individuums besser eingegrenzt werden, wodurch auch das Spektrum der vermissten Personen in manchen Fällen verringert werden kann (Fairgrieve, 2007). Durch forensische Anthropologen werden spezielle Methoden zur Sammlung, Erhaltung und Interpretation verbrannter Knochen erhoben, um eine Identitätsprüfung zu ermöglichen (z.B. Lage des Leichnams, Dekompositionsstadien zum Zeitpunkt der Verbrennung, etc.) (Symes et al., 2008). Der Anspruch an die Entwicklung solcher Altersbestimmungsmethoden im rechtsmedizinischen Kontext beinhaltet Transparenz und Prüfbarkeit sowie klare Informationen über die Genauigkeit der Methode. Der SEE (Standard Error of the Estimate) sollte nicht mehr als 7 Jahre umfassen (Ritz-Timme et al., 2000).

Darüber hinaus gewinnen Kremierungen in den letzten Jahren wieder mehr an Bedeutung als Bestattungsritus, auch da Leichenverbrennung in der katholischen Religion nicht mehr bestraft wird (siehe Kapitel 1.2). Die bislang dominierenden klassischen Körperbestattungen verlieren an Beliebtheit und kommerzielle Krematorien verbreiten sich immer weiter. Diese bieten auch ökonomische Vorteile, da sie kosteneffizient sind (May, 2011).

1.3) Makrostruktureller Aufbau kompakten Knochens

Knochen ist ein lebendiges Bindegewebe, welches sich während des Wachstums modelliert, danach kontinuierlich zeitlebens selbst remodeliert und repariert als Antwort auf Belastung oder Verletzung. Prozesse des „Modelings“ und „Remodelings“ basieren auf Knochenbildung und Knochenresorption (Safadi et al., 2009). Das Dickenwachstum der langen Röhrenknochen erfolgt appositionell, das Längenwachstum interstitiell (Benninghoff et al., 2008).

Das knöcherne Skelett liefert dem Körper seine Form, bietet Schutz, Ansatzstellen für Muskelgruppen, hat eine Hebelwirkung für Bewegungen und dient als Reservoir für Kalzium, Phosphat und Blutzellen zum Erhalt der mineralischen Homöostase (Weiner et al., 1999, Symes et al., 2008). Darüber hinaus passt sich das Skelett durch das Wachstum an und bietet Widerstand gegen einwirkende mechanische Zug- und Druckkräfte. Das Skelett setzt sich aus fünf verschiedenen Knochenkategorien zusammen, nämlich flache Knochen (*Ossa plana*), irreguläre Knochen (*Ossa irregularia*), kurze Knochen (*Ossa brevia*), lange Röhrenknochen (*Ossa longa*) und Sesambeine (*Ossa sesamoidea*) (Safadi et al., 2009, Downey und Siegel, 2006, Benninghoff et al., 2008).

Die Bildung dieser Knochen erfolgt dabei auf zwei verschiedenen Wegen, der desmalen (intramembranösen) und der *enchondralen* Ossifikation. Die *desmale* (=direkte) Ossifikation

beschreibt die Knochenbildung von einer organischen Matrixmembran ausgehend, bei welcher es sich um embryonales Bindegewebe handelt. Osteogene Mesenchymzellen differenzieren sich zu Osteoblasten, woraufhin Osteoid sekretiert wird und differenzierte Osteoblasten in die Knochenmatrix eingebaut werden. Die primäre Spongiosa entsteht aus diesem Geflechtknochen, woraus dann später lamellärer Knochen gebildet wird. Auf dem Wege der *chondralen* (=indirekten) Ossifikation entsteht aus Mesenchymverdichtungen Knorpelgewebe, welches über den Weg der *enchondralen* Ossifikation zu Knochengewebe umgewandelt wird (Benninghoff et al., 2008, Downey und Siegel, 2006).

1.3.1) Organischer und anorganischer Anteil

Bei Knochen handelt es sich um ein Kompositmaterial, bestehend aus einem organischen Anteil (~20 %), einem anorganischen Anteil (~70 %) und einem Anteil bestehend aus Wasser, Zellen, vaskulären Elementen o.ä. (~10 %) (Safadi et al. 2009, Reidsma et al. 2016, Turner-Walker 2008). Diese beiden ersten Komponenten ermöglichen durch ihre unterstützende und semi-flexible Bauweise die Fortbewegung (Symes et al. 2008). Der organische Anteil des Knochens macht insgesamt etwa 35% des totalen Knochengewichts aus und setzt sich vorwiegend aus Kollagen (~90%) zusammen, zudem aus nicht-kollagenen Proteinen und Mucopolysacchariden (Turner-Walker, 2008). Kollagen wird durch differenzierte Osteoblasten synthetisiert, sekretiert und extrazellulär zusammengefügt. Intrazellulär werden Tropo-Kollagen-Typ-I-Moleküle gebildet, bestehend aus drei helikalen Aminosäureketten, welche in eine Tripelhelix verdreht sind (Turner-Walker, 2008). Diese Kollagenmoleküle assemblieren sich miteinander zu Fibrillen, um flexible, elastische Fasern zu bilden, welche über Pyridinolinverbindungen miteinander verbunden sind (Reidsma et al., 2016, Boskey, 2007, Weiner, 2010, White and Folkens, 2005, Manolagas, 2000). Dadurch entsteht eine stabile Struktur, welche für die Dehnbarkeit des Knochens verantwortlich ist (Downey und Siegel, 2006). Des Weiteren besteht die organische Komponente aus Proteoglykanen, Glykoproteinen, Phospholipiden, Phosphoproteinen und verschiedenen Wachstumsfaktoren (Safadi et al., 2009). Der anorganische Anteil macht etwa 65% des totalen Knochengewichts aus. Er besteht hauptsächlich aus karbonisierten Apatit-Nanokristallen, enthält wenig Kalziumcarbonat (CaCO_3) und Kalziumhydrogenphosphat (CaHPO_4). Die chemische Zusammensetzung des Bioapatits ($(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Na}, \square)_5(\text{PO}_4, \text{HPO}_4, \text{CO}_3)_3(\text{CO}_3, \text{H}_2\text{O}, \text{OH}, \text{F}, \text{Cl}, \text{etc.})$) ist wesentlich komplexer als die des nicht-biologischen Hydroxylapatits ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), da weitaus mehr Elemente bzw. Moleküle substituieren können (Greiner et al., 2019). Bei den Bioapatitkristallen handelt es sich um plättchenförmige Nanokristalle, welche die leeren Räume in den Kollagenfibrillen ausfüllen und daher parallel zu diesen orientiert sind (Abbildung 2). Die Kristalle sind in Schichten arrangiert, die die Fibrillen durchqueren (Safadi et al., 2009, Reidsma et al., 2016, Teitelbaum, 2000, Weiner et al., 1999).

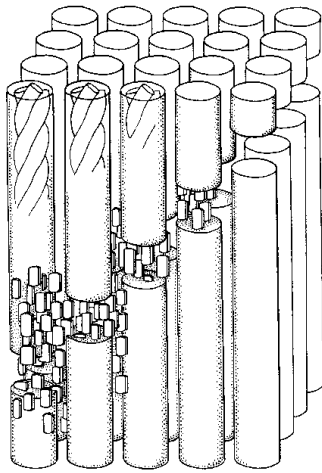


Abbildung 2: Ausrichtung der organischen und anorganischen Komponente des Knochens (verändert nach Turner-Walker 2008);

Die Anorganik des Knochens ist verantwortlich für die Druckfestigkeit und wichtige physiologische Funktionen, welche die „Lagerung“ von Ionen betreffen. Die mineralischen Salze des Knochens enthalten nämlich 99% des Kalziums, 85% der Phosphate und 40-60% des Natriums und Magnesiums im Knochen (Benninghoff et al., 2008, Downey und Siegel, 2006). Nervenleitung und Muskelkontraktion des Körpers hängen daher von der anorganischen Matrix ab, um eine ausreichende extrazelluläre Ionenkonzentration aufrechtzuerhalten

(Downey und Siegel, 2006, Turner-Walker, 2008).

1.3.2) Knochenbildung

Generell muss zwischen zwei Arten von Knochen unterschieden werden – Geflechtknochen und Lamellenknochen. Geflechtknochen ist ein schnellwachsender Knochen, welcher bereits früh in der Embryonalentwicklung gebildet, adsorbiert und sukzessive in Lamellenknochen umgewandelt wird (Turner-Walker, 2008, Downey und Siegel, 2006, Schultz, 1999). Noch *in utero* wird das knorpelige Skelett des Embryos durch Geflechtknochen ersetzt. In Altersabschnitten, welche mit schnellem Wachstum verbunden sind, kann zum Teil fibrolamellärer Knochen beobachtet werden. Dieser Knochentypus ist in der Regel bei schnell wachsenden größeren Wirbeltieren wie beispielsweise Rehen vorzufinden (vgl. Kapitel 1.3.7). Mit etwa fünf Jahren ist nach Pfeiffer et al. (Pfeiffer et al., 2006) der Geflechtknochen vollständig in Lamellenknochen umgebaut.

Nicht-Havers'sche Systeme wandern in den Knochen ein und bilden sich zu primären Osteonen. Durch kontinuierlichen Umbau, welcher zeitlebens besteht, werden Zirkumferenzlamellen durch Osteone ersetzt die sich mit der Zeit überlagern, wodurch Osteonfragmente entstehen (Abbildung 3) (Doppler et al., 2006).

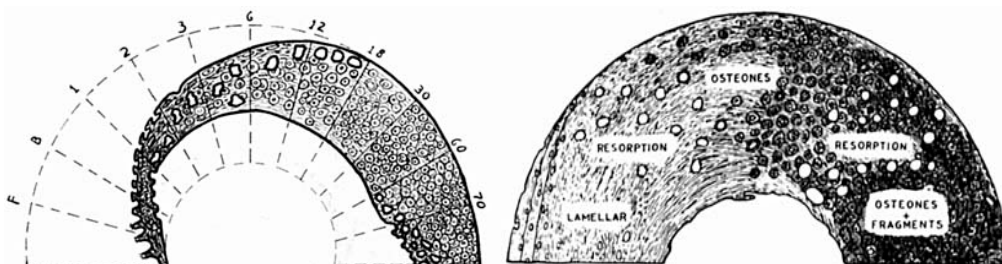


Abbildung 3: Altersbedingte Veränderungen der Knochenmikrostruktur am Beispiel des Femurs (verändert nach Kerley 1965);

Bei Geflechtknochen handelt es sich um ein Geflecht von Kollagenfasern, welche weniger dicht sind als im Lamellenknochen und keiner vorgegebenen Orientierung folgen. Er weist eine reduzierte Stabilität auf, ist aber resistenter gegen Zug- und Beugekräfte (Turner-Walker, 2008, Downey und Siegel, 2006, Schultz, 1999, Benninghoff et al., 2008). Geflechtknochen enthält viele Osteoblasten (vgl. Kapitel 1.3.3) und Osteoprogenitorzellen (Safadi et al., 2009). Darüber hinaus ist Geflechtknochen im Falle von Knochenneubildungen (Remodeling) zu finden, sowie bei der Frakturheilung in der

Kallusbildung und am Periost hervorgerufen durch Infektionen (Schultz, 1999, Benninghoff et al., 2008, Downey und Siegel, 2006). Lamelläer Knochen stellt die „mature“ Form des Knochens dar. Im Gegensatz zu Geflechtknochen sind die Kollagenfibrillen einer definierten Orientierung folgend angeordnet: von Lamelle zu Lamelle alterniert die Orientierung der Fibrillen, wodurch sich im histologischen Querschnitt unter polarisiertem Licht eine Doppelbrechung ergibt (Turner-Walker, 2008, Schultz, 1999). Die Fibrillen sind im Kortex umlaufend und tubulär (Zirkumferenzlamellen und Osteone) angeordnet (Safadi et al., 2009). Lamelläer Knochen zeichnet sich zudem durch appositionelles Dickenwachstum am Periost aus (Weiner et al., 1999).

Im lamellären Knochen unterscheidet man die *Substantia spongiosa* (trabekulärer Knochen) und die *Substantia compacta* (kortikaler Knochen). Die *Substantia spongiosa* ist zuständig für metabolische Kapazitäten, Widerstandsfähigkeit gegenüber Stoßdämpfungen, besitzt eine höhere metabolische Rate und eine schnellere Antwort auf mechanische Beanspruchung. Die *Substantia compacta* besitzt eine höhere mechanische Widerstandsfähigkeit, vor allem gegen Torsions- und Biegekräfte. Sie ist die äußere, kompakte Schicht der Röhrenknochen und umgibt die Knochenmarkshöhle sowie die trabekulären Platten der *Substantia spongiosa*. Der kortikale Knochen bildet die Diaphysen und macht insgesamt etwa 80% des Erwachsenenskeletts aus (Benninghoff et al., 2008, Turner-Walker, 2008, Downey und Siegel, 2006).

1.3.3 Knochenaufbau und Knochenumbau (Modeling und Remodeling)

Knochen wird zeitlebens auf- und umgebaut durch sogenanntes Modeling und Remodeling. Modeling bezeichnet Ab- und Aufbauvorgänge, welche direkt mit dem Knochenwachstum assoziiert sind.

An Remodelingprozessen sind verschiedene Zelltypen und zusammenwirkende Einheiten von Zellen beteiligt. Die „**BMU**“ (**Basic Multicellular Units**) remodelieren den Knochen in diskreten Paketen (Frost, 1969). Die Größe dieser BMUs bestimmt dabei die Größe der „**BSU**“ (**Basic Structural Unit = Osteon**), welches in dieser **BMU** entsteht (Parfitt, 1979).

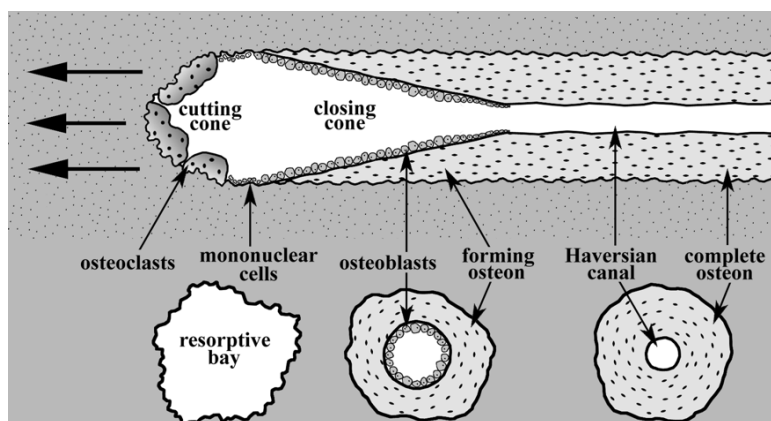


Abbildung 4: „Cutting Cone“ und „Closing Cone“ der BMU (verändert nach Robling & Stout (2000));

Dabei sind verschiedene Zelltypen an diesen Prozessen beteiligt. Grundsätzlich gibt es vier zelluläre Elemente von Knochen: Osteoblasten, Osteoklasten, Osteozyten und Bone Lining Cells (Abbildung 4).

Osteoblasten, Osteozyten und Bone Lining Cells entstehen aus *mesenchymalen Stammzellen*. Diese mesenchymalen Stammzellen differenzieren sich in verschiedene Bindegewebszelltypen: Chondroblasten, Fibroblasten, Fettzellen, Muskelzellen oder Osteoprogenitorzellen, je nach Stimulus. Osteoprogenitorzellen bilden sich dann in Osteoblasten um (Abbildung 5) (Safadi et al., 2009).

Aktive **Osteoblasten** weisen eine ovale Form auf und besitzen nur einen Nukleus. Sie sind primär verantwortlich für die Osteogenese. An Stellen aktiver Knochenbildung produzieren sie die organische Matrix und setzen Faktoren frei, welche zur Bildung von Osteoklasten führen können.

Osteoblasten können dann entweder aktiv bleiben, von Matrix eingeschlossen werden wodurch sie sich in Osteozyten umwandeln und anschließend in einen postmitotisch aktiven Zustand übergehen werden, oder Bone Lining Cells (ruhende Osteoblasten) bilden (Safadi et al., 2009, Downey und Siegel, 2006). Osteoblasten sekretieren zudem Zytokine, CSFs (Colony Stimulating Factors) wie Interleukin-6 und Interleukin-11 sowie Wachstumsfaktoren.

Bone Lining Cells liegen auf der Knochenoberfläche und sind oft miteinander und mit Osteozyten über „Gap Junctions“ verbunden (Abbildung 5). Bone Lining Cells können jederzeit zu Osteoblasten reaktiviert werden. Die weitere Funktion der Bone Lining Cells könnte darüberhinaus die Entfernung des Osteoids sein, um osteoklastischen Abbau vorzubereiten, die Regulierung von Kristallwachstum oder sie fungieren als Barriere zwischen extrazellulärer Flüssigkeit und dem Knochen.

Osteozyten sind inaktive Osteoblasten und machen mehr als 90% der Knochenzellen im gesamten Skelett aus (Abbildung 6). Sie sind kleiner als Osteoblasten und finden sich in Lakunen. Sie besitzen lange zytoplasmatische Fortsätze, welche durch die Canaliculi ragen und an die Fortsätze anderer Zellen anhaften. Dadurch wird zelluläre Kommunikation und Nährstoffversorgung innerhalb der mineralischen Matrix ermöglicht. Zudem kann über dieses Netzwerk mechanische Deformation ausgemacht werden, wodurch Reparaturprozesse in Form von gezieltem Remodeling induziert werden können. Darüber hinaus regulieren Osteozyten die Osteonenmorphologie durch die Kontrolle der „Wiederbefüllungsrate“ der abgebauten Knochenstruktur und des Bildungszeitraums (Metz et al., 2003).

Osteoklasten entstammen hematopoietischen Stammzellen einer Makrophagen/Monozytenzelllinie (Abbildung 5). Sie entstehen durch die Fusion dieser mononukleären Vorläuferzellen und besitzen daher mehrere Nuklei. Osteoklasten sind verantwortlich für die Knochenresorption sowohl unter normalen als auch unter pathologischen Bedingungen. Osteoklasten sind die größten Knochenzellen (Downey und Siegel, 2006, Benninghoff et al., 2008, Burr, 2002, Safadi et al., 2009).

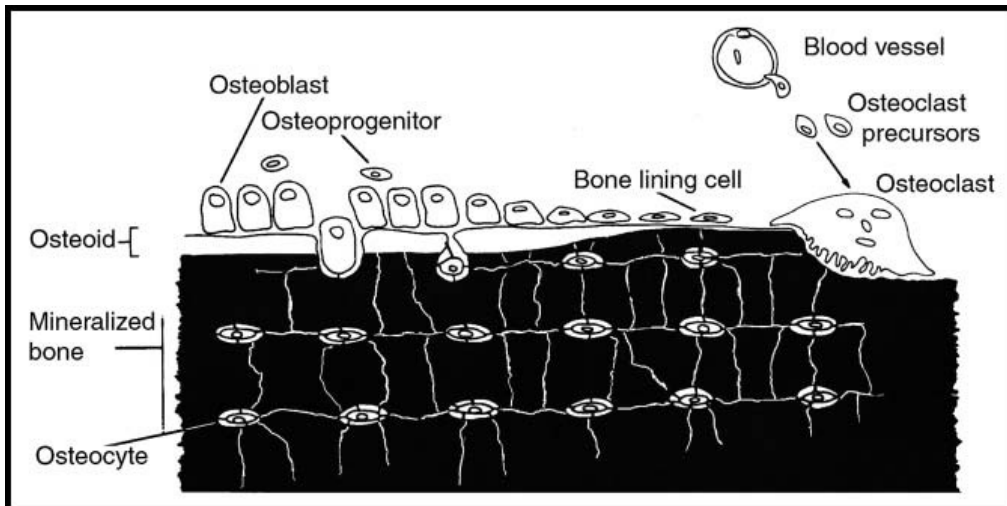


Abbildung 5: Relevante Knochenzellen des Modeling und Remodeling (verändert nach Downey & Siegel 2006); Der Prozess des **Modelings** gestaltet die Knochengröße, Knochenform und Biegung, um der täglichen, normalen mechanischen Belastung standzuhalten (Frost, 1969, Frost, 1982, Weiner et al., 1999). Laut dem von Frost (Frost, 1987a) postulierten „Mechanostat“ passt sich Knochenmasse der mechanischen Belastung an unter dem Einfluss von Wachstum, Modeling und Remodeling. Die sogenannten „Modeling Drifts“ bilden den primären Lamellenknochen, die Zirkumferenzlamellen und die endostalen Lamellen im kindlichen Skelett und dienen dem Erhalt der Knochenstruktur. Diese „Modeling Drifts“ beeinflussen die Makroarchitektur des Knochens und verlaufen in einem diametrischen (appositionell) bzw. unidirektionalen (in eine Richtung verschiebend) Muster oder in einer Kombination aus beidem (Abbildung 6).

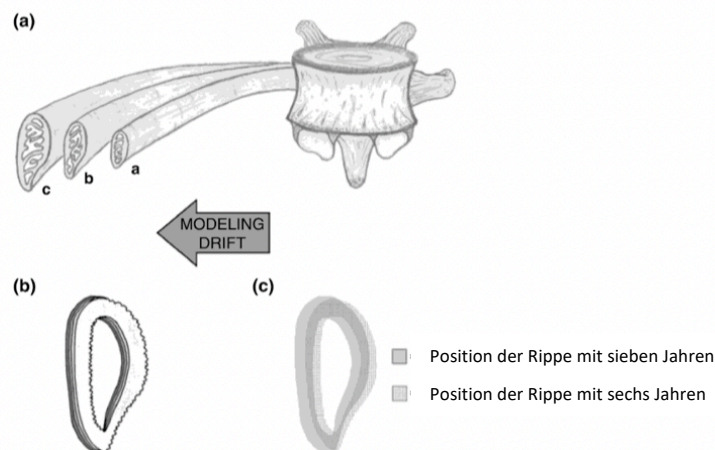


Abbildung 6: Darstellung der „Modeling Drifts“ in der menschlichen Rippe: a) Knochen wird während der Entwicklung internal abgebaut und external angebaut, es besteht mehr Auf-als Abbau und die Kompakta wird dickwandiger, b) driftender Kortex, c) driftender Kortex – in beiden Darstellungen ist der jüngere Kortex heller gefärbt, der ältere dunkler; (verändert nach Gocha et al. 2019);

Von Knorpel bedeckte Strukturen weisen dagegen keine Drift auf (Frost, 1987b, Katzenberg und Grauer, 2018). Die Modeling Drift bewegt sich durch Gewebe und Raum und kann den Querschnitt des Knochens vergrößern oder verkleinern durch die Inhibierung oder Stimulierung zellulärer Aktivität (Resorption oder Apposition).

Dies dient zum Erhalt des Kortex in einer biomechanisch vorteilhaften Position relativ zur zentralen Achse des Knochens. Durch Modeling Drift können früher gebildete Abschnitte der Knochenmikrostruktur entfernt und andere hinzugefügt werden. Dadurch besteht der adulte Kortex aus einer Kollektion von Lamellen diversen „Alters“ (Katzenberg und Grauer, 2018).

Auch beim Erwachsenen kann **Modeling** auftreten, im Falle von Krankheiten und bei Änderung der mechanischen Belastungseinwirkung. Frost (Frost, 1982) beschreibt verschiedene Arten von „Knochendrift“, welche zu den Merkmalen des Knochens führen, zum Beispiel Knochenaußendurchmesser, kortikale Dicke, Querschnitts- und Längsform. Als „osteoklastische und osteoblastische“ Drift definiert Frost (Frost, 1982) serielle Osteoklastenpopulationen (Knochen abbauende Zellen, vgl. S.11) bzw. Osteoblastenpopulationen (Knochen aufbauende Zellen, vgl. S.11), welche schrittweise Knochenmaterial entfernen bzw. neues Material hinzufügen. Perinatal schildert er eine „diametrische Drift“, welche die periostale Apposition von Knochen bezeichnet. Dabei werden Zirkumferenzlamellen und primäre Osteone gebildet und der Knochen kann plexiform (Vgl. Kapitel 1.4.7 „Histologische Unterscheidung von Mensch- und Tierknochen) erscheinen.

Darauf folgt eine schnelle Modelingperiode zwischen einem und 14 Jahren. Diese tritt ein, sobald Kinder zu Krabbeln und zu Gehen beginnen. Diese Periode bezeichnet er als „unidirektionale“ Drift, die durch den Einfluss der Bewegung (die steigende mechanische Belastung) entsteht. Der neu gebildete Knochen weist die Struktur von Lamellenknochen auf und zeigt weniger primäre, mehr sekundäre Osteone. Darauf folgt eine Rückgangsperiode in der Adoleszenz mit 14 bis 19 Jahren, in der sich alle Drift-Arten verlangsamen oder ineffektiv werden, worauf die Maturitätsperiode folgt (Frost, 1987b). Die Bildung lamellären Knochens ist ein Austauschmechanismus, da sie an solchen Stellen auftritt, an denen kürzlich eine Phase der Knochenresorption beendet wurde. Ausnahmefälle sind Frakturheilung oder pathologische Prozesse (Parfitt, 1979).

Das **Remodeling** ist ein in kontinuierlichen Zyklen zeitlebens auftretender Prozess der die Stadien der Aktivierung, Resorption und Formation durchläuft. Durch Remodeling treten keine größeren Veränderungen in Quantität, Geometrie und Größe von Knochen auf (Frost, 1969). Insgesamt werden bei Erwachsenen jährlich ca. 25% des trabekulären und ca. 3% des kortikalen Knochens resorbiert und ersetzt (Robling und Stout, 2008, Manolagas und Jilka, 1995). Insgesamt erfolgen ungefähr 30% des Remodelings zielgerichtet zur Reparatur von Mikrofissuren, 70% sind nicht zielgerichtet.

Durch Remodelingprozesse wird die Mineralienkonzentration im Knochen bzw. der umgebenden Flüssigkeit geändert. Zudem ermöglicht es Anpassungen an mechanische Belastungen, wodurch das Frakturrisiko verringert werden kann. Des Weiteren erfolgt die Reparatur von Schäden wie beispielsweise Mikrofissuren, die durch repetitive mechanische Belastung entstanden sind, ebenfalls durch Remodeling. Nach Frost (Frost, 1964) tritt Remodeling an anatomisch diskreten Schwerpunkten auf, in welchen die Remodelingaktivität für vier bis sechs Monate andauert. Diese anatomisch diskreten Schwerpunkte bezeichnet er als „**BMU**“ (Basic Multicellular Units).

Der Remodelingvorgang erfolgt über die Resorption älteren Knochens durch die Aktivität von Osteoklasten und die subsequente Bildung neuen Knochens durch Osteoblastenaktivität (Robling und

Stout, 2008). Die für das Remodeling verantwortlichen **BMUs** bestehen nach Robling und Stout (Robling und Stout, 1999) aus einem **Cutting Cone** mit mononukleären Zellen und Osteoklasten, die den Knochen resorbieren und zeitgleich die **BMU** durch das Gewebe manövrieren. Darauf folgt der **Closing Cone**, welche Prä-Osteoblasten und Osteoblasten enthält, die Knochen an den Rändern ablagern (vgl. Abbildung 4). Daraus entsteht dann eine **BSU**, woraus sich sekundäre Osteone bilden können. Doppler et al. (Doppler et al., 2006) beschreiben, dass das Remodeling stets in der Kortexmitte beginnt und dann zum Periost und Endost übergeht. Osteoklastenvorläuferzellen bilden sich in Osteoklasten um, welche dann die Knochenmatrix abbauen, indem sie ein eigenes Mikromilieu zwischen sich und der Knochenoberfläche bilden, welches sie durch Ansäuerung (HCl) demineralisieren und mittels proteolytischen Verdauung durch die lysosomale Protease Kathepsin K abbauen (Teitelbaum, 2000). Die Osteoklasten bilden für die nachfolgende Knochenresorption einen Tunnel von ca. 250-300 µm bzw. ~0,05 m³ Durchmesser, die sogenannte „Howship’sche Lakune“. Mononukleäre Zellen „glätten“ nach erfolgreichem Knochenabbau und Abwanderung der Osteoklasten die Ränder dieser Howship’schen Resorptionslakune. Ankommende Osteoblasten sekretieren daraufhin Osteoid, eine Matrix aus Kollagen und anderen Proteinen, welches mineralisiert wird. Zuletzt legen sich Bone Lining Cells, bei denen es sich um terminal differenzierte Osteoblasten handelt, auf die Knochenoberfläche (Robling und Stout, 2008, Downey und Siegel, 2006, Frost, 1969, Manolagas und Jilka, 1995). An der Knochenresorption sind auch verschiedene Hormone und lokale Faktoren beteiligt, beispielsweise Kalzitinin zur Inhibierung von Osteoklasten. Ebenso die aktive Form von Vitamin D (1,25-Dihydroxyvitamin D₃), welches für den Knochenmetabolismus und die mineralische Homöostase mitverantwortlich ist, Glukokortikoide, Schilddrüsenhormone und Östrogene und lokale Faktoren wie Zytokine, Wachstumsfaktoren und Prostaglandine wirken an der Knochenresorption mit. Die Resorptions- und Neubildungsmenge während des Remodelings variieren zwischen verschiedenen anatomischen Positionen und werden beeinflusst durch externe Faktoren wie Medikamenteneinnahme oder Krankheiten. Durchschnittlich über das Skelett verteilt werden 20 Einheiten von Knochen ab- und wieder aufgebaut. Gesteigerte Remodelingraten führen zu höheren Verlusten, verringertes Remodeling minimiert diese Verluste wieder (Frost, 1987b).

Laut Frosts „Mechanostat“ wird durch gesteigerte mechanische Belastung mehr Knochenmasse aufgebaut, durch verringerte mechanische Belastung wird Knochenmasse abgebaut. Dies erfolgt als Reaktion auf die einwirkende Kraft, nicht auf die Häufigkeit der Krafteinwirkung. Gesteigerte Belastung führt daher eher zum Erhalt von Knochen, verringerte Belastung zum Abbau. Außerordentliche Belastungen werden durch den Aufbau von Knochenmasse wieder auf den normalen Grenzwert nivelliert (Abbildung 7 aus (Ruff et al., 2006) verändert (Lanyon et al., 1982)).

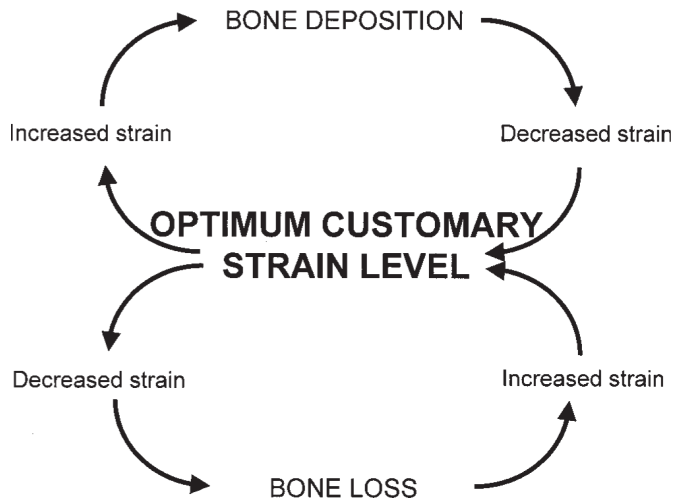


Abbildung 7: Vereinfachtes Feedback-Modell der funktionellen Knochenadaptation (verändert nach Lanyon et al. 1982);

Sobald die Rekrutierung dieser Mechanismen (Modeling und Remodeling) und der zugehörigen Zelltypen stoppt, stoppen im Körper auch Wachstum, Modeling und Remodeling (Frost, 1987a).

Bei älteren Individuen wird oftmals die vorhandene Knochendichte verringert, da die durch Resorptionslakunen abgebaute

Knochenmenge die aufgebaute Menge übersteigt (Downey und Siegel, 2006, Teitelbaum, 2000).

Steigt dagegen das Modeling im Erwachsenenalter *ohne* gleichzeitiges Remodeling an, führt dies zu einer Verringerung des mittleren Gewebeaters, da die aufgebaute Menge an Knochen die abgebaute Menge übersteigt. Dadurch wird das histologische Alter geringer eingestuft als das tatsächliche chronologische Alter.

Zu der Entstehung bzw. Auslösung des Remodeling-Zyklus existieren verschiedene Modelle:

Smit et al. (Smit et al., 2002) beschreiben die Initiierung des Remodelingzyklus als Folge physiologischer Belastung, welche zu einem Stillstand der Bewegung der extrazellulären Flüssigkeit führt. Dadurch werden Osteozyten aktiviert, die wiederum Osteoklasten rekrutieren. Anschließend kommt es zu einer Steigerung des extrazellulären Flüssigkeitsstroms um die BMU, wodurch Osteoblasten aktiviert werden. Osteozyten, welche unter dem Einfluss mechanischer Belastung stehen, rekrutieren daher Osteoblasten. Osteozyten, welche nicht unter dem Einfluss mechanischer Belastung stehen rekrutieren und aktivieren dagegen Osteoklasten.

Das Modell nach Martin (Martin, 2000) basiert auf den Theorien, dass zum einen Bone Lining Cells dafür verantwortlich sind, das Remodeling zu aktivieren. Dabei sendet ein „osteozytisches Synzytium“ (zusammenwirkendes Netz von Osteozyten) ein inhibitorisches Signal an Osteoblasten, woraufhin diese weniger Knochen produzieren. Dieses osteozytische Signal erfolgt als Antwort auf mechanische Belastung, wodurch im Gegenzug die Bone Lining Cells von ihrer Remodelingaktivierung inhibiert werden. Durch eine Reduzierung dieser inhibierenden osteozytischen Signale kann Remodeling aktiviert werden. Durch eine frakturbedingte Unterbrechung der Blutversorgung oder durch Mikroverletzung kann es zu einer lokalen Nekrose der Knochenmatrix und damit zu einem „Osteozytensterben“ kommen, wodurch die inhibitorischen Signale der Osteozyten reduziert werden und Remodeling eintritt. Alternativ könnte eine solche Osteozytenapoptose infolge von einwirkender mechanischer Belastung das generelle Signal für die Initiierung von intrakortikalem Remodeling darstellen (Gocha und Agnew, 2016).

Untersuchung bezüglich der Veränderung des Remodelings zwischen rezenten (modernen) Populationen und prähistorischen Populationen wurden bereits häufig durchgeführt (Streeter et al., 2010, Ruff and Hayes, 1988, Richman et al., 1979, Abbott et al., 1996). Dabei konnte beispielsweise ein

deutlicher Rückgang in der physischen Aktivität bei modernen Populationen festgestellt werden (Ruff and Hayes, 1988). Bell et al. (Bell et al., 2001) konnten feststellen, dass das Geschlecht einen signifikanten Einfluss auf das Remodeling nimmt.

1.3.4) Temperaturinduzierte Änderungen der Knochenstruktur

Durch die Hitzeeinwirkung während der Verbrennung verändern sich die chemischen Eigenschaften von Knochen und die strukturelle Integrität wird beschädigt oder zerstört (Symes et al., 2008). Knochenverbrennung ist ein Prozess der Dehydratation und Rekrystallisierung. Nachdem die Muskeln vom Knochen während der Verbrennung entfernt worden sind, verteilt sich die Hitze innerhalb des Periosts und entfernt es durch direktes Verkohlen und Abplatzen. Danach kommt es im Knochen zur Evaporation, zum Verlust der organischen Matrix und Änderungen der anorganischen Matrix (Symes et al., 2008, Fairgrieve, 2007). Eine direkte Verbrennung von Knochen tritt dort auf, wo sie nahe an der Oberfläche sind, z.B. an Ellenbogen, Kinn oder Knie (Abbildung 8).

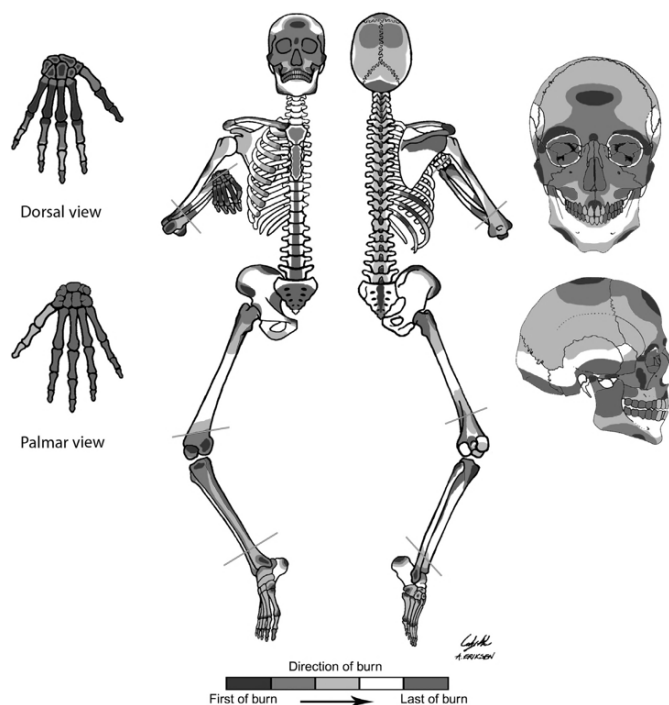


Abbildung 8: Darstellung der Reihenfolge der Verbrennung verschiedener Regionen des Skeletts (verändert nach Symes et al. 2008)

An Stellen, an denen sich mehr Weichgewebe befindet, verbrennen sie zuletzt (z.B. Gesäß und Rücken). Die Kompaktadicke hat einen zusätzlichen Einfluss auf den am Knochen vorhandenen Verbrennungsgrad (Herrmann, 1972b).

Das distale Femur am Kniegelenk brennt beispielsweise früh, das proximale Femur spät (Symes et al., 2008). Die Veränderung der Knochendimensionen ist nicht konsistent und die Orientierung

der Kollagenfibrillen hat einen signifikanten Einfluss auf die verbrennungsbedingte Schrumpfung. Risse verbreiten sich im Knochen über die Kanäle in der Knochenmikrostruktur und werden dort abgelenkt (Fairgrieve, 2007). Generell verbrennen Knochen von „außen nach innen“, wodurch häufig außen kalzinierter Knochen vorliegt und innen verkohlter Knochen (sog. „Sandwich-Struktur“). Hitzefrakturen verlaufen am häufigsten longitudinal, treten aber auch transversal auf. Die Krümmung der Knochen und die Frakturmuster geben Auskunft darüber, ob ein Individuum unmittelbar nach dem Eintritt des Todes kremiert wurde oder ob die Verbrennung ein sekundärer Prozess war (Gonçalves et al., 2011). Durch die Verbrennung kann es aber nicht nur zu Schrumpfungprozessen, sondern auch zu Expansionen im Knochen kommen. Die maximale Schrumpfung eines Knochens hängt ab von der Knochendichte, der einwirkenden Temperatur und der Dauer der Hitzeexposition (Eckert et al., 1988). Die Kompakta eines Knochens weist häufig weniger Schrumpfung, dafür vermehrt Verdrehungen und

Fissuren auf. Die Spongiosa dagegen schrumpft und wird rissig. Allgemein wird der Knochen durch die Verbrennung spröder (McKinley, 1994). Differentielle Schrumpfung am Knochen ist abhängig von der Mineraldichte und diese wiederum von Individualalter und Geschlecht des Individuums (Herrmann, 1977). Die Dimensionsänderungen des Knochens nehmen Einfluss auf die Anwendbarkeit anthropologischer Untersuchungsmethoden an verbrannten Knochen (Thompson, 2005).

Experimentelle Verbrennung

Experimentelle Verbrennungsversuche zur Analyse der temperaturbedingten Veränderung des Knochens wurden bereits in einer Vielzahl von Studien untersucht, sowohl an menschlichem als auch an tierischem Knochenmaterial (Stiner et al., 1995, Fernandez Castillo et al., 2013, Harbeck et al., 2011). Untersuchungen der prozentualen Schrumpfung ergaben, dass diese abhängig ist vom Anteil und der Verteilung spongiösen und kompakten Knochens in der jeweiligen Probe (Shipman et al., 1984). Zwischen Schrumpfung und Mineralgehalt eines Knochens besteht eine negative Korrelation, welche abhängig vom Individualalter ist. In der Regel werden 12% Schrumpfung für einen Knochen angenommen und als Korrekturfaktor bspw. zur Längenschätzung des Femurs miteinbezogen. Je höher der Mineralgehalt ist, desto geringer fällt die hitzebedingte Schrumpfung aus (Grupe und Herrmann, 1983). Nach Herrmann (Herrmann, 1977) beträgt die Schrumpfung unter 700 bis 800 °C nur ein bis zwei Prozent, darüber folgt eine starke Schrumpfung von etwa 8 bis 14%, teilweise sogar von bis zu 30% (Herrmann, 1977, Holden et al., 1995a). Größere Knochen bzw. Knochenfragmente schrumpfen generell weniger als kleine Knochenfragmente. Experimentelle Verbrennung von Schweinekadavern in unterschiedlichen Dekompositionsstadien (frisch, früh, fortgeschritten, frühe und späte Skelettierung) wurden durchgeführt, um künftig Rückschlüsse auf Dekompositionsstadien zum Zeitpunkt der Verbrennung im forensischen Kontext besser ermitteln zu können (Keough et al., 2015). Es zeigte sich, dass Färbänderungen am Knochen allein nicht aussagen können, ob dieser vor der Verbrennung bereits entfleischt war oder nicht (Keough et al., 2015). Anhand der Rissmuster des Knochens lässt sich darüber allerdings eine Aussage treffen (Gonçalves et al., 2011).

Als farbliche Veränderung tritt zunächst bei 200 °C eine Farbverdunkelung auf, da sich der Knochen durch eine Denaturierung des Kollagens hellbraun färbt. Bei 300 °C zeigt der Knochen durch eine Auftrennung der nicht-kohlenstoffhaltigen Elemente einen Übergang von brauner zu schwarzer Färbung, wodurch nur Kohlenstoff zurückbleibt. Die schwarze Verfärbung entsteht demnach durch Reste primären Kohlenstoffs. Zusätzliche Sekundärverfärbungen kommen durch Einwanderung von Kohlenstoff in den Knochen zustande (Herrmann, 1972a). Solche schwarzen Kohlenstoffverfärbungen finden sich am Leichenbrand bspw. dann, wenn ein Mangel an Feuermaterial herrschte, durch intentionelles Löschen des Scheiterhaufens, unvollständige Verbrennung und vor allem in der Übergangszeit von der Leichenverbrennung zur Körperbestattung (Herrmann, 1972a). Bei 600 °C färbt sich der Knochen grau bis leicht bläulich. Ab 700 °C nimmt der Knochen allmählich eine weiße Färbung an, welche auch in höheren Temperaturbereich bestehen bleibt (Walker et al., 2008, Absolonova et al., 2012, Holden et al., 1995a, Shipman et al., 1984).

Mineralogische Veränderungen

Die Hitzeeinwirkung während der Verbrennung führt auch zu mineralogischen Veränderungen der Knochenstruktur, nämlich einer Zunahme der Kristallgröße und einer Reduzierung der Gitterparameter. Diagenetische Prozesse können denselben Einfluss auf die Knochenmikrostruktur haben wie eine Verbrennung bei geringer Temperaturstufe (Stiner et al., 1995). Bereits ab 100 °C sind kleine Änderungen bezüglich der Rekristallisierungsreaktion des Bioapatits und eine Zunahme der Kristallgröße erkennbar. Zwischen 150 °C und 300 °C kommt es zum Wasserverlust aus dem Knochenmineral und dadurch zu einer geringen Längenschumpfung (Herrmann, 1977). Unter 400 °C treten bereits kleine, aber signifikante Änderungen der Gitterparameter ein. Diese sind möglicherweise hervorgerufen durch die Zerstörung des Kollagens und durch Änderungen der Kompositstruktur des Knochens (Schmahl et al., 2017). Temperaturen über 500 °C führen zu tiefgreifenden Veränderungen der chemischen und kristallinen Zusammensetzung des Bioapatits (Schmahl et al., 2017). Eine erste minimale Reduktion des kristallographischen Elementarzellvolumens tritt ab 200 °C auf, dann folgt ein leichter Anstieg durch thermale Expansion, gefolgt von einer signifikanten Reduktion des kristallographischen Elementarzellvolumens und dem Verlust des organischen Materials bei 500 °C bis 600 °C (Schmahl et al., 2017, Harbeck et al., 2011, Reidsma et al., 2016, Holden et al., 1995b). Durch einen dadurch direkteren Kontakt zwischen den Kristalloberflächen tritt eine Fusion ein, danach eine strukturelle Re-Organisation im Bioapatit. Daraufhin sinkt das Elementarzellvolumen und die Kristallgröße steigt an (Sinterungsprozess) (Holden et al., 1995b). Zwischen 500 und 700 °C kommt es zum quantitativen Verlust von CO₂. Die Rekristallisierungsreaktion der mineralischen Bestandteile des Knochens bei der kritischen Temperaturspanne zwischen 700 °C und 800 °C führt zum Eintritt eines Gewichtsverlusts (Herrmann, 1977, Wahl, 2001). Ab 700 °C ist die Rekristallisation von Bioapatit zu Hydroxylapatit komplett (Reidsma et al., 2016, Harbeck et al., 2011, Greiner et al., 2019). Über 700 °C treten Veränderungen der Kristallstruktur durch eine gesteigerte Kristallgröße und Neuordnung von OH⁻ (Hydroxid) und PO₄³⁻ (Phosphat) innerhalb der Räume, welche durch den Austritt von Organik und Wasser entstanden sind, auf (Marques et al., 2018). Das Gitternetz rekristallisiert und es kommt zum Karbonatverlust auf dem Bioapatit. Der Bioapatit wird zunehmend kristalliner und die Gitterparameter ändern sich (Rogers and Daniels, 2002, Hiller et al., 2003, Stiner et al., 1995). Die temperaturbedingte Denaturierung und Dekomposition der organischen Matrix beeinflusst das Kristallwachstum (Rogers and Daniels, 2002). Ab 800 °C kommt es durch die Dekomposition des Bioapatits zur Bildung von CaO (Calciumoxid) (Piga et al., 2018, Schmahl et al., 2017). Im Widerspruch dazu liegen die Ergebnisse der experimentellen Verbrennungsversuche von Greiner et al. (Greiner et al., 2019), welche keine solche Bildung von CaO feststellen konnten. Dagegen trat bei ihren Versuchen ab 800 °C die Bildung von Buchwaldit (CaNaPO₄) aus der Natriumkomponente des Knochenminerals auf.

1.4) Mikrostruktureller Aufbau kompakten Knochens

Im Folgenden wird der mikrostrukturelle Aufbau kompakten Knochens beschrieben. In Abbildung 9 sind die wesentlichen mikrostrukturellen Einheiten des kompakten Knochens dargestellt (Abbildung 9).

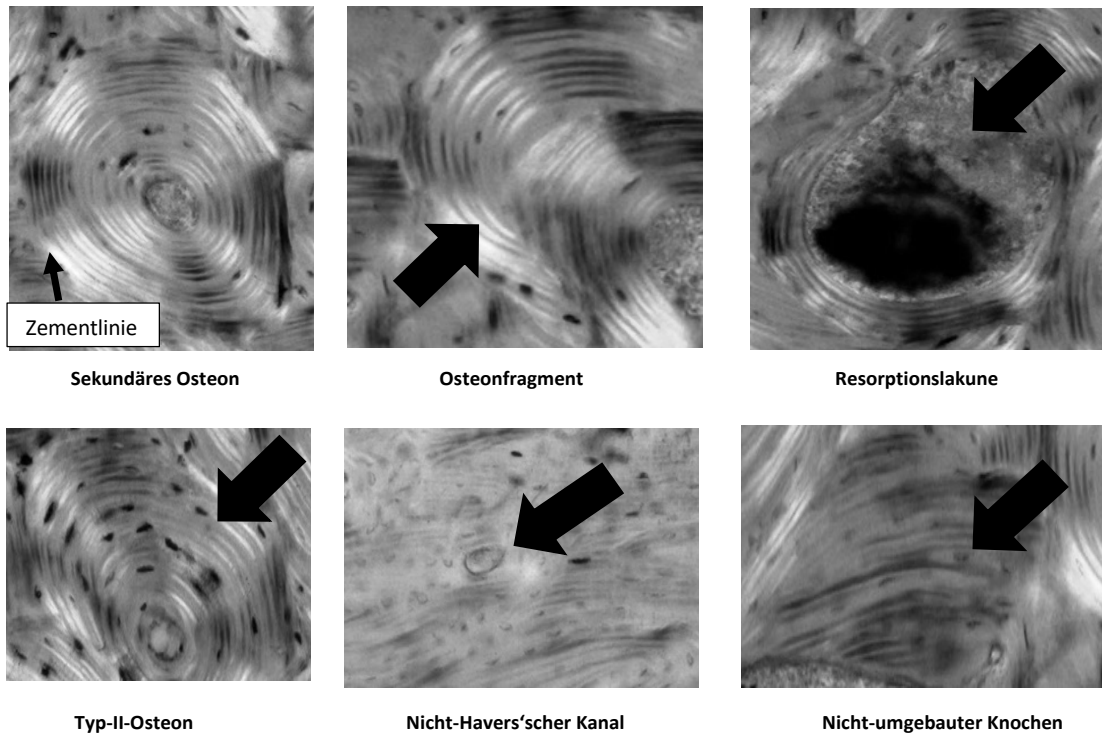


Abbildung 9: Mikrostrukturelle Einheiten kompakten Knochens: v.l.n.r. sekundäres Osteon, Osteonfragment, Resorptionslakune, Typ-II-Osteon, primäres Osteon bzw. nicht-Havers'scher Kanal, nicht-umgebauter Knochen bzw. Grundlamellen (Durchlichtmikroskop, 100fache Vergrößerung);

1.4.1) Knochenmikrostruktur

Osteone sind die kleinste funktionelle Einheit des kortikalen Knochens.

Im erwachsenen, kompakten Knochen dominieren *sekundäre Osteone* als Struktureinheit (Abbildung 10). In der Mitte der zylinderförmigen Osteone findet sich leicht azentrisch gelegen ein Gefäßkanal - der *Havers'sche Kanal* (*Canalis centralis*). Dieser enthält Blutgefäße, Nerven, Lymphbahnen und Bindegewebe mit Osteoprogenitorzellen. Der Havers'sche Kanal eines Osteons ist von etwa fünf bis 15 konzentrischen Lamellen umgeben. Der mittlere Durchmesser von Osteonen liegt bei 0,2 mm mit 2,5 mm mittlerer Länge (Benninghoff et al., 2008). Osteone sind vor allem entlang der Längsachse des Knochens ausgerichtet und enthalten in ihren konzentrischen Lamellen kleine Lakunen, in denen die Osteozyten zu finden sind (Abbildung 10) (Schultz, 1999, Jaworski et al., 1972, Downey und Siegel, 2006).

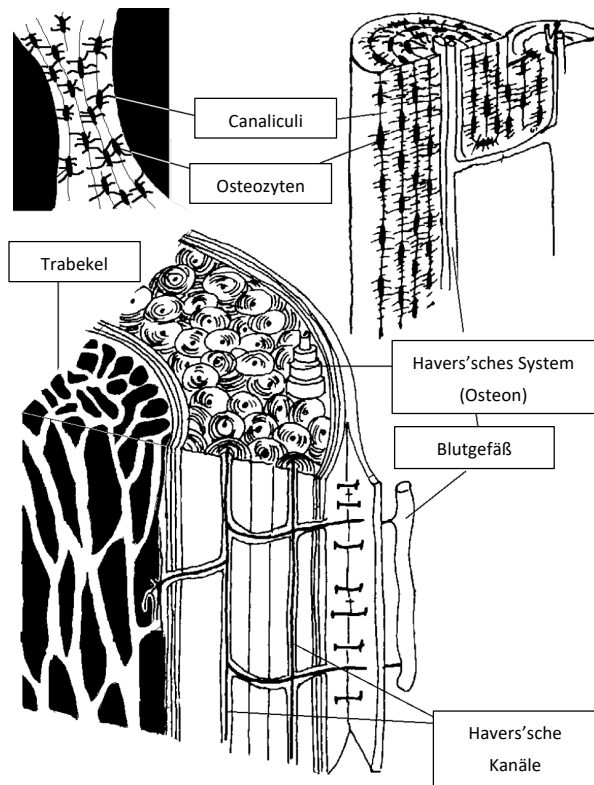


Abbildung 10: Grundlegender Aufbau kompakten Knochens (verändert nach Smit et al. 2002);

Die Größe *sekundärer Osteone* wird durch die von *Osteoklasten* abgebaute Menge an Knochen bestimmt (Qiu et al., 2003). Pfeiffer et al. (Pfeiffer et al., 2006) konnten zeigen, dass die Variation in der Osteongröße und in der Größe des *Havers'schen Kanals* im Femur nicht größer ist als in der Rippe. In dieser Studie konnten kein Einfluss des Geschlechts auf die Osteongröße festgestellt werden (Pfeiffer et al., 2006).

Bei *primären Osteonen* handelt es sich um in den Kortex einwachsende, primäre vaskuläre Kanäle, sogenannte *nicht-Havers'sche Kanäle*, die von wenigen rudimentären konzentrischen Lamellen umgeben sind (Kerley, 1965, Robling und Stout, 2008). Diese finden sich vorwiegend bei

jüngeren Individuen. *Primäre Osteone* können von *sekundären Osteonen* durch die sogenannte *Zementlinie* unterschieden werden (Abbildung 9). Diese Zementlinie ist hypermineralisiert (bzw. defizitär in Kollagen) und wirkt der Ausbreitung von Mikrofissuren entgegen (Martin et al., 1998, Skedros et al., 2005).

Die *Osteozyten* besitzen kleine Fortsätze – die *Canaliculi* – über welche sie ein Netzwerk ausbilden, miteinander kommunizieren und Nährstoffe austauschen (Abbildung 10). Die *Osteozytendichte* reguliert die Dicke der „Osteonwand“ und die Breite des Havers'schen Kanals. Dadurch wird die „Strecke“ bestimmt, welche vom Havers'schen Kanals aus zurückgelegt werden muss, um auch die am weitesten entfernten Osteozyten zu erreichen (Metz et al., 2003).

Havers'sche Kanäle verschiedener Osteone können über sogenannte *Volkman'sche Kanäle (Canales perforantes)* miteinander verbunden sein. Diese laufen transversal durch die Kompakta und kommunizieren mit Havers'schen Kanälen, der Knochenmarkshöhle und Blutgefäßen im Periost (Benninghoff et al., 2008, Robling und Stout, 2008, Schultz, 1999, Safadi et al., 2009, Downey und Siegel, 2006). Die Zahl der sekundären Osteone im Kortex nimmt mit steigendem Individualalter zu, wohingegen nicht-Havers'sche Systeme vorwiegend bei jüngeren Individuen zu finden sind. Die nicht-Havers'schen Systeme im subadulten Kortex bilden sich anschließend zu Osteonen um.

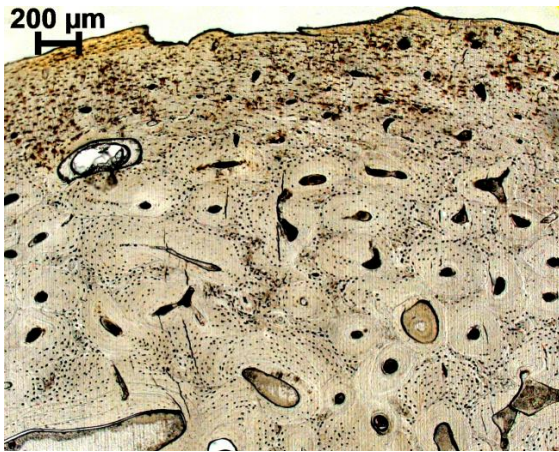
Durch die ansteigende Zahl *sekundärer Osteone* mit zunehmendem Individualalter überlagern Osteone, welche neu in den Kortex einspiessen, ältere Osteonengenerationen und lassen *Osteonfragmente* entstehen. Daher sind neu gebildete Havers'sche Systeme immer jünger als der Knochen, den sie ersetzen (Currey, 2012).

Osteonfragmente werden auch als interstitielle Lamellen bezeichnet und steigen in ihrer Anzahl ebenfalls mit dem Alter an (Safadi et al., 2009). Der am häufigsten in der Knochenstruktur erkennbare

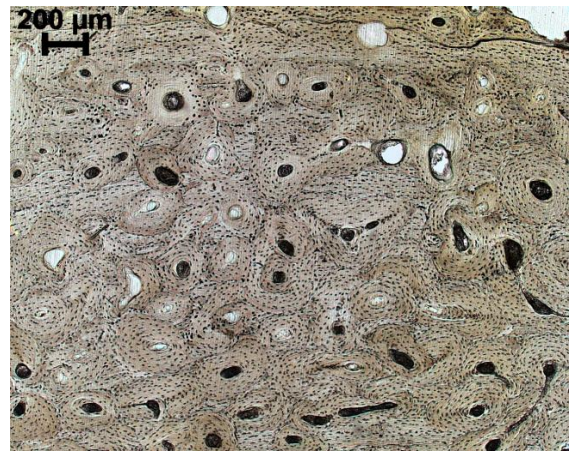
Typ der sekundären Osteone sind sogenannte *Typ-I-Osteone*. Diese kennzeichnen sich durch ununterbrochene zentripetale Lamellen um den Havers'schen Kanal und ihre Orientierung entlang der Längsachse des Knochens. Diese Orientierung wird durch die Richtung der einwirkenden mechanischen Belastung bestimmt (Robling and Stout, 1999, Schultz, 1997). Die Osteone sind über die Länge eines Langknochens, beispielsweise des Femurs, in zwei Helices gegenläufiger Richtung arrangiert. Diese liegen auf gegenüberliegenden Seiten der Diaphyse und treffen in scharfen Grenzen aufeinander. Eine longitudinale Knochenstruktur findet sich nur in einem kleinen Teil der Knochenoberfläche der dazu dient, Widerstand gegen mechanische Belastung zu ermöglichen (Heřt et al., 1994).

Durch die mit steigendem Individualalter zunehmende Anzahl an Osteonen und Osteonfragmenten werden diese Parameter häufig für histologische Altersbestimmungsmethoden verwendet. Die Verwendung dieser Parameter zur Schätzung des histologischen Alters und damit auch des kalendarischen Alters wird in der Literatur jedoch auch oft kritisiert. Nach Bertelsen et al. (Bertelsen et al., 1995) steigt die Zahl der Havers'schen Kanäle bzw. der sekundären Osteone im Knochenkortex mit steigendem Individualalter. Allerdings limitiert die Streuung der Parameterwerte in jeder einzelnen Altersklasse deren Eignung für eine histologische Altersschätzung. Zudem steigt die Porosität des kortikalen Knochens bei älteren Individuen (Simmons et al., 1991). Pfeiffer et al. (Pfeiffer et al., 1995) schlussfolgern zudem aus den Resultaten ihrer Studie, dass die Ergebnisse histologischer Altersschätzungen stark von der jeweiligen Entnahmestelle im kortikalen Knochen beeinflusst sind.

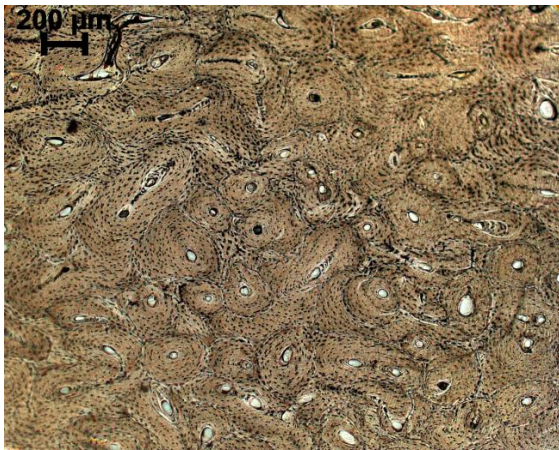
In Abbildung 11 ist die altersbedingte Veränderung der Knochenmikrostruktur über alle Altersklassen hinweg dargestellt. Dabei ist die Zunahme an sekundären Osteonen und Osteonfragmenten erkennbar, sowie die Abnahme der Anzahl an nicht-Havers'schen Kanälen, primären Osteonen und des Anteils an nicht-umgebautem Knochen (Generallamellen).



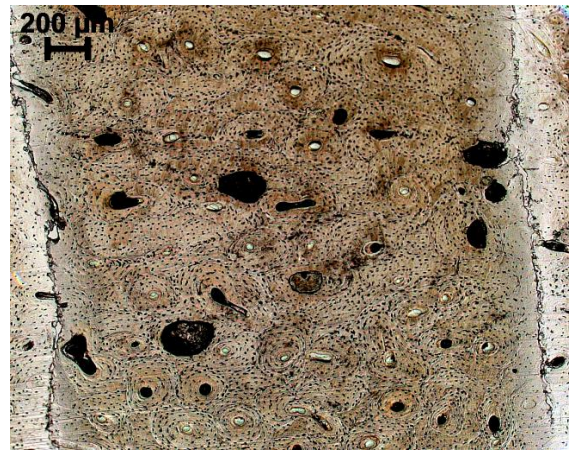
Infans I



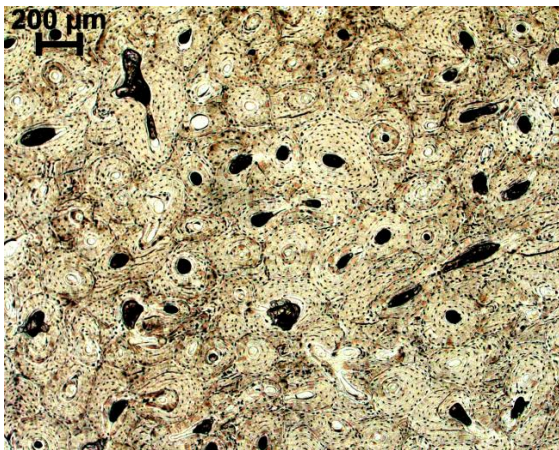
Infans II



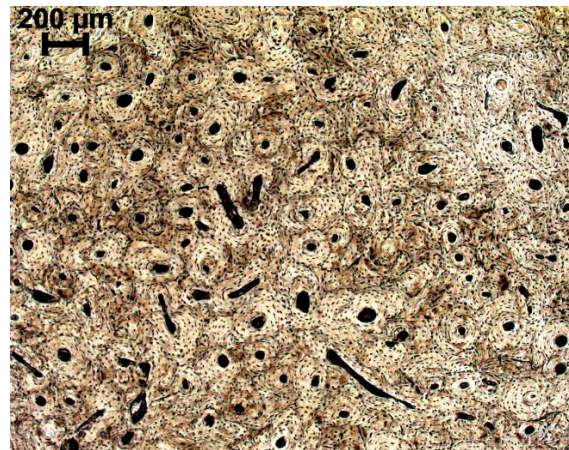
Juvenis



Adultas



Maturitas



Senilis

Abbildung 11: Altersbedingte Veränderung der Knochenmikrostruktur von der Altersklasse Infans I bis zur Altersklasse Senilis; erkennbar ist eine Zunahme an sekundären Osteonen und Osteonfragmenten sowie eine Abnahme an nicht-Havers'schen Kanälen und dem Anteil nicht-umgebauten Knochens; verändert nach Niggemeyer (Niggemeyer, 2013);

Neben den Typ-I-Osteonen finden sich in der Knochenmikrostruktur noch weitere Typen sekundärer Osteone: *Typ-II-Osteone*, *driftende Osteone* und „*Growth Arrest*“-Osteone (=doppelzonige Osteone). *Typ-II-Osteone* sind kleiner als Typ-I-Osteone (sekundäre Osteone), bilden sich innerhalb der Zementlinie eines sekundären Osteons und weisen daher einen hyperkalzifizierten Ring innerhalb der konzentrischen Lamellen auf (Abbildung 9) (Robling und Stout, 2008). Sie nehmen in ihrer Anzahl ebenfalls mit steigendem Alter zu und treten ab einem Individualalter von ca. 20 Jahren auf (Robling and Stout, 2008, Pankovich et al., 1974). „*Growth Arrest*“-Osteone sind nur schwer bis kaum von Typ-II-Osteonen zu unterscheiden, da auch hier ein hyperkalzifizierter Ring innerhalb der konzentrischen Lamellen zu sehen ist, welcher sich während des Wachstumsstopps bildet. Mit steigendem Alter ist eine höhere Zahl an „*Growth Arrest*“-Osteonen mit unvollständiger Wachstumsstopplinie zu finden, was nach Pankovich et al. generell auf Resorptionsaktivitäten schließen lässt (Pankovich et al., 1974). Simmons et al. (Simmons et al., 1991) konnten eine steigende Anzahl der *doppelzonigen Osteone* mit steigendem Individualalter ausmachen. Während der Bildungsperiode der BMU, die für die Entstehung der doppelzonigen Osteone verantwortlichen ist, wird die Matrixelaboration zeitweise angehalten, wodurch der hyperkalzifizierte Ring innerhalb der konzentrischen Lamellen entsteht (Robling and Stout, 1999). Raguin & Streeter (Raguin und Streeter, 2018) schrieben den doppelzonigen Osteonen eine Beteiligung bei physiologischen Krankheiten zu.

Der letzte Typus sekundärer Osteone, die *driftenden Osteone*, stammen von speziellen BMUs ab, welche longitudinal und transversal durch den Kortex wandern (Robling and Stout, 1999, Robling and Stout, 2008). Driftende Osteone stellen ein Havers'sches System dar, in welchem auf einer Seite kontinuierlich resorbiert und auf der anderen Seite kontinuierlich modelliert wird. Daher erscheinen sie auf der einen Seite abgeflacht, auf der anderen Seite transversal elongiert (Abbildung 12).



Abbildung 12: Morphologie eines driftenden Osteons (Abbildung verändert nach Robling und Stout 2008);

Der Havers'sche Kanal liegt nicht zentral und ist nur von etwa vier bis acht konzentrischen Lamellen umgeben, auf die auf einer Seite ein hemizyklischer Lamellenschweif folgt. Dies spiegelt die transversale Drift der BMU während der Bildung der BSU wider. Driftende Osteone sind häufig bei Kindern ab dem fünften und bis zum achten Lebensjahr vorhanden, danach sind sie nur noch sporadisch auffindbar (Robling und Stout, 1999, Pfeiffer et al., 2006). Eine mögliche Erklärung für die Persistenz driftender Osteone ist nach Robling und Stout (Robling und Stout, 1999) die erhöhte Freisetzung von Mineralstoffen durch die Bildung driftender Osteone für den Erhalt der mineralischen Homöostase

als Antwort auf erhöhten Mineralstoffbedarf während des Wachstums.

Die Zahl der *Osteonfragmente* und *sekundären Osteone* wird zusammengefasst als die *Osteonenpopulationsdichte* (OPD) bezeichnet. Aufgrund ihrer stetigen Zunahme erreicht sie ab einem gewissen Individualalter eine Asymptote. Von diesem Zeitpunkt an entfernen alle neuen

Osteonbildungen die Rückstände älterer Osteonengenerationen. Dieses Plateau wird im Femur mit etwa 70 Jahren erreicht, in der Rippe bereits mit etwa 60 Jahren (Andronowski und Crowder, 2019). Der *periostale* und *endostale Rand* eines Knochenquerschnitts werden von parallel zueinander verlaufenden äußeren bzw. inneren *Zirkumferenzlamellen* gebildet. Diese sind vorwiegend im jungen Alter zu finden und werden nach und nach durch die Ausbreitung *osteonalen Knochens* im Kortex verdrängt (Safadi et al., 2009, Kerley, 1965). Nach Singh und Gunberg (Singh und Gunberg, 1970) nimmt die Zahl der konzentrischen Lamellen um ein Osteon herum mit steigendem Alter zu, der Durchmesser des Havers'schen Kanals und der Osteone selbst verringert sich jedoch.

Resorptionslakunen kennzeichnen Regionen, in denen Knochenabbau bzw. Remodeling stattfindet. Sie können dabei nach distal, proximal oder beides zusammen verlaufen und durch einen bereits existierenden vaskulären Kanal führen bzw. Verbindungen zu vaskulären Kanälen ausbilden (Tappen, 1977). Resorptionslakunen, welche zeitlebens noch aktiv waren, sind im histologischen Schnitt durch ihre ausgefransten Ränder (Howship'sche Lakune) erkennbar. Sind die Ränder hingegen glatt, war die Resorptionslakune zum Zeitpunkt des Todes inaktiv (Jaworski et al., 1972). Generell werden Resorptionslakunen zum Endost hin größer und steigen in ihrer Anzahl vor allem bei Frauen in der Menopause und auch bei Männern mit steigendem Individualalter an (Ahlborg et al., 2003, Simmons et al., 1991).

1.4.2) Biomechanik des Knochens

Knochen adaptiert sich zeitlebens an *mechanische Beanspruchung*. Wolff (Wolff, 1892) hat als Erster beschrieben, dass mechanische Belastung einen Einfluss auf Änderungen der Knochenmikrostruktur ausübt, was fortan als „Wolff's Law“ bezeichnet wurde (Ruff et al., 2006).

Auf Knochen einwirkende *physikalische Belastung* sowie das Feedback-Modell (Abbildung 7) lösen Modeling und Remodeling aus (Ruff et al., 2006). Insgesamt verlaufen 30% des Remodelings zielgerichtet, beispielsweise für die Reparatur von Mikrofissuren. Etwa 70% des Remodelings verlaufen nicht zielbedingt und werden unter anderem durch metabolische Faktoren, Gewebeerterung bzw. Gewebeerermüdung, die mineralische Homöostase oder die mechanische Belastung, beeinflusst (Burr, 2002). Gesteigerte *mechanische Belastung*, beispielsweise durch Wachstum erhöhte Körpergröße oder durch Sport gesteigerte Muskelaktivität stimulieren die Ablagerung neuen Knochenmaterials und führen zur Stärkung des Knochens, wodurch die Belastung wieder auf ihr ursprüngliches Level reduziert wird. Durch verringerte Belastungseinwirkung, beispielsweise durch Inaktivität, Paralyse oder Raumfahrt bedingt, kommt es zu einer Resorption von Knochenmaterial, wodurch die Knochenstruktur geschwächt und die ursprüngliche Belastung ebenfalls wiederhergestellt wird (Ruff, 2008). Dieses übliche bzw. normale Belastungslevel, welches immer wieder durch Remodelingvorgänge erreicht werden soll, ist allerdings nicht konstant, da es von der Position im Skelett und systemischen Faktoren, wie hormoneller Status, Geschlecht, Alter, genetischer Hintergrund, Krankheiten und Ernährung, beeinflusst wird (Ruff et al., 2006). Auch die Art der Belastung und vergangene Belastungen sind wichtige Variablen. Unterschiede in der Morphologie von Knochen lassen Rückschlüsse zu auf Unterschiede vergangener mechanischer Beanspruchung. Bei

Erwachsenen ist die Antwort auf mechanische Belastung reduziert im Vergleich zu Jugendlichen. Turner (Turner, 1999) hat diesbezüglich die sogenannte „Cellular accommodation“-Theorie aufgestellt, nach der Knochenzellen aus ihrer ursprünglichen Umgebung assimilieren und sich an neue Positionen anhaften. Auch ihm zufolge variieren Remodelingprozesse je nach Lokalisation im Skelett, beeinflusst von der lokalen Belastungsrate. Die Knochenmasse wird stabilisiert, sobald sich die Zellen an die neue Umgebung angepasst haben.

Es existieren grundsätzlich drei verschiedene Arten mechanischer Belastung: Achsen-, Biege- und Torsionsbelastung (Ruff and Hayes, 1983a). Knochen ist widerstandsfähig gegenüber mechanisch wirkenden Kräften. In Bezug auf die Auswirkung mechanischer Belastung ist Knochen am schwächsten gegenüber Scher- und Torsionskräften, da das Skelett unter dieser Art von Belastung mehr Mikrofissuren aufweist, welche ausgeglichen werden müssen (Skedros et al., 2013). Das mechanostatische Prinzip besagt, dass Knochen eine dynamische Flexibilität besitzen, verbunden mit spezifischen „Antworten“ der Makroarchitektur (Frost, 1982). Die Spongiosatrabekel verlaufen v.a. in Richtung der im Knochen vorherrschenden Zug- und Druckspannungen. Im proximalen Femur findet sich beispielsweise das „Ward'sche Dreieck“, ausgerichtet auf die Belastungsrichtung (Abbildung 13).

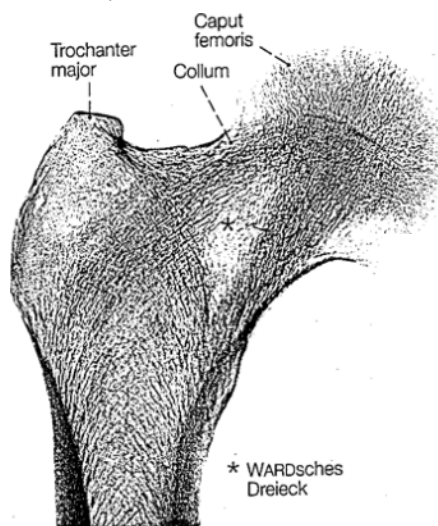


Abbildung 13: Ward'sches Dreieck im Caput femoris (verändert nach Benninghoff et al. 2008);

Hier wirken vor allem Kompressionskräfte ein, die mediale Oberfläche steht unter Druck, die laterale Oberfläche unter Zug. Beide gipfeln im Oberschenkelhals und im proximalen Femurschaft, reduzieren sich dann in Richtung distal (Benninghoff et al., 2008, Ruff and Hayes, 1983b, Goldman et al., 2003, Ruff und Hayes, 1983a). Die transversalen Kollagenfasern zeugen von Druckbelastung, longitudinale Fasern von Zugbelastung (Goldman et al., 2003). Knochenstärke, Materialverteilung und Anordnung der

Osteone sind in direkter Abhängigkeit von mechanischen Belastungen, die auf den Knochen einwirken (Benninghoff et al., 2008, Amtmann und Doden, 1981). Die Länge der Röhrenknochen wird durch zunehmende mechanische Belastung jedoch nicht beeinflusst (Amtmann and Doden, 1981). Die Kollagenfibrillen nehmen die Belastung von den mineralischen Kristallen auf und leiten sie an weiter distal gelegene Kristalle über Scherkräfte weiter (Currey, 2012).

Die größte *mechanische Belastung* für den Knochen entsteht durch *Muskelkontraktionen*, welche in konstanter Gegenrichtung zur Erdanziehungskraft stehen. Der proximale Femurschaft erfährt mehr einwirkende Muskelkraft als distaler gelegene Regionen (Frost, 1997). Daher findet sich im proximalen Bereich des Femurschaftes eine höhere kortikale Knochenmasse im Vergleich zur distalen Verringerung der Kortikalis. Dies stellt eine Adaption dar, um eine höhere Widerstandsfähigkeit gegen Zug- und Druckbelastung zu gewährleisten. Der distale Diaphysenabschnitt ist dagegen robuster gegenüber medio-lateraler Biegebelastung (Burr et al., 1981). Auch der posteriore Femurschaft ist

durch die dort ansetzende Muskelansatzstelle (*Linea aspera*) höherer mechanischer Belastung ausgesetzt. Dort findet sich erhöhtes Remodeling und eine verdichtete Anzahl an Resorptionslakunen (Frost, 1997). Innerhalb und zwischen verschiedenen Regionen der Femurdiaphyse können signifikante Unterschiede im Remodeling bestehen, verursacht durch regional unterschiedlichen mechanischen Stress und differierende Belastung (Crowder et al., 2016, Chan et al., 2007). Diese regionalen Unterschiede können wiederum Einfluss auf die Ergebnisse histologischer Altersbestimmungsmethoden nehmen. Die posteriore Femurdiaphyse lieferte in einer Studie beispielsweise andere Ergebnisse bei der histologischen Altersbestimmung nach Thompson (Thompson, 1978) als im anterioren Bereich. Teils konnten auch Unterschiede zwischen dem periostalen und mittigen Bereich der Kortikalis festgestellt werden (Chan et al., 2007). Der anteriore Femurschaft scheint sich allerdings gut für die Anwendung histologischer Altersbestimmungsmethoden zu eignen, da sich entlang des Schaftes sehr ähnliche Ergebnisse erzielen lassen und da sich am anterioren Femurschaft keine Muskelansatzstellen befinden (Chan et al., 2007). In mehreren Studien konnte bisher bewiesen werden, dass histomorphometrische Parameter keine geschlechtsbedingten Unterschiede aufweisen (Gocha and Agnew, 2016, Pfeiffer, 1998), andere Studien wiederum stellten deutliche Geschlechtsunterschiede fest (Britz et al., 2009, Ruff and Hayes, 1983a). Osteonfläche und Osteondurchmesser unterscheiden sich signifikant zwischen den Geschlechtern. Bei Frauen scheinen kleinere Osteone zu persistieren als bei Männern. Für die Osteonkreisförmigkeit konnte auch hier ein Zusammenhang mit steigendem Individualalter, nicht aber mit dem Geschlecht festgestellt werden (Britz et al., 2009). Solche Geschlechtsunterschiede, v.a. in den unteren Extremitäten wie Femur und Tibia, können beispielsweise durch *genetische Faktoren* und *Umweltfaktoren* bedingt sein. Dabei spielen *biomechanische Eigenschaften*, unter anderem der *Geschlechtsdimorphismus* des Beckens und Unterschiede im *Verhalten* zwischen Männern und Frauen, eine Rolle (Ruff und Hayes, 1983a). Sowohl männliche als auch weibliche Individuen weisen eine vermehrte *endostale Resorption* mit steigendem Individualalter auf, welche bei Männern jedoch durch *subperiostale Apposition* und *Expansion* relativiert wird. Dadurch kommt es bei Männern zu einer verringerten Änderung der kortikalen Fläche, welche bei Frauen gravierender ausfällt. Dadurch kompensieren männliche Individuen den Verlust an Knochenmaterial und Knochenstärke mit dem Alter (Ruff and Hayes, 1988). Im Vergleich von industriellen (modernen) Populationen mit prähistorischen Populationen zeigt sich, dass moderne Individuen einen verminderten Geschlechtsdimorphismus aufweisen. Für weibliche Individuen zeigen sich kaum Änderungen. Für männliche Individuen fallen diese Änderungen allerdings stärker aus, da sich die Geschlechtsunterschiede im Bewegungshabitus von agrikulturellen zu industriellen Bevölkerungen reduziert haben (Ruff and Hayes, 1983a). Für moderne Populationen erscheinen zudem bei beiden Geschlechtern größere Havers'sche Kanäle, bei Männern außerdem noch eine erhöhte Anzahl Havers'scher Kanäle (Burr et al., 1990). Das Problem bei der Untersuchung solcher Geschlechtsdimorphismen ist, dass durch die Auswahl kleiner Stichproben Geschlechtsunterschiede verschleiert werden können (Crowder et al., 2016).

In der *Robustizität* von Langknochen persistiert ein statistisch signifikanter Rückgang im Vergleich mit Knochenmaterial prähistorischer Populationen. Dieser ist bedingt durch die Abnahme der mechanischen Belastung. Unter anderem durch technische Neuerungen, den sitzenden Lebensstil und verminderte physische Aktivität kommt es zu einer Grazilisierung des Skeletts, was wiederum ein erhöhtes Risiko für Knochenfrakturen im Alter birgt (Ruff, 2008). Die prähistorischen Populationen unterschieden sich in ihren Subsistenzstrategien von denen moderner Populationen, die durch eine landwirtschaftliche Arbeitsweise gekennzeichnet sind. So führte der Wandel von einem vorlandwirtschaftlichen zu einem landwirtschaftlichen Lebensstil zu einem Rückgang in der relativen Knochenstärke von Femur und Humerus. Dies ist allerdings stark vom betrachteten Kulturkreis und der tatsächlichen Lebensweise abhängig (Ruff, 2008). Diesbezüglich ist noch weitere Forschung nötig, um klären zu können, wie viel physische Aktivität vorhanden sein muss, um einen Einfluss auf Knochenbildungsraten zu haben und sich damit auf die Ergebnisse histologischer Altersbestimmungsmethoden auszuwirken (Crowder et al., 2016).

Zudem scheint ein Zusammenhang zwischen dem Körpergewicht und histomorphometrischen Parametern zu bestehen (Britz et al., 2009, Ruff et al., 1991). Erhöhte Körpermasse übt eine hemmende Wirkung auf osteoklastische Resorption aus, wodurch Resorptionslakunen zusammen mit BMUs weniger Platz einnehmen (können) und somit kleinere Osteone entstehen. Bilateralsymmetrische Unterschiede in der Knochenmikrostruktur sind eher weniger über die Länge des Knochenschaftes erkennbar, sie zeigen sich vor allem im Vergleich der Mikrostruktur der unteren Extremitäten mit der der oberen Extremitäten.

1.4.3) Histomorphometrie

Die *Histomorphometrie* beschreibt die quantitative Knochenhistologie für die strukturelle Organisation der Knochenmikrostruktur und die Individualaltersschätzung zum Todeszeitpunkt (Katzenberg und Grauer, 2018). Bereits 1911 wurden von Balthazard und Lebrun erste histomorphometrische Untersuchungen der Knochenmikrostruktur durchgeführt ((Balthazard und Lebrun, 1911) in (Katzenberg and Grauer, 2018)). Generell können anhand der Knochenmikrostruktur Hinweise auf das biologische Alter eines Individuums gewonnen werden, da die physiologische Basis histomorphometrischer Techniken *Modeling* und *Remodeling* sind (Katzenberg and Grauer, 2018). Aktivität und Inaktivität bzw. Immobilität nehmen dabei Einfluss auf die Umbauraten innerhalb der Knochenmikrostruktur. In der histomorphometrischen Analyse der Knochenmikrostruktur wird davon ausgegangen, dass das morphologische Sterbealter Erwachsener dem biologischen Alter entspricht bzw. den „*Status quo*“ des Knochenbaus des Individuums zum Todeszeitpunkt widerspiegelt. Dieser kann durch verschiedene äußere Faktoren, wie Individualalter, Geschlecht, Hormonstatus und physische Aktivität beeinflusst werden (siehe auch Kapitel 1.3.4). Die Histomorphometrie dient der Einbeziehung solcher einflussnehmenden Faktoren in die Individualaltersschätzung, wie Geschlecht, Populationsvariation, die Einbeziehung von Referenzproben oder Biomechanik (Katzenberg and Grauer, 2018). Den maßgeblichsten Einfluss darauf trägt aber das Individualalter. Die

Knochenumbauraten bzw. Stoffwechselraten können mittels histomorphometrischer Verfahren erfasst werden (Wu et al., 1970, Frost, 1987b, Stout and Paine, 1994).

Histomorphometrische Untersuchungen beinhalten einen Algorithmus zur Bestimmung des Gewebeaters kompakten Knochens unter dem Einfluss von Knochenwachstum, Modeling und chronologischem Alter sowie zur quantitativen Messung dieser Einflüsse (Frost, 1987b). Die Akkumulation von Osteonen wird dabei vor allem von Zeit und Zeitpunkt beeinflusst. Daher können in unterschiedlichen Bereichen derselben Diaphyse unterschiedliche Zahlen von Osteonen vorherrschen. Für die Errechnung histomorphometrischer Parameter werden die betreffenden histologischen Strukturen in einem definierten Bereich von 1mm^2 erfasst.

Besonders bei der Sterbealtersbestimmung älterer Individuen spielt die histomorphometrische Untersuchung eine wichtige Rolle, da bei senilen Individuen makromorphologische Diagnosekriterien oftmals unzulänglich sind bzw. nur die Einstufung in die Altersklasse ermöglichen.

Folgende histomorphometrische Parameter werden in der Regel erhoben:

- Ein histomorphometrischer Parameter zur Quantifizierung der Knochenmikrostruktur ist die *Osteonenpopulationsdichte* (OPD). Diese bezeichnet die Zahl der Remodelingereignisse innerhalb eines Quadratmillimeters (siehe Kapitel 2.2.7) (Gocha und Agnew, 2016).

Sobald für die OPD eine Asymptote erreicht ist, kann keine Korrelation mit dem Individualalter mehr nachvollzogen werden. Dies trifft nach Walker et al. (Walker et al., 1994) für das Femur ab einem Individualalter von über 70 Jahren zu, was die histologische Altersschätzungen für Individuen der Altersklassen *Spät matur* und *Senilis* deutlich erschwert. Walker et al. (Walker et al., 1994) konnten allerdings eine Korrelation zwischen der OPD mit der kortikalen Fläche und der kortikalen Porosität feststellen. Allerdings nimmt bereits ab dem 35. Lebensjahr vor allem bei weiblichen Individuen die kortikale Fläche ab, wodurch im Alter keine signifikante Korrelation zwischen OPD und Individualalter mehr bestehen kann (Goldsmith et al., 1973). In Rippen haben in der sechsten Lebensdekade alle neuen Osteone bereits alle alten Osteonengenerationen ersetzt, wodurch die OPD ihre Asymptote erreicht (Andronowski and Crowder, 2019). Goliath et al. (Goliath et al., 2016) konnten bei ihrer histomorphometrischen Erfassung der Variation der Osteone und deren Einfluss auf die histologische Altersbestimmung älterer Individuen an Femur und Rippe keine Geschlechtsunterschiede feststellen. Allerdings zeigte sich eine erhöhte Osteonzirkularität, eine verminderte Osteongröße und eine erhöhte OPD mit steigendem Individualalter. Untersuchungen zur Quantifizierung der Remodelingvorgänge am mittleren Femurschaft konnten feststellen, dass Remodeling am häufigsten im periostalen Bereich der Knochenkompakta auftritt. Zudem zeigte sich, dass der mittlere Femurschaft das jüngste Primärgewebe ist, da dort die höchsten Remodelingraten zu finden sind. Dies kann bedingt sein durch einwirkende Spannungs- und Scherkräfte sowie durch höhere Belastungsmaxima, wodurch es zu einer erhöhten Anzahl an Mikrofissuren und darauffolgenden Reparaturereignissen kommt (Gocha und Agnew, 2016).

Am wenigsten wird endostal, posterior, sowie postero- und anteriomedial im Kortex umgebaut.

- Basierend auf der *OPD* kann wiederum die jährliche *Bildungsrate* von *Knochenmasse* (Knochenbildungsrate bzw. Bone Formation Rate (BFR)) bestimmt werden (Wu et al., 1970).
- Die auf den *OPD*-Berechnungen basierende Berechnung der *AOC* („*Accumulated Osteon Creations*“) bestimmt die Anzahl der Remodelingevents über die Lebenszeit der Knochenkompakta, in welcher sich die quantifizierten Osteone befinden.

Die *AOC*-Rate kann dabei die *OPD* übersteigen, wenn neue Osteone alle Überbleibsel alter Osteonengenerationen entfernt haben – sprich wenn die *OPD* ihre Asymptote erreicht hat. Bei der Berechnung der *AOC* wird meist nur die zeitliche Komponente in die Formel miteinbezogen, nicht aber andere einflussnehmende Faktoren wie Gesundheit, Krankheit, Ernährung oder Aktivität. Da dies vor allem bei Untersuchungen an prähistorischem Probenmaterial oft nichtmehr nachvollzogen werden kann, wurde von Frost (Frost, 1987b) ein Faktor in seine Formel miteinbezogen, der das mittlere Gewebealter berechnet und auf welchen z.B. die verschiedenen Modeling Drifts Einfluss nehmen. Modeling Drifts nehmen Einfluss auf das chronologische Alter des Knochens, sodass dieser an manchen Stellen jünger bzw. älter erscheinen kann als das tatsächliche chronologische Alter. Hierdurch kann sich auch die *OPD* zwischen verschiedenen histologisch untersuchten Positionen deutlich unterscheiden.

- Die *Aktivierungsfrequenz* ist ein Maß für die Intensität dieser Remodelingvorgänge. Mit der Berechnung der Aktivierungsfrequenz wird nachvollzogen, wie viele Osteone jährlich in die Knochenmikrostruktur eingebaut werden (Osteone/mm²/Jahr).

Des Weiteren werden in histomorphometrischen Untersuchungen die *prozentuale Zusammensetzung* der Knochenmikrostruktur und die *Osteon-* sowie *Resorptionslakenengeometrie* erfasst.

Bei der Anwendung histomorphometrischer Methoden ist zu berücksichtigen, dass Modelingprozesse auch bei adulten Individuen auftreten können, da dadurch ohne gleichzeitiges Ansteigen der Remodelingraten das mittlere Gewebealter stark gesenkt wird. Zudem besteht der adulte Kortex aus einer Kollektion von Lamellen diversen Alters, wodurch dessen mittleres Alter stets geringer ist als das chronologische Alter des Individuums (Katzenberg und Grauer, 2018).

Die Histomorphometrie dient also dazu, um aus dem *Status quo* der mikrostrukturellen Organisation auf einen Prozess schließen zu können.

1.4.4) Äußere Einflüsse auf die Knochenmikrostruktur

Verschiedene äußere Parameter können Einfluss auf das Remodeling und damit die Entwicklung der Knochenmikrostruktur nehmen. Darunter fallen zum Beispiel Geschlecht, Genetik, Umwelt, Herkunft, Hormone, Stoffwechsel, Belastung, Krankheiten oder Traumata (Parfitt, 1983, Livshits et al., 1998, Robling and Stout, 2008). Den größten Einfluss trägt allerdings mit Sicherheit das *Individualalter*. Nach Frost (1987a) können auch die *Ernährung*, die *berufliche Tätigkeit* und die *physische Aktivität* eine

Auswirkung auf die OPD haben. Die *Ernährung* spielt vor allem während der Wachstumsphasen eine wichtige Rolle (Robling und Stout, 2008).

Genetische Faktoren nehmen einen Einfluss auf die Knochenalterung. Dies zeigt sich darin, dass unterschiedliche Populationen und Ethnien unterschiedliche Knochenalterungsraten aufweisen (Livshits et al., 1998). *Klimatische Faktoren* wirken sich ebenfalls auf die Knochenalterungsrate aus, darunter fallen unter anderem geographische Koordinaten, Temperaturen im Sommer und im Winter und der jährliche Niederschlag. Auch metabolische Prozesse können durch das Klima beeinflusst werden (Belkin et al., 1998). Der Einfluss geographischer Koordinaten als Umweltfaktor zeigt sich beispielsweise in der Betrachtung von Knochenmaterial von Bevölkerungsgruppen aus Bergregionen. Diese zeigen eine höhere Robustizität des Femurs als solche aus dem Flachland oder aus Küstenregionen (Ruff, 2008). Primär sind diese geographischen Faktoren allerdings von der Belastungseinwirkung auf den Knochen abhängig.

Osteoporotische Veränderungen können zu einem irreversiblen, konstanten Verlust an Knochenmasse führen (Parfitt, 1979, Burr et al., 1990, Manolagas und Jilka, 1995). Der Verlust an Knochenmasse beginnt im *trabekulären* Geflecht. Die trabekuläre Kontinuität wird durch osteoporotischen Knochenabbau geschwächt und die daraus resultierende reduzierte Konnektivität der Knochenstruktur führt zu einer erhöhten Fragilität und damit einem erhöhten Frakturrisiko (Jindal et al., 2017). Im Falle von Osteoporose wird mehr Knochen resorbiert als aufgebaut, wodurch ein Remodeling-Ungleichgewicht entsteht. Dieses Ungleichgewicht tritt mit etwa 40 bis 50 Jahren auf, was zu einem Verlust von 0,3-0,5% an Knochenmasse pro Jahr führt (Manolagas und Jilka, 1995).

Bei Frauen entsteht Osteoporose früher als bei Männern durch den Verlust der Gonadenfunktion (postmenopausale Osteoporose), einhergehend mit der Menopause (Manolagas and Jilka, 1995, Burr et al., 1990). Die postmenopausal einsetzende Verringerung der Östrogene bewirkt eine gesteigerte Aktivität der Osteoklasten, da diese durch Östrogene gehemmt werden. Durch das Einsetzen der Menopause kommt es bei weiblichen Individuen zu einer gesteigerten Remodelingrate (Recker et al., 2018). Ein Remodeling-Ungleichgewicht kann entweder durch einen Anstieg des Anteils an abgebautem Knochen, oder durch eine Verringerung des Anteils an neu gebildetem Knochen entstehen. Ein Anstieg beider Prozesse, wobei die Knochenresorption die Knochenbildungsrate übersteigt, scheint auch möglich (Manolagas und Jilka, 1995). Zudem kommt es zu einem Anstieg in der Bildung von Osteoklasten und Osteoblasten durch gesteigerte Interleukin-6-Produktion (Manolagas und Jilka, 1995).

Durch *Altern* bedingte Veränderungen der Knochenmikrostruktur gehen mit intrakortikalen Verlusten von Knochenmasse einher, was auch als „senile Osteoporose“ oder „Typ-II-Osteoporose“ bezeichnet wird. Mit zunehmendem Alter verringert sich die Osteongröße, die OPD nimmt dagegen zu (Burr et al., 1990). Für die altersbedingte Osteoporose könnte auch eine reduzierte Anzahl an Osteoblasten ursächlich sein. Aktivere Bevölkerungsgruppen zeigen generell weniger osteoporotische Frakturen auf, sowohl bei Männern als auch bei Frauen (Ruff, 2008). Im Falle von lokalen oder systemischen Krankheiten kann auch die damit einhergehende Einnahme von Medikamenten einen Einfluss auf die Knochenmineraldichte nehmen (Babayigit et al., 2006). Die Antwortmechanismen auf Belastung

können durch Krankheiten entweder sensibilisiert oder desensibilisiert werden, zum Beispiel in der postmenopausalen Osteoporose, bei Fluorideinnahme oder bei chronischen Krankheiten (Frost, 1987a).

Ein weiterer Faktor, welcher Einfluss auf das Remodeling nimmt, ist die *mechanische Belastung* (vgl. Kapitel 1.4.2). Diaphysen sind bei älteren Individuen meist weniger mechanischer Belastung ausgesetzt, wodurch es zu weniger Remodeling und einem erhöhtem Frakturrisiko kommt. Dem entgegenwirkend sind auch schon in jüngeren Jahren hohe Aktivitätslevel, welche zu einem verstärkten appositionellen Aufbau von Knochen führen. Dadurch kann dieser auch im Alter noch stabil sein (Ruff and Hayes, 1982).

1.4.5) Taphonomische Prozesse und damit verbundene Degradation der Knochenmikrostruktur

Nach dem Tod treten verschiedene Prozesse der Dekomposition und Degradation ein. Zunächst kommt es zur Autolyse, dem Abbau organischer Bestandteile durch körpereigene Enzyme. Darauf folgt die Fäulnis, bewirkt durch bakteriellen Befall des Leichnams. Anschließend kommt es zur Verwesung, gefolgt von der Knochendekomposition. Diese lässt sich in physikalische, chemische und biologische Veränderungen trennen. Die physikalischen Veränderungen werden durch die vorherrschenden Witterungsbedingungen, den Einfluss des Sediments und den Erddruck bewirkt. Chemische Veränderungen beziehen sich auf Veränderungen der mineralischen Matrix, biologische Faktoren stellen beispielsweise Mikroorganismen dar (Herrmann et al., 1991).

Austausch anorganischer Komponenten mit dem Boden oder dessen Umfeld führen zu Veränderungen in der Konzentration biologisch relevanter Elemente im Knochen. Die chemische Dekomposition kann beispielsweise über eine Gleichgewichtsreaktion mit einer hetero- oder homoionischen Substitution innerhalb des Kristallgitters oder über die Auflösung des Hydroxyapatits mit nachfolgender Rekristallisation, verursacht durch den pH-Wert des Bodens, erfolgen.

Da es sich beim dem untersuchten Knochenmaterial (abgesehen von dem rechtsmedizinischen Material) überwiegend um bodengelagerte Skelettfunde handelt, können die Umgebungsbedingungen einen Einfluss auf die Qualität der Knochenmikrostruktur nehmen. Je nachdem, ob Individuen in Särgen oder direkt im Boden bestattet wurden, können sich Degradationsprozesse unterscheiden (Dent et al., 2004). Die variierenden Bestattungsumgebungen führen zu unterschiedlichem Grad mikrobiellen Befalls. Bei einer Krypta-Bestattung beispielsweise tritt eine verzögerte Knochendekomposition auf, einhergehend mit weniger mikrobiellem Befall (Caruso et al., 2018). Temperatur, Feuchtigkeit, pH-Wert und Luftdruck nehmen einen Einfluss auf die Dekomposition (Sutherland et al., 2013, Vass, 2001). Der generelle Zustand der sterblichen Überreste und Tierfraß haben ebenfalls Auswirkungen auf die Dekomposition.

Taphonomische Prozesse, wie mikrobielle und chemische Degradation, haben eine Auswirkung auf die Analysierbarkeit der Knochenmikrostruktur. Mikrobielle Aktivität kann zu einer Zerstörung der Kollagenfasern und nicht-kollagenen Proteinen durch verschiedene Arten von Bakterien und Pilzen führen (Jans et al., 2004, Turner-Walker, 2008, Grupe et al., 1993, Crowder et al., 2016). Andere Degradationsprozesse können durch eindringendes Wasser über die vaskulären Kanäle entstehen,

wodurch es zu einer Auflösung des Knochenmaterials durch einen pH-abhängigen Verlust von Kalzium und Phosphat kommen kann. Durch den Eintritt von Wasser kann mikrobielles Wachstum begünstigt werden, wodurch Bodenbakterien über die Havers'schen Kanäle in den Knochen eindringen können (Turner-Walker, 2008). Des Weiteren kann durch im Boden vorhandene Säuren eine Zersetzung der periostalen Lamellen auftreten, wodurch Osteone und Osteonfragmente freigelegt werden und dünne, von Bakterien gebildete, Mikrotunnel leichter entstehen können (Fernández-Jalvo et al., 2010). Bei der Untersuchung demineralisierter und mineralisierter Knochendünnschnitte ist eine Korrelation zwischen dem Erhalt der Knochenmikrostruktur und der Zeit der Bodenlagerung erkennbar.

Die oft beschriebene Bildung von „Brushit“ geht einher mit einer Auflösung der Mikrostruktur, da laminäre Brushit-Kristalle größer sind als die des Hydroxyapatits. Dies führt zur Rissbildung im Knochen und dadurch zu einer Dissoziation der Osteone (Piepenbrink, 1989).

1.4.6) Verbrennungsbedingte Veränderungen der Knochenmikrostruktur

Im Folgenden werden die temperaturbedingten Veränderungen der Knochenmikrostruktur aufgezeigt. Erste histologische Untersuchungen zu temperaturinduzierten mikromorphologischen Veränderungen am Leichenbrand wurden bereits 1941 von Forbes durchgeführt (Correia, 1997). Bei Forbes 1941 (in (Correia, 1997) wurde beschrieben, dass die Lakunen nur noch als Umrisse erkennbar sind und die Lamellen graduell verschwinden, bis nur eine granuläre Matrix mit Havers'schen Kanälen übrigbleibt. Havers'sche Systeme schrumpfen und der Durchmesser der Havers'schen Kanäle steigt (Forbes 1941 in (Correia, 1997)).

In den niedrigeren Verbrennungstemperaturen treten kaum bzw. nur wenige Unterschiede zu unverbrannten Vergleichsproben auf. Bei 200 °C nimmt die Mikrostruktur im histologischen Schnitt eine braune Färbung durch denaturiertes Kollagen an und erste Mikrofissuren entstehen. Bei einer Temperatur ab 300 °C erscheint der Knochen in der mikroskopischen Betrachtung durch den Austritt elementaren Kohlenstoffs bzw. Reste primären Kohlenstoffs schwarz (Hanson und Cain, 2007, Herrmann, 1972a). Castillo et al. (Fernandez Castillo et al., 2013) beschrieben bei 100 bis 200 °C bereits eine Deformation der Havers'schen Kanäle sowie Mikrofissuren. Ab 400 °C entstehen weitere Deformationen und Risse im Knochengewebe, ab 500 °C beginnt die Zerstörung der Mikrostruktur. Brewster-Kreuze sind ab 600 °C durch eine reduzierte Doppelbrechung nicht mehr auffindbar (Shipman et al., 1984, Harbeck et al., 2011, Herrmann, 1973). Brewster-Kreuze sind im histologischen Dünnschnitt unverbrannten Knochens aufgrund der Anordnung der Kollagenfasern und eine daraus resultierende Doppelbrechung unter polarisiertem Licht erkennbar und können unter anderem der Beurteilung des Erhaltungszustandes des Kollagens dienen (Bromage et al., 2003).

Bis 600 °C bleiben Osteone, Lamellen und Osteozytenlakunen weitgehend intakt (Holden et al., 1995a). Nach Harbeck et al. (Harbeck et al., 2011) verschwindet bei 800 °C die ursprüngliche histologische Organisation und keine strukturellen Elemente sind mehr erkennbar. Spätestens bei einer Temperatur von 900°C bersten die Havers'schen Kanäle (Fernandez Castillo et al., 2013). Van Vark ((Van Vark, 1970) in (Cambra-Moo et al., 2018)) beschreibt einen Erhalt histologischer Strukturen bis zu 800 °C (Cambra-

Moo et al., 2018). Dieser Erhalt der histologischen Strukturen ist allerdings von vielen Parametern abhängig.

Sowohl Absolonova et al. (Absolonova et al., 2012) als auch Cattaneo et al. (Cattaneo et al., 1999) konnten auch bei experimenteller Verbrennung in hohen Temperaturstufen (bis zu 1000 °C) noch Mikrostrukturen erkennen. Zudem beschrieben sie den Zustand der Knochenmikrostruktur bei 600 °C als kaum unterscheidbar zu unverbranntem Knochen. Sie schlussfolgerten, dass nach der Verbrennung mehr Mikrostrukturen pro Flächeneinheit (mm²) erkennbar seien, allerdings prozentual gesehen auf weniger Fläche als vor der Verbrennung. Dies liegt an der hitzebedingten Schrumpfung des Knochens, wodurch sich wiederum die Osteondimensionen verändern. Es ergaben sich statistisch signifikante Differenzen in der Knochenmikrostruktur vor und nach der Verbrennung bei verschiedenen Temperaturen (Absolonova et al., 2012). Bradtmiller und Buikstra ((Bradtmiller and Buikstra, 1984) in (Cambra-Moo et al., 2018)) stellten fest, dass die hitzebedingte Schrumpfung keinen Einfluss auf die Anzahl der Osteone nimmt (Fairgrieve, 2007). Bis 1400 °C behalten Havers'sche Kanäle und Osteozytenlakunen ihre Integrität. Ab 1600°C sind alle Strukturen durch das Schmelzen und die Rekristallisation des Knochenminerals beim Abkühlen zerstört (Holden et al., 1995a). Bei einer weiteren experimentellen Verbrennung von Femurfragmenten zur anschließenden histologischen Auswertung zeigte sich, dass der Durchmesser des Havers'schen Kanals zunahm, der Osteondurchmesser jedoch abnahm. Dies hatte jedoch keinen Einfluss auf die histologische Altersbestimmung ((Nelson, 1992) in (Bradtmiller und Buikstra, 1984)). Oft werden bei der Histologie am Leichenbrand vorhandene Pathologien fälschlicherweise als hitzebedingte Schädigung angesehen und somit nicht korrekt determiniert (Schultz, 1999). Hanson und Cain (Hanson und Cain, 2007) beschrieben das Auftreten von Rissen in der Knochenmikrostruktur auch bei unverbrannten Proben, möglicherweise bedingt durch den Bodendruck oder eine Zersplitterung des Knochens. Risse im histologischen Schnitt sind somit kein Alleinstellungsmerkmal verbrannter Knochen. Darüber hinaus ist der Zustand des Knochens vor der Verbrennung essenziell für das Auftreten hitzebedingter Änderungen (Hanson und Cain, 2007).

1.4.7) Histologische Altersbestimmung

Histologische Altersbestimmungsmethoden kommen meist dann zur Anwendung, wenn keine anderen (morphologischen) Methoden zur Individualaltersbestimmung mehr herangezogen werden können oder aber zur Unterscheidung von Menschen- und Tierknochen (siehe nachfolgender Abschnitt im Kapitel). Diese histologischen Methoden zur Individualaltersschätzung basieren auf den altersbedingten Veränderungen der Knochenmikrostruktur. Im Folgenden werden verschiedene Methoden zur histologischen Individualaltersschätzung vorgestellt und bewertet.

Bereits in den 1960er Jahren wurde begonnen, die altersbedingten Veränderungen der Knochenmikrostruktur genauer zu analysieren und zu beschreiben (Jowsey, 1960, Jowsey, 1966). Currey (Currey, 1964) schilderte einen Anstieg des Anteils an nicht-Havers'schem Knochen in der Anzahl der Havers'schen Systeme und des Anteils an Havers'schem Knochen mit steigendem Individualalter.

Die erste quantitative Methode zur histologischen Individualaltersbestimmung wurde von Kerley (Kerley, 1965) entwickelt. Er stellte fest, dass makroskopische Altersbestimmungsmethoden mit steigendem Individualalter ungenauer werden und strebte an mit der histologischen Untersuchung für dieses Problem eine Lösung zu finden. Er untersuchte 126 Knochenquerschnitte von Individuen bekannten Sterbealters und Geschlechts (88 Männer, 29 Frauen, 9 Individuen unbekanntes Geschlechts). Dabei versuchte er möglichst alle Altersstufen (Sterbealter zwischen 0 und 95 Jahren) abzudecken und verschiedene Langknochen der unteren Extremitäten (Femur- und Tibiadiaphyse sowie Fibula) zu verwenden. Er nutzte dafür insgesamt vier histologische Felder am Periost rund um den Schaft. Seine Analysen bezogen sich auf altersbedingte Veränderungen der sekundären Osteone, der Osteonfragmente, der nicht-Havers'schen Kanäle sowie des prozentualen Anteils nicht-umgebauten Knochens im kreisförmigen Sichtfeld seines Mikroskops. Basierend auf seinen Erkenntnissen zu den altersbedingten Veränderungen der Knochenmikrostruktur stellte er verschiedene Regressionsgleichungen zur Individualaltersschätzung auf.

Der *periostale Bereich* wurde von ihm ausgewählt, da hier wenige Resorptionsvorgänge stattfinden. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) veröffentlichten später eine Korrektur für die von Kerley (Kerley, 1965) publizierten Regressionsgleichungen, da festgestellt werden konnte, dass die Messfeldgröße in der ursprünglichen Publikation bei 1,62 mm und nicht wie angegeben bei 1,25 mm lag. Dies führte zu verfälschten Ergebnissen bei der histologischen Altersbestimmung. Auch Ahlqvist und Damsten (Ahlqvist und Damsten, 1969) stellten Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit von Kerleys Methode bei der Differenzierung sich verringernder und vermehrender Parameter fest. Daher stellten sie eine eigene Regressionsformel unter der Einbeziehung der prozentualen Anteile umgebauten und nicht-umgebauten Knochens in einem Gitternetz von 1 mm² auf und achteten in den vier untersuchten histologischen Feldern auf die Vermeidung von Bereichen um die *Linea aspera*, da hier durch die Muskelansatzstelle häufig Remodelingvorgänge und damit verbundene Umbauprozesse stattfinden. Uytterschaut (Uytterschaut, 1985) konnte feststellen, dass Kerleys Methode besser funktioniert als die von Ahlqvist und Damsten (Ahlqvist und Damsten, 1969) entwickelte Regressionsformel. Allerdings bemängelte auch sie die unzureichende Definition der untersuchten Parameter bei Kerley (Kerley, 1965). Zudem beanstandete sie, dass eines der untersuchten histologischen Felder bei Kerley auf die *Linea aspera* fällt, was auch schon von Ahlqvist und Damsten (Ahlqvist und Damsten, 1969) angemerkt wurde. Uytterschaut (Uytterschaut, 1985) selbst entwickelte ebenfalls eigene Regressionsformeln zur Individualaltersschätzung an Tibiae und Femora. Auch Bouvier und Ubelaker (Bouvier und Ubelaker, 1977) verglichen die Methoden von Kerley (Kerley, 1965) und Ahlqvist und Damsten (Ahlqvist und Damsten, 1969). Sie kamen wie Uytterschaut (Uytterschaut, 1985) zu dem Schluss, dass die Methode nach Kerley (1965) besser funktionierte. Dies ist dadurch bedingt, dass Ahlqvist und Damsten (Ahlqvist und Damsten, 1969) für die Aufstellung ihrer Regressionsformeln eine sehr kleine Stichprobe von nur 20 Individuen verwendeten, die zudem überaltert waren. Daher scheint diese Methode für ältere Individuen genauer zu sein. Das von Kerley (Kerley, 1965) verwendete Kollektiv für die Erstellung von Regressionsformeln zur Altersschätzung an der Fibula war dagegen zu jung und die Stichprobe ähnlich klein wie das Kollektiv von Ahlqvist und Damsten (Ahlqvist und Damsten, 1969), was deren

Anwendbarkeit einschränkt (Bouvier and Ubelaker, 1977). Singh und Gunberg (Singh und Gunberg, 1970) verwendeten für die Individualaltersschätzung Knochenproben von Mandibula, Femur und Tibia. Sie untersuchten pro Probe zwei mikroskopische Felder an insgesamt 139 Kompaktadünnschnitte in einem mikroskopischen Feld mit einer Größe von 2,0 mm bei 100-facher Vergrößerung. Sie bewerteten dabei die Anzahl der sekundären Osteone, die mittlere Zahl an Lamellen pro Osteon und den durchschnittlichen Durchmesser des Havers'schen Kanals.

Drusini (Drusini, 1987) testete die Methoden von Kerley (Kerley, 1965) im Vergleich zu denen von Thompson (Thompson, 1978, Thompson, 1979) an Fibula, Tibia und Femur. Er kritisierte, dass bei Kerley (Kerley, 1965) in den Formeln nur sekundäre Osteone und Osteonfragmente verwendet wurden, bei Thompson (Thompson, 1978, Thompson, 1979) dagegen der Anteil an sekundären Osteonen, Havers'schen und pseudo-Havers'schen Kanälen (fälschlich als Havers'sche Kanäle identifizierte Strukturen). Auch er erstellte eine eigene Regressionsformel mit einer Standardabweichung von nur 3,93 Jahren. Dafür untersuchte er 20 Femora, 23 Tibiae und 14 Fibulae. Im Femur beprobte sie in der Diaphysenmitte und verwendete den kompletten Querschnitt, bei Tibia und Fibula fokussierte sie sich auf das medial und lateral breiteste Fragment und untersuchte die Anzahl an sekundären Osteonen in einem Feld von 1 mm² in 10 bis 20 histologischen Feldern. Das mittlere Alter seines Kollektivs lag allerdings nur bei 28,75 Jahren.

Ericksen (Ericksen, 1991) beprobte in ihren Untersuchungen den anterioren Femurkortex. Ihre Studie umfasste insgesamt 264 Individuen (139 Männer und 125 Frauen), darunter 12 Afroamerikaner, ein Individuum aus Süd(ost)asien, 58 Individuen von einem Friedhof in der Dominikanischen Republik und sechs Individuen aus Chile. Bei den restlichen Individuen handelte es sich um Amerikaner mit kaukasischem Ursprung. Ericksen (Ericksen, 1991) wollte möglichst viele verschiedene Ethnien abdecken, um ein breiteres Spektrum für die Methodenentwicklung zu haben und somit für eine bessere bzw. breitere Anwendbarkeit der Methode. Von ihr wurden auch Individuen miteingeschlossen, welche Krankheiten aufwiesen (Diabetes mellitus, chronische Nierenerkrankung, etc.). Dies begründete sie damit, dass manche Krankheiten im Skelett eventuell nicht erkannt werden und histologische Altersbestimmungsmethoden auf alle Arten von Knochenmaterial anwendbar sein sollten. Sie vollzog ihre Untersuchungen an fünf histologischen Feldern, wertete im photographischen Feld aus, addierte diese fünf Felder auf ein großes Gesamtfeld und rechnete die Ergebnisse dann auf eine Feldgröße von 1 mm² herunter. Bewertet in der Knochenmikrostruktur wurden die Anzahlen sekundärer Osteone, Osteonfragmente, Resorptionslakunen, nicht-Havers'scher Kanäle und die prozentualen Anteile nicht-umgebauten, osteonalen und fragmentalen Knochens, wobei Ericksen (Ericksen, 1991) eine Korrelation mit dem Alter bestätigen konnte. Anders als andere Autoren stellte sie Geschlechtsunterschiede fest. Der Vorteil in ihrer Technik liegt darin, dass sie weniger destruktiv ist als solche Methoden, welche komplette Querschnitte benötigen.

Maat et al. (Maat et al., 2006) zählten den prozentualen Anteil nicht-umgebauten Knochens in ihrer Studie. Sie beprobten dafür den subperiostalen anterioren mittleren Femurschaft und 25° rechts und links gelegen zu diesem Punkt.

Histologische Altersbestimmungsmethoden werden nicht nur an Langknochen, sondern in den letzten Jahren zunehmend auch an Rippen vorgenommen. Bednarek et al. (Bednarek et al., 2009) wendeten histomorphometrische Verfahren an Rippen zur Individualaltersbestimmung an. Dabei stellten auch sie fest, dass das morphologisch bestimmte Skeletalter nicht das kalendarische Alter widerspiegelt und diese Methoden fehlerbehaftet sind. Dadurch bestätigten sie die Notwendigkeit der Anwendung histologischer Altersschätzungsverfahren in Kombination mit der morphologischen Altersbestimmung, um ein sicheres Gesamtbild des Individuums generieren zu können.

Auch Cannet et al. (Cannet et al., 2011) verwendeten histomorphometrische Verfahren zur Altersbestimmung an Rippen, da an kleinen Knochen die ganze kortikale Fläche ausgewertet werden kann und die ausgewertete Knochenmikrostruktur daher nicht von der jeweiligen Entnahmestelle beeinflusst wird. Hierdurch kann keine fälschliche Über- oder Unterschätzung auftreten. Dabei untersuchten sie die kortikale Fläche zwischen Endost und Periost sowie verschiedene histomorphometrische Parameter (u.a. größter und kleinster Durchmesser und Fläche des Havers'schen Kanals, OPD, Dichte an Havers'schen und nicht-Havers'schen Kanälen) auf der externalen und internalen Seite der Rippen. Pfeiffer et al. (Pfeiffer, 2006) versuchten histologische Altersbestimmungen an subadulten Individuen anhand der Knochenmikrostruktur von Rippen. Kim et al. (Kim et al., 2007) begründeten ihre Fokussierung auf Rippen zur histologischen Altersbestimmung damit, dass an Rippen wenig bis kaum Einfluss mechanischer Belastung ausgeübt wird, ganz im Gegensatz zu Langknochen. Zudem sind diese Methoden weniger invasiv als die Probenahme an Langknochen. Kim et al. (Kim et al., 2007) konnten sowohl Geschlechtsunterschiede in den betrachteten Parametern als auch altersbedingte Veränderungen feststellen. Bei der histomorphometrischen Untersuchung an Rippen, durchgeführt von Cho et al. (Cho et al., 2006), wurde darauf geachtet, ein gemischtes Kollektiv (afrikanisch-amerikanisch und europäisch-amerikanische Individuen) zu analysieren, um mögliche ethnische Unterschiede herauszuarbeiten, welche sie auch bestätigen konnten. Bereits in einer früheren Publikation befanden sie, dass verschiedene histologische Altersbestimmungsmethoden für verschiedene Ethnien nötig seien (Cho et al., 2002). Problematisch erschien allerdings, dass histologische Verfahren zur Individualaltersbestimmung mit steigendem Alter ungenauer werden, v.a. in der Altersklasse „*Senilis*“, da die OPD mit etwa 60 Jahren in den Rippen ihre Asymptote erreicht. Mnich et al. (Mnich et al., 2017) führten den Vergleich verschiedener bestehender Methoden an der Rippe durch und stellten fest, dass die besten Ergebnisse mit den Methoden von Bednarek et al. (Bednarek et al., 2009) und Cho et al. (Cho et al., 2002) erzielt werden konnten. Allerdings traten deutliche Unterschiede bei spezifischen Proben zwischen histologischem und morphologischem Alter auf, was durch Krankheiten verursacht worden sein könnte (Mnich et al., 2017).

Probleme in der Anwendung histologischer Altersbestimmungsmethoden

Nach Crowder (Crowder et al., 2016) treten verschiedene methodische Probleme bei der Anwendung histologischer Altersbestimmungsverfahren auf. Die *Bewertungstechnik* bestimmt beispielsweise den Grad an Subjektivität bei der histologischen Altersbestimmung, weshalb mehr *objektive*

Parameterdefinitionen in der Literatur nötig sind. Während der histomorphometrischen Auswertung der Knochenmikrostruktur können die betrachteten Parameter z.T. hohe Inter- und Intra-Observer-Error aufweisen (Lynnerup et al., 2006). Dies tritt beispielsweise bei der Identifikation und Quantifizierung sekundärer Osteone, Osteonfragmente oder Havers'scher Kanäle auf.

Des Weiteren müssten stets mehr *unabhängige histologische Felder* ausgewertet werden und das Auszählen der histologischen Strukturen sollte nicht ohne ein Gitternetz durchgeführt werden, um keine subjektive Beeinflussung des Ergebnisses zu provozieren (Crowder et al., 2016). Auch das angewendete *statistische Modell* nimmt Einfluss auf die Ergebnisse der histologischen Altersbestimmungsmethoden bzw. der histomorphometrischen Verfahren. Hennig und Cooper (Hennig and Cooper, 2011) deklarierten einen Zusammenhang zwischen der *Stichprobengröße* und dem „Standard Error of Estimate“ (SEE), da sich durch kleine Stichproben ein erhöhter SEE, durch große Stichproben ein verringerter SEE ergibt. Darüber hinaus kann eine kleine Stichprobe nicht die Struktur der Population repräsentieren, nur durch die Vergrößerung der Stichprobe nähert sich diese der tatsächlichen Strukturverteilung der jeweiligen Population an. Oft sind Stichproben zu klein, um wirksame Regressionen zur histologischen Individualaltersbestimmung aufzustellen und etwaige Zusammenhänge klar zu erkennen. Ein Minimum hierfür wären 100 Individuen, besser wäre ein Stichprobenumfang von mehreren 100 Individuen, damit die Ergebnisse stabiler und weniger zufällig ausfallen (Hennig und Cooper, 2011). Auch durch die interindividuelle Variation der Knochenmikrostruktur werden hohe SEEs bzw. große Altersschätzungsintervalle bei der Erstellung von Regressionsformeln in Kauf genommen (Crowder et al., 2016). Keough et al. (Keough et al., 2009) stellten fest, dass sich unter Individuen mit vielen Krankheiten eine geringere Korrelation zwischen dem Alter und den histomorphometrischen Parametern zeigte, als in der Literatur beschrieben. Dies ging einher mit schlechteren Ergebnissen bei der Anwendung der histologischen Altersbestimmungsmethoden von Kerley (Kerley, 1965) und Maat et al. (Maat et al., 2006).

Darüber hinaus wird in der Literatur bemängelt, dass kein Standard zur *Beprobung* von Knochen zur histologischen Auswertung vorhanden ist, was die Vergleichbarkeit verschiedener Studien limitiert (Iwaniec et al., 1998). Zudem wird in der Literatur beschrieben, dass sich verschiedene *Positionen* entlang der Femurdiaphyse deutlich in der mikrostrukturellen Zusammensetzung unterscheiden (Iwaniec et al., 1998, Frost, 1969). Demzufolge beeinflusst auch die Entnahmestelle das Ergebnis der histologischen Untersuchung (Lynnerup et al., 2006). Dies konnte allerdings bei den Untersuchungen von Müller (2017) und Mussauer (2017) nicht bestätigt werden.

Uytterschaut (Uytterschaut, 1985) betonte die Relevanz histologischer Altersbestimmungsmethoden vor allem für Individuen älter als 30 Jahre, da ab diesem Alter wenige spezifische makromorphologische Kriterien vorliegen. Falls möglich sollte die histologische Altersbestimmung auch im mittleren und endostalen Bereich der Knochenkompakta angewendet werden und nicht nur im periostalen Bereich, um möglichst viele Facetten der Mikrostruktur miteinzubeziehen. Crowder (Crowder et al., 2016) bemängelt, dass die ersten Studien zur histologischen Altersbestimmung den Einfluss mechanischer Belastung nicht berücksichtigt hatten, nur die Anreicherung von histomorphometrischen Parametern (bspw. sekundäre Osteone und Osteonfragmente) über die Zeit.

Histologische Unterscheidung von Mensch- und Tierknochen

Die Untersuchung der Knochenstruktur junger subadulter Individuen führt oft zu Fehlinterpretationen in der Differenzierung von Menschen- und Tierknochen, da besonders bei Individuen jünger als ein Jahr sogenannter *fibrolamellärer* Knochen auftreten kann, welcher dem *plexiformen* Knochen von Tieren stark ähnelt (Caccia et al., 2016, Cattaneo et al., 1999, Cattaneo et al., 2009). Erst ab einem Alter von sechs bis zehn Jahren treten erstmals sekundäre Osteone auf, vorher findet sich bereits lamellärer Knochen mit primären Osteonen (Caccia et al., 2016). *Plexiformer* Knochen tritt bei größeren Wirbeltieren mit schnell zunehmender Körpermasse auf (Rind, Schwein, Pferd), wodurch der Knochendurchmesser durch die große mechanische Belastung schnell ansteigt (Dittmann et al., 2006). Bei Primaten und Karnivoren bildet sich zuerst *fibrolamellärer* und dann *Havers'scher Knochen* (Dittmann et al., 2006). Das *Osteon banding*, bei dem es sich um linienförmig angeordnete primäre und bzw. oder sekundäre Osteone handelt, ist ein weiteres Merkmal zur Unterscheidung menschlicher und tierischer Knochenstruktur (Caccia et al., 2016, Crowder et al., 2018, Andronowski et al., 2017). In der histomorphometrischen Analyse von Osteozytenlakunen zur Differenzierung zwischen Menschen und Schweinen zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in der Zahl der Lakunen pro Osteon, allerdings in ihrer Geometrie (Cumaudo et al., 2019). Aber nicht nur die Geometrie der Osteozytenlakunen, sondern auch die der Osteone, v.a. die Osteongröße, variiert zwischen verschiedenen Spezies (Jowsey, 1966). Daher können Osteonform und Osteongröße zur Unterscheidung von Menschen- und Tierknochen herangezogen werden (Dominguez and Crowder, 2012, Crescimanno and Stout, 2012).

Im forensischen Kontext ist vor allem die Unterscheidung von Fragmenten tierischen und menschlichen Ursprungs relevant (Cattaneo et al., 2009). Diese Anwendung dieser Differenzierung ist beispielsweise im Falle von Massenkatastrophen relevant, wenn extreme Kräfte einwirken (z.B. Hitze oder Explosionen) und dadurch die skelettalen Überreste nur noch stark fragmentiert vorliegen oder gar verbrannt sind und potenziell Mensch und Tier betroffen sind (Martiniaková et al., 2007, Cumaudo et al., 2019).

Histomorphometrie und Histologie am Leichenbrand

Histomorphometrische Untersuchungen können zu einer Verbesserung der Auswertung von Leichenbrandmaterial im archäologischen und auch im forensischen Kontext beitragen (Cambra-Moo et al., 2018). Absolonova et al. (Absolonova et al., 2012) untersuchten den Einfluss der Verbrennungstemperatur auf die Knochenmikrostruktur an Rippen von Individuen bekannten Alters und Geschlechts bei Temperaturen von 700 bis 1000 °C im Vergleich mit einer unverbrannten Referenzprobe. Es zeigte sich, dass die prozentuale Repräsentation der Fläche der einzelnen Parameter in der Querschnittsfläche schrumpft, sich allerdings mehr Mikrostrukturen pro Flächeneinheit finden. Bei ihrer Untersuchung mussten sie allerdings ihre Auswertung auf die Quantifizierung intakter Osteone und Havers'scher Kanäle beschränken, da sich in der Mikrostruktur der experimentell verbrannten Rippen nur noch diese Parameter eindeutig identifizieren ließen. Daraus schlussfolgerten sie, dass sich Rippen nicht für experimentelle Kremierungsversuche eignen. Schlussendlich befanden

sie noch eine Abhängigkeit der Veränderungen der histomorphometrischen Parameter (bspw. Fläche des Havers'schen Kanals, Osteonumfang, Osteonfläche) von der jeweiligen Verbrennungstemperatur, der Verbrennungsdauer, der Abkühlung und vom Knochen selbst.

Eine histologische Individualaltersschätzung wird am Leichenbrandmaterial nach wie vor selten angewandt, da wenige Altersbestimmungsformeln für verbranntes Knochenmaterial bestehen. Wolf (Wolf, 1999) und Novacek (Novacek, 2012) nutzten die Regressionsformeln von Kerley (1965) zur histologischen Altersbestimmung am Leichenbrandmaterial. Dabei wurde ein Korrekturfaktor mit einbezogen, um das von Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley and Ubelaker, 1978) verwendete Sichtfeld auf das Sichtfeld der von ihnen benutzten Mikroskope zu übertragen. Großkopf (Großkopf, 2004) wandte eine subjektive Betrachtung der Knochenmikrostruktur an und ordnete die Individuen darauf basierend in die verschiedenen Altersklassen ein. In der von Hummel und Schutkowski (Hummel and Schutkowski, 1993) aufgestellten Regressionsformel werden Osteone bzw. Havers'sche Kanäle in einem Gitternetz mit einer Größe von 1mm^2 gezählt und die Werte in die Formel eingesetzt. Zuletzt wurde von Absolonova et al. (Absolonova et al., 2013) eine Regressionsformel für die histologische Altersbestimmung an verbrannten Rippen erstellt.

Zusätzlich kann auch eine histologische Differenzierung von Menschen- und Tierknochen vorgenommen werden (Wahl, 2008). Dabei liegt der Fokus ebenfalls auf der Form der Osteone und den Havers'schen Kanälen (Wahl, 2001). Weitere Entwicklung histologischer Altersbestimmungsmethoden unter Einbeziehung histomorphometrischer Parameter an Leichenbrandmaterial könnte die Auswertung verbrannter Knochen bereichern (Cambra-Moo et al., 2018).

Neue Methoden der Leichenbranduntersuchung

Die Untersuchung von Leichenbränden ist in den letzten Jahren auch in anderen Bereichen der Makro- und Mikromorphologie von Knochen wieder mehr in den Fokus gerückt. Dabei spielen nicht nur morphologische Beurteilungsmethoden, sondern auch histologische oder molekulare Analysemethoden eine immer entscheidendere Rolle. Es wurden neue Methoden zur histologischen Leichenbrandbearbeitung im Zuge der Individualaltersbestimmung entwickelt. Unter anderem die Untersuchung von Zahnwurzeln zur Individualaltersbestimmung mithilfe der TCA (tooth cementum annulation) hat wieder mehr an Bedeutung gewonnen (Gocha und Schutkowski, 2013, Ferreira et al., 2008). Diese Methode ist bei verbrannten Zähnen jedoch oft nicht möglich, da die relevanten Linien hitzebedingt verschmelzen oder durch die Verbrennung zu undurchsichtig oder rissig geworden sein können (Ferreira et al., 2008, Gocha and Schutkowski, 2013, Großkopf, 1990). Da die relative Anordnung jedoch erhalten bleibt, ist die Anwendung der TCA-Methode bei Leichenbränden oftmals trotzdem anwendbar (Gocha and Schutkowski, 2013). Dies ist allerdings nur dann möglich, wenn Zahnkronen im Leichenbrandmaterial vorhanden und intakt sind (Wahl, 2008). Durchschnittlich finden sich in 45% der Leichenbrandpartien Zahnreste (Großkopf 1995 in (Großkopf, 2004)).

Aber auch Methoden zur Rekonstruktion von Migration und Handel sowie die Herkunftsanalyse von Individuen sind in den Fokus des Interesses gerückt. Bereits Grupe und Hummel (Grupe and Hummel,

1991) stellten fest, dass sich das Element Strontium sowie Strontium-Kalzium Verhältnisse zur Untersuchung am Leichenbrand eignen. Die Herkunftsanalyse von Individuen wird am Leichenbrandmaterial mittels der Strontiumisotopenanalyse durchgeführt (Snoeck et al., 2016, Snoeck et al., 2015). Trotz der Verbrennung bleibt die Strontiumisotopenkomposition im Knochen erhalten und stellt eine Mittelung der aufgenommenen Nahrung über die letzten zehn Jahre vor dem Tod dar (Snoeck et al., 2018).

Abseits von Herkunftsanalysen und Altersbestimmungsmethoden wurden ebenfalls neue Methoden zur Leichenbranduntersuchung entwickelt. Brooks et al. (Brooks et al., 2006) entwickelten eine Methode zur Differenzierung von menschlichem und nicht-menschlichem Leichenbrand, wenn nach vollständiger Pulverisierung nur noch Knochenpulver vorhanden ist. Harvig und Lynnerup (Harvig and Lynnerup, 2013) konnten mit CT-Messungen das totale Volumen des Leichenbrandes (inklusive luftgefüllter Zwischenräume) bestimmen. Durch taphonomische Prozesse können die Leichenbrandgewichte nach der Präparation geringer ausfallen als in der Urne. Die Messung des Leichenbrandvolumens ist wichtig für die Beschreibung der Repräsentanz des Skeletts. Dabei steht zur Diskussion, ob ein ganzer Körper kremiert und zur Bestattung in die Urne platziert wurde und um das Volumen mit dem Gewicht in Relation zu setzen für eine Beschreibung der generellen Fragmentierung der verbrannten Knochen. Das Volumen-Gewicht-Verhältnis gibt außerdem Auskunft über bestehende lokale Bestattungsriten. In der Urne tragen Anteile trabekulären Knochens zum Leichenbrandgewicht bei (Harvig and Lynnerup, 2013).

Um das Methodenspektrum für die Anwendung an Leichenbrandmaterial auszuweiten, wurde in dieser Dissertation die verbrennungsbedingte Änderung der Knochenmikrostruktur und ihrer Parameter genauer untersucht. Da generell bei unverbrannten wie auch verbrannten Individuen besonders die histologische Altersbestimmung seniler Individuen beeinträchtigt ist, da die $OPD_{Asymptote}$ meist bereits erreicht ist und die Knochenmikrostruktur so dicht gepackt ist, dass keine Umbauvorgänge mehr stattfinden, bzw. Osteonneubildungen durch das Erreichen der Asymptote nichtmehr erkannt werden. Basierend auf dieser Problematik wurde der Fokus der vorliegenden Dissertation besonders auf die Entwicklung histologischer Altersbestimmungsformeln für senile Individuen gelegt.

2.) Material und Methoden

2.1) Material

Die Akquise altersbekanntes humanes Knochenmaterial stellte eine besondere Herausforderung dar, da hierfür eine Zusammenarbeit mit Friedhöfen und dem rechtsmedizinischen Institut erforderlich ist. Durch im Zuge von Grabaufösungen freigegebenes Skelettmaterial können Skelettelemente unterschiedlichen, aber bekannten Alters und Geschlechts akquiriert werden. Bei Knochenmaterial aus dem rechtsmedizinischen Institut kann dagegen nur auf freigegebenes Material durch Körperspenden zugegriffen werden.

Auf die Zusammensetzung des Knochenmaterials bezüglich des Individualalters und Geschlechts kann dabei in beiden Fällen kein Einfluss genommen werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden drei verschiedene Probenkollektive untersucht. Bei dem ersten Kollektiv handelt es sich um Knochenmaterial aus Grabaufösungen des Münchner Westfriedhofs. Das zweite Kollektiv stammt von Körperspendern aus der rechtsmedizinischen Abteilung der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München. Das dritte Kollektiv stammt aus zufällig beprobtem archäologischem Streufundmaterial der Arbeitsgruppe.

2.1.1) Westfriedhofproben

Das erste Kollektiv stammt aus dem Münchener Westfriedhof. Im Zuge einer vorausgegangenen Dissertation der Arbeitsgruppe zur Degradation von bodengelagertem Knochenmaterial wurden unter Einverständnis der Friedhofsverwaltung über eine zeitliche Dauer von etwa einem halben Jahr einhergehend mit geplanten Grabaufösungen insgesamt 50 Langknochenproben von dafür freigegebenem Material gesammelt. Soweit möglich, wurde der Fokus auf die Beprobung bzw. Entnahme von Femora gelegt. In manchen Fällen musste allerdings auf Tibiae ausgewichen werden. Die Individuen wurden mittels der Vergabe einer aufsteigenden Nummerierung anonymisiert, lediglich Angaben zu Geschlecht und Individualalter wurden vermerkt. Die Liegezeit lag zwischen acht und 60 Jahren. Für die vorliegende Dissertation konnte Knochenmaterial von insgesamt 39 Individuen verwendet werden.

Nach Probenahme wurden die Langknochen bzw. Langknochenfragmente umgehend bei -18°C eingefroren. Nach Anfrage bei der Ethikkommission der LMU München handelte es sich bei dem Knochenmaterial um Material, welches nicht unter die Deklaration von Helsinki (WMA, 2008) fällt und dessen Bearbeitung daher nicht einer Zustimmung der Ethikkommission bedarf.

Das Knochenmaterial, welches nach Durchführung der oben genannten Dissertation noch verfügbar war, wurde für die vorliegende Dissertation verwendet (Tabelle 1).

Tabelle 1: Auflistung des Probenmaterials des Münchener Westfriedhofs (WF) samt vergebener Nummer, beprobtem Skelettelement, Geschlecht, Altersklasse und Art der Bearbeitung;

Probe	Skelettelement	Sterbealter	Geschlecht	Bearbeitung
WF 1	Tibia	82	w	20 vs. 950°C
WF 2	Femur	80	m	Verbrennungsreihe, experimentelle Nachverbrennung
WF 3	Femur	75	w	20 vs. 950°C
WF 4	Femur	95	w	Verbrennungsreihe
WF 9	Femur	68	m	Verbrennungsreihe, experimentelle Nachverbrennung, intraindividuelle Variabilität
WF 12	Tibia	79	w	20 vs. 950°C
WF 15	Femur	79	m	Verbrennungsreihe, intraindividuelle Variabilität
WF 17	Tibia	63	w	Verbrennungsreihe
WF 18	Tibia	38	w	Verbrennungsreihe
WF 19	Femur	76	m	Verbrennungsreihe, intraindividuelle Variabilität
WF 20a	Femur	86	m	20 vs. 950°C
WF 20b	Femur	86	w	20 vs. 950°C
WF 21a	Tibia	67	m	20 vs. 950°C
WF 22	Tibia	77	w	Verbrennungsreihe
WF 24	Tibia	21	m	Verbrennungsreihe
WF 26	Femur	72	w	Verbrennungsreihe, experimentelle Nachverbrennung, intraindividuelle Variabilität
WF 27	Tibia	73	m	Verbrennungsreihe
WF 28	Femur	64	w	Verbrennungsreihe, experimentelle Nachverbrennung
WF 29a	Femur	89	m	Verbrennungsreihe, experimentelle Nachverbrennung
WF 29b	Femur	82	w	Verbrennungsreihe, experimentelle Nachverbrennung
WF 30	Femur	91	w	Verbrennungsreihe
WF 32	Femur	83	w	Verbrennungsreihe
WF 33	Tibia	87	w	Verbrennungsreihe
WF 34	Femur	68	m	Verbrennungsreihe, experimentelle Nachverbrennung
WF 36	Femur	78	m	20 vs. 950°C
WF 37	Femur	87	w	Verbrennungsreihe, experimentelle Nachverbrennung, intraindividuelle Variabilität
WF 38	Femur	54	w	Verbrennungsreihe
WF 39a	Femur	69	w	Verbrennungsreihe
WF 39b	Tibia	70	w	20 vs. 950°C
WF 40a	Femur	75	m	20 vs. 950°C
WF 40b	Femur	73	w	20 vs. 950°C
WF 41	Femur	64	w	20 vs. 950°C
WF 42b	Femur	89	m	20 vs. 950°C
WF 45	Femur	16	m	Verbrennungsreihe
WF 46	Femur	73	w	20 vs. 950°C
WF 47	Femur	22	m	20 vs. 950°C
WF 48	Tibia	80	w	20 vs. 950°C
WF 49	Femur	60	w	20 vs. 950°C
WF 53	Femur	82	w	20 vs. 950°C

2.1.2) Rechtsmedizinproben

Bei diesem Probenkollektiv handelt es sich um acht rezente Knochenproben aus Femora von Körperspendern, welche von der rechtsmedizinischen Abteilung der LMU zur Verfügung gestellt wurden. Die Zustimmung zur Bearbeitung des Knochenmaterials für die vorliegende Arbeit wurde von der Ethikkommission der LMU erteilt. Im Rahmen rechtsmedizinisch notwendiger Präparationen der Beine wurde die Probeentnahme durch das rechtsmedizinische Institut durchgeführt, sofern die Individuen zuvor einer Körperspende zugestimmt hatten. Die Proben wurden irreversibel anonymisiert, nur Alter und Geschlecht waren bei der Auswertung bekannt (Tabelle 2). Einschlusskriterien für die Studie war ein Individualalter von ≥ 20 Jahren zum Todeszeitpunkt.

Ausschlusskriterien waren infektiöses Material und das Auftreten osteoporotischer Veränderungen.

Tabelle 2: Auflistung des Probenmaterials aus der Rechtsmedizin samt vergebener Nummer, beprobtem Skelettelement, Geschlecht, Altersklasse und Art der Bearbeitung

Probe	Skelettelement	Individualalter	Geschlecht	Altersklasse	Bearbeitung
FS01-13	Femur	20	m	adultas	20 vs. 950°C
FS01-14	Femur	63	m	senilis	20 vs. 950°C
FS02-14	Femur	60	w	senilis	20 vs. 950°C
FS01-15	Femur	70	m	senilis	20 vs. 950°C
FS01-16	Femur	58	m	maturitas	20 vs. 950°C
FS02-16	Femur	58	m	maturitas	20 vs. 950°C
FS03-16	Femur	78	w	senilis	20 vs. 950°C
FS04-16	Femur	64	m	senilis	20 vs. 950°C

2.1.3) Streufundmaterial

Für die Verifizierung der erstellten Regressionsgleichungen anhand von archäologischem Leichenbrandmaterial lagen insgesamt 18 Proben aus Streufundmaterial (SF) der Arbeitsgruppe vor, welches verwendet werden konnte (Tabelle 3).

Tabelle 3: Auflistung des Streufundmaterials samt vergebener Nummer, beprobtem Skelettelement, und morphologisch geschätztem Individualalter

Probe	Individualalter	Datierung	Probe	Individualalter	Datierung
Garching-Alz 15	21-24	Urnenfelderzeit	SF10	unbestimmt	Urnenfelderzeit
Garching-Alz 9	mind. Juvenil	Urnenfelderzeit	SF11	unbestimmt	Urnenfelderzeit
Kleinaitingen 14	mind. Adult	Urnenfelderzeit	SF12	unbestimmt	Urnenfelderzeit
Kleinaitingen 40	mind. Adult	Urnenfelderzeit			
Königsbrunn-Zeller	mind. Juvenil	Urnenfelderzeit			
Trudering 153	mind. Adult	Urnenfelderzeit			
SF1	unbestimmt	Urnenfelderzeit			
SF2	unbestimmt	Urnenfelderzeit			
SF3	unbestimmt	Urnenfelderzeit			
SF4	unbestimmt	Urnenfelderzeit			
SF5	unbestimmt	Urnenfelderzeit			
SF6	unbestimmt	Urnenfelderzeit			
SF7	unbestimmt	Urnenfelderzeit			
SF8	unbestimmt	Urnenfelderzeit			
SF9	unbestimmt	Urnenfelderzeit			

Für das Streufundmaterial wurden bewusst unvollständig verbrannte Knochenproben verwendet, um zu testen, ob die im Zuge dieser Dissertation erhobenen histologischen Altersbestimmungsformeln auch für verbranntes Knochenmaterial anwendbar sind.

2.1.3.1) Intraindividuelle Variabilität der Knochenmikrostruktur am Femur

Der anteriore Schaft von vier Femora aus dem Kollektiv der Westfriedhofproben (vgl. Kapitel 2.1.1.1) wurde zum Test der intraindividuellen Variabilität der Knochenkompakta in zwei Bachelorabschlussarbeiten verwendet (Müller, 2017, Mussauer, 2017).

2.1.3.2) Nachverbrennungsversuch

Proben von zehn Femora des Westfriedhofkollektivs wurden verwendet, um im Rahmen einer Bachelorabschlussarbeit zu testen, ob die Nachverbrennung unvollständig verbrannter (ca. 300°C) Knochenstücke zu einer besseren Anwendbarkeit histomorphometrischer Auswertungsmethoden solche Knochenfunde führt (Fetzer, 2018).

2.2) Methoden

Nachfolgend werden die in dieser Dissertation angewendeten Methoden zur Vorbereitung der histologischen Untersuchung und anschließenden Auswertung dargestellt und erläutert.

2.2.1) Mazeration des Rechtsmedizinmaterials

Vor der weiteren Bearbeitung mussten die Knochen des rechtsmedizinischen Probenmaterials nach der Entnahme mazeriert werden. Mazerationstechniken werden angewandt, um Weichgewebereste von Knochen oder Zähnen zu entfernen (Offele et al., 2007). Die Proben wurden zunächst für zwei Stunden mit H_2O_{dest} gewässert. Anschließend wurden sie in Diethylether (Firma Roth, Rotipuran $\geq 99,5\%$, p.a., stab.) überführt und auf einem Schüttler im Abzug unter Eiskühlung für vier Tage dort stehengelassen. Die Eiskühlung war notwendig, um während des Auftauens und Inkubierens in Diethylether auftretende Verwesungsprozesse zu vermeiden. Der Ether wurde regelmäßig ausgetauscht. Danach folgte ein manuelles Entfernen der noch an den Femurquerschnitten anhaftenden Muskel- und Sehnenreste mit einem Skalpell. Daraufhin wurden die Knochen in eine Biozymlösung, bestehend aus Biozym F, Biozym SE (LaVita natürlich e.K., Kempen) und H_2O_{dest} , im Verhältnis 1:10 unter Luftabschluss in einem Wasserbad bei 50-60 °C für drei Tage inkubiert. Die Proteinase in Biozym dient dazu die restlichen noch an den Knochen anhaftenden Proteine abzubauen, während die ebenfalls enthaltene Lipase fettlösend wirkt. Danach wurden die Knochen in destilliertes Wasser überführt und dort für weitere drei Tage in einem Wasserbad bei 70 °C unter regelmäßigem Wässern stehengelassen. Abschließend wurden die Proben mit destilliertem Wasser im Ultraschallbad gereinigt, bis keine Trübung mehr auftrat.

2.2.2) Reinigung und Zerkleinerung

Verbrennungsreihen:

Die für die Erstellung von Verbrennungsreihen vorgesehenen Femora bzw. Tibiae des Westfriedhofmaterials (Tabelle 1) wurden zur Grobreinigung unaufgetaut für zwei Stunden *in toto* in H_2O_{dest} gewässert, grob manuell gereinigt und anschließend über Nacht bei $-18^{\circ}C$ eingefroren. Anschließend wurden die Epiphysenenden mit einer Bandsäge (Scheppach) entfernt und die Knochen anterior-posterior zerteilt. Die verbleibende anteriore Hälfte wurde dann in elf Positionen á 1-1,5 cm Höhe und Breite (je nach Gesamtlänge des Schaftes) zerteilt. Die anteriore Hälfte wurde verwendet, da auf die Verwendung von Geflechtknochen verzichtet werden sollte.

Diese elf Stücke wurden jeweils nochmals mittig halbiert, was in zwei korrespondierenden Hälften der elf Positionen entlang des anterioren Langknochenschaftes resultierte (Abbildung 14). Die Proben wurden daraufhin im Ultraschallbad mit H_2O_{dest} gewaschen, bis keine Trübung mehr auftrat. Anschließend wurden die Knochenproben zum Trocknen auf ein Vlies gelegt.

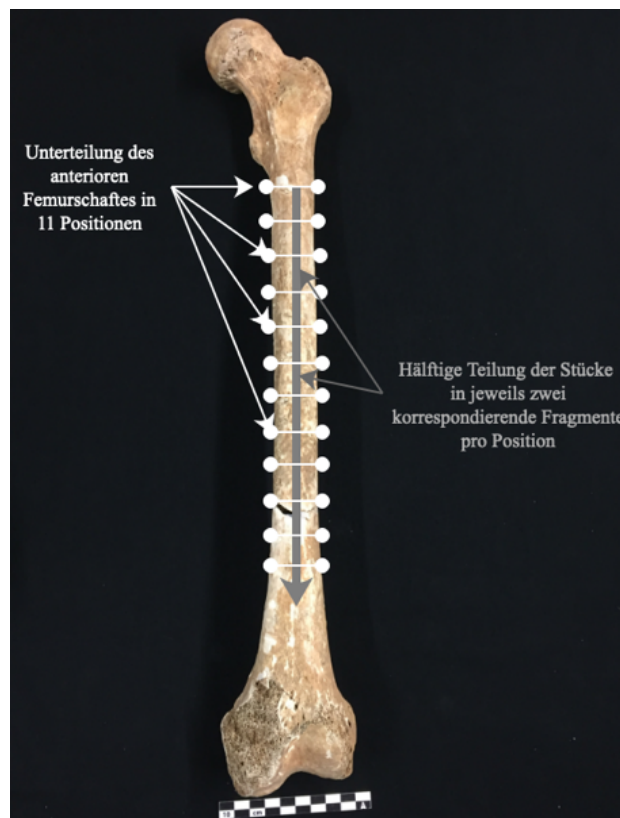


Abbildung 14: Teilung des anterioren Femurschaftes zur Erstellung korrespondierender Fragmente für die Anfertigung der Verbrennungsreihe;

Vergleich korrespondierender Proben im unverbrannten Zustand und nach Verbrennung bei $950^{\circ}C$:

Da nicht das gesamte Knochenkollektiv des Westfriedhofmaterials für die Erstellung von Verbrennungsreihen verwendet werden konnte, wurde an diesen Querschnitten zunächst eine anterior-posteriore Teilung vorgenommen. Anschließend erfolgt eine Halbierung der anterioren Hälfte. Dies liegt der Tatsache zugrunde, dass von einigen Femora bzw. Tibiae nur Querschnitte von ca. 2 cm Höhe vorhanden waren,

Rechtsmedizinproben:

Da es sich bei dem Probenmaterial aus dem Kollektiv der Rechtsmedizin lediglich um kleinere Querschnitte des Femurschafts handelte, wurden diese lediglich anterior-posterior geteilt und die anteriore Hälfte nochmals mittig halbiert, resultierend in zwei korrespondierenden Fragmenten.

2.2.3) Soxhlet

Das Material des Westfriedhofs und das Probenmaterial aus der Rechtsmedizin wurden vor der weiteren Bearbeitung dem Soxhlet-Extraktionsverfahren unterzogen. Die Anwendung des Soxhlet-Extraktionsverfahrens dient der Entfettung der Proben, um das Einbetten der Proben zur Herstellung der histologischen Präparate zu gewährleisten (Abbildung 15). Für die vorliegende Arbeit wurde zur Entfettung der Proben Diethylether (Firma Roth, Rotipuran $\geq 99,5\%$, p.a., stab.) verwendet. Diethylether (ca. 400-500 ml) wird in einem mit Watte gefüllten Rundkolben (Firma Schott Duran 500 ml) durch einen Heizpilz bis zum Siedepunkt ($34,6^{\circ}\text{C}$) erhitzt. Dadurch geht der Ether in einen gasförmigen Zustand über und kondensiert am angeschlossenen Rückflusskühler (Normschliff Gerätebau Wertheim) wieder. Vom Rückflusskühler aus tropft der flüssige Diethylether kontinuierlich in die angeschlossene Extraktionshülse (Firma Isolab), in welcher sich die Knochenproben befinden. Sobald ein Flüssigkeitsmaximum erreicht ist, läuft der Ether durch ein Ablaufsiphon an der Extraktionshülse zurück in den Rundkolben. Dies funktioniert nach dem Heberprinzip. Die im Rundkolben enthaltene Watte dient dazu, die durch den Diethylether extrahierten Fette aufzunehmen. Durch diese sich anreichernden gelösten Fette nimmt die Watte allmählich eine gelbe Färbung an. Dieser Prozess wurde solange weitergeführt, bis die Watte keine weitere Gelbfärbung mehr aufwies. Dies entsprach für die Rechtsmedizin- und Westfriedhofproben jeweils einer Zeitdauer von etwa 60 Stunden. Da es sich bei Ether um ein flüchtiges Medium handelt wurde während des Versuchsaufbaus darauf geachtet, dass alle Verbindungen (zwischen Rückflusskühler und Extraktionshülse sowie zwischen Extraktionshülse und Rundkolben) fest mittels Parafilm (Parafilm M, Firma Laboratory Film, Bemis) verschlossen sind.

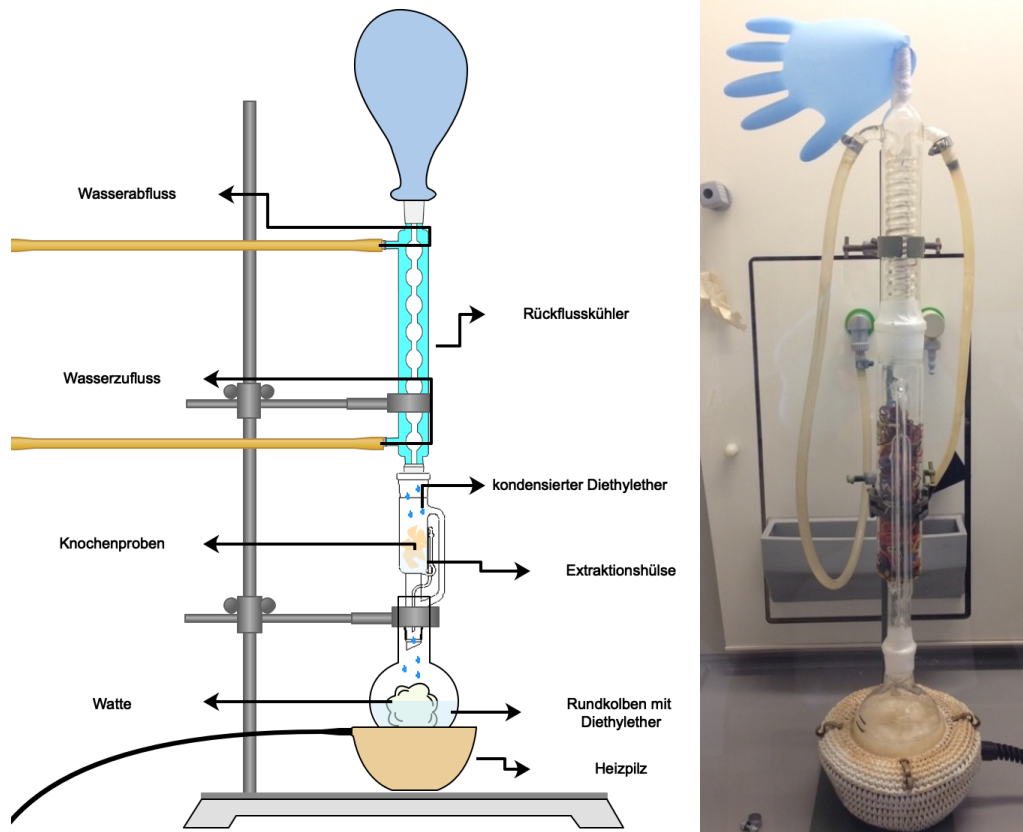


Abbildung 15: Schematische (links) und tatsächliche (rechts) Darstellung des Soxhlet-Extraktionsverfahrens;

2.2.4) Verbrennung

Bei den für die Verbrennungsreihenversuche vorgesehenen Proben wurden jeweils elf Fragmente entlang des anterioren Langknochenschaftes von Femur und Tibia bei Verbrennungstemperaturen von 100 bis 1000°C experimentell verbrannt in Stufen von 100°C unter wenig Luftzufuhr im Muffelofen. Die andere korrespondierende Hälfte des anterioren Schaftes diente bei der späteren Auswertung als unverbrannte Referenzprobe zum Vergleich. Von den restlichen Proben (aus Westfriedhofs- und Rechtsmedizinkollektiv) wurde eine Hälfte als unverbrannte Referenz aufbewahrt und die andere Hälfte bei 950°C verbrannt.

Vor der Verbrennung wurden alle Knochenfragmente mit einer Schieblehre in Höhe, Breite und Dicke vermessen und mittels einer Feinwaage (Firma Ohaus, Typ EX 125D) gewogen. Anschließend wurden die Proben in den Muffelofen (Firma Heraeus, Typ M104) gestellt (jeweils 20 Proben je Temperaturstufe) und erhitzt. Ab Erreichen der vorgesehenen Verbrennungstemperatur wurde die Temperatur für die Dauer von einer Stunde gehalten. Anschließend wurde der Ofen ausgeschaltet und die Proben im Ofen ausgekühlt.

Nach der Verbrennung und dem Abkühlen wurden die Proben erneut vermessen und gewogen, um Schrumpfung und Gewichtsverlust zu dokumentieren.

2.2.4) Einbetten

Die Herstellung der histologischen Präparate konnte für alle Probenkollektive gleichermaßen durchgeführt werden. Dafür mussten die Knochenproben in ein Einbettmedium fixiert werden, um die Stabilisierung des Knochenmaterials während des Schneidevorgangs zu gewährleisten. Das Einbetten erfolgte nach dem Protokoll von Herrmann et al. (Herrmann et al., 1991). Dafür wurde das Kunstharz „Biodur E12“ (Firma Gunther von Hagens) verwendet, welches mit dem Härter „Biodur E1“ (Firma Gunther von Hagens) in einem Gewichtsverhältnis von 100:28 (abgewogen mittels Analysewaage, PM4600, Firma Mettler) unter langsamen Rühren für mindestens zehn Minuten, bzw. bis keine Schlierenbildung mehr erkennbar war, vermischt werden musste. Vor der Herstellung des Kunstharz-Härter-Gemisches musste das Kunstharz über Nacht in einem Wärmeschrank (Firma Salvis) bei 50°C inkubiert werden, um bei Raumtemperatur auskristallisiertes Harz durch das Erwärmen wieder zu verflüssigen. Die in Plastikgläsern vorgelegten Proben wurden mit dem Kunstharz übergossen, bis sie vollständig bedeckt waren. Anschließend wurden die Plastikgläser in einen Wärmeschrank (Firma Salvis), welcher als Exsikkator diente, überführt. An den Wärmeschrank war eine Vakuumpumpe (B-160 Vacobox, Firma Büchi) angeschlossen, wodurch Vakuum (auf ca. 90-100 mbar) gezogen werden konnte. Dies diente dazu, dass das Kunstharz die mit Luft gefüllten Räume der Knochenfragmente durch Verdrängung der Luftbläschen vollständig durchdringen konnte, um den Knochen während des Schneidens zu festigen. Dies war besonders bei verbranntem Knochenmaterial essenziell, da verbrannte Knochenproben wegen des Kollagenverlusts oft spröde und brüchig sind. Das Vakuum wurde für 24 Stunden gehalten, dann wurde der Wärmeschrank langsam belüftet. Die Proben wurden für 48 Stunden im belüfteten Wärmeschrank stengelassen. Dann wurde der Wärmeschrank auf eine Temperatur von 35°C erhitzt und die Proben für weitere 24 Stunden stengelassen.

2.2.5) Herstellung der Dünnschnitte

Die Anfertigung der Knochendünnschnitte erfolgte mit einem Sägemikrotom (Firma Leica, Typ SP1600), welches mit einer Diamanttrennscheibe ausgestattet ist.

Vor der Präparation der Knochendünnschnitte wurden die ausgehärteten Proben zunächst aus den Plastikgläsern geklopft. Dann wurden die Biodurblöckchen an einer Seite mittels einer wassergekühlten Tellerschleifmaschine (Firma Struers, Dap-V) mit einer Körnung von 220 (SiC-Papier, Firma Struers) plan geschliffen, um die Proben auf der Objekthalterung des Sägemikrotoms mit einem wasserfesten Sekundenkleber (Firma Uhu) befestigen zu können. Die Objekthalterung wurde im Sägemikrotom eingespannt.

Zunächst wurde ein Anschnitt ohne Feinjustierung des Knochens erstellt. Dieser diente einerseits dazu, überschüssiges Biodurmaterial zu entfernen und andererseits dazu, in die Knochenprobe zu schneiden, um von dort ausgehend planparallele Dünnschnitte zu erstellen. Dabei wurde die Objekthalterung mit der Geschwindigkeitsstufe 10 an das Sägeblatt herangefahren und dann für den Anschnitt auf Stufe 8 herunterreguliert.

Von jeder Probe wurden mindestens drei Querschnitte erstellt. Dabei wurde die Objekthalterung ebenfalls mit Stufe 10 an das Sägeblatt herangefahren und dann auf Stufe 5 bis 6 zur Erstellung des

Dünnschnitts herunterreguliert. Die Dünnschnitte der unverbrannten Referenzproben wurden je nach Erhaltungszustand des Knochens auf Stufe 7 bis 8 geschnitten.

Für die unverbrannten Referenzproben wurden Dünnschnitte mit einer Schnittdicke von 70-100µm erstellt, für die verbrannten Proben lag die Schnittdicke bei 70-300µm aufgrund der Porosität durch den Kollagenverlust (Abbildung 16).

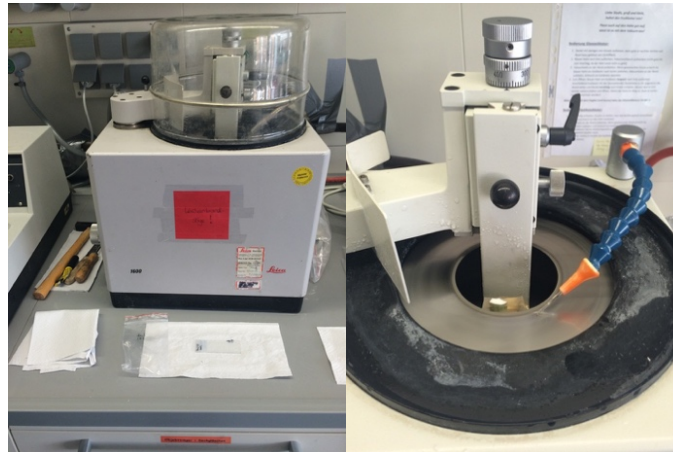


Abbildung 16: Sägemikrotom (Leica 1600) zur Erstellung der histologischen Dünnschnitte

Die Proben wurden auf Objektträger (Größe 76x26 mm, geschnitten, Firma Roth) übertragen und dort für 24 Stunden getrocknet. Anschließend wurden sie mit dem Kunstharzkleber Eukitt (Histofluid, Marienfeld Laboratory Glasware) auf neue Glasobjektträger fixiert. Nach weiteren 24-48 Stunden Trocknung wurden die Dünnschnitte mit der Tellerschleifmaschine mit Schleifpapieren unterschiedlicher Körnung (Sic-Papier Körnung 500, 800, 1200, Firma Struers) heruntergeschliffen, bis keine Überlagerung der histologischen Strukturen im mikroskopischen Bild mehr erkennbar war und die Schnittdicke aller Dünnschnitte unter 100 µm lag.

Danach wurden die Proben mit Einbettmedium überschichtet, dieses glattgestrichen und mittels eines Deckgläschens (Größe 24x60 und 24x40 mm, Firma Roth) verschlossen. Dies dient dazu, die Proben für die histologische Untersuchung haltbar zu machen. Nach mindestens 48 Stunden Trocknung konnten die Präparate histologisch untersucht werden.

2.2.6) Histologische Untersuchung und Fotodokumentation

Zur mikroskopischen Untersuchung und der damit verbundenen Bilddokumentation der histologischen Schnitte wurde ein Durchlichtmikroskop (Axioskop 2 plus, Firma Zeiss comp., Jena) verwendet. Dieses war mit einer CCD-Kamera (AxioCamMrc color, Firma Zeiss comp., Jena) versehen, welche 1300x1030 Pixel abbildet und für die Übertragung des Mikroskopbildes auf den Computerbildschirm fungiert. Das Kamerabild konnte mithilfe des Programms AxioVision 4.8.1 sichtbar gemacht und dokumentiert werden, womit auch die Erstellung der histologischen Bilder für die folgende Auswertung ermöglicht wurde. Zunächst wurde von allen Präparaten mindestens ein Übersichtsbild bei 50facher Vergrößerung im Hellfeld und mit polarisiertem Licht an derselben Stelle, jeweils im periostalen und mittigen Bereich der Kompakta erstellt. Anschließend wurden mindestens drei Bilder von jeder Probe (photographiert im Hellfeld und im polarisierten Licht an derselben Stelle)

zur histologischen Analyse bei 100facher Vergrößerung erstellt, ebenfalls jeweils im periostalen und mittigen Bereich der Kompakta. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Bilder an drei unterschiedlichen Stellen im Knochen, welche sich nicht überlappen, aufgenommen wurden.

2.2.7) Definition der histomorphometrischen Parameter

Die histologische Auswertung der Knochendünnschnitte erfolgte im periostalen und mittigen Bereich der Kompakta, soweit dies möglich war. Im periostalen Bereich der Kompakta, welcher meist für histologische Altersbestimmungsmethoden herangezogen wird, bildet die Knochenmikrostruktur durch das appositionelle Dickenwachstum nicht das tatsächliche biologische Alter eines Individuums ab. Dies findet sich auch teilweise bei senilen Individuen. Dabei tritt kontinuierlicher Anbau am periostalen Rand des Knochens auf, welcher zum Erhalt des Knochens dient (Lazenby, 1990a, Lazenby, 1990b{Burr, 1992}).

Dagegen wird anhand der Knochenmikrostruktur im mittleren Bereich der Kompakta eine Näherung an das tatsächliche biologische Sterbealter erzielt. Die histomorphometrischen Parameter und deren Berechnung, anhand derer die Knochenmikrostruktur bewertet wurde, sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Definition und Berechnung der histomorphometrischen Parameter (nach (Ericksen, 1991, Doppler, 2008));

Parameter	Definition	Abkürzung
Sekundäre Osteone	sekundäre Osteone in 1 mm ²	SekOst
Typ-II-Osteone	Typ-II-Osteone in 1 mm ²	TypIIOst
Osteonfragmente	fragmentierter Osteone in 1 mm ²	OstFrag
Anzahl intakter Osteone	SekOst + TypIIOst	OstInt
Osteonenpopulationsdichte	OstFrag + OstInt	OPD
Resorptionslakunen	Resorptionslakunen in 1 mm ²	ResLak
Havers'sche Kanäle	intakte Havers'sche Kanäle in 1 mm ²	HavKan
nicht-Havers'sche Kanäle	intakte nicht-Havers'sche Kanäle in 1 mm ²	NonHavKan
Volkman'sche Kanäle	Volkman'sche Kanäle in 1 mm ²	VolkM
Anteil resorbierter Knochen [%]	Anzahl der Kästchen (von 100) ausgefüllt mit Resorptionslakunen (>50%)	ResKno
Anteil an General- bzw. Grundlamellen [%]	Anzahl der Kästchen (von 100) ausgefüllt mit nicht-umgebautem Knochen (>50%)	GenLam
Anteil an osteonalem Knochen [%]	Anzahl der Kästchen (von 100) ausgefüllt mit osteonalem Knochen (>50%)	OstKno
Anteil an fragmentalem Knochen [%]	Anzahl der Kästchen (von 100) ausgefüllt mit Osteonfragmenten (>50%)	FragKno
Durchschnittliche Osteonfläche [mm ²]	OstKno/100/OstInt	OstFl
Durchschnittlicher Osteonumfang [mm]	$2 * \pi * \sqrt{\frac{OstFl}{\pi}}$	OstU
Durchschnittlicher Osteondurchmesser[mm]	$2 * \sqrt{\frac{OstFl}{\pi}}$	OstD
Aktivierungsfrequenz [Anzahl/mm ² /Jahr]	AOC/ (chronologisches Alter -12.5)	AktFr
Knochenbildungsrate [mm ² /mm ² /Jahr]	ActFr*OstFl	BFR
Accumulated osteon creations	$\beta * OPD$ mit $\beta = \frac{1}{1 - (\frac{OPD}{OPD_{Asymptote}})^{3.5}}$	AOC

Die gezählten histomorphometrischen Parameter (SekOst, TypIIOst, OstFrag, OstInt, ResLak, HavKan, NonHavKan, VolkM) wurden gemäß den Definitionen von Ericksen (Ericksen, 1991) bewertet, da für unverbranntes Probenmaterial innerhalb der Arbeitsgruppe mit dieser Methode die besten Ergebnisse erzielt werden konnten.

Für die Auswertung der histologischen Bilder wurde das Programm Gimp2 verwendet. Dabei wurden die im Hellfeld und im polarisierten Licht aufgenommenen Bilder eines visuellen Feldes im Knochen übereinandergelegt, um eine bestmögliche Sichtbarkeit der histologischen Strukturen zu gewährleisten. Dann wurde ein aus 100 Kästchen bestehendes und 1mm² großes Gitternetz über den Bildausschnitt gelegt. Innerhalb dieses Gitternetzes wurden die histomorphometrischen Parameter bewertet und ausgezählt. Die Auszählung der histologischen Bilder erfolgte dabei blind und randomisiert (Alter und Geschlecht waren zu diesem Zeitpunkt nicht bekannt), um eine mögliche Beeinflussung des Ergebnisses zu vermeiden (Abbildung 17).

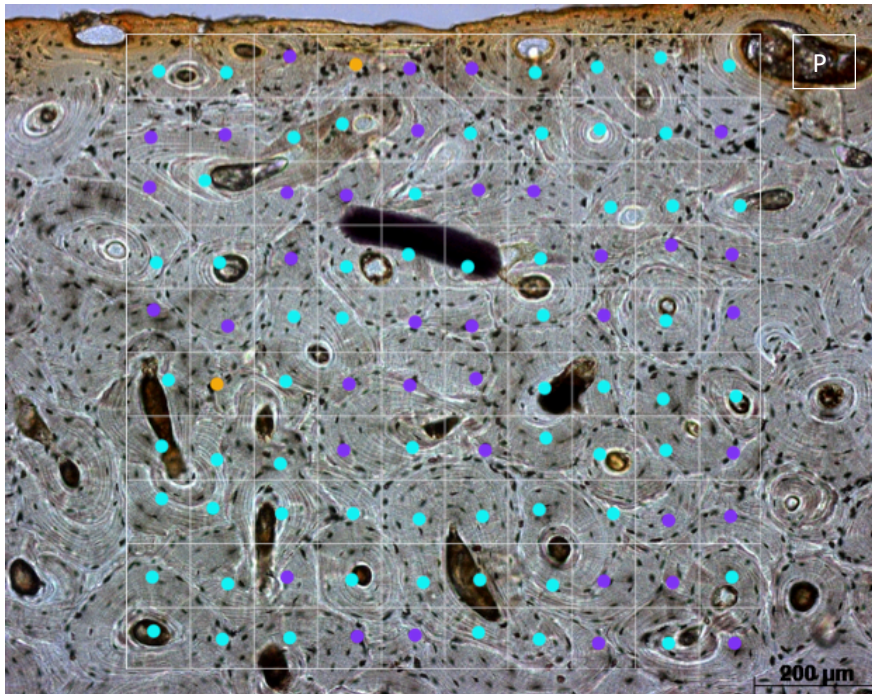


Abbildung 17: Darstellung der histomorphometrischen Auswertung eines histologischen Bildes bei 100facher Vergrößerung innerhalb eines 1mm² großen Gitternetzes; P = periostaler Rand; lilafarbene Punkte stehen für den prozentualen Anteil an Osteonfragmenten, türkisblaue Punkte für den Anteil sekundärer Osteone und orange Punkte für den Anteil nicht-umgebauten Knochens – ein Kästchen wurde zu dem jeweiligen Anteil gezählt wenn sich die Struktur in mehr als 50% des Kästchens fand;

2.2.8) Histologische Altersbestimmung mit bekannten Formeln

Zum Test der Anwendbarkeit verschiedener bestehender histologischer Altersschätzungsformeln auf verbranntes und unverbranntes Knochenmaterial wurden für das Kollektiv der Femurproben die Methoden nach Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) für Femora, Ericksen (Ericksen, 1991) und Hummel und Schutkowski (Hummel and Schutkowski, 1993) verwendet. Für das Kollektiv der Tibiaproben wurden die Methoden nach Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley and Ubelaker, 1978) für Tibiae und Uytterschaut (Uytterschaut, 1985) angewendet.

2.2.8.1) Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978)

Da es sich bei den Kollektiven der Westfriedhofs- und der Rechtsmedizinproben jeweils um ein überaltertes Kollektiv handelt, wurden lediglich die Regressionsformeln zur Verwendung intakter Osteone und Osteonfragmente verwendet. Dies liegt daran, dass sich überalterten Individuen keine oder kaum nicht-Havers'sche Kanäle oder nicht-umgebauter Knochen finden. Für die Anwendung der Gleichungen nach Kerley (Kerley, 1965) bzw. nach der Anpassung der Formeln durch Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) musste die Sichtfeldgröße an das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Mikroskop bzw. den zu Auswertung gewählten Sichtfeldausschnitt angepasst werden. Dabei wurde der rechteckige Ausschnitt des Kamerabildes als Sichtfeld verwendet und nach den Anpassungsformeln von Wolf (Wolf, 1999) bzw. Novacek (Novacek, 2012) wurde der Korrekturfaktor mit $KF = \frac{2,06}{s}$ errechnet. Für die histologische Altersschätzung werden die ausgezählten Parameterwerte (=x) in die Regressionsformeln eingesetzt.

Osteone (SEE±9,19 Jahre) – Femur:

$$Y = 2,278 + 0,187 * (1,38 * x) + 0,00226 * (1,38 * x^2)$$

Osteone (SEE±10,53 Jahre) – Tibia:

$$Y = -13,4218 + 0,660 * x$$

Osteonfragmente (SEE±6,98 Jahre) – Femur:

$$Y = 5,241 + 0,509 * (1,38 * x) + 0,017 * (1,38 * x^2) - 0,00015 * (1,38 * x^3)$$

Osteonfragmente (SEE±8,42 Jahre) – Tibia:

$$Y = -26,997 + 2,501 * x - 0,014 * x^2$$

Für die Errechnung des histologischen Alters wurden die Mittelwerte der Parameter von drei ausgewerteten Bildern jeweils im periostalen und mittigen Bereich der Kompakta gebildet und dieser mit dem Faktor 4 multiplizierte Mittelwert wurde in die Regressionsgleichung eingesetzt. Dies dient zur Kompensation, da in der vorliegenden Arbeit nicht wie bei Kerley (Kerley, 1965) an vier verschiedenen Positionen des Femur- bzw. Tibiaquerschnitts ausgewertet werden sollte.

2.2.8.2) Ericksen (1991)

Die Altersbestimmung nach Ericksen (Ericksen, 1991) erfolgte im anterioren periostalen Bereich der Femurkompakta. Dabei werden insgesamt acht histomorphometrische Parameter (sekundäre Osteone, Typ-II-Osteone, Osteonfragmente, Resorptionslakunen, Havers'sche Kanäle, nicht Havers'sche Kanäle und die prozentualen Anteile lamellären, resorbierten und osteonalen Knochens) in einem 1 mm² großen Gitternetz ausgezählt. Für die histologische Altersbestimmung wurden die von Ericksen (Ericksen, 1991) empfohlenen Regressionsgleichungen angewendet. Die Unterschiede in der Sichtfeldgröße bei Ericksen (0,886 mm²) zur vorliegenden Arbeit (1 mm²) wurden vernachlässigt, da bei Ericksen die Zählungen aus fünf verschiedenen Sichtfeldern aufaddiert und durch 4,43 dividiert werden, um auf die Parameteranzahl innerhalb eines Quadratmillimeters rückzuschließen.

Geschlechtsunabhängig (SEE±10,8 Jahre):

$$Y = 67,43 + 1,11 * SekOst + 2,46 * TypII Ost + 0,20 * OstFrag - 1,57 * NonHavKan - 0,30 * GenLam - 0,39 * OstKno$$

Männlich (SEE±10,05Jahre):

$$Y = 57,98 + 1,36 * SekOst + 1,90 * TypII Ost + 0,32 * OstFrag - 1,62 * NonHavKan - 0,17 * GenLam - 0,33 * OstKno$$

Weiblich (SEE±10 Jahre):

$$Y = 63,39 + 0,55 * SekOst + 3,12 * TypII Ost + 0,20 * OstFrag + 0,92 * ResLak - 1,57 * NonHavKan - 0,31 * GenLam - 0,24 * OstKno$$

2.2.8.3) Hummel und Schutkowski (1993)

Hummel und Schutkowski (Hummel and Schutkowski, 1993) erstellten eine Regressionsgleichung anhand experimentell verbrannter Knochenfragmente und bestätigten deren Anwendbarkeit. Die Regressionsgleichung bezog sich auf die Anzahl der sichtbaren Havers'schen Kanäle, da bei Leichenbrandmaterial im histologischen Schnitt in Abhängigkeit von der Verbrennungstemperatur durch den Einfluss primären Kohlenstoffs oftmals nur noch diese erkennbar sind.

$$\text{Anzahl Havers'scher Kanäle (SEE±10,9 Jahre): } y = 1,79 * x - 11,41$$

2.2.8.4) Uytterschaut (1985)

Die histologische Altersbestimmung nach der Methode von Uytterschaut (Uytterschaut, 1985) wurde an sechs verschiedenen histologischen Feldern durchgeführt, jeweils zwei im dorsalen, lateralen und medialen Bereich der Tibiadiaphyse und die Zählungen gemittelt. Da das Tibiakollektiv nur eine geringe Probenmenge umfasste, wurde nur in drei histologischen Feldern gezählt und gemittelt. Die Auszählung erfolgt bei Uytterschaut (Uytterschaut, 1985) in einem 1mm² großen Gitternetz bei 100facher Vergrößerung. Dabei wird der prozentuale Anteil an Osteonen und Osteonfragmenten quantifiziert.

$$\text{Osteone und Osteonfragmente [\%] (SEE±6,29 Jahre): } y = 0,989 * x + 3,31$$

2.2.9) Statistik

Die deskriptive Statistik sowie die statistische Auswertung wurden mit der freien Programmiersprache „R“ und den dafür erstellten Packages „ggplot2“, „EnvStats“, „ppcor“, „corrplot“, „reshape2“, „data.table“, „tidyverse“, „dplyr“ und „pheatmap“ durchgeführt (Wickham, 2016, Millard, 2013, Kim, 2015, Wickham, 2007, Dowle et al., 2019, Wickham und Wickham, 2017, Wickham et al., 2018, Kolde, 2019, Wei et al., 2017, Wei und Simko, 2017). Alle Parameter aller Datensätze wurden mittels des **Shapiro-Wilk-Tests** auf Normalverteilung getestet. Da über die meisten Temperaturstufen und Positionen für die histomorphometrischen Parameter keine Normalverteilung bestätigt werden konnte, wurden im weiteren Verlauf nicht-parametrische Prüfverfahren angewandt. Das

Signifikanzniveau wurde dabei zur Widerlegung der Nullhypothese auf 5% ($p < 0,05$) gelegt, ein hochsignifikantes Ergebnis lag bei 1% ($p < 0,01$). Der **Wilcoxon-Rangsummentest** diente der Ermittlung signifikanter Unterschiede der Anzahlen der verschiedenen Parameter über die Verbrennungstemperaturen bzw. zwischen den Positionen entlang des anterioren Langknochenschaftes. Zudem diente er dazu herauszufinden, für welche der untersuchten histomorphometrischen Parameter sich signifikante verbrennungsbedingte Unterschiede ergeben. Des Weiteren wurde damit untersucht, ob diese Unterschiede bereits unter und zwischen den unverbrannten Proben entlang der Positionen des Langknochenschaftes festgestellt werden können, oder ob signifikante Unterschiede zwischen dem periostalen und mittigen Bereich der Kompakta für die untersuchten Parameter bestehen, Zuletzt wurde versucht zu ermitteln, ob sich signifikante Unterschiede in der Häufung der Parameter (im nativen und im verbrannten Zustand) zwischen den Geschlechtern erkennen lassen. Zusammenhänge wurden anhand des Chi²-Tests erarbeitet. Für die Untersuchung der linearen Korrelationen verschiedener histomorphometrischer Parameter miteinander wurde der **„Pearson“-Korrelationstest** verwendet. Mithilfe des Korrelationskoeffizienten (r) wurde die Stärke des linearen Zusammenhangs zweier Variablen untersucht bzw. ausgedrückt. Dieser kann allerdings nicht den kausalen Zusammenhang der beiden Variablen erklären, lediglich die Tatsache, dass die Änderung der einen Variable eine Änderung der anderen Variable bedingen kann (Allan, 1982). Darüber hinaus hängt die Aussagekraft der statistischen Tests maßgeblich von der Größe der untersuchten Stichprobe ab. Es wurde darüber hinaus untersucht, ob die Anwendung eines sogenannten „Schrumpfungskoeffizienten“ – generiert aus der Breiten- und Dickenschrumpfung jedes Fragments jedes Individuums bei jeder Temperaturstufe – auf die Zählungen der Parameter im verbrannten Zustand zu Ergebnissen führt, welche an die Werte der unverbrannten Referenzproben angenähert sind. Zuletzt wurden die Datensätze von solchen Zählungen bereinigt, die für den Gesamtdatensatz als Ausreißer identifiziert werden konnten. Dies erfolgte mithilfe der statistischen „PCOut-Methode“ des RStudio-Pakets „MVOutlier“ (Filzmoser et al., 2008, Filzmoser et al., 2005). Diese Methode basiert auf robusten Distanzen vom Mittelpunkt der Daten, ist multivariat und auf nicht-normalverteilte Datensätze anwendbar. Dieser Test ist zudem probat für solche Daten, deren Änderungen auf sogenannten sekundären Prozessen beruhen. Dazu zählen beispielsweise Individualalter, Umwelt oder Geschlecht. Dem Testprinzip zufolge müssen Werte, die im Verhältnis zum Gesamtdatensatz extrem ausfallen, nicht unmittelbar als Ausreißer vom Gesamtdatensatz gewertet werden, sondern können sich an dessen äußeren Grenzen befinden. Im Rahmen dieser Testmethode wird, zusätzlich zu den robusten Distanzen zum Mittelwert, die Verteilung der Daten miteinbezogen. Die oberen und unteren zwei Prozent der Werte am Extremwert (Grenzwert) werden untersucht (97,5 Perzentil). Zur Prüfung des Zusammenspiels multipler linearer Zusammenhänge verschiedener Variablen (Parameter) mit dem Individualalter wurden multiple lineare Regressionsmodelle erstellt. Dies diente ebenso dem Zweck, Regressionsgleichungen zur histologischen Altersbestimmung an verbrannten menschlichen Skelettfunden aufzustellen. Die Beurteilung der erstellten Regressionsmodelle erfolgte anhand der Regressionsmodell-Statistik und anhand statistischer Plots zur Beurteilung der Güte von Regressionsmodellen. Zudem wurden diese Modelle auf ihre Anwendbarkeit anhand der Datensätze

selbst getestet. Mithilfe der grundlegenden linearen Regressionsmodelle wurden zunächst darauf getestet, welche Parameter einen signifikanten Einfluss auf das Modell haben. Daraufhin wurden die am meisten signifikanten Parameter zur Erstellung verschiedener Regressionsmodelle herangezogen. Zum Modelltest wurden die Regressionsmodelle an zufällig ausgewählten Proben, die $\frac{2}{3}$ des Gesamtdatensatzes ausmachten, neu erstellt. Das übrige Drittel wurde zum Testen des Modells verwendet.

3.) Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der experimentellen Verbrennungsversuche und damit einhergehende statistisch relevante Veränderungen in der Knochenmikrostruktur im Vergleich mit dem unverbrannten Referenzmaterial dargestellt. Da es sich um einen sehr umfangreichen Gesamtdatensatz handelt, wird nicht auf Einzelergebnisse eingegangen, sondern der Fokus auf eine zusammengefasste Darstellung der Ergebnisse gelegt. Die Einzeldaten bzw. die einzelnen Auswertungstabellen können im Anhang eingesehen werden. Zu Beginn werden die im Rahmen dieser Dissertation angefertigten studentischen Abschlussarbeiten samt deren Ergebnissen kurz vorgestellt. Danach wird auf die allgemeinen Veränderungen (makroskopische Änderungen in Form von Gewichtsverlust und Schrumpfung sowie farbliche Veränderungen der Knochenmikrostruktur) des Knochenmaterials durch die einwirkenden Verbrennungstemperaturen eingegangen. Die anschließende statistische Auswertung gliedert sich in die Femur- und Tibia-Kollektive, welche getrennt voneinander betrachtet werden. Für jedes der beiden Probenkollektive wurde die Auswertung sowohl am periostalen Rand als auch in der Mitte der Kompakta durchgeführt. Abschließend zu jeder Auswertung (Femur und Tibia – beide Bereiche der Kompakta) wurden multiple lineare Regressionsmodelle zur histologischen Altersbestimmung erstellt und getestet.

3.1) Intraindividuelle Variabilität der Knochenmikrostruktur am Femur

Im Rahmen dieser Dissertation wurden zwei Bachelorarbeiten angefertigt, welche sich mit der Quantifizierung der Veränderung der Zusammensetzung histomorphometrischer Parameter aufgrund der Biomechanik des Knochens entlang des anterioren Schaftes (proximal nach distal) der Femurdiaphyse im unverbrannten Zustand befassten. Im Zuge dessen wurden Unterschiede zwischen Ergebnissen unterschiedlicher Altersbestimmungsformeln untersucht. Zuletzt wurde der „Inter- und Intra-Observer-Error“ untersucht. Die Ergebnisse dieser beiden Arbeiten zeigten auf, dass sich das histologisch bestimmte Alter entlang des anterioren periostalen Femurschaftes nicht signifikant ändert, wodurch geschlossen wurde, dass die Position entlang des Femurschaftes, aus welcher das zu untersuchende Langknochenfragment stammt, keine entscheidende Rolle für die histologische Individualaltersschätzung spielt (Mussauer, 2017, Müller, 2017, Otto und Grupe, in prep.).

3.2) Nachverbrennung des Knochenmaterials

Im Rahmen einer weiteren Bachelorabschlussarbeit wurde untersucht, ob eine Nachverbrennung unvollständig verbrannter Knochenfragmente, welche durch Reste primären Kohlenstoffs eine schwarze Färbung der Mikrostruktur aufweisen, eine Verbesserung der Sichtbarkeit bzw. Erkennbarkeit der zur histologischen Altersbestimmung relevanten Strukturen bewirken kann. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Nachverbrennung des Knochenmaterials eine deutliche Verbesserung der Sichtbarkeit erzielt wird (Otto et al., in prep., Fetzer, 2018).

3.3) Makroskopische Änderungen durch den Einfluss der Verbrennung

3.3.1) Farbliche Veränderung

In Abbildung 18 sind die hitzebedingten makroskopischen Veränderungen der farblichen Erscheinung der Knochenfragmente dargestellt. Durch die einwirkenden Temperaturen verändern die Knochenfragmente ihre Farbe von hellbraun (RT- 100°C) über dunkelbraun (200-300 °C), bräunlich-grau (400-500°C) zu bläulich-weiß (600-700 °C) und nehmen zuletzt eine kreidig-weiße Farbe an (800-1000 °C).

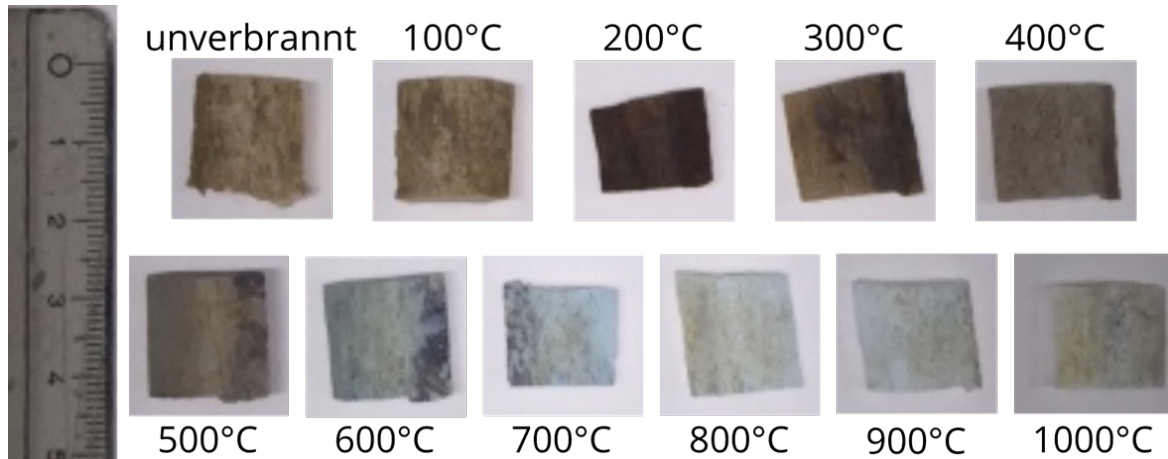


Abbildung 18: Makroskopische Änderungen der Knochenfärbung über die Verbrennungsreihe (RT bis 1000°C in Schritten von 100°C);

Nach der erfolgten experimentellen Verbrennung und Schnittherstellung konnten nicht alle Proben histologisch untersucht werden. In Tabelle 1 im Anhang sind die Proben aufgelistet, an denen keine histologische Untersuchung vorgenommen werden konnte.

Im **periostalen Bereich** der Femurkompakta konnten insgesamt 12 histologische Schnitte nicht ausgewertet werden, da die Kompakta am posterioren Ende der Diaphyse zu dünnwandig war. Bei drei histologischen Schnitten konnte aufgrund der schlechten Sichtbarkeit der histologischen Strukturen (Verbrennungstemperatur 300 °C) keine Auswertung durchgeführt werden.

Im **mittigen Bereich** der Femurkompakta ließen sich weitaus weniger Schnitte histologisch auswerten. In insgesamt 21 Fällen lag dies an der Sichtbarkeit der histologischen Strukturen, in 159 Fällen an der Dicke der Kompakta und einmal an der schlechten Qualität des Knochenfragments (Pos 5 unverbrannt).

Für die **periostale Tibiakompakta** konnte insgesamt viermal bei einer Verbrennungstemperatur von 1000 °C aufgrund einer zu dünnwandigen Kompakta nicht ausgewertet werden, im **mittigen Bereich** lag dies fünfmal an der Sichtbarkeit der histologischen Strukturen und 27mal an der für eine histologische Auswertung im mittigen Bereich zu dünnwandigen Kompakta.

Der **endostale Bereich** der Kompakta war während der Verbrennung häufig so stark geschrumpft oder beschädigt, dass vor allem in den höheren Temperaturstufen (ab 700 °C) keine Auswertung in diesem Bereich mehr durchgeführt werden konnte. Daher wurde wegen des großen Ausmaßes fehlender Daten davon abgesehen, für den Datensatz der endostalen Kompakta eine gesonderte Auswertung durchzuführen.

3.3.2) Schrumpfung

Femur

Abbildung 19A-C zeigt die mittlere prozentuale Schrumpfung in Breite, Höhe und Dicke der experimentell verbrannten Fragmente entlang des Femurschaftes über die angewendeten Temperaturstufen von 100 bis 1000 °C in Schritten von 100°C (Tabelle 5). Die *Höhenschrumpfung* zeigt eine hohe Variabilität bereits bei einer Verbrennungstemperatur von 100 °C, wird danach geringer, ist zwischen 200 und 300 °C nur noch sehr gering und steigt dann in ihrer Variabilität weiter an. Die größte Höhenschrumpfung tritt bei einer Temperatur von 1000 °C auf (- 11,9 %) (Tabelle 5 und Abbildung 19A). Die *Fragmentbreite* weist zunächst nur eine geringe negative Schrumpfung bis leicht positive Ausdehnung bis zu einer Temperatur von 300 °C auf. Zwischen 400 und 600 °C ist die Breitenschrumpfung nur gering variabel (-7,48 % bei 400 °C bis -5,84% bei 600 °C), danach werden die prozentuale Breitenschrumpfung und deren Variabilität deutlich größer und die maximale Schrumpfung (-18,93%) wird bereits bei einer Verbrennungstemperatur von 700 °C erreicht (Tabelle 5 und Abbildung 19B). Anschließend schwankt die prozentuale Breitenschrumpfung nur noch zwischen - 17,10 und - 18,57 %. Die *Dickenschrumpfung* weist keine kontinuierliche Entwicklung auf und variiert stark über alle Verbrennungstemperaturen hinweg, wobei sie die höchste negative Größenänderung bei 700 °C (- 48,65%) und die höchste positive Veränderung bei 900°C hat (57,42 %) (Tabelle 5 und Abbildung 19C). Abbildung 19D und Tabelle 5 zeigen den mittleren *Gewichtsverlust* über die Verbrennungstemperaturen hinweg. Zwischen 100 und 200°C ist der temperaturbedingte prozentuale Gewichtsverlust noch gering (7-10 %), steigt zwischen 300 °C und 700°C (23-38 %) an und stagniert schließlich zwischen 700 und 1000 °C (38-41 %). Bei einer Temperatur von 1000°C ist der Gewichtsverlust am größten, mit einem prozentualen Verlust von 41 %.

In Tabelle 2 (siehe Anhang) sind die Einzelwerte der Höhen-, Breiten und Dickenschrumpfung und des Gewichtsverlusts pro Individuum über die Verbrennungstemperaturen aufgelistet. Tabelle 3 (siehe Anhang) zeigt die mittleren, maximalen und minimalen Schrumpfungswerte jeder Temperaturstufe.

Tabelle 5: Mittlere Höhen-, Breiten- und Dickenschrumpfung [%] und mittlerer Gewichtsverlust [% und g] der Femur-Verbrennungsreihen des Westfriedhofmaterials (100-1000 °C, n=28) und der Rechtsmedizinproben (1000 °C, n=8) über die Verbrennungstemperaturen hinweg;

Temperatur [°C]	Höhenschrumpfung [%]	Breiten-schrumpfung [%]	Dicken-schrumpfung [%]	Gewichts-verlust [%]	Gewichts-verlust [g]
100	-7,80	-2,51	-14,20	7	0,16
200	1,73	1,81	19,67	10	0,25
300	1,07	-1,68	-5,90	23	0,45
400	-6,90	-7,48	-14,45	33	0,80
500	-2,81	-5,81	0,35	35	0,85
600	-2,01	-5,84	-25,30	36	0,82
700	-6,75	-18,93	-48,65	38	0,83
800	-9,44	-17,10	6,73	40	0,80
900	-8,40	-17,84	57,42	40	0,76
1000	-11,90	-18,57	-25,09	41	1,13

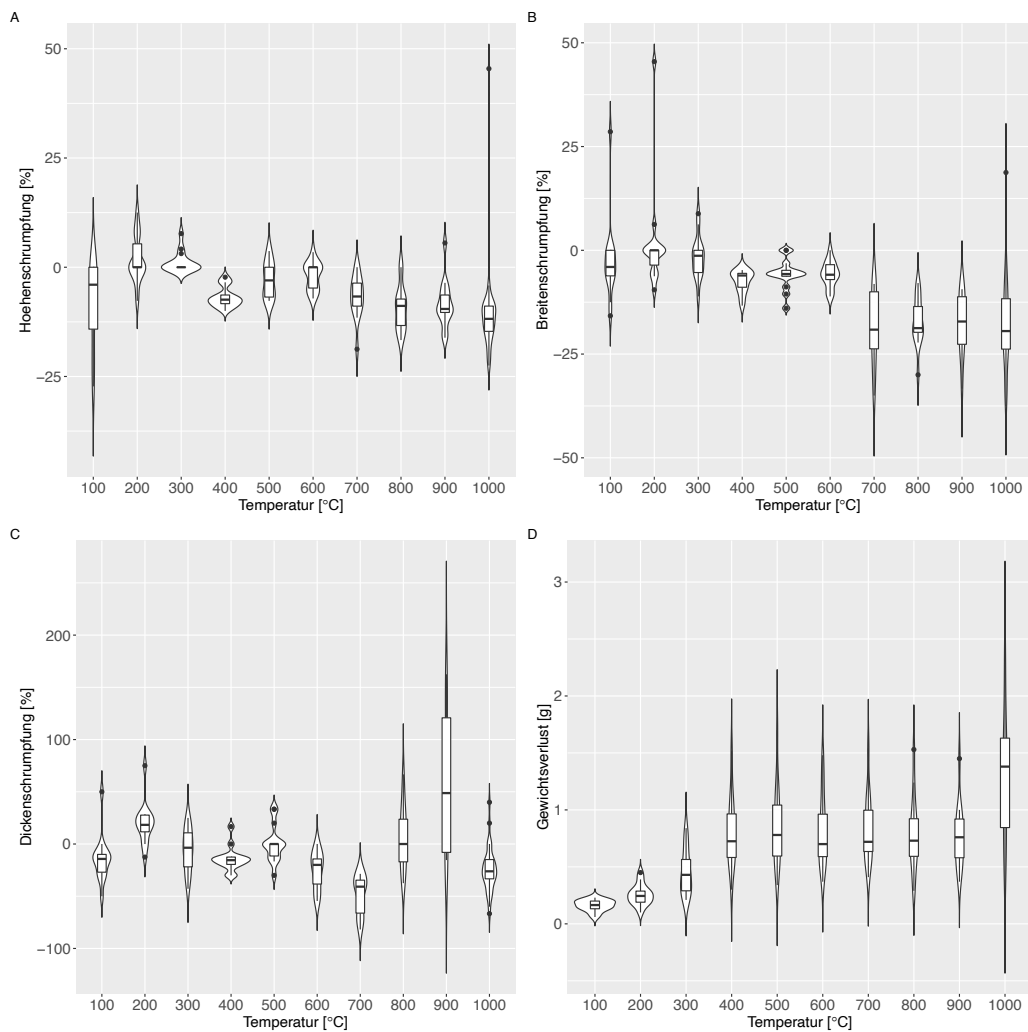


Abbildung 19: A-D: Prozentuale Höhen-, Breiten- und Dickschrumpfung, sowie Gewichtsverlust [g] der Femur-Verbrennungsreihen des Westfriedhofmaterials (100-1000 °C) und der Rechtsmedizinproben (1000 °C) über die angewendeten Verbrennungstemperaturen (100-1000 °C);

Tibia

Zur experimentellen Verbrennung konnten insgesamt nur *fünf* Tibiaschäfte verwendet werden, wodurch die gezeigten mittleren Schrumpfungen und der mittlere Gewichtsverlust nur als exemplarische Darstellung dienen können.

In Abbildung 20 sind die prozentuale Breiten-, Dicken- und Höhenschrumpfung, sowie der Gewichtsverlust [g] aus den experimentellen Verbrennungen der Tibiae aus dem Westfriedhofkollektiv über die Temperaturstufen aufgezeigt.

Für die mittlere *Höhenschrumpfung* entlang der Temperaturstufen der Verbrennungsreihe ist zunächst eine Ausdehnung (+17,4 % bei 100 °C), gefolgt von einer zunehmenden Schrumpfung (-1,2 % bei 300 °C bis maximal -15,8 % bei 1000 °C) feststellbar (Tabelle 6 und Abbildung 20A). Die *Breitenschrumpfung* weist einen nahezu kontinuierliche Zunahme mit steigender Verbrennungstemperatur auf (-0,62 % bei 100 °C bis -21,7 % bei 1000 °C) (Tabelle 6 und Abbildung 20B). Für die mittlere *Dickschrumpfung* zeigt sich eine weitaus größere Variabilität über die Verbrennungstemperaturen im Vergleich zu den beiden anderen Schrumpfungsdimensionen (-5,3 % bei 100 °C, +11,5 % bei 500 °C und -35,6% bei

1000 °C). Zudem wird bereits bei 700°C das Schrumpfungsmaximum für diesen Parameter erreicht (39,8 % bei 700 °C) (Tabelle 6 und Abbildung 20C).

Grundsätzlich weisen mittlere Höhen-, Breiten- und Dickschrumpfung eine höhere Variabilität auf als die experimentell verbrannten Femora. Dies ist primär durch die reduzierte Probenmenge bedingt, wodurch extreme Veränderungen einzelner Proben stärker ins Gewicht fallen können.

Der prozentuale *Gewichtsverlust* über die Verbrennungsreihen liegt bei 7 (100 °C) bis maximal 40 % (800 und 1000 °C) mit einer Gewichtsreduktion von 0,13 bis 0,73 g. Der mittlere Gewichtsverlust ist zunächst zwischen 100 und 200 °C nur gering, steigt zwischen 200 und 300°C deutlich an und ist ab 400 bis 1000°C mit kleinen Schwankungen relativ konstant (Tabelle 6 und Abbildung 20D).

Die Einzelwerte der Höhen-, Breiten- und Dickschrumpfung und des Gewichtsverlusts pro Individuum über die Verbrennungstemperaturen, sowie die Werte der maximalen und minimalen prozentualen Höhen-, Breiten-, Dicken- und Gewichtsschrumpfung sowie der Gewichtsverlust sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 im Anhang zu finden.

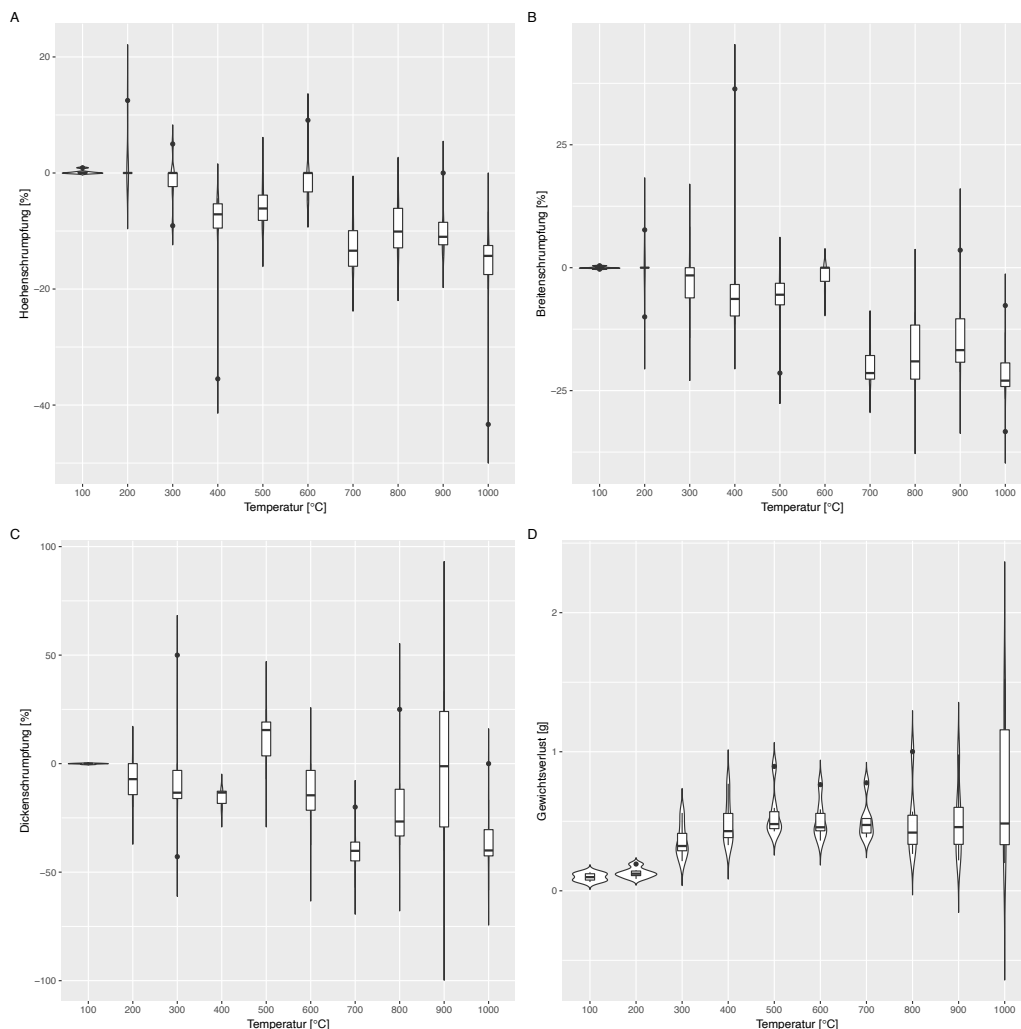


Abbildung 20: A-D: Prozentuale Höhen-, Breiten- und Dickschrumpfung und Gewichtsverlust [g] der Tibia-Verbrennungsreihen des Westfriedhofmaterials (100-1000 °C) und der Rechtsmedizinproben (1000 °C) über die angewendeten Verbrennungstemperaturen (100-1000 °C);

Tabelle 6: Mittlere Höhen-, Breiten- und Dickenschumpfung [%] und mittlerer Gewichtsverlust [% und g] der Tibia-Verbrennungsreihen des Westfriedhofmaterials (100-1000°C) über die Verbrennungstemperaturen hinweg.

Temperatur [°C]	Höhen-schrumpfung [%]	Breiten-schrumpfung [%]	Dicken-schrumpfung [%]	Gewichtsverlust [%]	Gewichtsverlust [g]
100	17,39	-0,62	-5,30	7%	0,10
200	2,08	-0,38	-8,10	10%	0,13
300	-1,202	-2,70	-6,05	25%	0,36
400	-11,51	-0,22	-15,52	31%	0,49
500	-5,69	-7,18	11,47	33%	0,55
600	-0,0031	-1,60	-14,96	35%	0,51
700	-12,82	-20,14	-39,78	38%	0,51
800	-9,70	-17,54	-18,04	40%	0,50
900	-9,46	-13,25	-2,52	39%	0,51
1000	-15,78	-21,70	-35,56	40%	0,74

3.4) Mikroskopische Änderungen

3.4.1) Herstellung und Auswertbarkeit der histologischen Schnitte

Bei einer Verbrennungstemperatur von 200 °C zeigte sich eine wesentliche Verschlechterung Sichtbarkeit histologischer Strukturen. Diese ist bedingt durch die hohe Brüchigkeit der Knochenfragmente bei dieser Temperaturstufe, weshalb in den meisten Fällen nur relativ dicke histologische Schnitte (250 – 350 µm Schnittdicke) erstellt werden konnten, die dann mittels der Tellerschleifmaschine vorsichtig heruntergeschliffen wurden. Trotz Vorsicht war oft kein allzu starkes Herunterschleifen möglich, weshalb bei der Auswertung noch Überlagerungen verschiedener histologischer Ebenen auftraten.

Bei einer Verbrennungstemperatur von 300 °C liegt die erschwerte Sichtbarkeit und Auswertbarkeit der histologischen Strukturen an der Schwarzfärbung des Knochenfragments durch Einlagerungen von primärem Kohlenstoff. Zudem ist bei dieser Verbrennungstemperatur die Fragilität des Knochenfragmentes extrem hoch. Daher konnten die Dünnschnitte meist nicht so weit geschliffen werden, dass die zu untersuchenden Parameter der Knochenmikrostruktur wieder vollständig sichtbar waren (vgl. Abbildung 21). Im Gegensatz zu der gänzlichen Schwarzfärbung der Knochenmikrostruktur bei 300 °C stellt diese Behandlung eine erhebliche Verbesserung der Qualität dar.

Je stärker der Knochendünnschnitt geschliffen und umso dünner die Mikrostruktur wird, desto besser sichtbar werden die einzelnen Strukturen. Jedoch verbleichen die histologischen Strukturen der Knochenmikrostruktur während des Herunterschleifens und sind weniger deutlich voneinander abgrenzbar. Dies ist einerseits durch die immer dünnwandiger werdende Mikrostruktur bedingt, andererseits durch den Einfluss der Verbrennungstemperatur. Das Verbleichen der histologischen Strukturen geschieht erst, wenn die Dünnschnitte bereits annähernd durchscheinend sind. Aber auch dann können meist Umrisse der Osteone, Osteonfragmente und Havers'schen Kanäle detektiert werden. Darüberhinaus verkleinerte sich durch den verbrennungsbedingten Schrumpfungsvorgang die auswertbare Fläche eines Knochenfragmentes. Dadurch fand ein geringfügiger Übergang zwischen dem **periostalen** in den **mittigen Bereich** der Kompakta statt. In den meisten Fällen fanden sich allerdings dennoch genug auswertbare Stellen, um eine Überlappung in der Auswertung zwischen **periostalem** und **mittigem Bereich** der Kompakta zu vermeiden. Auch bei der Auswertung im **mittigen**

Bereich wurde versucht, alternative Stellen zur Vermeidung einer solchen Überlappung zu finden. Dabei musste zudem darauf geachtet werden, eine Überlappung von **Kompaktamitte** und **Endost** zu vermeiden. Durch die hitzebedingte Schrumpfung war der mittige Bereich allerdings entsprechend verkleinert und respektive auch der endostale Bereich der Kompakta. Dieser kann generell ohnehin nur schwer ausgewertet werden aufgrund des hohen Vorkommens von resorbiertem, porösem Knochen. Dadurch kann allerdings die Problematik entstehen, dass sich im **mittigen** Bereich des Knochenfragmentes keine Stellen zur histologischen Auswertung finden – auch wenn dieser besser erhalten ist als der **periostale** Rand des Knochenfragments. In einigen Fällen ist die Kompakta bereits ab Position 8 oder 9 bzw. Verbrennungsgraden von 700 bis 800 °C zu dünnwandig für eine Auswertung geworden. Wenn dies bereits bei 700 °C der Fall war konnte meist auch das unverbrannte korrespondierende Fragment nicht histologisch bewertet werden.

3.4.2) Überblick über farbliche Veränderungen

Die farblichen Veränderungen der Knochenmikrostruktur durch die einwirkenden Temperaturen während der experimentellen Verbrennung gehen aus Abbildung 21 hervor. Die Knochenmikrostruktur weist verbrennungsbedingt verschiedene Stufen bräunlicher Verfärbung auf, von einem helleren braun ausgehend (100-200 °C) über nahezu schwarz (300 °C), gefolgt von verschiedenen Stufen unterschiedlich dunkler Braunfärbung (400-600 °C) und zuletzt in eine schwarz-dunkelbraune Farbgebung endend (700-1000 °C). Abbildung 21 zeigt zudem, dass sich auch die Sichtbarkeit der histomorphometrischen Parameter durch die unterschiedliche Färbung der histologischen Schnitte verändert. Zwischen 100 und 200 °C sind alle histologischen Strukturen gut erkennbar. Bei 300 °C können nahezu keine Einzelstrukturen mehr ausgemacht werden, lediglich Havers'sche Kanäle, nicht Havers'sche Kanäle und Resorptionslakunen sind erkennbar. Zwischen 400 und 600 °C sind die einzelnen Parameter meist gut sichtbar, allerdings treten vermehrt Hitzerisse im histologischen Schnitt auf. Ab 700°C bis hin zu 1000 °C nimmt die Zahl der vorhandenen Hitzerisse kontinuierlich zu und die einzelnen histologischen Parameter können schlechter bewertet werden, da sie nichtmehr klar differenziert werden können.

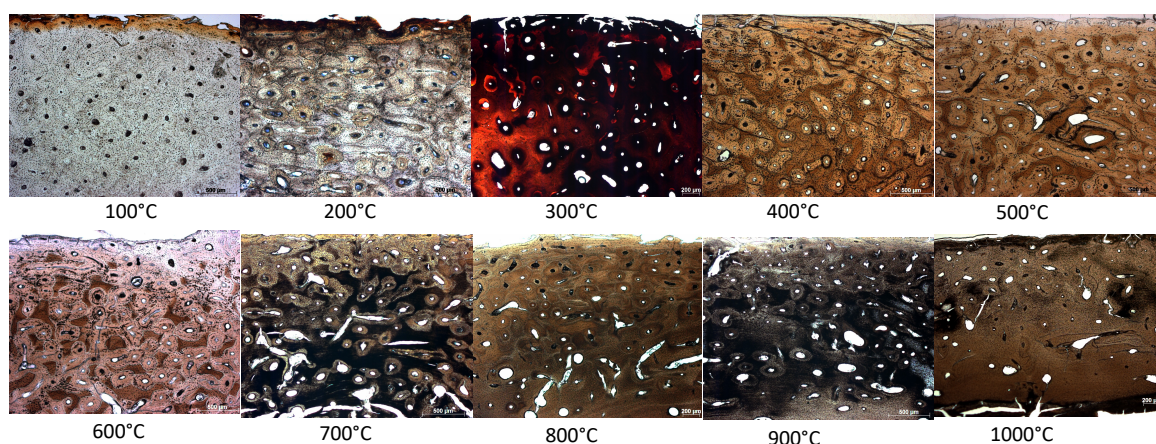


Abbildung 21: Hitzebedingte farbliche Veränderungen der Knochenmikrostruktur über die Verbrennungstemperaturen hinweg;

3.4.3) Test bestehender histologischer Altersbestimmungsformeln

In den Abbildungen zum Test bestehender histologischer Altersbestimmungsformeln ist die Position entlang des anterioren Schaftes für unverbrannte und verbrannte Proben auf der X-Achse dargestellt. Im Falle der kremierten Proben stellt diese eine vereinfachte Darstellung für die Verbrennungstemperaturen zwischen 100 und 1000 °C dar, was den Positionen entlang der Diaphyse entspricht. In einigen Abbildungen fehlen nach Verbrennung einzelne Datenpunkte, was einerseits dadurch bedingt ist, dass diese nach experimenteller Verbrennung nichtmehr histologisch beurteilt werden konnten, in die Beurteilung der unverbrannten Proben jedoch einfließen konnten. Andererseits lässt es sich darauf zurückführen, dass in manchen Fällen die Differenz zwischen tatsächlichem und histologisch berechnetem Alter größer als 100 Jahre bzw. kleiner als -50 Jahre war und somit nicht mehr in die graphische Darstellung einbezogen wurde. In den folgenden Abbildungen ist in roter Farbe die Differenz zwischen tatsächlichem und errechnetem Individualalter für die verbrannten Referenzproben dargestellt, in blauer Farbe die Differenzen für das unverbrannte Probenmaterial entlang der elf bewerteten Positionen der anterioren Diaphyse.

Zum Test der **Anwendbarkeit bereits bestehender histologischer Altersbestimmungsformeln** auf das vorliegende verbrannte und unverbrannte Probenmaterial der *Femora* wurden einige der von Ericksen (Ericksen, 1991), Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) und Hummel und Schutkowski (Hummel und Schutkowski, 1993) erstellten Regressionsgleichungen gewählt. Bei der Methode nach Ericksen (Ericksen, 1991) wurden sowohl geschlechtsunabhängige als auch geschlechtsspezifische Regressionen verwendet, wobei bei den geschlechtsspezifischen ausschließlich die von Ericksen (Ericksen, 1991) empfohlenen Gleichungen verwendet wurden.

Für die Methode nach Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) wurde auf die Verwendung der Regressionsformeln für den Anteil nicht-Havers'scher Kanäle, sowie für den Anteil nicht-umgebauten Knochens verzichtet, da es sich insgesamt um ein deutlich überaltertes Probenkollektiv (29 Individuen der Altersklasse *Senilis*, 4 Individuen der Altersklasse *Maturitas*, 2 Individuen der Altersklasse *Adultas* und ein Individuum der Altersklasse *Juvenis*) handelt. Dies liegt darin begründet, dass bei älteren Individuen (nahezu) kein nicht-umgebauter Knochen und (nahezu) keine nicht-Havers'schen Kanäle mehr vorliegen.

Zur exemplarischen histologischen Altersschätzung in der *Kompaktmitte* der *Femora* wurden nur die Verbrennungsreihen des Westfriedhofkollektivs herangezogen, da für den mittigen Bereich der Femurkompakta generell weniger Proben aus dem Vergleich zwischen RT und 950 °C ausgewertet werden konnten als am periostalen Rand der Femurkompakta (vgl. Kapitel 3.3.1 und Tabelle 1 im Anhang). Zur exemplarischen histologischen Altersschätzung der *Tibiae* wurden nur die Verbrennungsreihen herangezogen.

Auf das vorliegende verbrannte und unverbrannte Probenmaterial der *Tibiaproben* wurden die Regressionsgleichungen von Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley and Ubelaker, 1978) und Uytterschaut (Uytterschaut, 1985) verwendet.

Geschlechtsabhängige Regressionsformel nach Ericksen (1991)

Die Differenz zwischen dem tatsächlichen Individualalter (Sterbealter) und dem mit der *geschlechtsunabhängigen* Regressionsformel nach *Ericksen* (Ericksen, 1991) für das **Periost** errechneten histologischen Alter ist in Abbildung 22 dargestellt.

Die errechneten Alterswerte weisen überwiegend eine Tendenz zu einem histologisch zu niedrig geschätztem Alter auf, da die Werte zumeist über die obere Grenze der Standardabweichung ($\pm 10,8$ Jahre) hinausgehen.

Für Individuum WF45 ist kein Trend erkennbar, da die Werte sowohl im negativen als auch im positiven Bereich über die Grenzen der Standardabweichung hinausgehen. Für die Individuen WF26, WF28 und WF9 liegen die errechneten Differenzen überwiegend innerhalb der in der Regressionsformeln angegebenen Standardabweichung.

Dies gilt auch für die unverbrannten Proben von WF38 entlang des Femurschaftes. Bei Individuum WF34 liegen sowohl die Differenzen der unverbrannten als auch die der verbrannten Proben auf der oberen Grenze der Standardabweichung ($\pm 10,8$ Jahre).

Im Vergleich der Ergebnisse der verbrannten Proben mit ihren unverbrannten Referenzen zeigt sich, dass die von Ericksen (Ericksen, 1991) entwickelte Formel keine verbrennungsbedingte Verschlechterung der Schätzungen aufweist.

Die Differenzen zwischen histologischem und tatsächlichem Sterbealter scheinen durch den Einfluss der Verbrennungstemperaturen tatsächlich in einigen Fällen eher in die Grenzen der Standardabweichung zu fallen als zuvor.

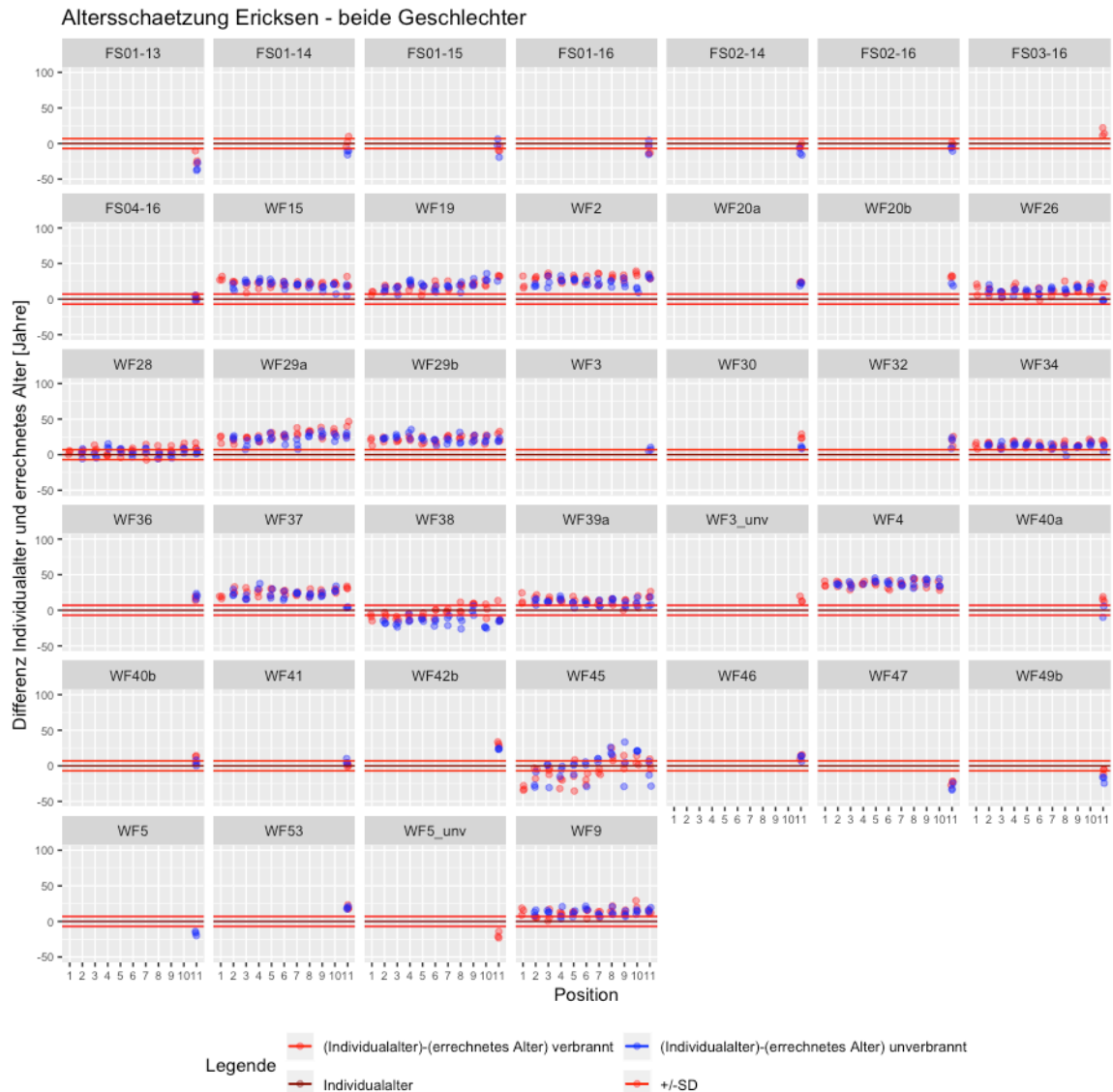


Abbildung 22: geschlechtsunabhängige Altersschätzung nach Ericksen (1991) auf das verbrannte (rot) und unverbrannte (blau) Probenmaterial am periostalen Rand der Femurkompakta; es sind sowohl die Verbrennungsreihen (WF15, WF19, WF2, WF26, WF28, WF29a, WF29b, WF34, WF37, WF38, WF39a, WF4, WF45, WF9), als auch die Proben aus dem Vergleich zwischen unverbrannter Probe und einer Verbrennung bei 1000°C (FS01-13, FS01-14, FS01-15, FS01-16, FS02-14, FS02-16, FS04-16, WF20a, WF20b, WF3, WF30, , WF36, WF40a, WF 40b, WF41, WF42b, WF46, WF47, WF49b, WF5, WF53) zur histologischen Altersbestimmung verwendet worden; auf der X-Achse ist die Position entlang des Femurschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100- 1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem Individualalter (Differenz=0) und die hellroten Linien ober- und unterhalb dem Individualalter spiegeln die angegebene Standardabweichung aus der verwendeten Regressionsformel wider;

Abbildung 23 stellt die Veränderung der Abweichung zwischen errechnetem Alter und tatsächlichem Sterbealter für die geschlechtsunabhängige Formel von Ericksen über die verschiedenen Verbrennungstemperaturen bzw. Positionen des Femurschaftes am *periostalen* Rand der Kompakta dar. In dieser Abbildung entsprechen die Verbrennungstemperaturen (100-1000 °C) den Positionen 2 bis 11 entlang des unverbrannten Femurschaftes. Es wird deutlich, dass für die geschlechtsunabhängige Formel nach Ericksen (Ericksen, 1991) die histologisch geschätzten Alterswerte sowohl für die unverbrannten als auch die verbrannten Proben über alle Temperaturen und Positionen hinweg negativ vom tatsächlichen Sterbealter abweichen. Zwischen 600 und 700 °C zeigen die errechneten Alterswerte eine divergierende Abweichung, da für die unverbrannten

Referenzproben die Abweichung bei 600°C positiv und bei 700 °C negativ ist. Für die verbrannten Proben verhält es sich genau gegensätzlich. Über alle Temperaturen und Positionen hinweg finden sich Alterswerte, welche für die unverbrannten Proben eine deutlich größere Abweichung zeigen als für die unverbrannten Proben.

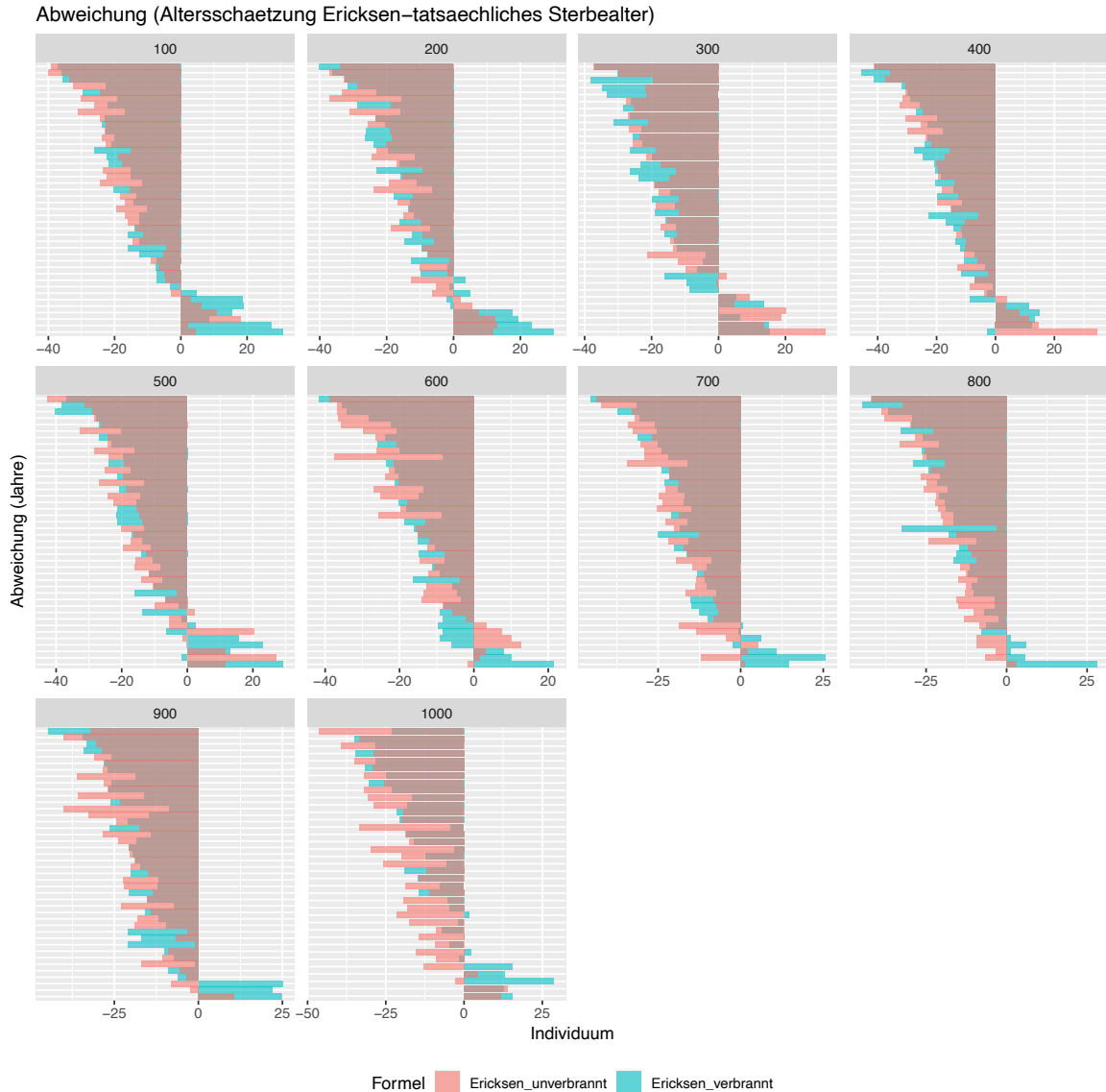


Abbildung 23: Abweichung zwischen der Altersschätzung nach Ericksen (1991) und dem tatsächlichen Sterbealter am periostalen Rand der Femurkompakta, die Abweichungen werden dabei sowohl über die Verbrennungstemperaturen (100 bis 1000°C - türkise Balken) und über die Positionen entlang des Femurschaftes (Verbrennungstemperaturen 100 bis 1000°C entsprechen den Positionen 2 bis 11 - rote Balken) dargestellt;

Abbildung 24 zeigt die Differenzen zwischen histologisch geschätztem und tatsächlichem Sterbealter der Individuen berechnet mit der geschlechtsunabhängigen Regressionsformel nach Ericksen aus der **Kompaktmitte** (Ericksen, 1991). Es wird dabei deutlich, dass bei den meisten Individuen (WF15, WF19, WF2, WF26, WF29a, WF29b, WF34, WF37, WF4, WF9) sowohl entlang des unverbrannten Femurschaftes als auch über die Verbrennungstemperaturen hinweg das histologisch geschätzte Alter deutlich niedriger geschätzt wurde als der Wert des tatsächlichen Sterbealters.

Bei Individuum WF45 lag das histologisch geschätzte Alter deutlich höher als das tatsächliche Sterbealter. Für die Individuen WF38 und WF28 lag das histologisch geschätzte Alter überwiegend

innerhalb der durch die Regressionsformel vorgegebenen Standardabweichung ($\pm 10,8$ Jahre). Für Individuum WF9 konnten ebenfalls einige Alterswerte errechnet werden, welche innerhalb der vorgegebenen Standardabweichung lagen.

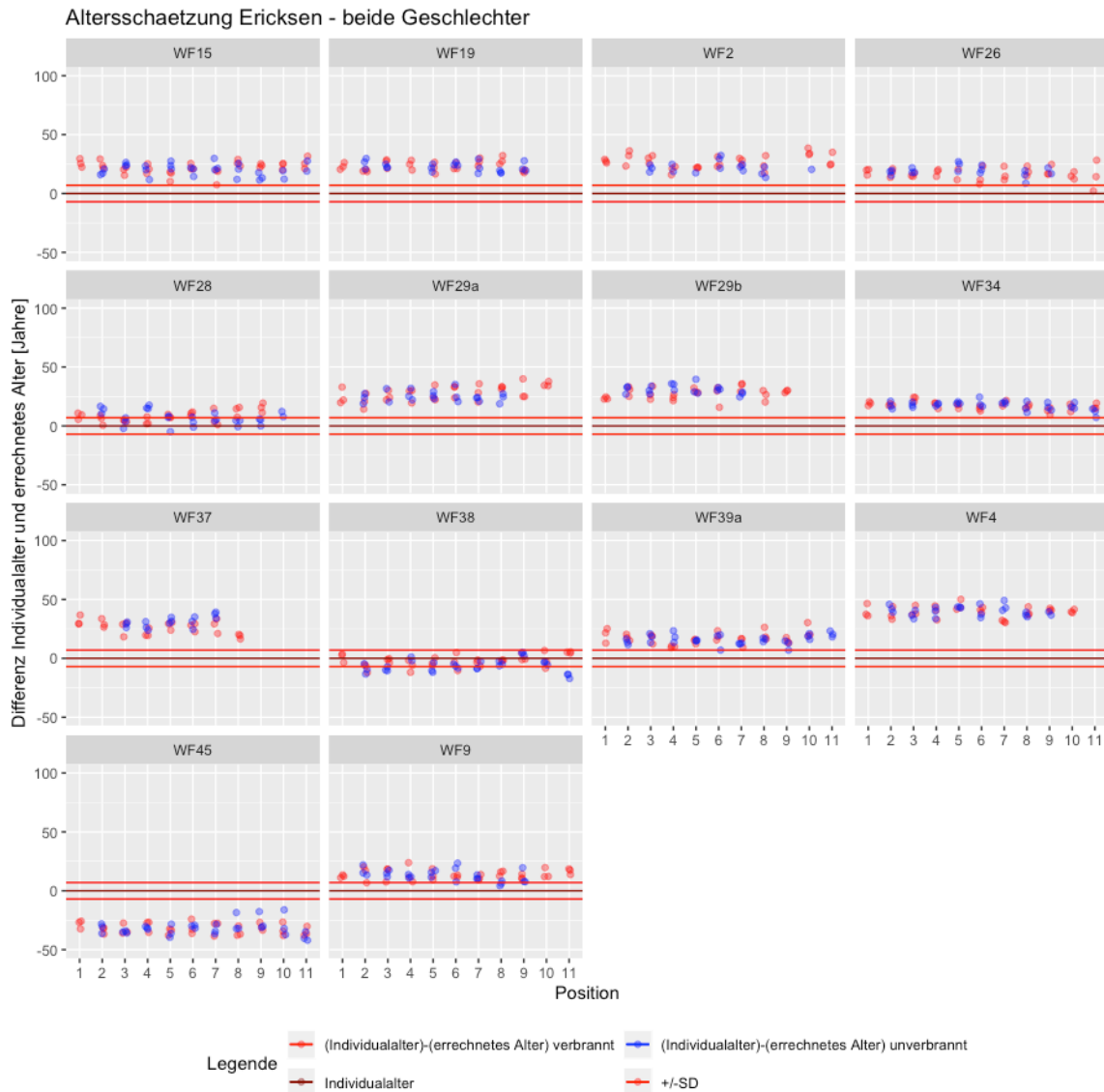


Abbildung 24: geschlechtsunabhängige Altersschätzung nach Ericksen (1991) auf das verbrannte (rot) und unverbrannte (blau) Probenmaterial aus der Kompaktmitte des Femur; es sind ausschließlich die Verbrennungsreihen (WF15, WF19, WF2, WF26, WF28, WF29a, WF29b, WF34, WF37, WF38, WF39a, WF4, WF45, WF9) zur histologischen Altersbestimmung verwendet worden; auf der X-Achse ist die Position entlang des Femurschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100- 1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem Individualalter (Differenz=0) und die hellroten Linien ober- und unterhalb dem Individualalter spiegeln die angegebene Standardabweichung aus der verwendeten Regressionsformel wider;

Abbildung 25 zeigt die Veränderung der Abweichung zwischen errechnetem Alter und tatsächlichem Sterbealter für die geschlechtsunabhängige Formel von Ericksen für die **Kompaktmitte** der Femora. Die Differenz zwischen den errechneten Alterswerten nach Ericksen (Ericksen, 1991) sind bis zu einer Temperatur von 500-600 °C, bzw. Position 6-7 für die verbrannten Proben höher als für das Referenzmaterial. Zwischen Position 8 bzw. 700 °C und Position 10 bzw. 900 °C übersteigen die errechneten Abweichungen der unverbrannten Proben die der verbrannten Proben. Bei Position 11

bzw. einer Temperatur von 1000 °C zeigte sich sowohl eine höhere negative Abweichung der verbrannten Proben als auch eine höhere positive Abweichung der unverbrannten Proben.

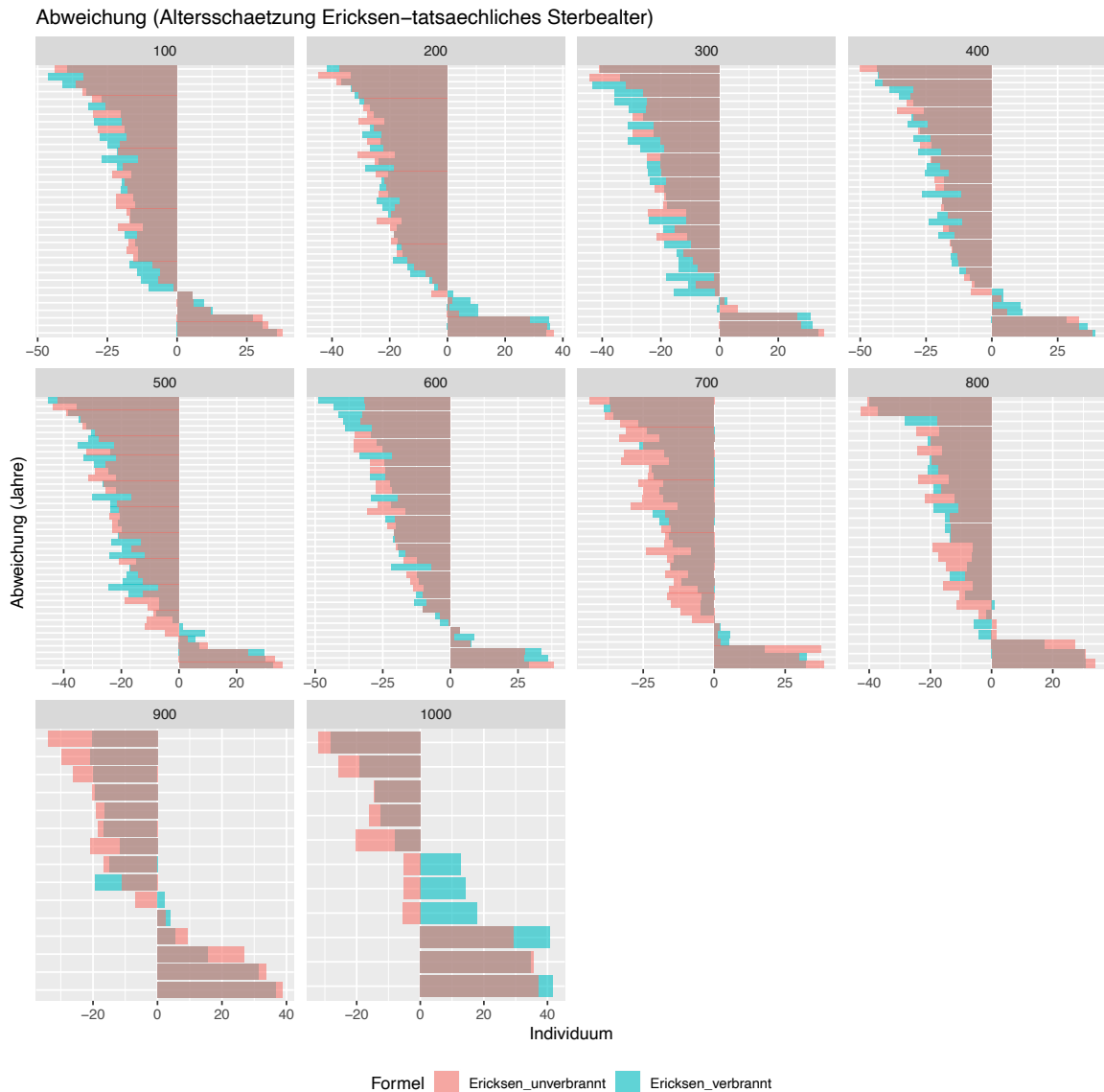


Abbildung 25: Abweichung zwischen der Altersschätzung nach Ericksen (1991) und dem tatsächlichen Sterbealter in der Mitte der Femurkompakta, die Abweichungen werden dabei sowohl über die Verbrennungstemperaturen (100 bis 1000°C - türkise Balken) und über die Positionen entlang des Femurschaftes (Verbrennungstemperaturen 100 bis 1000°C entsprechen den Positionen 2 bis 11 - rote Balken) dargestellt;

Geschlechtsabhängige histologische Altersschätzung nach Ericksen für männliche Individuen

Die Ergebnisse der geschlechtsabhängigen Altersschätzung für männliche Individuen nach Ericksen (Ericksen, 1991) sind in Abbildung 26 (**Periost**) und 27 (**Kompaktamitte**) dargestellt.

Wie schon die errechneten Differenzen aus der geschlechtsunabhängigen Regression am **periostalen** Rand der Kompakta, weichen die der geschlechtsabhängigen Regression sowohl für die verbrannten als auch für die unverbrannten Proben ebenfalls vorwiegend über die positive Standardabweichung hinausgehend vom tatsächlichen Alter ab (Abbildung 26). Für die Individuen WF45 und WF9 konnten allerdings einige Alterswerte errechnet werden, die sich sowohl innerhalb der Standardabweichung (± 10 Jahre) als auch teils mit dem tatsächlichen Alter decken.

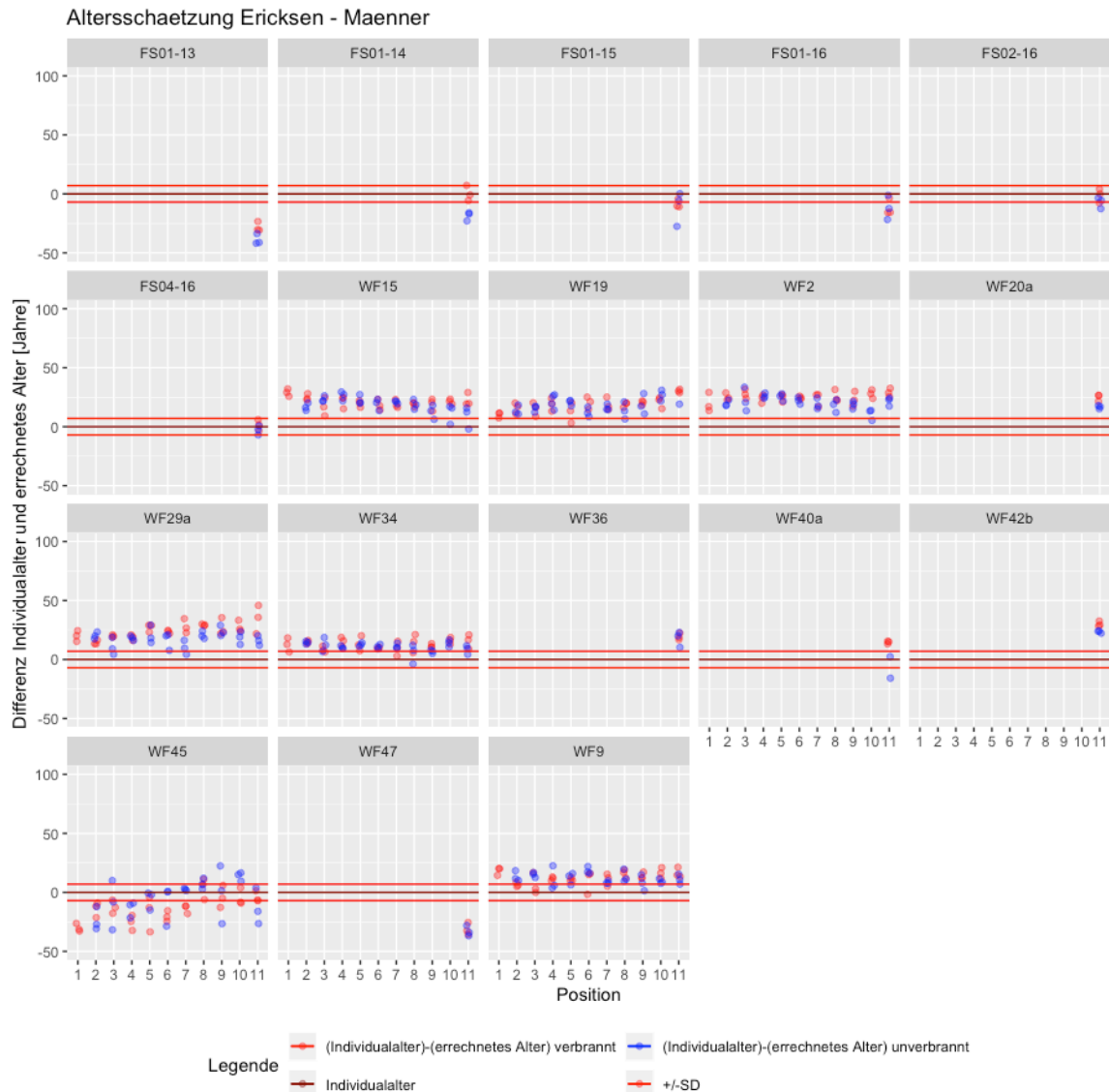


Abbildung 26: geschlechtsabhängige Altersschätzung (Regressionsformel für männliche Individuen) nach Ericksen (1991) auf das verbrannte (rot) und unverbrannte (blau) Probenmaterial am periostalen Rand der Femurkompakta; es sind sowohl die Verbrennungsreihen (WF15, WF19, WF2, WF26, WF28, WF29a, WF29b, WF34, WF37, WF38, WF39a, WF4, WF45, WF9), als auch die Proben aus dem Vergleich zwischen unverbrannter Probe und einer Verbrennung bei 1000°C (FS01-13, FS01-14, FS01-15, FS01-16, FS02-14, FS02-16, FS04-16, WF20a, WF20b, WF3, WF30, , WF36, WF40a, WF 40b, WF41, WF42b, WF46, WF47, WF49b, WF5, WF53) zur histologischen Altersbestimmung verwendet worden; auf der X-Achse ist die Position entlang des Femurschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100-1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem tatsächlichen Alter des Individuums und die hellroten Linien ober- und unterhalb dieser Linie spiegeln die angegebene Standardabweichung aus der verwendeten Regressionsformel wider);

Abbildung 27 zeigt die Differenzen auf, welche sich zwischen den histologischen Altersschätzungen mithilfe der geschlechtsabhängigen Formel für männliche Individuen nach Ericksen (Ericksen, 1991) in der **Kompaktmitte** errechnet wurden. Auch in diesem Fall war das histologische Alter deutlich unter dem tatsächlichen Individualalter angesiedelt. Nur für Individuum WF45 waren die Altersschätzungen höher als das Individualalter. Für die Individuen WF15, WF34 und WF9 konnten allerdings einige Alterswerte histologisch bestimmt werden, welche innerhalb der in der Formel angegebenen Standardabweichung lagen ($\pm 10,05$ Jahre).

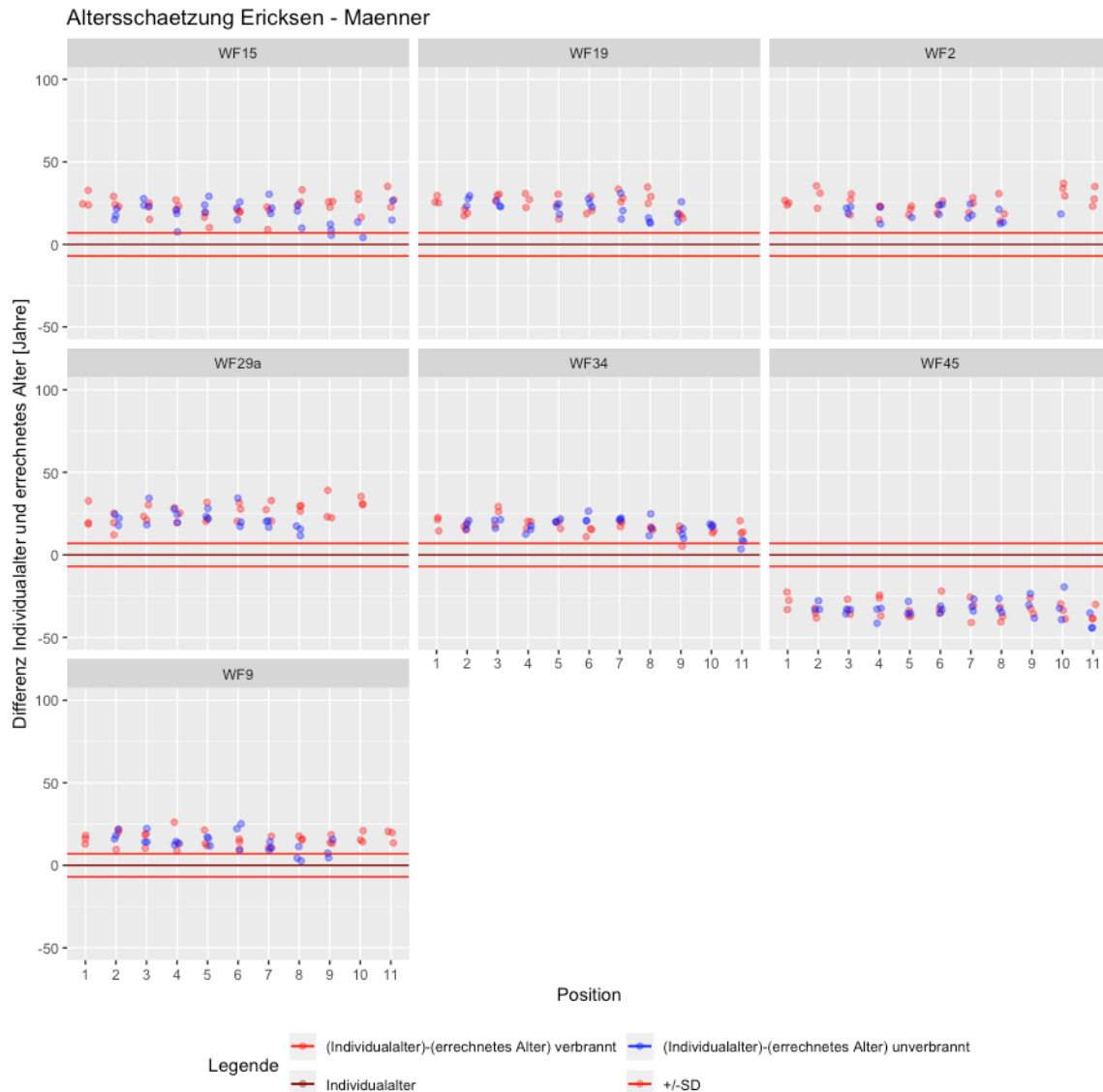


Abbildung 27: geschlechtsabhängige Altersschätzung (Regressionsformel für männliche Individuen) nach Ericksen (1991) auf das verbrannte (rot) und unverbrannte (blau) Probenmaterial in der Kompaktmitte der Femora; es sind ausschließlich die Verbrennungsreihen (WF15, WF19, WF2, WF26, WF28, WF29a, WF29b, WF34, WF37, WF38, WF39a, WF4, WF45, WF9) zur histologischen Altersbestimmung verwendet worden; auf der X-Achse ist die Position entlang des Femurschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100-1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem tatsächlichen Alter des Individuums und die hellroten Linien ober- und unterhalb dieser Linie spiegeln die angegebene Standardabweichung aus der verwendeten Regressionsformel wider;

Geschlechtsabhängige Altersschätzung nach Ericksen (1991) für weibliche Individuen

Für weibliche Individuen sind die Ergebnisse der Differenzen am *periostalen* Rand der Kompakta in Abbildung 28 gezeigt. Wie in den vorherigen Berechnungen weichen die Differenzen zwischen dem tatsächlichen und errechneten Sterbealter im positiven Bereich von der optimalen Differenz und der Standardabweichung (± 10 Jahre) ab. Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse der verbrannten Proben mit den korrespondierenden Referenzproben zeigt sich, wie auch für die geschlechtsspezifische Formel für männliche Individuen, durch den Einfluss der Verbrennungstemperaturen eine deutliche Verschlechterung der Differenz zwischen tatsächlichem und errechnetem Sterbealter. In diesem Fall scheint die Verbrennung der Knochenfragmente sich auf die Ergebnisse der histologischen Altersbestimmung auszuwirken. Allerdings ist auch für die

unverbrannten Referenzproben eine deutliche Abweichung vom Individualalter und den Grenzen der formeligenen Standardabweichung erkennbar.

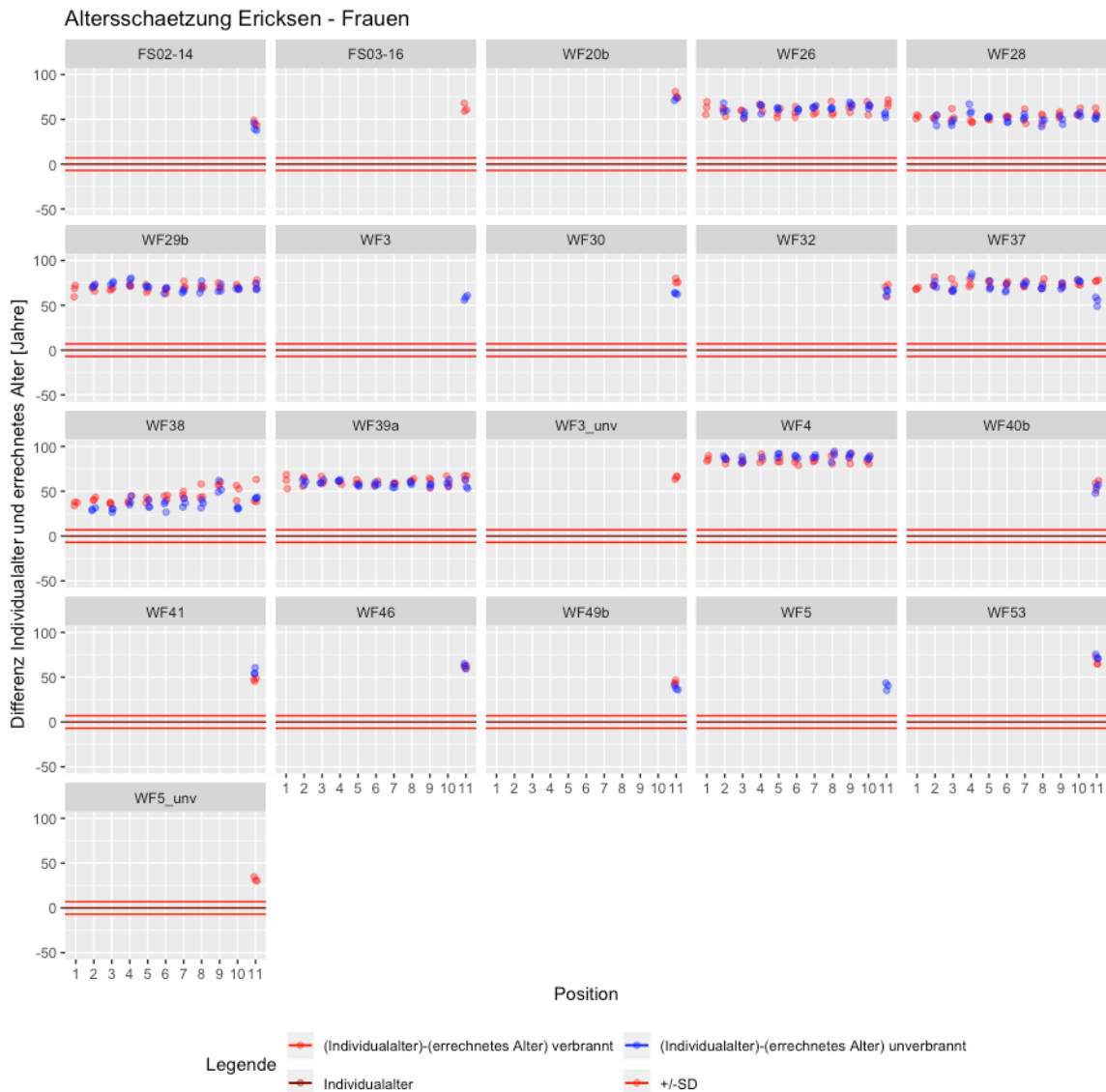


Abbildung 28: geschlechtsabhängige Altersschätzung (Regressionsformel für weibliche Individuen) nach Ericksen (1991) auf das verbrannte (rot) und unverbrannte (blau) Probenmaterial am periostalen Rand der Femurkompakta; es sind sowohl die Verbrennungsreihen (WF15, WF19, WF2, WF26, WF28, WF29a, WF29b, WF34, WF37, WF38, WF39a, WF4, WF45, WF9), als auch die Proben aus dem Vergleich zwischen unverbrannter Probe und einer Verbrennung bei 1000°C (FS01-13, FS01-14, FS01-15, FS01-16, FS02-14, FS02-16, FS04-16, WF20a, WF20b, WF3, WF30, , WF36, WF40a, WF 40b, WF41, WF42b, WF46, WF47, WF49b, WF5, WF53) zur histologischen Altersbestimmung verwendet worden; auf der X-Achse ist die Position entlang des Femurschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100-1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem tatsächlichen Alter des Individuums und die hellroten Linien ober- und unterhalb dieser Linie spiegeln die angegebene Standardabweichung aus der verwendeten Regressionsformel wider);

Abbildung 29 beinhaltet die Abweichungen zwischen dem Individualalter und dem histologisch geschätzten Alter mit der geschlechtsabhängigen Formel für weibliche Individuen von Ericksen in der **Kompaktmitte** der Femora (Ericksen, 1991). In diesem Fall ist erkennbar, dass sowohl für die verbrannten als auch die unverbrannten Proben die geschätzten Alterswerte weit unterhalb des tatsächlichen Alters lagen (± 10 Jahre).

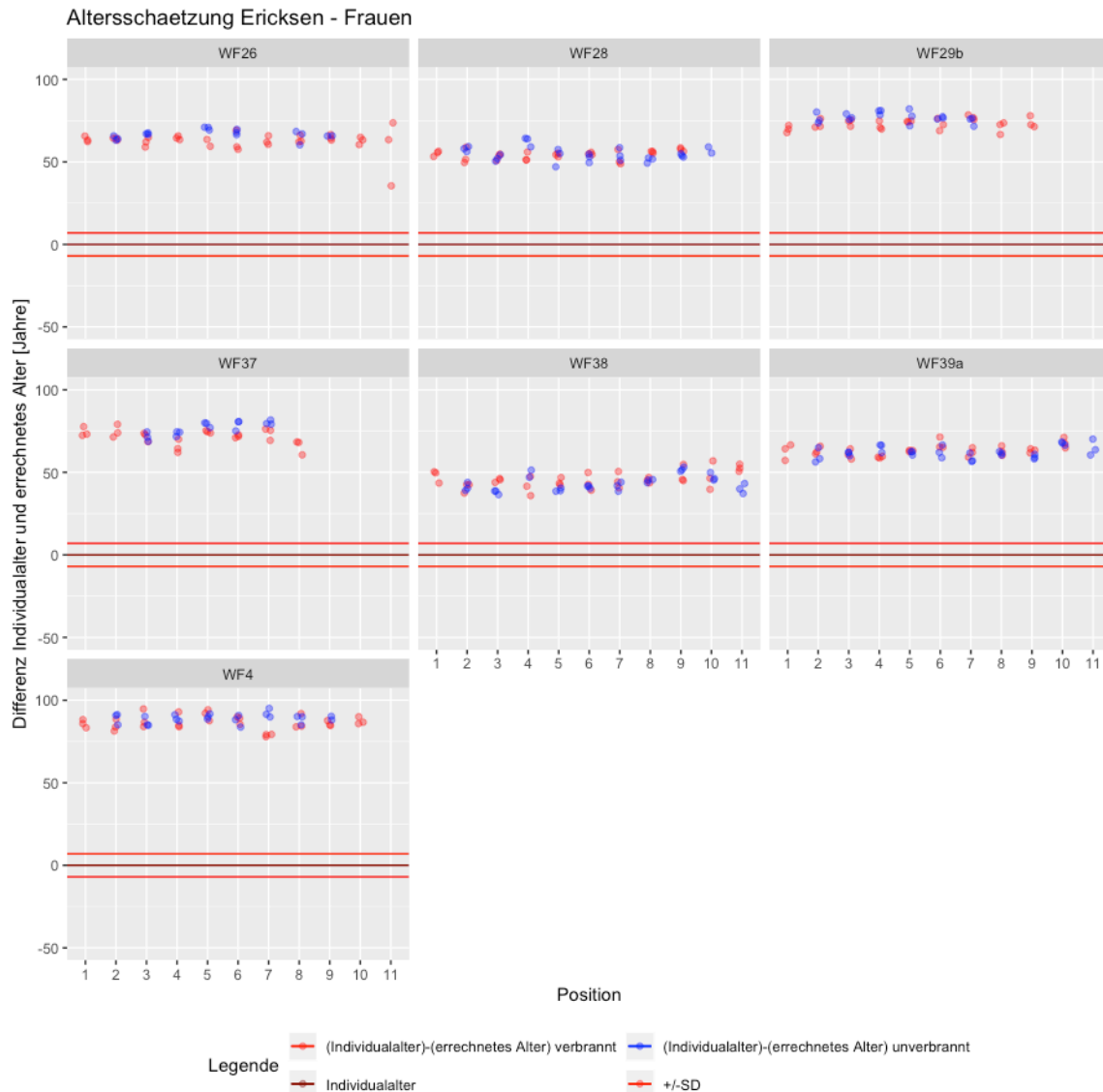


Abbildung 29: geschlechtsabhängige Altersschätzung (Regressionsformel für weibliche Individuen) nach Ericksen (1991) auf das verbrannte (rot) und unverbrannte (blau) Probenmaterial in der Kompaktmitte der Femora; es sind ausschließlich die Verbrennungsreihen (WF15, WF19, WF2, WF26, WF28, WF29a, WF29b, WF34, WF37, WF38, WF39a, WF4, WF45, WF9) zur histologischen Altersbestimmung verwendet worden; auf der X-Achse ist die Position entlang des Femurschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100-1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem tatsächlichen Alter des Individuums und die hellroten Linien ober- und unterhalb dieser Linie spiegeln die angegebene Standardabweichung aus der verwendeten Regressionsformel wider;

Wie bereits bei der Anwendung derselben Regressionsformeln im **periostalen** Bereich des Knochenfragments konnte auch bei der Auswertung des **mittigen** Bereichs für die geschlechtsunabhängige Regressionsformel nach Ericksen (Ericksen, 1991) keine temperaturinduzierte Verschlechterung der Ergebnisse erkannt werden. Wie bereits für den periostalen Bereich der Femurkompakta konnte auch für die Kompaktmitte festgestellt werden, dass die histologisch bestimmten Alterswerte für die unverbrannten Proben deutlich von Individualalter und Standardabweichungsgrenzen abweichen.

Histologische Altersschätzung nach Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978) – Formel für Osteonfragmente

Femora

Die Differenzen zwischen Individualalter zum Todeszeitpunkt und errechnetem histologischem Alter mit der Formel nach Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) durch die Bewertung der Osteonfragmente im Sichtfeldbereich des Mikroskops in der **periostalen** Femurkompakta sind in Abbildung 30 aufgezeigt. Bei der Betrachtung der Ergebnisse ist erkennbar, dass sich für nahezu alle Individuen (außer WF30, WF41, WF49b und WF5) bei den unverbrannten Proben Altersschätzungen ergeben haben, deren Differenz zum tatsächlichen Sterbealter innerhalb der Grenzen der Standardabweichung lag. Auch für die verbrannten Referenzproben zeigt sich, dass für die überwiegende Anzahl an Individuen ebenfalls solche Alterswerte bestimmt werden konnten. Im Vergleich zwischen verbrannten und unverbrannten korrespondierenden Proben ist erkennbar, dass sich eine verbrennungsbedingte Verschlechterung der Ergebnisse einstellt. Zudem weisen die histologischen Alterswerte der Individuen keine systematische Streuung zwischen unverbrannten und verbrannten Proben auf.

Abbildung 31 stellt die Veränderung der Abweichung zwischen errechnetem Alter und tatsächlichem Sterbealter für die Formel für Osteonfragmente nach Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) über die verschiedenen Verbrennungstemperaturen bzw. Positionen dar. In dieser Abbildung entsprechen die Verbrennungstemperaturen (100-1000 °C) den Positionen 2 bis 11 entlang des unverbrannten Femurschaftes.

Anhand der Altersschätzung nach Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) für Osteonfragmente ist weder für die verbrannten Proben über die Verbrennungstemperaturen noch für die unverbrannten Referenzproben ein Trend erkennbar.



Abbildung 30: geschlechtsunabhängige Altersschätzung nach Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978) auf Basis der Zählung von Osteonfragmenten auf das verbrannte (rot) und unverbrannte (blau) Probenmaterial, es sind sowohl die Verbrennungsreihen (WF15, WF19, WF2, WF26, WF28, WF29a, WF29b, WF34, WF37, WF38, WF39a, WF4, WF45, WF9), als auch die Proben aus dem Vergleich zwischen unverbrannter Probe und einer Verbrennung bei 1000°C (FS01-13, FS01-14, FS01-15, FS01-16, FS02-14, FS02-16, FS04-16, WF20a, WF20b, WF3, WF30, WF36, WF40a, WF40b, WF41, WF42b, WF46, WF47, WF49b, WF5, WF53) zur histologischen Altersbestimmung verwendet worden; auf der X-Achse ist die Position entlang des Femurschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100-1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem tatsächlichen Alter des Individuums und die hellroten Linien ober- und unterhalb dieser Linie spiegeln die angegebene Standardabweichung aus der verwendeten Regressionsformel wider)

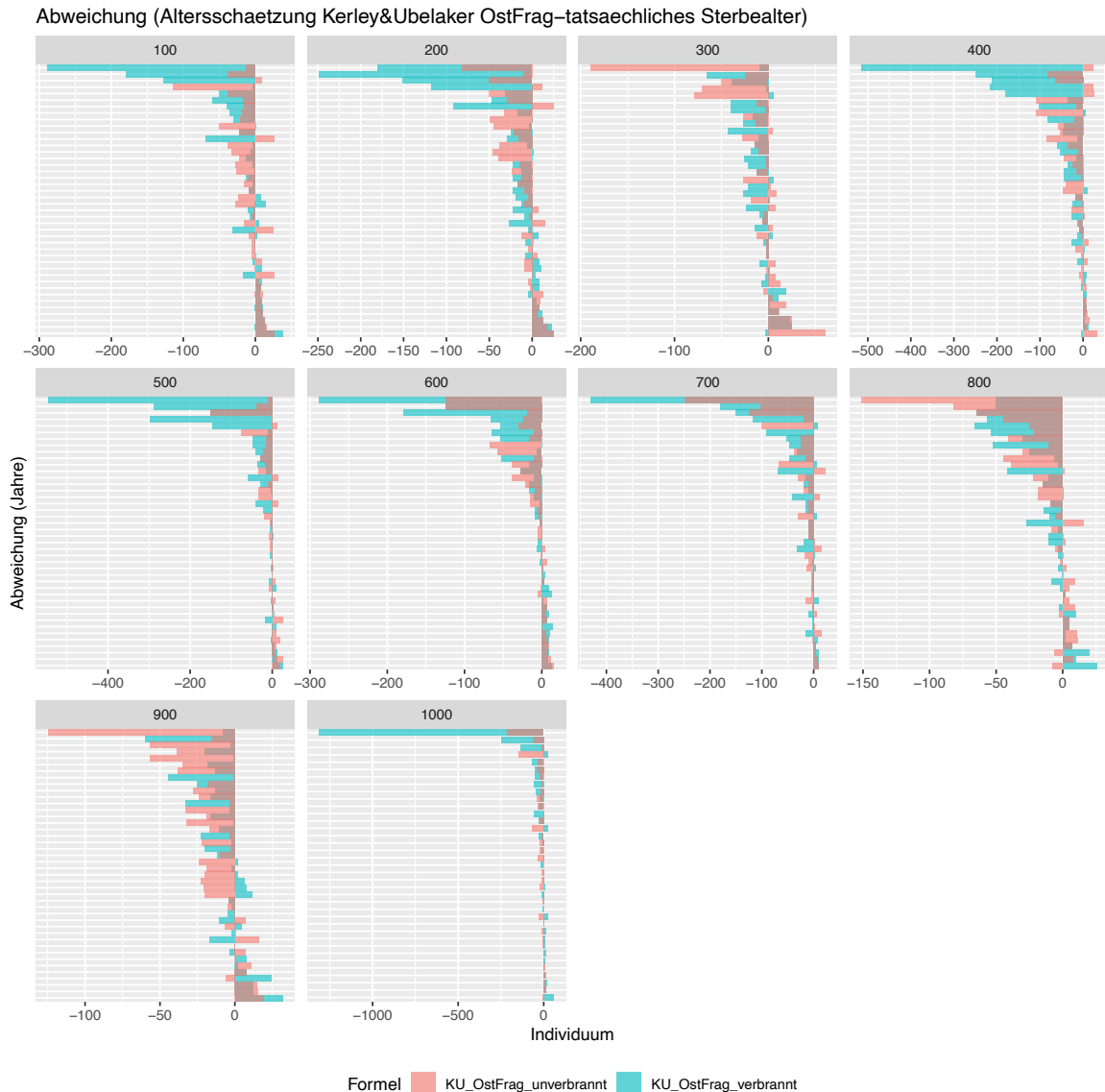


Abbildung 31: Abweichung zwischen der Altersschätzung nach Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978) mit der Formel für Osteonfragmente und dem tatsächlichen Sterbealter am periostalen Rand der Femurkompakta, die Abweichungen werden dabei sowohl über die Verbrennungstemperaturen (100 bis 1000°C - türkise Balken) und über die Positionen entlang des Femurschaftes (Verbrennungstemperaturen 100 bis 1000°C entsprechen den Positionen 2 bis 11 - rote Balken) dargestellt;

Im Falle der Regressionsformel nach Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) beruhend auf der Anzahl an Osteonfragmenten im Sichtfeld in der **Kompaktmitte** der Femora konnten für die unverbrannten Proben (Abbildung 32) aller untersuchten Verbrennungsreihen einige Alterswerte histologisch errechnet werden, welche innerhalb der formelbedingten Standardabweichung lagen ($\pm 6,98$ Jahre). Bei den meisten Individuen ergaben sich zwar auch Alterswerte, welche deutlich unter dem tatsächlichen Sterbealter lagen. Für Individuum WF45 hingegen lagen die meisten errechneten Werte oberhalb des Individualalters. Für die Berechnungen der Differenzen zwischen histologischem und tatsächlichem Alter anhand der Proben aus Verbrennungsreihe mit derselben Formel) konnten nur für Individuum WF45 Alterswerte erzielt werden, welche überwiegend innerhalb der Grenzen der Standardabweichung der Regressionsformel lagen ($\pm 6,98$ Jahre). Auch hier weisen die histologischen Alterswerte der Individuen keine systematische Streuung zwischen unverbrannten und verbrannten Proben auf.

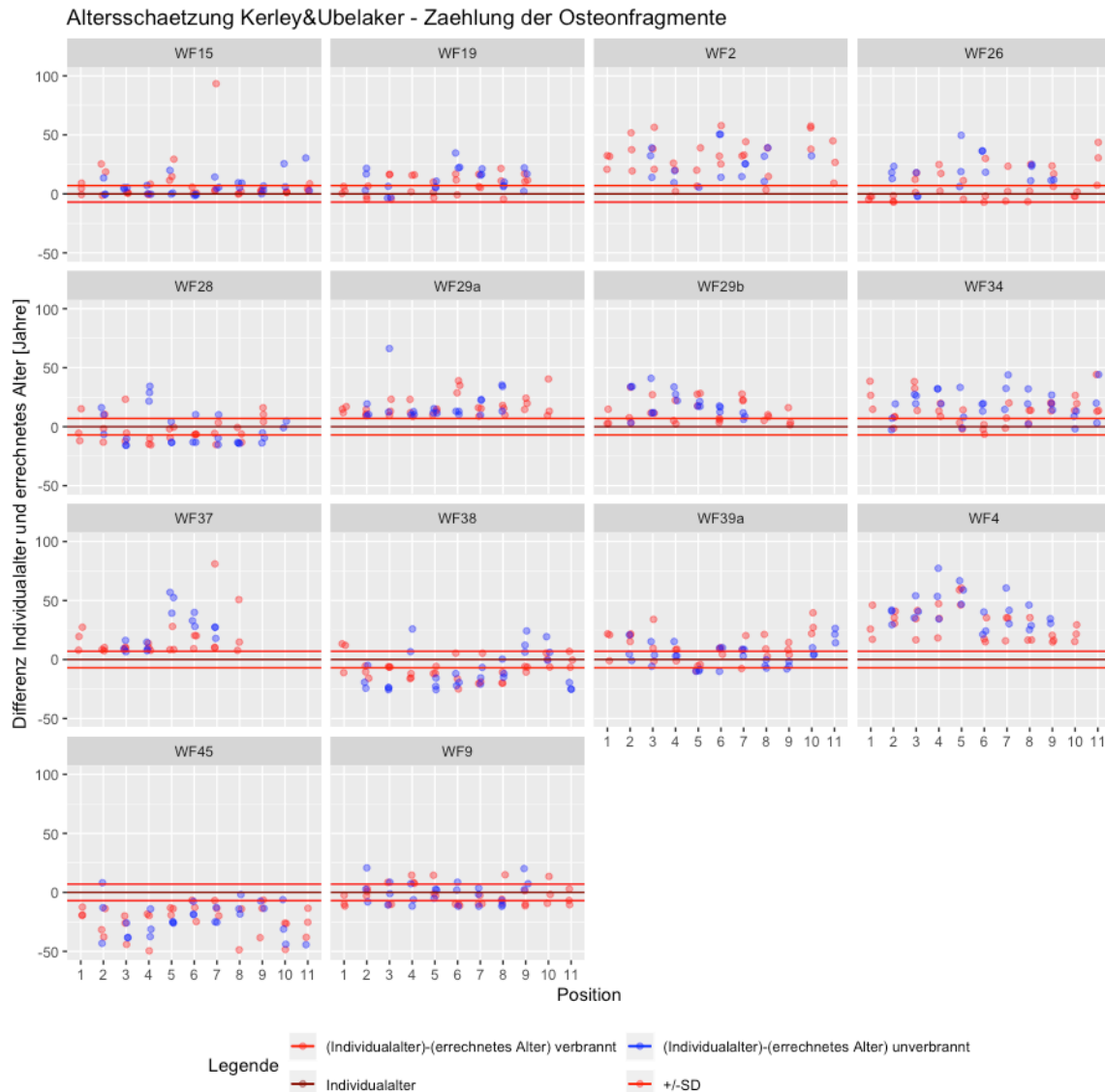


Abbildung 32: Differenz zwischen dem histologisch geschätzten Alter mittels der Regressionsformel nach Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978) mit der Zählung der Osteonfragmente auf das verbrannte (rot) und unverbrannte (blau) Probenmaterial in der Kompaktmitte der Femora; es sind ausschließlich die Verbrennungsreihen (WF15, WF19, WF2, WF26, WF28, WF29a, WF29b, WF34, WF37, WF38, WF39a, WF4, WF45, WF9) zur histologischen Altersbestimmung verwendet worden; auf der X-Achse ist die Position entlang des Femurschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100- 1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem tatsächlichen Alter des Individuums und die hellroten Linien ober- und unterhalb dieser Linie spiegeln die angegebene Standardabweichung aus der verwendeten Regressionsformel wider)

Die Abweichung zwischen der histologischen Altersschätzung und dem tatsächlichen Sterbealter für die geschlechtsunabhängigen Regression nach Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) für *Osteonfragmente* in der Kompaktmitte der Femora sind in Abbildung 33 nochmals graphisch aufgezeigt.

Für die sich ergebenden Differenzen basierend auf der Formel für Osteonfragmente nach Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) ist wie am *periostalen* Rand der Femurkompakta weder für die verbrannten noch für die unverbrannten Proben ein Trend erkennbar.

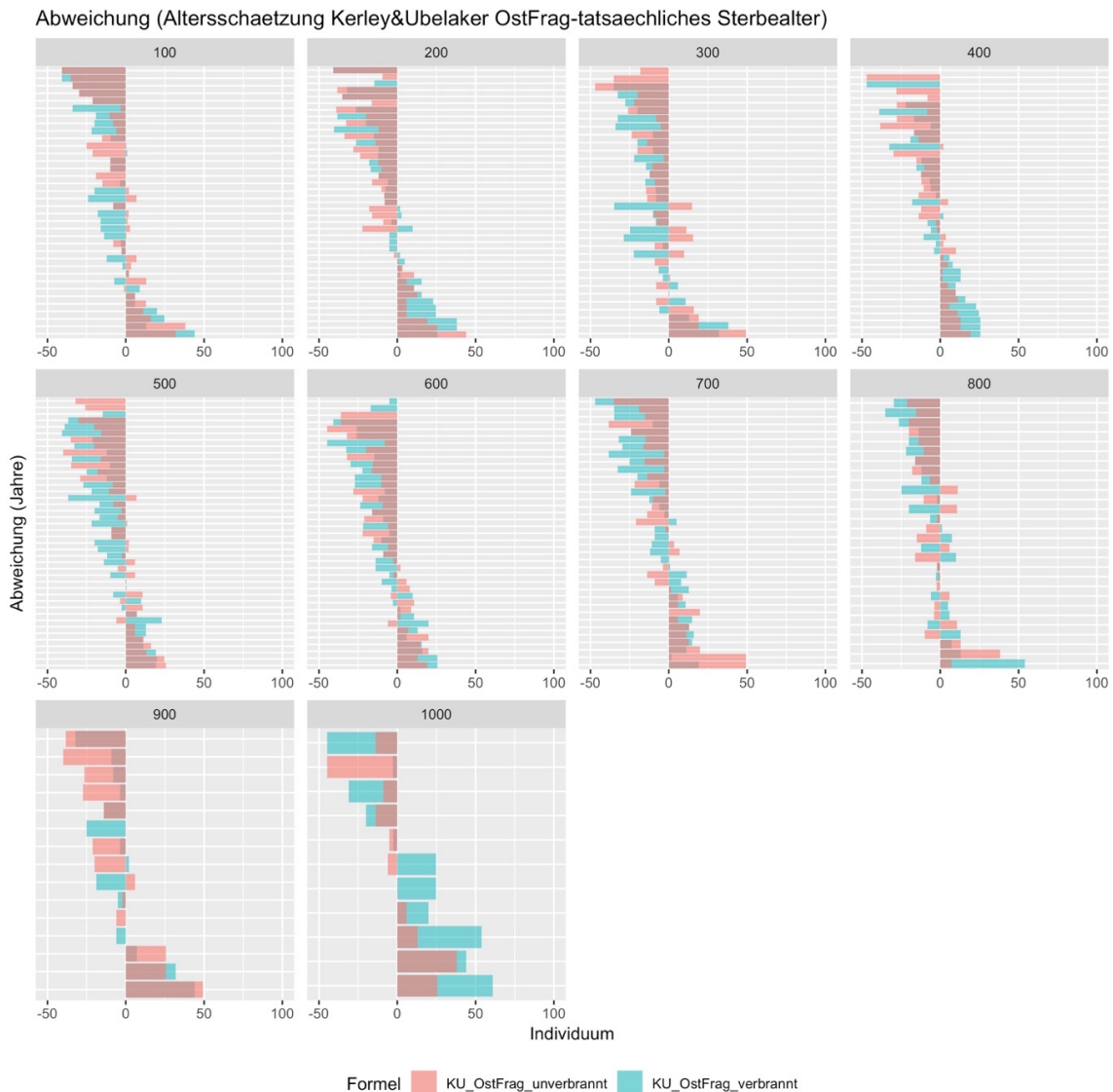


Abbildung 33: Abweichung zwischen der Altersschätzung nach Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978) mit der Formel für Osteonfragmente und dem tatsächlichen Sterbealter aus der Mitte der Femurkompakta, die Abweichungen werden dabei sowohl über die Verbrennungstemperaturen (100 bis 1000°C - türkise Balken) und über die Positionen entlang des Femurschaftes (Verbrennungstemperaturen 100 bis 1000°C entsprechen den Positionen 2 bis 11 - rote Balken) dargestellt;

Tibiae

Die Differenzen zwischen histologischer Altersschätzung am *periostalen* Rand der Tibiakompakta mit der Methode nach Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) für Osteonfragmente und dem tatsächlichen Sterbealter anhand der Verbrennungsreihe und der unverbrannten korrespondierenden Proben sind in Abbildung 34 dargestellt. Individuum WF18 weist nur drei Werte auf, welche alle zu hoch eingeschätzt wurden und außerhalb der Standardabweichung liegen ($\pm 8,42$ Jahre). Für WF22, WF24 und WF33 konnten Differenzen erzielt werden, welche innerhalb der Standardabweichung der Regressionsgleichung lagen, die restlichen histologischen Alterswerte waren teils zu gering, teils zu hoch. WF27 zeigt nur vier errechnete Differenzen auf, drei weichen negativ über die Grenzen der Standardabweichung ab, eine positiv. Bei den unverbrannten Proben sind ebenfalls nur lückenhafte bzw. keine (WF18) histologischen Alterswerte vorhanden. Bei den Individuen WF17, WF22 und WF24 wurden histologische Alterswerte bestimmt, welche innerhalb

der Grenzen der formeleigenen Standardabweichung lagen, die übrigen Alterswerte wichen sowohl positiv als auch negativ vom tatsächlichen Sterbealter ab. WF27 zeigt in der Differenz nur zu hoch geschätzte histologische Alterswerte auf. In diesem Fall ergab sich keine verbrennungsbedingte Verschlechterung der Werte.

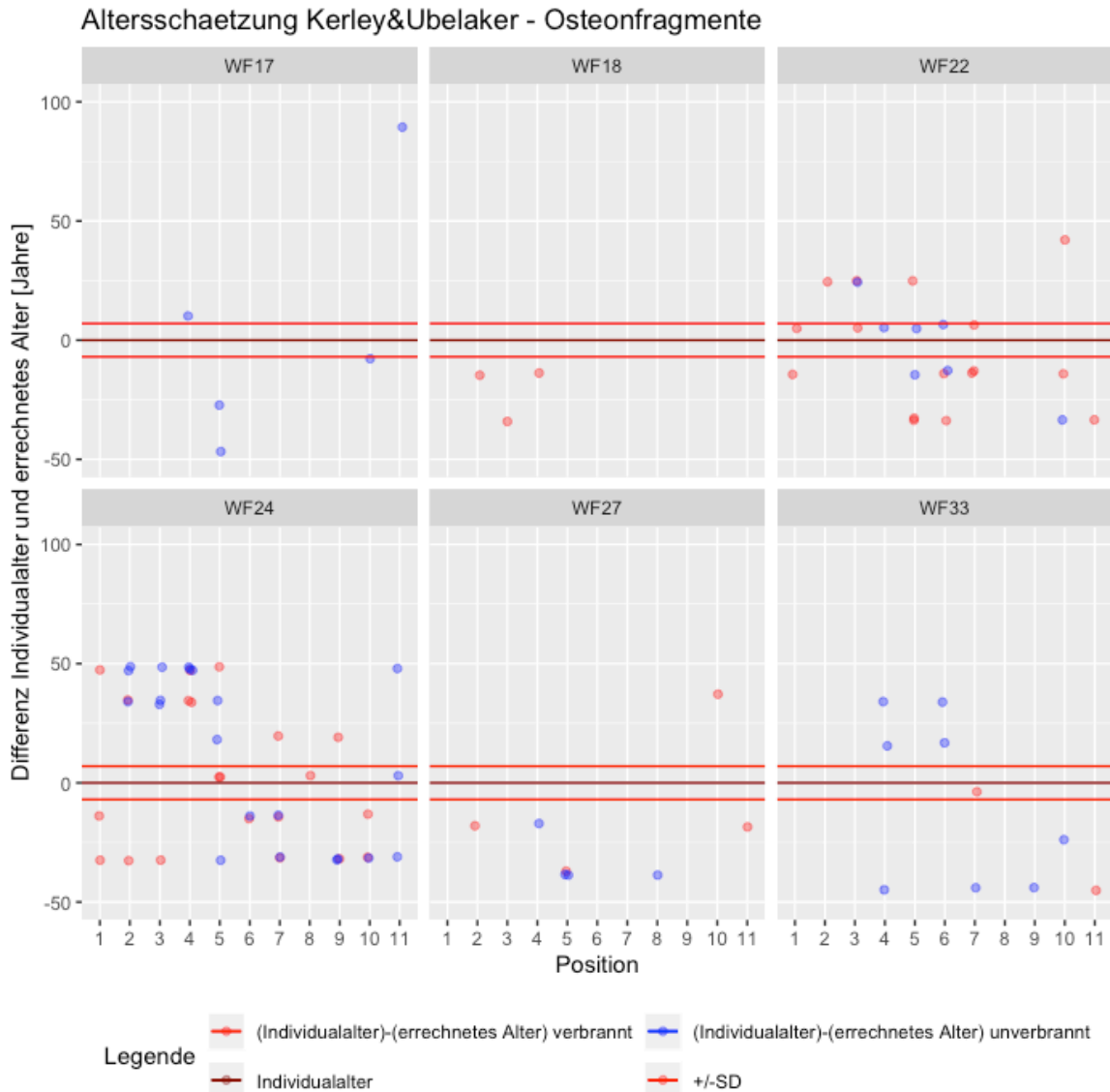


Abbildung 34: geschlechtsunabhängige Altersschätzung nach Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978) auf Basis der Zählung von Osteonfragmenten auf das verbrannte (rot) und unverbrannte (blau) Probenmaterial am periostalen Rand der Tibiakompakta; dabei wurden die Verbrennungsreihen des Tibiakollektivs vom Münchner Westfriedhof (WF17, WF18, WF22, WF24, WF27 und WF33) zur histologischen Altersbestimmung verwendet; auf der X-Achse ist die Position entlang des Tibiaschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100-1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem Individualalter (Differenz=0) und die hellroten Linien ober- und unterhalb dem Individualalter spiegeln die angegebene Standardabweichung aus der verwendeten Regressionsformel wider;

Abbildung 35 zeigt die Differenzen für die Formel nach Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978) basierend auf der Zählung der Osteonfragmente aus der *Kompaktamitte* der Tibiae. Sowohl die Alterswerte der unverbrannten als auch der verbrannten Proben streuen stark und weichen zum Teil mehr als +100 bzw. -50 Jahre vom tatsächlichen Sterbealter ab. Nur für die Individuen WF22 und WF27 konnten bei den unverbrannten Proben, und für die Individuen WF22, WF24, WF27 und WF33

histologische Alterswerte bestimmt werden, welche in der Abweichung vom Individualalter innerhalb der Grenzen der Standardabweichung lagen ($SEE \pm 8,42$ Jahre).

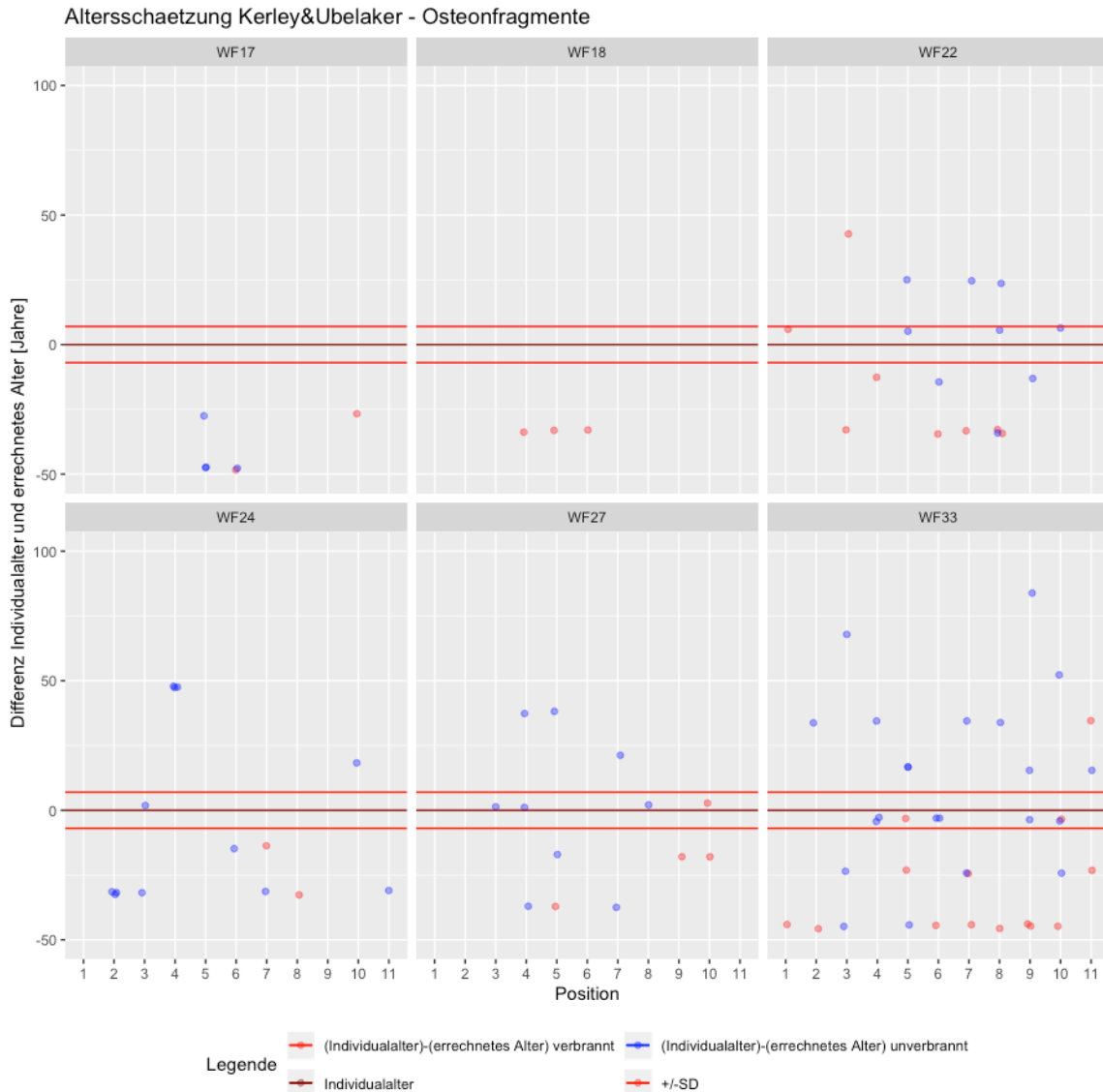


Abbildung 35: geschlechtsunabhängige Altersschätzung nach Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978) auf Basis der Zählung von Osteonfragmenten auf das verbrannte (rot) und unverbrannte (blau) Probenmaterial in der Mitte der Tibiakompakta, wofür die Verbrennungsreihen des Tibiakollektivs vom Münchner Westfriedhof (WF17, WF18, WF22, WF24, WF27 und WF33) zur histologischen Altersbestimmung verwendet worden; auf der X-Achse ist die Position entlang des Tibiaschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100-1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem Individualalter (Differenz=0) und die hellroten Linien Regressionsformel wider;

Historische Altersschätzung nach Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978) – Formel für intakte Osteone

Femora

Durch die Regressionsformel für die Zählung intakter Osteone im histologischen Feld nach Kerley und Ubelaker am *periostalen* Rand der Femurkompakta (Kerley and Ubelaker, 1978) lag das errechnete histologische Alter überwiegend weit unter dem tatsächlichen Sterbealter (Abbildung 36). Für die Individuen FS01-14, FS01-15, FS01-16, FS02-14, FS04-16, WF47 und WF49b konnte in mindestens einem ausgezählten Feld ein histologisches Alter berechnet werden, dessen Differenz zum

tatsächlichen Sterbealter innerhalb der Standardabweichung ($\pm 9,19$) der Regressionsformel lag. Für Individuum WF45 konnten mittels der Regressionsformel die besten Altersschätzungen erzielt werden, da sich sowohl für die verbrannten als auch für die unverbrannten Proben die Differenzen zum tatsächlichen Sterbealter innerhalb der Standardabweichung der Formel befanden.

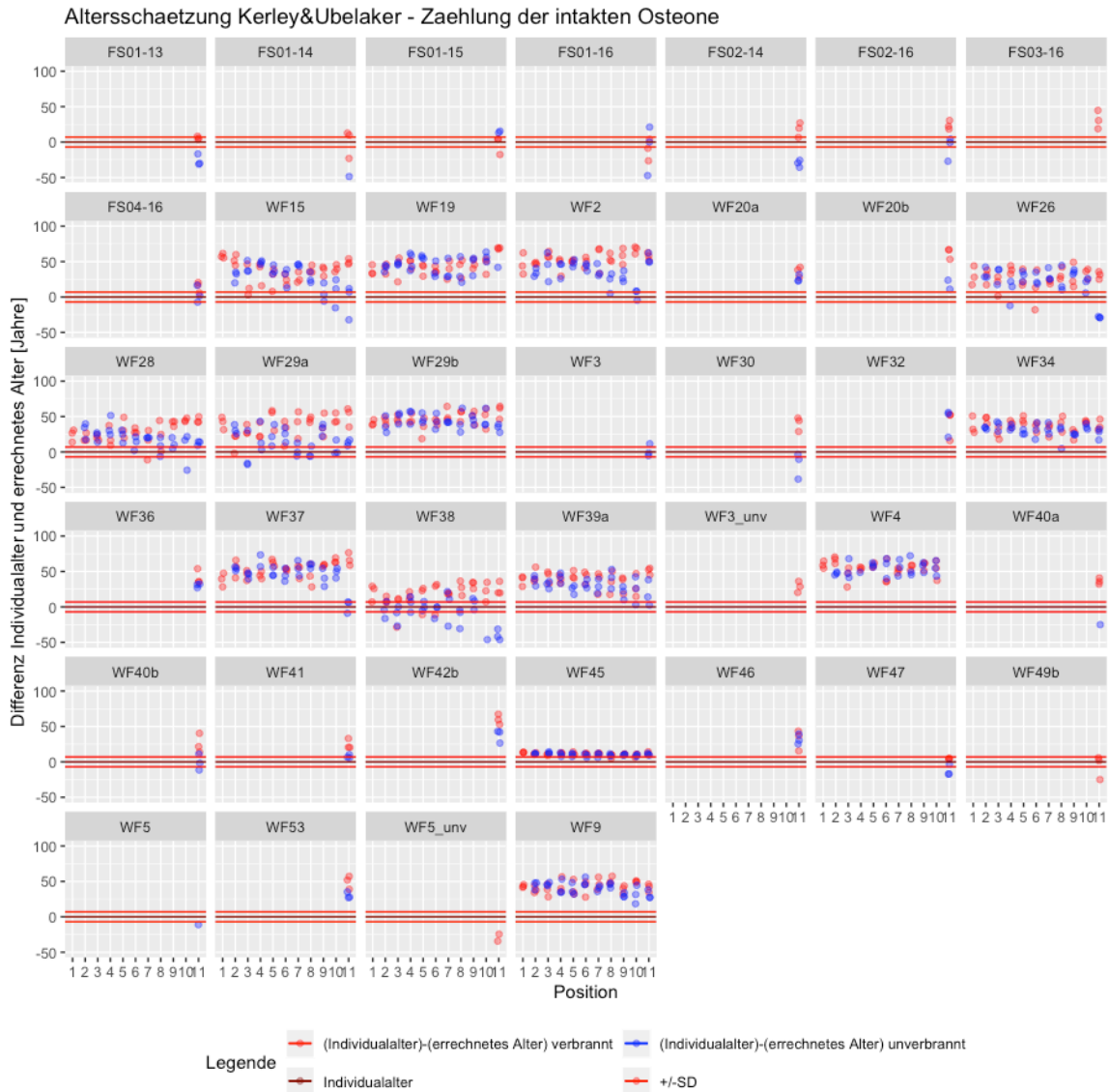


Abbildung 36: geschlechtsunabhängige Altersschätzung nach Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978) auf Basis der Zählung von intakten Osteonen auf das verbrannte (rot) und unverbrannte (blau) Probenmaterial; es sind sowohl die Verbrennungsreihen als auch die Proben aus dem Vergleich zwischen unverbrannter Probe und einer Verbrennung bei 1000°C zur histologischen Altersbestimmung verwendet worden; auf der X-Achse ist die Position entlang des Femurschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100- 1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem tatsächlichen Alter des Individuums und die hellroten Linien ober- und unterhalb dieser Linie spiegeln die angegebene Standardabweichung aus der verwendeten Regressionsformel wider);

Abbildung 37 zeigt die Veränderung der Abweichung zwischen errechnetem Alter und tatsächlichem Sterbealter für die Formeln für intakte Osteone nach Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) am *periostalen* Rand der Kompakta auf. Die Regressionsformel liefert eine überwiegend negative Abweichung vom Individualalter. Fehlende Werte in der Graphik sind dadurch zu erklären, dass die Differenzen zwischen histologisch geschätztem und tatsächlichem Individualalter

den Wert von 100 Jahren übersteigen und dadurch nichtmehr erfasst wurden. Bei Position 10 und 11 zeigen die histologischen Alterswerte der verbrannten und unverbrannten Proben eine abweichende Tendenz auf, da die verbrannten Proben eine positive Abweichung und die unverbrannten Vergleichsproben eine negative Abweichung aufweisen.

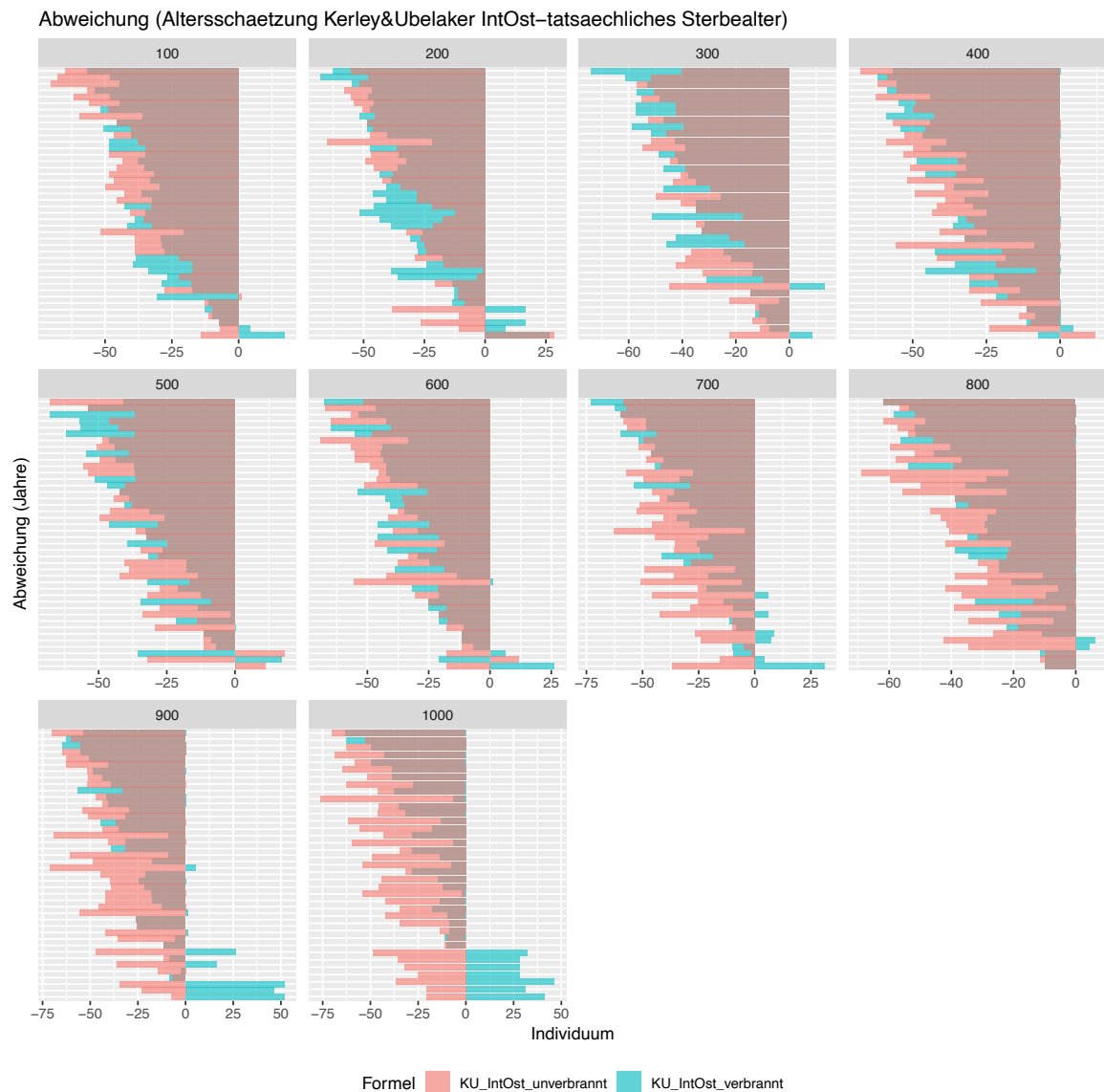


Abbildung 37: Abweichung zwischen der Altersschätzung nach Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978) mit der Formel für intakte Osteone und dem tatsächlichen Sterbealter am periostalen Rand der Femurkompakta, die Abweichungen werden dabei sowohl über die Verbrennungstemperaturen (100 bis 1000°C - türkise Balken) und über die Positionen entlang des Femurschaftes (Verbrennungstemperaturen 100 bis 1000°C entsprechen den Positionen 2 bis 11 - rote Balken) dargestellt;

Für die Regressionsformel nach Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978), basierend auf der Quantifizierung der Anzahl intakter Osteone in der *Kompaktmitte* der Femora, lagen bei den unverbrannten Referenzproben (Abbildung 38) für die meisten Individuen die errechneten Altersschätzwerte deutlich unter dem tatsächlichen Sterbealter. Nur für die Individuen WF45 und WF38 lagen die histologisch bestimmten Alterswerte innerhalb der Grenzen der Standardabweichung ($\pm 9,19$ Jahre). Im Falle der Ergebnisse für die verbrannten Proben nach derselben Regressionsformel konnten für die meisten Individuen einige Alterswerte errechnet werden, welche innerhalb der Standardabweichung lagen ($\pm 9,19$ Jahre). Für die Individuen WF38 und WF45 lagen die meisten

errechneten Werte oberhalb des Individualalters, für die anderen Individuen unterhalb des Individualalters. Für beide Formeln nach Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) lässt sich keine Verschlechterung der berechneten Differenzen durch den Einfluss der Verbrennungstemperaturen erkennen.

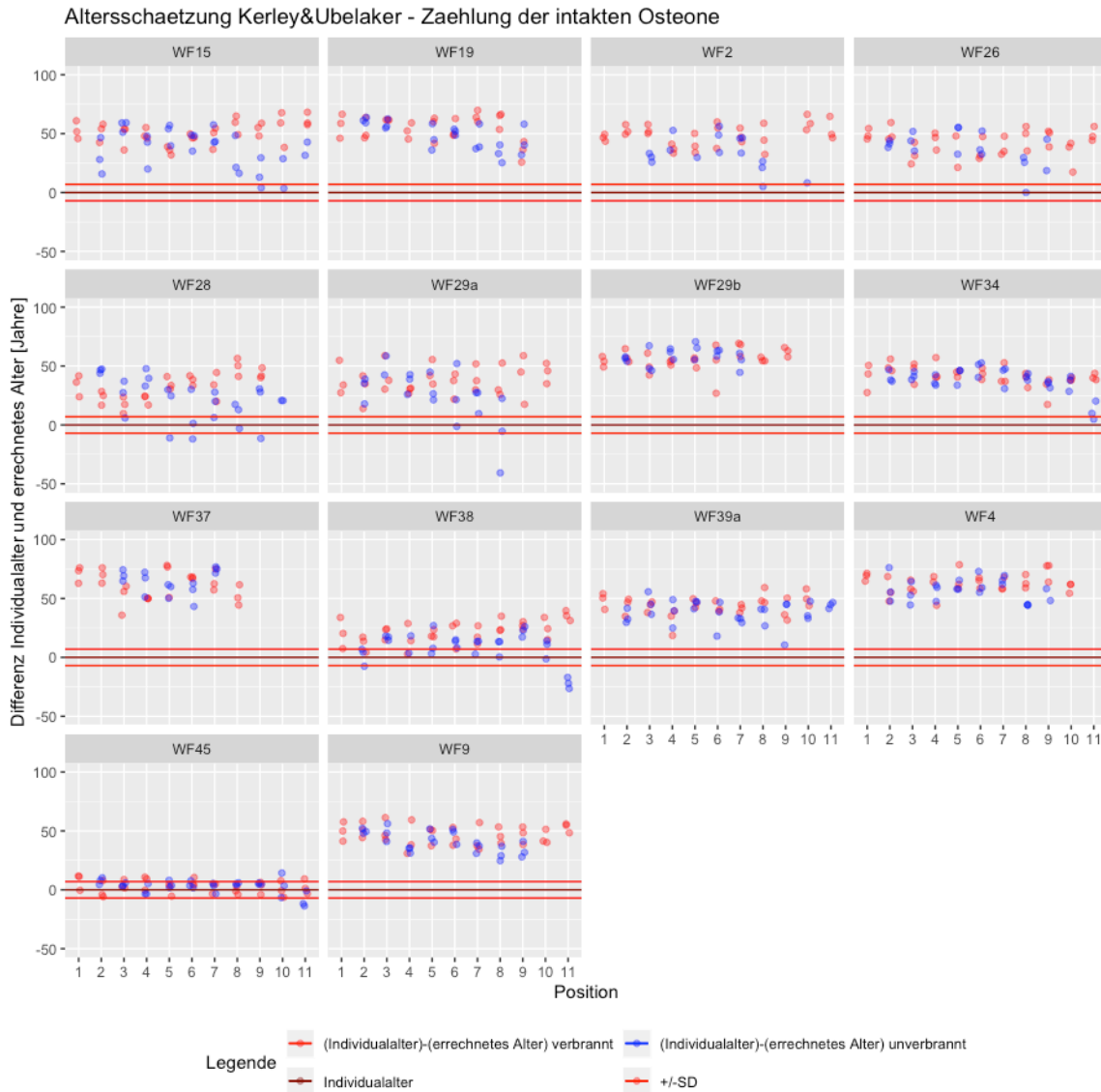


Abbildung 38: Differenz zwischen dem histologisch geschätzten Alter mittels der Regressionsformel nach Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978) mit der Zählung der intakten Osteone auf das verbrannte (rot) und unverbrannte (blau) Probenmaterial in der Kompaktmitte der Femora; es sind ausschließlich die Verbrennungsreihen (WF15, WF19, WF2, WF26, WF28, WF29a, WF29b, WF34, WF37, WF38, WF39a, WF4, WF45, WF9) zur histologischen Altersbestimmung verwendet worden; auf der X-Achse ist die Position entlang des Femurschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100- 1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem tatsächlichen Alter des Individuums und die hellroten Linien ober- und unterhalb dieser Linie spiegeln die angegebene Standardabweichung aus der verwendeten Regressionsformel wider;

Die Abweichung bei der Altersschätzung nach Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) basierend auf der Formel für intakte Osteone zeigt für die unverbrannten und verbrannten Proben in der *Kompaktmitte* der Femora eine überwiegend negative Abweichung vom Individualalter (Abbildung 39). Ab 700°C bzw. Position 8 ergaben sich für unverbrannte und verbrannte Proben z.T. divergierende Abweichungen, da die Differenzen der verbrannten Proben meist ins Positive und die der unverbrannten Proben ins Negative gehen. Für die sich ergebenden Differenzen basierend auf der

Formel für Osteonfragmente nach Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) ist weder für die verbrannten noch für die unverbrannten Proben ein Trend erkennbar. Fehlende Werte in der Grafik sind wie am periostalen Rand der Kompakta durch zu große Abweichungen bedingt.

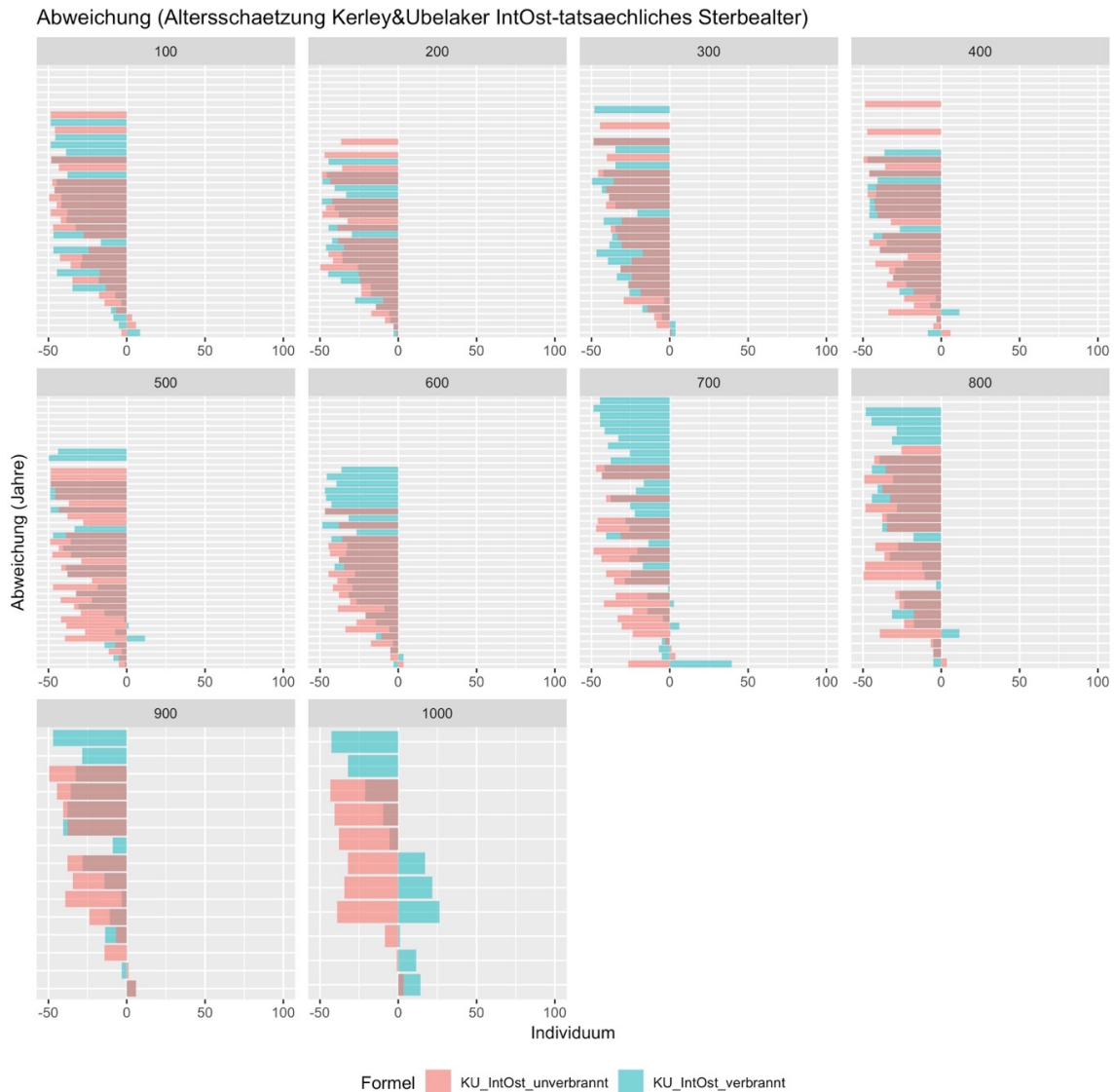


Abbildung 39: Abweichung zwischen der Altersschätzung nach Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978) mit der Formel für intakte Osteone und dem tatsächlichen Sterbealter in der Mitte der Femurkompakta, die Abweichungen werden dabei sowohl über die Verbrennungstemperaturen (100 bis 1000°C - türkise Balken) und über die Positionen entlang des Femurschaftes (Verbrennungstemperaturen 100 bis 1000°C entsprechen den Positionen 2 bis 11 - rote Balken) dargestellt;

Tibiae

Die Differenz zwischen dem tatsächlichen Individualalter (Sterbealter) und dem mit der Regressionsformel für intakte Osteone nach Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) am *periostalen Rand* der Tibiakompakta ist in Abbildung 40 dargestellt. Es ist erkennbar, dass für die Individuen WF17, 18, 22 und 24 bei den unverbrannten Proben histologische Alterswerte errechnet werden konnten, welche in Differenz zum tatsächlichen Alter innerhalb der Grenzen der positiven und negativen Standardabweichung der Regressionsgleichung lagen ($\pm 10,53$ Jahre). Bei Individuum WF17 gibt es nur für einige Proben positive Abweichungen oberhalb der

Grenzen der positiven Standardabweichung ($\pm 10,53$ Jahre). Für die restlichen Individuen sind diese Abweichungen deutlich häufiger. Individuum WF27 und WF33 zeigen nur histologisch bestimmte Alterswerte auf, welche positiv über die Grenzen der Standardabweichung hinausgehen. Im Falle der verbrannten Proben zeigt sich, dass für alle Individuen zumindest einige histologische Alterswerte geschätzt wurden, welche sich innerhalb der Grenzen der Standardabweichung befinden. Bei WF22, WF27 und WF33 weichen die meisten Alterswerte positiv von den Grenzen der Standardabweichung ab. Das histologische Alter wurde zu niedrig geschätzt. Die Individuen WF18 und WF24 zeigen sowohl positive als auch negative Abweichungen außerhalb der Standardabweichung. Individuum WF17 zeigt negative Abweichungen außerhalb der Grenzen der Standardabweichung der Regressionsgleichung, das Individuum wurde häufig zu alt geschätzt. Es konnte nur eine geringfügige verbrennungsbedingte Verschlechterung der Ergebnisse festgestellt werden.

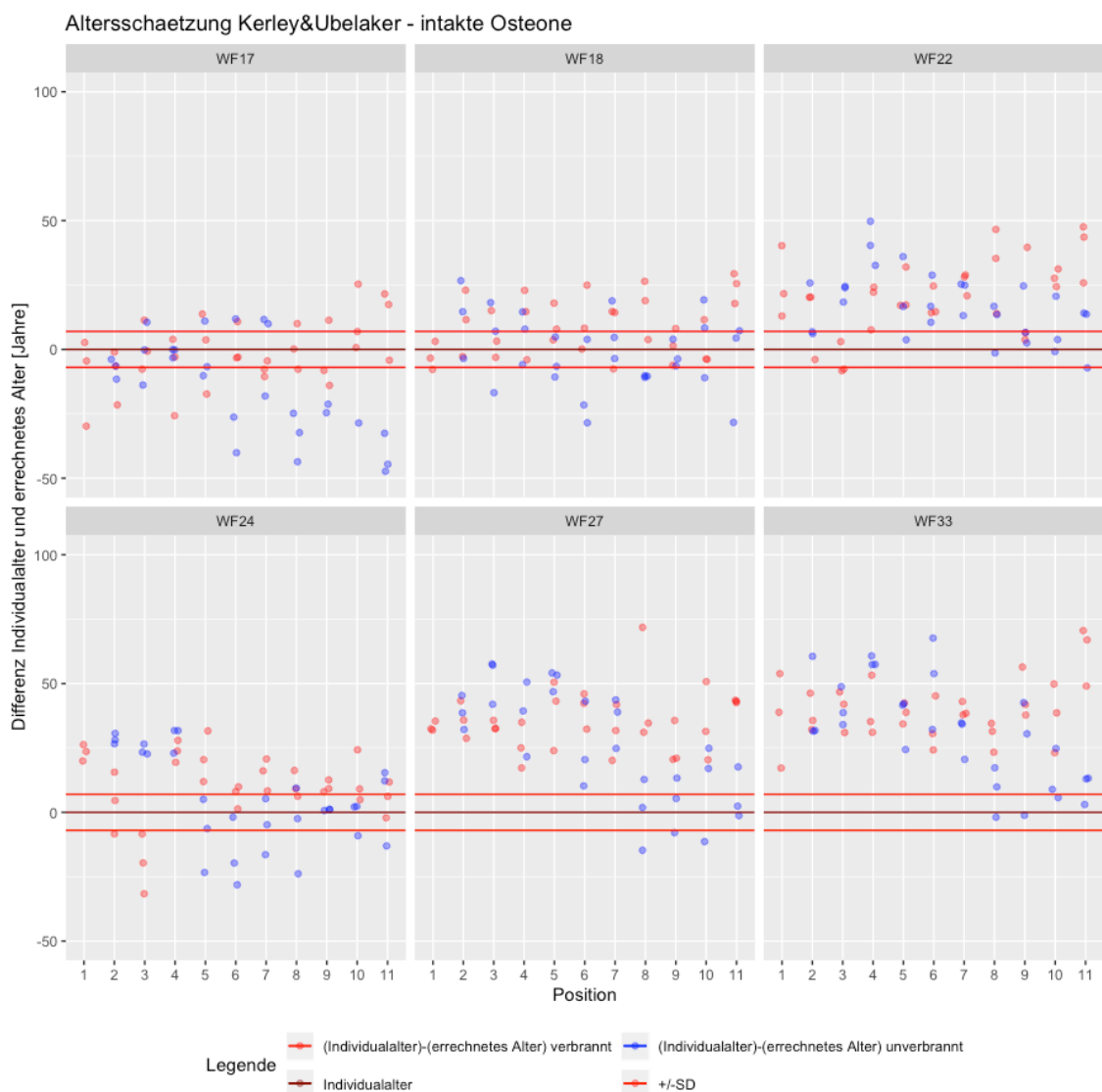


Abbildung 40: geschlechtsunabhängige Altersschätzung nach Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978) auf Basis der Zählung von intakten Osteonen auf das verbrannte (rot) und unverbrannte (blau) Probenmaterial am periostalen Rand, wofür die Verbrennungsreihen des Tibiakollektivs vom Münchner Westfriedhof (WF17, WF18, WF22, WF24, WF27 und WF33) zur histologischen Altersbestimmung verwendet wurden; auf der X-Achse ist die Position entlang des Tibiaschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100- 1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem Individualalter (Differenz=0) und die hellroten Linien ober- und unterhalb dem Individualalter spiegeln die angegebene Standardabweichung aus der verwendeten Regressionsformel wider;

Die Differenz zwischen histologischem und tatsächlichem Sterbealter, errechnet anhand der Formel von Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) mit der Formel für intakte Osteone, ist für unverbrannte und verbrannte Proben in der *Mitte* der Tibiakompakta in Abbildung 41 dargestellt.

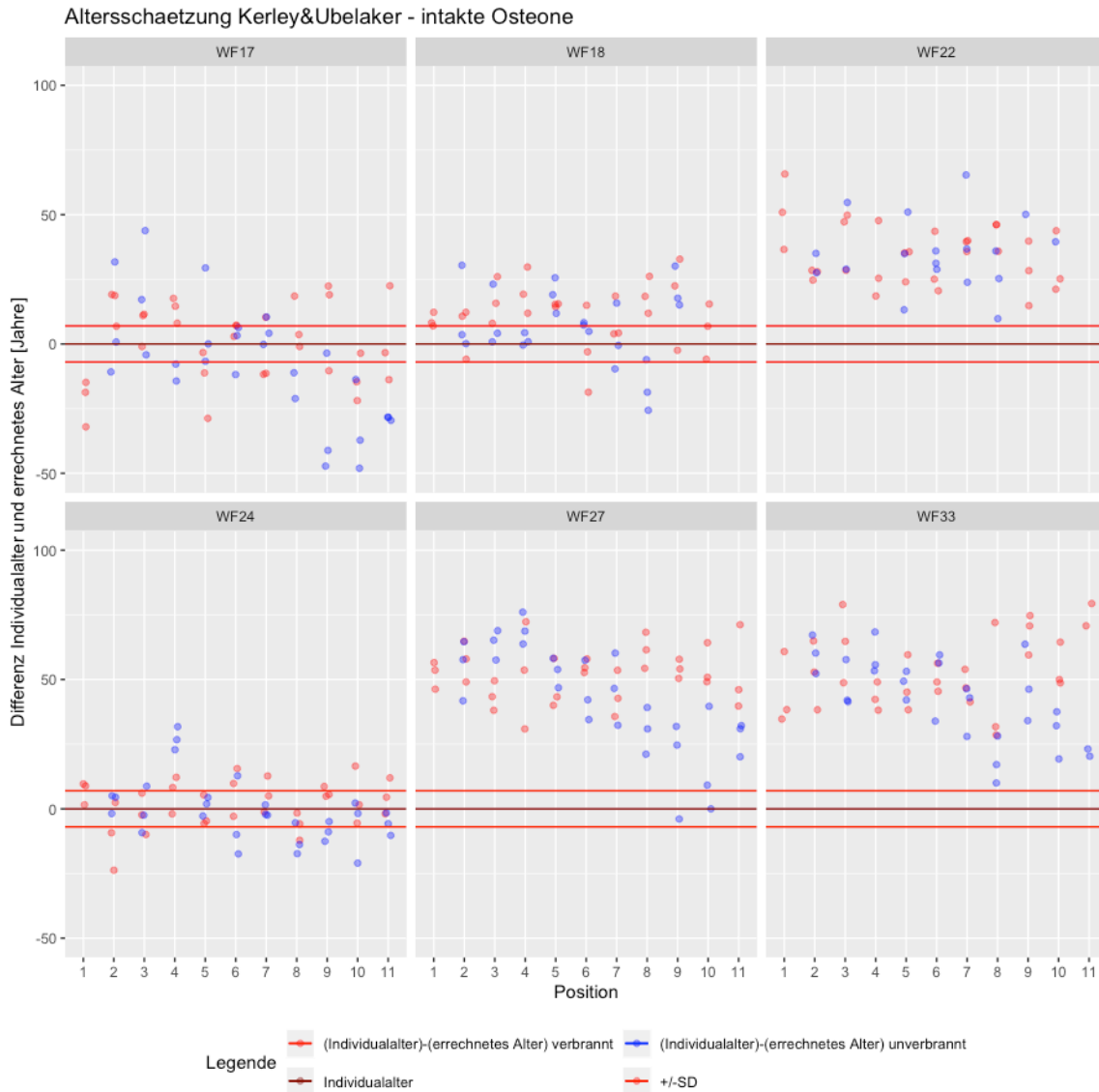


Abbildung 41: geschlechtsunabhängige Altersschätzung nach Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978) auf Basis der Zählung von intakten Osteonen auf das verbrannte (rot) und unverbrannte (blau) Probenmaterial, wofür die Verbrennungsreihen des Tibiakollektivs vom Münchner Westfriedhof (WF17, WF18, WF22, WF24, WF27 und WF33) zur histologischen Altersbestimmung verwendet worden; auf der X-Achse ist die Position entlang des Tibiaschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100-1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem Individualalter (Differenz=0) und die hellroten Linien ober- und unterhalb dem Individualalter spiegeln die angegebene Standardabweichung aus der verwendeten Regressionsformel wider;

Es ist ersichtlich, dass für die Individuen WF22, WF27 und WF33 im Falle der unverbrannten Proben alle histologischen Alterswerte deutlich geringer als das tatsächliche Sterbealter waren. Für die Individuen WF17, WF18 und WF24 konnten einige Alterswerte bestimmt werden, deren Differenzen zum tatsächlichen Sterbealter innerhalb der Grenzen der Standardabweichung lagen ($\pm 10,53$ Jahre). Bei den verbrannten Proben wurden bei den Individuen WF17 und WF18 die histologischen Alterswerte entweder zu hoch oder auch zu niedrig geschätzt, einige Alterswerte lagen aber innerhalb

der Standardabweichungsgrenzen. Bei den Individuen WF22, WF27 und WF33 war das histologisch geschätzte Alter überwiegend zu niedrig im Vergleich zum tatsächlichen Sterbealter. Bei WF24 lagen die meisten geschätzten Alterswerte innerhalb der Grenzen der Standardabweichung.

Histologische Altersschätzung nach Hummel und Schutkowski (1993)

Abbildung 42 zeigt die Abweichung zwischen dem errechneten Sterbealter unter Verwendung der Regressionsformel nach Hummel und Schutkowski (Hummel und Schutkowski, 1993) am *periostalen* Rand der Femurkompakta. Die Formel nach Hummel und Schutkowski (Hummel und Schutkowski, 1993) wurde für die histologische Altersbestimmung verbrannten Knochenmaterials entwickelt, ist aber zur vollständigen Vergleichbarkeit in dieser Arbeit auch für die histologische Altersbestimmung der unverbrannten Referenzproben miteinbezogen worden. Für alle Proben entlang des unverbrannten Femurschaftes wurden zu geringe Alterswerte über die positive Standardabweichung ($\pm 10,9$ Jahre) hinausgehend errechnet, nur für Individuum WF5 konnte in einem gezählten Feld ein einzelner histologischer Alterswert errechnet werden, dessen Differenz zum tatsächlichen Sterbealter sich auf der oberen Grenze der Standardabweichung der Regressionsformel befand. Die verbrannten Proben weisen ebenfalls überwiegend ein zu niedrig geschätztes histologisches Alter auf. Für die Individuen FS01-13, FS01-15, FS01-16, WF47, WF49b und WF5 konnte in mindestens einem Feld ein histologisches Alter festgestellt werden, welches sich innerhalb der Standardabweichung der Regressionsformel zum tatsächlichen Sterbealter befand.

Abbildung 43 stellt die Veränderung der Abweichung zwischen errechnetem Alter und tatsächlichem Sterbealter für die Altersschätzung mithilfe der Formel nach Hummel und Schutkowski (Hummel und Schutkowski, 1993) dar. Die Abweichung vom tatsächlichen Sterbealter ist über alle Verbrennungstemperaturen hinweg relativ konstant mit einer maximalen Abweichung von -80 Jahren. Für die Positionen 8, 9, 10 und 11 (Verbrennungstemperaturen 700, 800, 900 und 1000 °C) übersteigen die Abweichungen der unverbrannten Referenzproben die des verbrannten Materials.

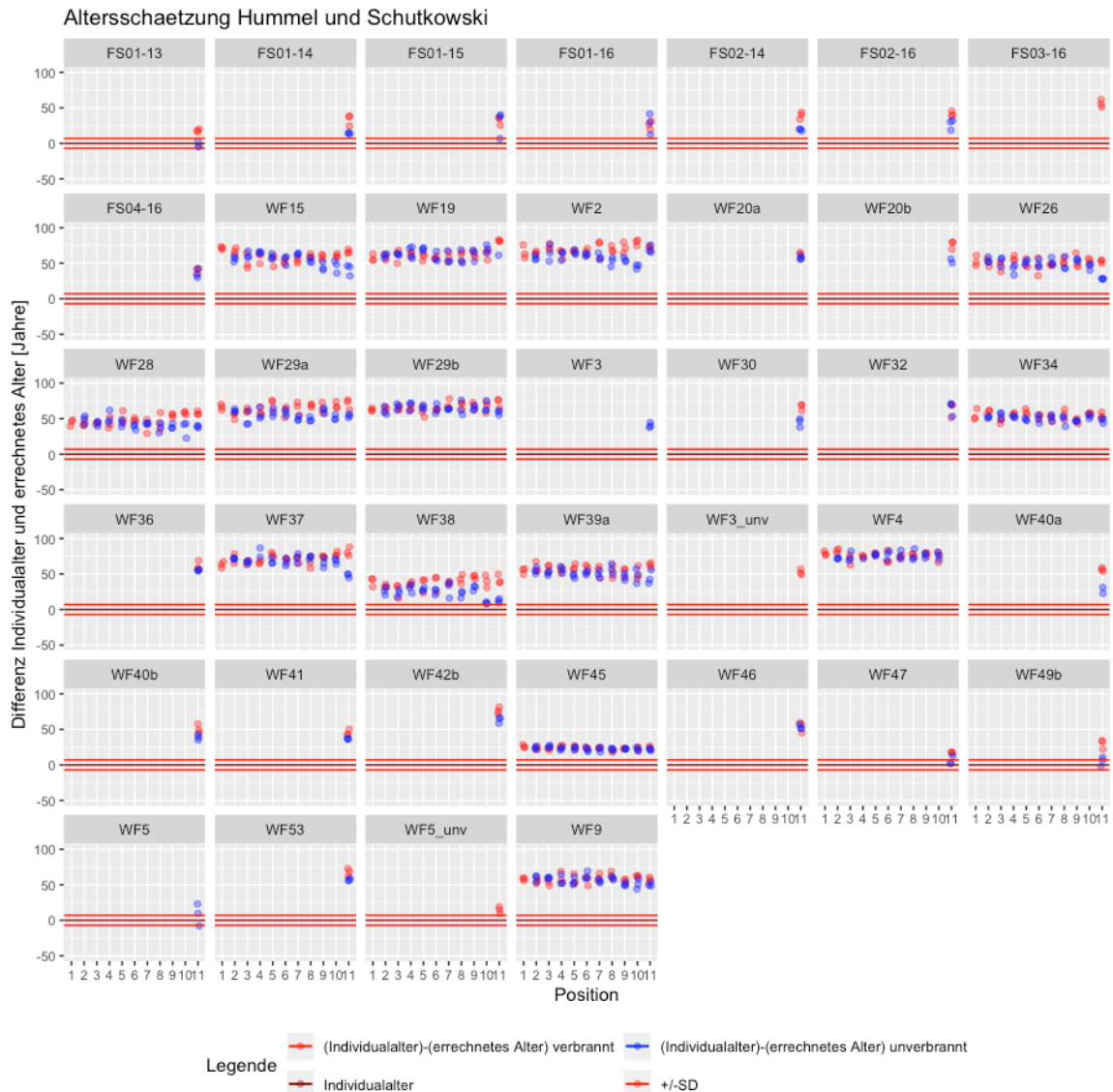


Abbildung 42: geschlechtsunabhängige Altersschätzung nach Hummel und Schutkowski (1993) auf Basis der Zählung von Havers'schen Kanälen auf das verbrannte (rot) und unverbrannte (blau) Probenmaterial; es sind sowohl die Verbrennungsreihen (WF15, WF19, WF2, WF26, WF28, WF29a, WF29b, WF34, WF37, WF38, WF39a, WF4, WF45, WF9), als auch die Proben aus dem Vergleich zwischen unverbrannter Probe und einer Verbrennung bei 1000°C (FS01-13, FS01-14, FS01-15, FS01-16, FS02-14, FS02-16, FS04-16, WF20a, WF20b, WF3, WF30, , WF36, WF40a, WF 40b, WF41, WF42b, WF46, WF47, WF49b, WF5, WF53) zur histologischen Altersbestimmung verwendet worden; auf der X-Achse ist die Position entlang des Femurschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100-1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem tatsächlichen Alter des Individuums und die hellroten Linien ober- und unterhalb dieser Linie spiegeln die angegebene Standardabweichung aus der verwendeten Regressionsformel wider);

Abweichung (Altersschätzung Hummel&Schutkowski–tatsaechliches Sterbealter)

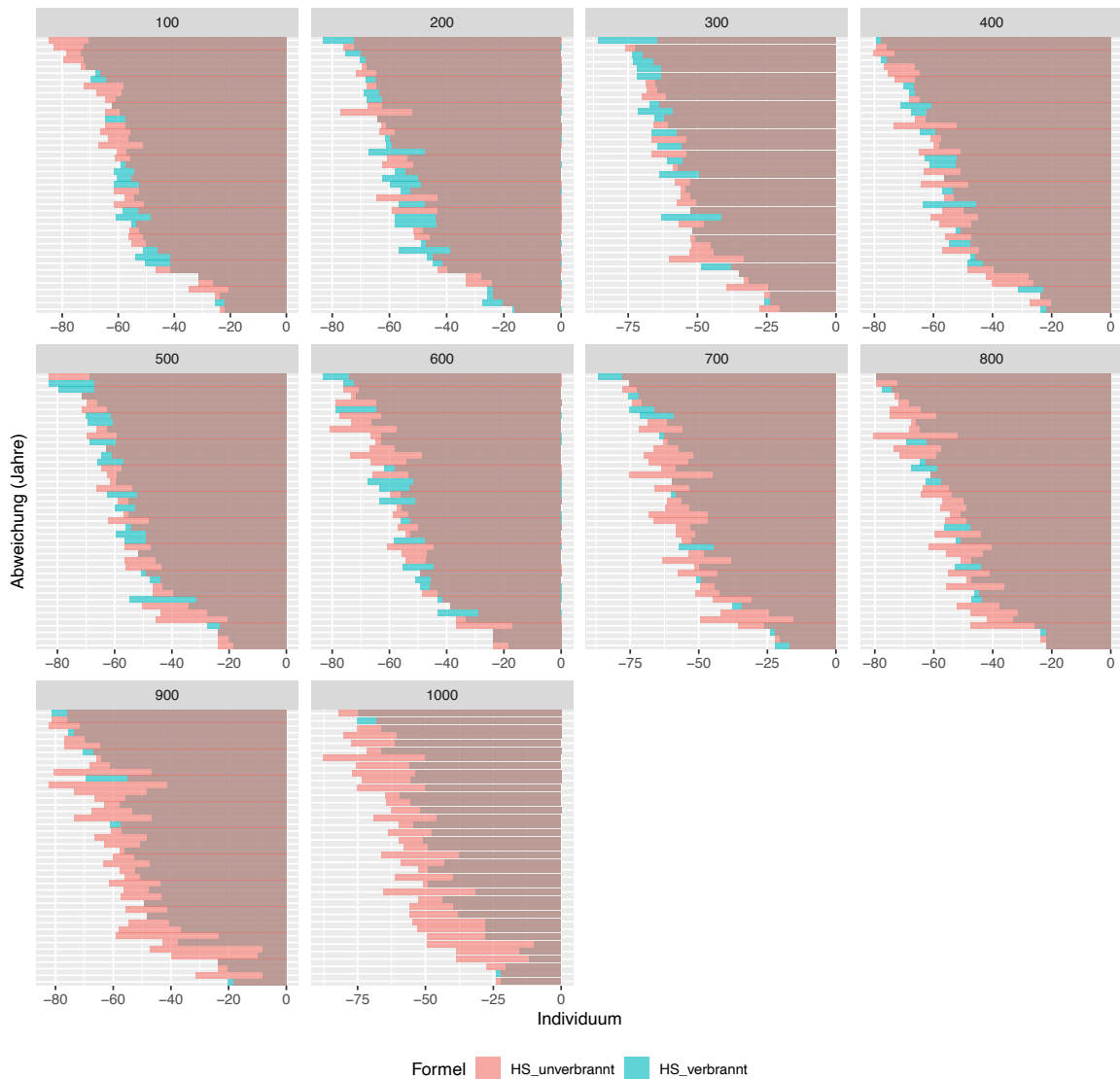


Abbildung 43: Abweichung zwischen der Altersschätzung nach Hummel und Schutkowski (1993) und dem Individualalter am periostalen Rand der Femurkompakta (HS= Hummel und Schutkowski); die Abweichungen werden dabei sowohl über die Verbrennungstemperaturen (100 bis 1000°C - türkise Balken) und über die Positionen entlang des Femurschaftes (Verbrennungstemperaturen 100 bis 1000°C entsprechen den Positionen 2 bis 11 - rote Balken) dargestellt;

Die Altersschätzung nach Hummel und Schutkowski (Hummel und Schutkowski, 1993) in der Mitte der Femurkompakta lieferte für alle Individuen, ausgenommen Individuum WF45, ein viel zu niedrig geschätztes Individualalter verglichen mit dem tatsächlichen Sterbealter. Für Individuum WF45 lagen die errechneten Alterswerte weitgehend innerhalb der in der Formel vorgegebenen Grenzen der Standardabweichung ($\pm 10,9$ Jahre) (Abbildung 44).

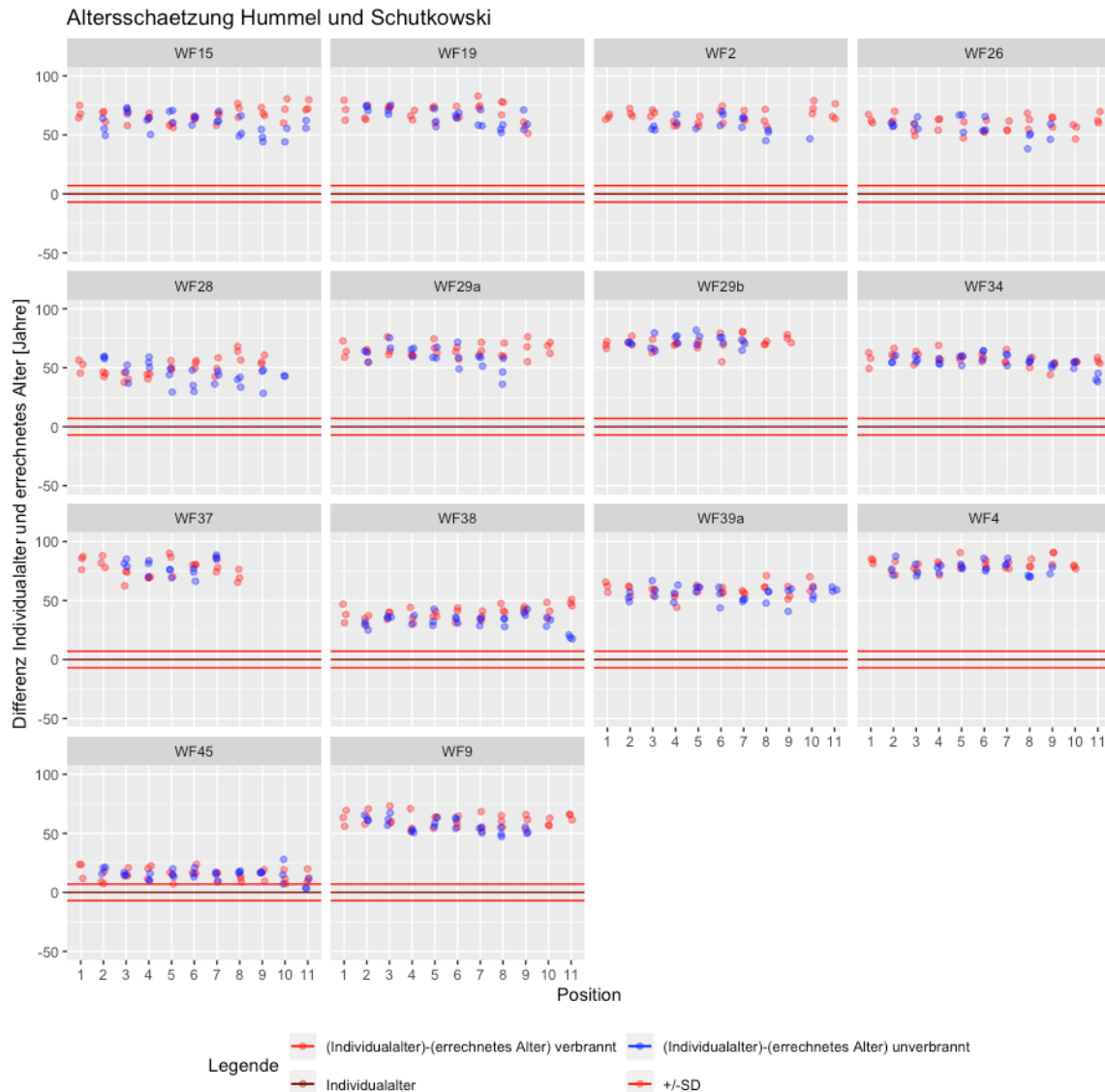


Abbildung 44: Differenz zwischen dem histologisch geschätzten Alter mittels der Regressionsformel nach Hummel und Schutkowski (1993) auf das verbrannte (rot) und unverbrannte (blau) Probenmaterial in der Mitte der Femurkompakta; es sind ausschließlich die Verbrennungsreihen (WF15, WF19, WF2, WF26, WF28, WF29a, WF29b, WF34, WF37, WF38, WF39a, WF4, WF45, WF9) zur histologischen Altersbestimmung verwendet worden; auf der X-Achse ist die Position entlang des Femurschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100-1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem tatsächlichen Alter des Individuums und die hellroten Linien ober- und unterhalb dieser Linie spiegeln die angegebene Standardabweichung aus der verwendeten Regressionsformel wider)

Die Abweichung zwischen der histologischen Altersschätzung und dem tatsächlichen Sterbealter für die Regression nach Hummel und Schutkowski in der Mitte der Femurkompakta (Hummel und Schutkowski, 1993) ist in Abbildung 45 graphisch aufgezeigt. Die Differenzen, welche sich unter der waren bis zu einer Temperatur von 500 °C bzw. Position 6 entlang des Femurschaftes relativ konstant mit einer leicht höheren Abweichung der verbrannten Proben. Ab einer Verbrennungstemperatur von 600 °C bzw. der Position 7 beginnt die negative Abweichung der unverbrannten Proben die der verbrannten Proben immer deutlicher zu übersteigen. Für Position 11 bzw. eine Temperatur von 1000 °C konnten im mittigen Bereich der Femurkompakta keine geeigneten Sichtfelder für die histologische Auswertung ausfindig gemacht werden, weshalb für einige Individuen bei dieser Temperatur bzw. Position keine Alterswerte errechnet werden konnten.



Abbildung 45: Abweichung zwischen der histologischen Altersschätzung nach Hummel und Schutkowski (1993) und dem Individualalter in der Mitte der Femurkompakta (HS= Hummel und Schutkowski die Abweichungen werden dabei sowohl über die Verbrennungstemperaturen (100 bis 1000°C - türkise Balken) und über die Positionen entlang des Femurschaftes (Verbrennungstemperaturen 100 bis 1000°C entsprechen den Positionen 2 bis 11 - rote Balken) dargestellt;

Histologische Altersbestimmung nach Uytterschaut (1995) – Tibia

Abbildung 46 zeigt die Differenz zwischen tatsächlichem und errechnetem Sterbealter nach der Regressionsgleichung von Uytterschaut (Uytterschaut, 1985). Im Falle der unverbrannten Proben liegen für die Individuen WF22, WF27 und WF33 die Differenzen meist innerhalb der Grenzen der Standardabweichung. Auch für WF24 konnten histologische Alterswerte bestimmt werden, welche innerhalb der Standardabweichung des Modells liegen. Bei Individuum WF18 wurde das histologische Alter für alle Proben zu hoch eingeschätzt. Bei den verbrannten Proben waren die histologischen Alterswerte der Individuen WF17, WF18 und WF24 meist bzw. generell weit höher als das tatsächliche Sterbealter. Bei WF22, WF27 und WF33 differieren die meisten histologischen Alterswerte innerhalb der Standardabweichung der Regressionsgleichung ($\pm 6,29$ Jahre). Auch in diesem Fall ergab sich keine verbrennungsbedingte Verschlechterung der Werte.

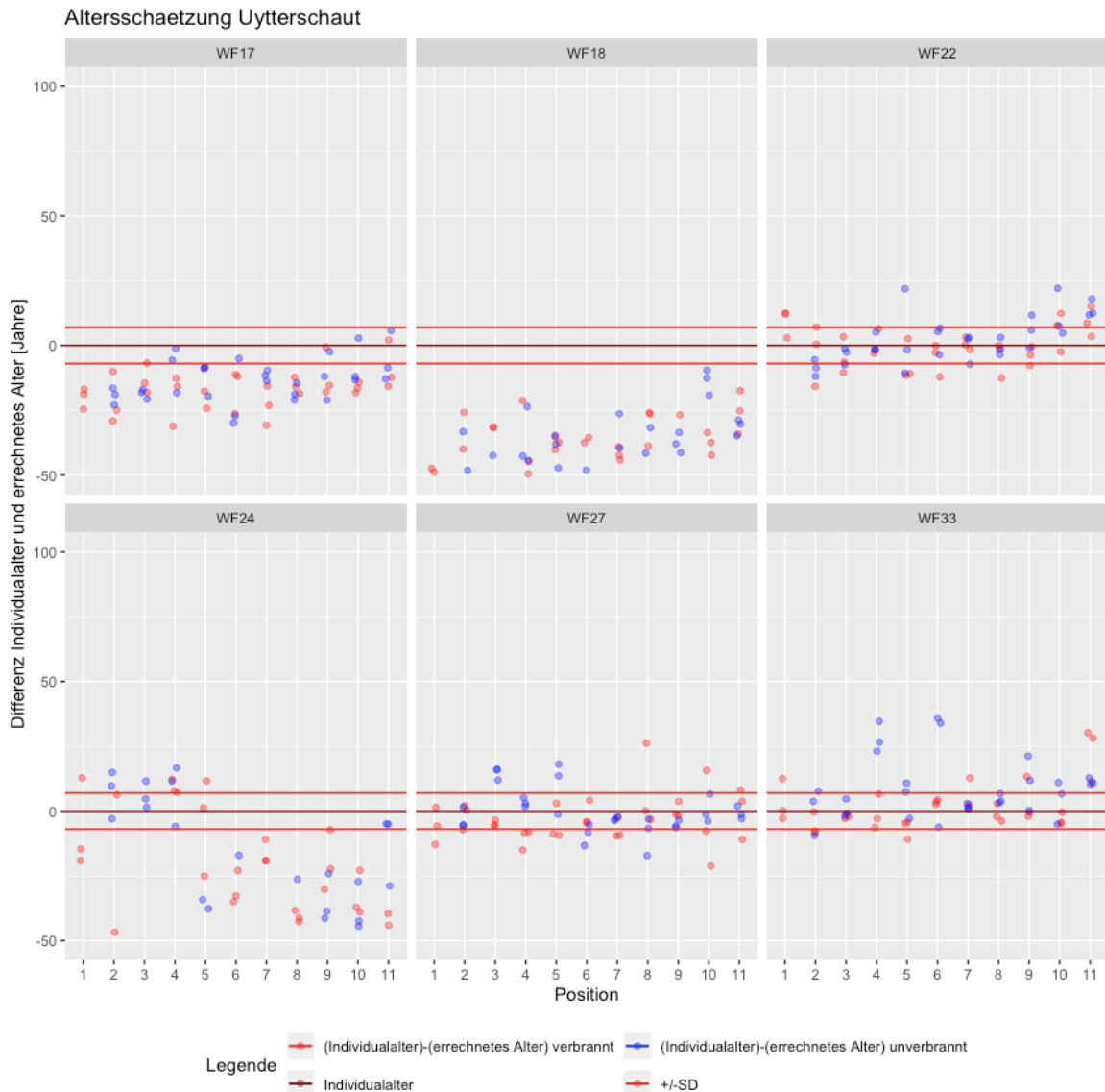


Abbildung 46: geschlechtsunabhängige Altersschätzung nach Uytterschaut (1985) für das verbrannte (rot) und unverbrannte (blau) Probenmaterial am periostalen Rand der Tibiakompakta, wofür die Verbrennungsreihen des Tibiakollektivs vom Münchner Westfriedhof (WF17, WF18, WF22, WF24, WF27 und WF33) zur histologischen Altersbestimmung verwendet wurden; auf der X-Achse ist die Position entlang des Tibiaschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100- 1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem Individualalter (Differenz=0) und die hellroten Linien ober- und unterhalb dem Individualalter spiegeln die angegebene Standardabweichung aus der verwendeten Regressionsformel wider;

Die Differenz zwischen histologischem und tatsächlichem Alter errechnet nach den histologischen Alterswerten mittels der Formel von Uytterschaut (Uytterschaut, 1985) in der Mitte der Tibiakompakta sind in Abbildung 47 gezeigt. Sowohl für die unverbrannten als auch für die verbrannten Proben weisen die Individuen WF17, WF18 und WF24 überwiegend eine negative Abweichung über die Grenzen der Standardabweichung auf ($\pm 6,29$ Jahre). Die Individuen WF27, WF33 und WF22 zeigen positive Abweichungen. Bis auf WF24 im verbrannten Kollektiv konnten für alle Individuen Altersbestimmungen innerhalb der Standardabweichung erzielt werden.

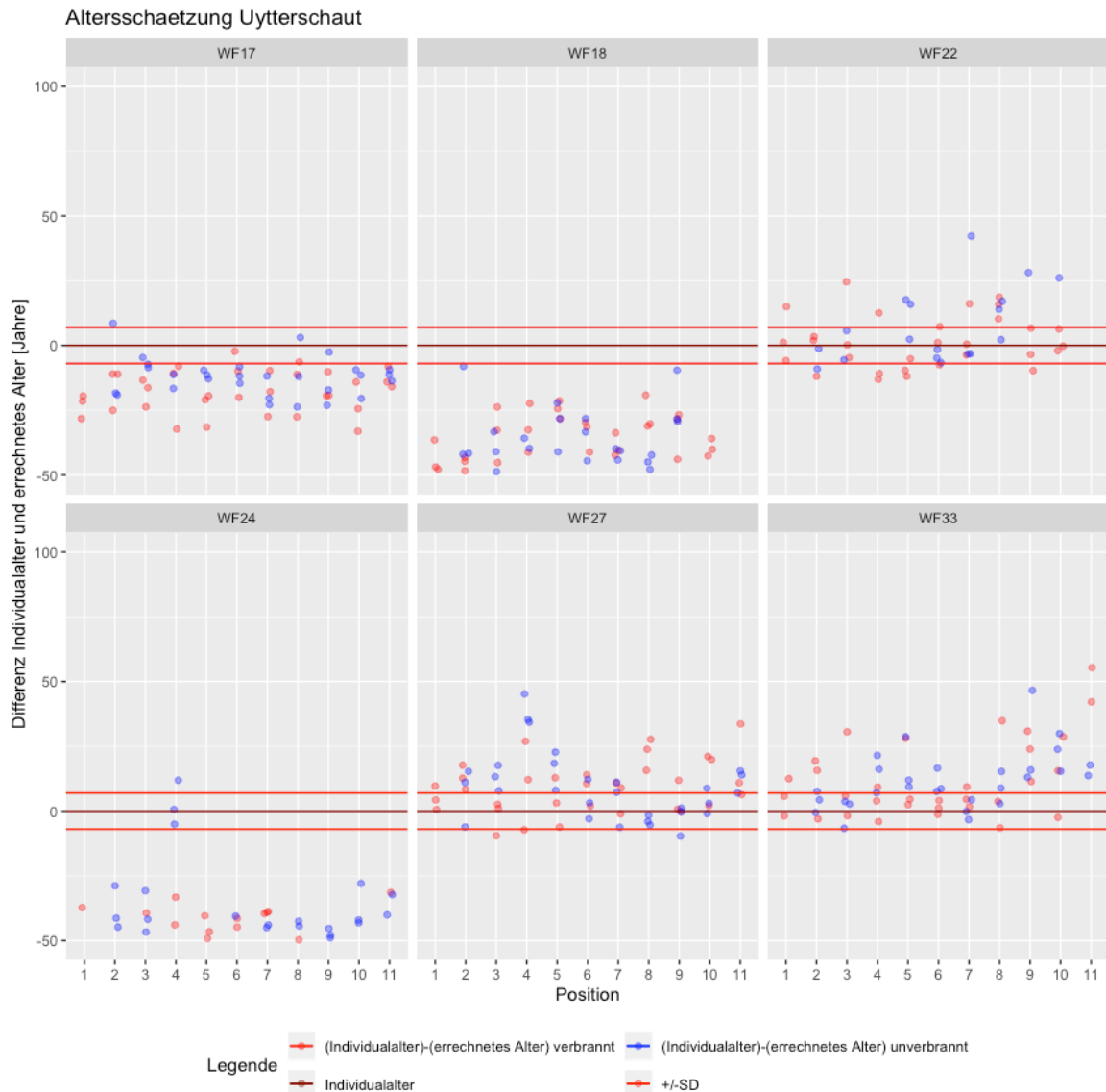


Abbildung 47: geschlechtsunabhängige Altersschätzung nach Uytterschaut (1985) auf Basis der Zählung von Osteonfragmenten auf das verbrannte (links) und unverbrannte (rechts) Probenmaterial in der Mitte der Tibiakompakta, wofür die Verbrennungsreihen des Tibiakollektivs vom Münchner Westfriedhof (WF17, WF18, WF22, WF24, WF27 und WF33) zur histologischen Altersbestimmung verwendet wurden; auf der X-Achse ist die Position entlang des Tibiaschaftes dargestellt, welche für die verbrannten Proben der Verbrennungsreihe entlang des Schaftes entspricht (100- 1000°C in Schritten von 100°C, beginnend mit 100°C bei Position2), auf der Y-Achse ist die Differenz zwischen Individualalter und errechnetem Alter aufgetragen; die dunkelrote Linie entspricht dem Individualalter (Differenz=0) und die hellroten Linien ober- und unterhalb dem Individualalter spiegeln die angegebene Standardabweichung aus der verwendeten Regressionsformel wider;

3.5) Femur

In den nachfolgenden Kapiteln wird die Auswertung des Femurprobenkollektivs, bestehend aus Rechtsmedizinproben und Westfriedhofproben, vorgestellt. Für den Test der Anwendbarkeit bestehender histologischer Altersbestimmungsformeln wurden die im Zuge der verbrennungsbedingten Veränderungen der histomorphometrischen Parameter ausgewerteten Proben bzw. deren Einzeldaten aus dem periostalen und mittigen Bereich der Femurkompakta in die Regressionsformeln einbezogen. Diese Rohdaten finden sich in Tabelle 1 und 2 im Anhang auf CD. Zudem konnten insgesamt vier der erhobenen Regressionsformeln anhand des archäologischen Probenmaterials, bestehend aus archäologischen Leichenbränden und Streufunden, aus dem Probenmaterial aus dem Archiv der Arbeitsgruppe getestet werden.

Da sich bis zu einer Verbrennungstemperatur von 600 bzw. 700°C keine signifikanten Veränderungen feststellen lassen, wird sowohl in der deskriptiven Analyse als auch in der statistischen Auswertung auf die Temperaturbereiche zwischen 100 und 500°C nicht weiter eingegangen.

3.5.1) Veränderung histomorphometrischer Parameter über die Verbrennungstemperaturen

In den folgenden Abbildungen zur Veränderung histomorphometrischer Parameter über die angewendeten Verbrennungstemperaturen sind die einzelnen Temperaturstufen zwischen 20°C (RT) und 1000°C auf der X-Achse dargestellt, welche im Falle der unverbrannten Proben den Positionen 1 bis 11 entlang der anterioren Femurdiaphyse entsprechen.

Sekundäre Osteone, intakte Osteone, Osteonfragmente und Havers'sche Kanäle

Durch die angewendeten Verbrennungstemperaturen von 100-1000 °C ergeben sich unterschiedliche Entwicklungen der einzelnen histomorphometrischen Parameter im Vergleich mit den jeweiligen unverbrannten Referenzproben an derselben Position. Die einzelnen Parameter wurden jeweils in einem Sichtfeld mit einer Größe von 1 mm² an drei unterschiedlichen Stellen im histologischen Schnitt bestimmt (vgl. Material und Methoden, Kapitel 2.2.6). Die tatsächlichen Werte aller gezählten und errechneten histomorphometrischen Parameter sind in Tabelle 1 im Anhang auf CD zu finden. Dort finden sich ebenfalls die prozentualen Abweichungen zwischen den verbrannten Proben und deren unverbrannten Referenzen (Abbildung 1A-E im Anhang). Der mittlere Bereich der Femurkompakta wurde ebenfalls einer histomorphometrischen Auswertung im Hinblick auf verbrennungsbedingte Veränderungen unterzogen. Die ausgezählten Einzeldaten sind in Tabelle 2 im Anhang auf CD zu finden. Die prozentualen Änderungen zwischen verbrannter Probe und der korrespondierenden unverbrannten Referenz befindet sich im direkten Anhang der Arbeit (Abbildung 2A-E).

Abbildung 48 zeigt den Verlauf der Veränderung von Osteonen (sekundäre, intakte und Typ-II-Osteone) und Osteonfragmenten über die Verbrennungstemperaturen (20-1000 °C) hinweg (hellgraue Linie) im *periostalen* Bereich der Femurkompakta, welche auch den Positionen 1 bis 11 der unverbrannten Referenzproben entlang des anterioren Femurschaftes entsprechen (schwarze Linie). Ab einer Temperatur von 700 °C ist ein deutlicher Anstieg der Differenz zwischen unverbrannter und verbrannter Probe erkennbar, welcher bei 1000 °C sein Maximum erreicht. Für die verbrannten Proben zeigt sich ab 700 °C (Position 8) ein deutlicher Anstieg der Zahl intakter und sekundärer Osteone, wobei diese beiden Parameter im Falle der unverbrannten Referenzproben eine leicht negative Tendenz aufweisen. Die Zahl der Osteonfragmente ist für beide Probenarten konstant leicht abnehmend mit zunehmender Verbrennungstemperatur, ist jedoch zwischen 600 und 1000 °C stets geringfügig erhöht für die verbrannten Proben. Bei den Typ-II-Osteonen zeigt sich zwischen 600 und 1000 °C bei unverbrannten und verbrannten Proben der gleiche Trend.

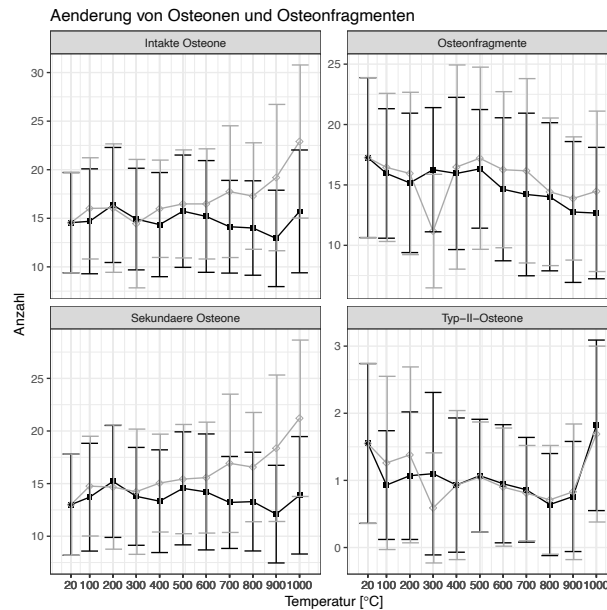


Abbildung 48: Verlauf der verbrennungsbedingten Änderung von intakten und sekundären Osteonen, Osteonfragmenten und Typ-II-Osteonen im Vergleich mit dem Verlauf der unverbrannten Referenzproben; die auf der X-Achse aufgetragenen Verbrennungstemperaturen von 20-1000°C entsprechen den Positionen 1-11 entlang der anterioren Femurdiaphyse; in schwarz ist der Verlauf der unverbrannten Referenzen dargestellt, in grau die Veränderungen über die Verbrennungstemperaturen; die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung, berechnet einzeln für jede Temperaturstufe bzw. Position;

Tabelle 6 im Anhang beschreibt die verbrennungsbedingte Änderung sekundärer und intakter Osteone, Typ-II-Osteone und Osteonfragmente. Auf die Veränderung Havers'scher Kanäle wird verzichtet, da diese sich genauso wie die Veränderung intakter Osteone verhält. Die sekundären Osteone zeigen entlang des anterioren Femurschaftes geringe Variationen von im Mittel 12 bis 15 sekundären Osteonen pro mm². Über die Verbrennungstemperaturen fallen die Unterschiede gravierender aus. Hier ist eine kontinuierliche Zunahme innerhalb der unverbrannten Referenzprobe (13/mm²) bis zu der höchsten Verbrennungstemperatur von 1000 °C (21/mm²) zu beobachten. Dies spiegelt sich auch in der prozentualen Veränderung zwischen der unverbrannten Referenzprobe und der verbrannten Probe wider (+53 %).

Intakte Osteone zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf wie die sekundären Osteone, mit leichter Variation entlang des unverbrannten Femurschaftes (14/mm² bis 15/mm²) und einem deutlichen Anstieg mit zunehmender Verbrennungstemperatur (14/mm² bis 23/mm²). Anhand der Typ-II-Osteone lässt sich im unverbrannten Zustand nur eine Variation zwischen 0,6/mm² und 1,8/mm² feststellen. Ebenso ist bei den verbrannten Proben eine Zunahme mit steigender Verbrennungstemperatur erkennbar (0,6-1,7/mm²). Die Osteonfragmente lassen im unverbrannten Zustand entlang des Femurschaftes von proximal nach distal gehend eine Verringerung in ihrer Anzahl erkennen (17,26/mm² bei Position 1 und 12,67/mm² bei Position 11). Dieser Trend zeigt sich, wenn auch vermindert, auch für die temperaturbehandelten Proben (17/mm² bei RT und 14/mm² bei 1000 °C).

Der Verlauf in der Anzahl von Osteonen und Osteonfragmenten über die Verbrennungstemperaturen im Vergleich mit der unverbrannten Referenz in der *Kompaktmitte* der Femora ist in Abbildung 49 aufgezeigt. Im Vergleich mit dem temperaturbedingten Verlauf derselben Parameter am periostalen Rand der Femurkompakta zeigt sich auch für die Kompaktmitte zwischen 600 und 1000 °C bei

intakten und sekundären Osteonen ein kontinuierlicher Anstieg. Die Anzahl der Parameter bei den unverbrannten Referenzen nimmt ebenfalls zwischen Position 8 und Position 11 stetig zu. Im Gegensatz zum periostalen Rand ist allerdings in der Kompaktamitte auch für die Osteonfragmente eine solche Akkumulierung zwischen 600 und 1000 °C bzw. Position 8 und 11 erkennbar.

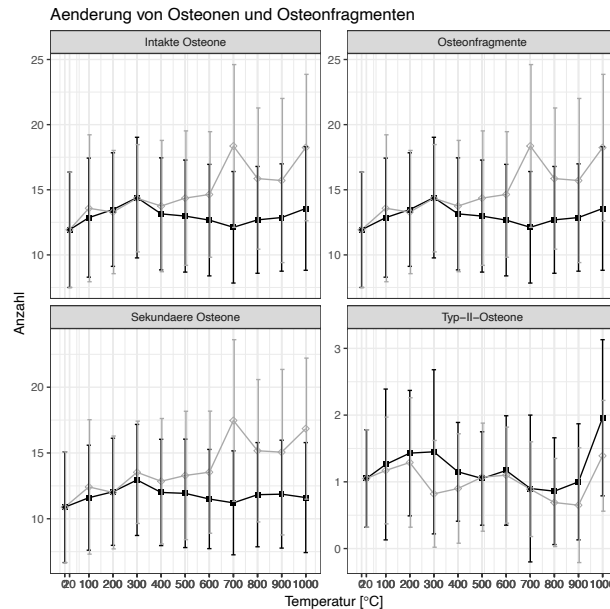


Abbildung 49: Verlauf der verbrennungsbedingten Änderung von intakten und sekundären Osteonen, Osteonfragmenten und Typ-II-Osteonen im Vergleich mit dem Verlauf der unverbrannten Referenzproben; die auf der X-Achse aufgetragenen Verbrennungstemperaturen; in schwarz ist der Verlauf der unverbrannten Referenzen dargestellt, in grau die Veränderungen über die Verbrennungstemperaturen; die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung, berechnet einzeln für jede Temperaturstufe bzw. Position;

In Tabelle 10 im Anhang ist der mittlere Verlauf der Anzahl sekundärer und intakter Osteone, Typ-II-Osteone und Osteonfragmente entlang des unverbrannten Schaftes und über die Verbrennungstemperaturen dargestellt. Zu sehen ist dabei die prozentuale Veränderung zwischen unverbrannter und verbrannter Probe. Für die sekundären Osteone steigt die Abweichung zwischen unverbrannten und verbrannten Proben kontinuierlich an mit einem Maximum bei 700 °C (55 %), gefolgt von einem Absinken und anschließendem Anstieg zwischen 800 und 900 °C. Die intakten Osteone zeigen den gleichen Verlauf wie die Anzahl sekundärer Osteone. Dabei zeigt sich eine Zunahme sowohl unverbrannt als auch verbrannt über die Positionen des Schaftes bzw. Temperaturstufen. Zudem sind zunehmende Unterschiede zwischen den unverbrannten und verbrannten Proben erkennbar. Für die Typ-II-Osteone zeigt sich über alle Temperaturstufen eine negative Differenz zu den unverbrannten Proben mit einem Peak bei 300°C (-43 %). Die Osteonfragmente zeigen keinen verbrennungsbedingten Anstieg über die Temperaturstufen und nur eine leichte Zunahme entlang des unverbrannten Schaftes. Die Abweichung schwankt zwischen 11 (200 °C) und -15 % (600 °C).

Resorptionslakunen, nicht-Havers'sche Kanäle und Volkmann'sche Kanäle

Die Änderung der Resorptionslakunen, nicht-Havers'schen und Volkmann'schen Kanäle am *periostalen Rand* der Femurkompakta werden in Abbildung 50A aufgezeigt. Die Anzahl der Resorptionslakunen der kremierten Proben weist bis zu einer Temperatur von 800°C nahezu den gleichen Verlauf auf wie

die unverbrannten Referenzen. Ab 900°C zeigen sowohl verbrannte als auch unverbrannte Proben einen deutlich negativen Trend. Trotzdem übersteigt die Anzahl der Resorptionslakunen in den verbrannten Proben die der unverbrannten Proben. Die Volkmann'schen Kanäle verhalten sich ebenfalls ähnlich in ihrem Verlauf zwischen den unverbrannten und den verbrannten Proben. Bei 600°C übersteigt die Anzahl in den verbrannten Proben die der unverbrannten. Auch im Falle der nicht-Havers'schen Kanäle liegen nahezu gleiche Trends für unverbrannte und verbrannte Proben vor, wobei die Anzahl für die verbrannten Proben ab 700°C gegenüber den unverbrannten Proben leicht erhöht ist. Da sich die Anzahl der nicht-Havers'schen und Volkmann'schen Kanäle sowie der Resorptionslakunen nur in einem geringen Maße in dem gewählten histologischen Feld von 1mm² finden lässt (maximal 1-2/mm²), wird nicht auf die Einzeldaten eingegangen.

Abbildung 50B zeigt den Verlauf derselben Parameter in der Kompaktmitte der Femora. Die Anzahl der Resorptionslakunen ist in der *Kompaktmitte* bei den unverbrannten Proben stets erhöht gegenüber den verbrannten Proben. Die Volkmann'schen Kanäle zeigen weder bei verbrannten noch bei unverbrannten Proben einen klaren Trend auf, sind jedoch immer erhöht im Falle der unverbrannten Proben gegenüber den verbrannten.

Nicht-Havers'sche Kanäle sind für unverbrannte und verbrannte Proben bis Position 7 bzw. 600 °C nahezu gleich. Ab einer Temperatur von 700 °C ist die Anzahl der nicht-Havers'schen Kanäle der verbrannten Proben deutlich erhöht gegenüber den unverbrannten Proben. Diese verbrennungsbedingte Zunahme ist wesentlich stärker ausgeprägt als am *periostalen* Rand.

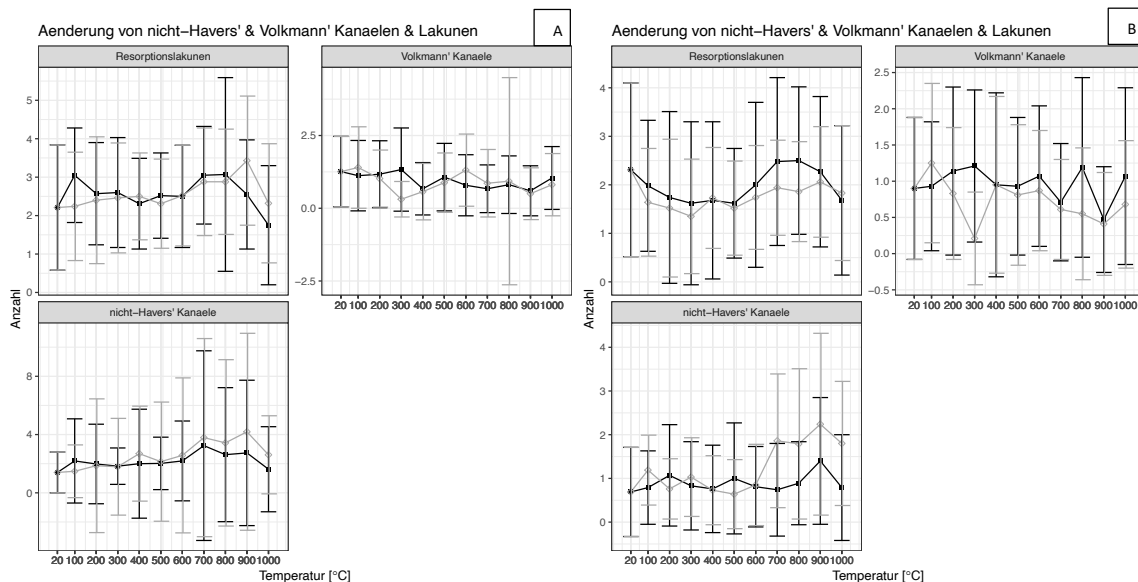


Abbildung 50: Verlauf der verbrennungsbedingten Änderung von Resorptionslakunen, Volkmann' Kanälen und nicht-Havers' Kanälen im Vergleich mit dem Verlauf der unverbrannten Referenzproben; A. periostaler Rand der Femurkompakta, B. Mitte der Femurkompakta; die auf der X-Achse aufgetragenen Verbrennungstemperaturen von 20-1000°C; in schwarz ist der Verlauf der unverbrannten Referenzen dargestellt, in grau die Veränderungen über die Verbrennungstemperaturen; die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung, berechnet einzeln für jede Temperaturstufe bzw. Position;

Prozentuale Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur

Die temperaturinduzierten Änderungen der prozentualen Anteile an Generallamellen (=lamellärer Knochen), sowie osteonalem, resorbiertem und fragmentalem Knochen über die Verbrennungsreihen im Vergleich mit den unverbrannten Referenzproben am *periostalen* Rand der Femurkompakta sind in

Abbildung 51A und 51B und Tabelle 7 im Anhang gezeigt. Der fragmentale Knochen zeigt für unverbrannte und verbrannte Proben einen ähnlichen Verlauf. Zwischen Position 1 und Position 11 ist eine Abnahme um 7 % erkennbar (26 % bei Position 1 auf 18 % bei Position 11). Auch zwischen der unverbrannten Referenzprobe und der Verbrennungstemperatur von 1000 °C zeigt sich eine Verringerung des prozentualen Anteils um 9 % (26 % bei RT und 17 % bei 1000 °C). Des Weiteren schwankt die prozentuale Abweichung zwischen unverbrannter und verbrannter Probe zwischen bis zu +10 % (Position 6 bis 8) und bis zu -8% (Position 9 und 10). Der prozentuale Anteil lamellaren Knochens hat für verbrannte und unverbrannte Proben einen ähnlichen Verlauf. Für den prozentualen Anteil osteonalen Knochens zeigt sich bei 700 bis 900 °C ein leicht höherer Anteil für die verbrannten Proben, bei 300 °C übersteigt der Anteil innerhalb der unverbrannten Proben den innerhalb der verbrannten Proben um 8 %. Generell schwankt der Anteil osteonalen Knochens bei den unverbrannten Proben zwischen 43 und 54 %, bei den verbrannten Proben hingegen nur zwischen 46 % und 52 %. Der prozentuale Anteil resorbierten Knochens ist für die unverbrannten Proben zwischen 700 und 800 °C leicht erhöht gegenüber den verbrannten. Bei 400 und 900 °C übersteigt der Anteil resorbierten Knochens der verbrannten Proben den der unverbrannten.

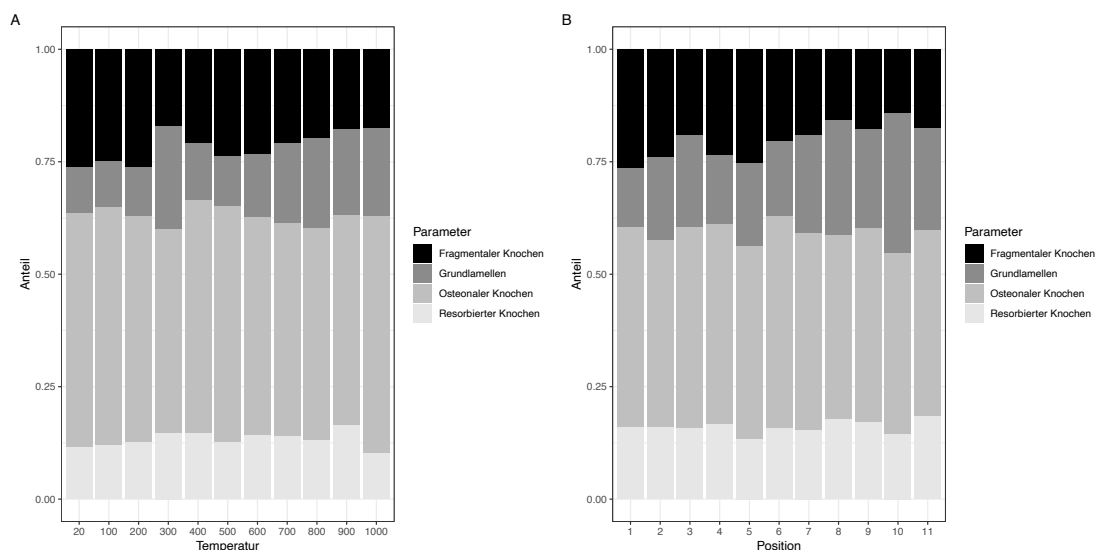


Abbildung 51: Periostale Femurkompakta: A. Veränderung der Anteile fragmentalen, lamellären, osteonalen und resorbierten Knochens über die Verbrennungstemperaturen der Verbrennungsreihe (RT bis 1000 °C), B. Veränderungen der prozentualen Zusammensetzung der Anteile fragmentalen, lamellären, osteonalen und resorbierten Knochens über die Positionen entlang des Femurschaftes

Die Änderung der prozentualen Anteile im Vergleich mit den unverbrannten Referenzproben in der Mitte der Femurkompakta ist in Abbildung 52A und B und in Tabelle 11 im Anhang dargestellt. Der Anteil fragmentalen Knochens zeigt für die Kompaktamitte eine wesentlich deutlichere verbrennungsbedingte Divergenz zwischen unverbrannter und verbrannter Probe als am *Periost*. Der lamellare Knochen weist sowohl für unverbrannte als auch verbrannte Proben deutliche Schwankungen auf. Zwischen 700 °C und 1000 °C ist der Anteil lamellaren Knochens für die verbrannten Proben deutlich erhöht. Der osteonale Knochen zeigt für die unverbrannten Proben von Position 3 bis Position 8 einen Negativtrend, gefolgt von einem leichten Anstieg (Schwankung von -1 bis 13 %). Für die verbrannten Proben ist bei 600 °C ein Anstieg erkennbar, gefolgt von einem Absinken

auf den Wert der unverbrannten Proben zwischen 700 und 1000 °C. Der Verlauf resorbierten Knochens ist bis 500 °C bzw. Position 6 nahezu gleich für verbrannte und unverbrannte Proben. Ab 600°C bzw. Position 7 zeigen die unverbrannten Proben einen deutlichen Anstieg, gefolgt von einem Absinken zwischen 900 und 1000 °C auf den Verlauf der verbrannten Proben (Schwankung von 1 bis -25 %).

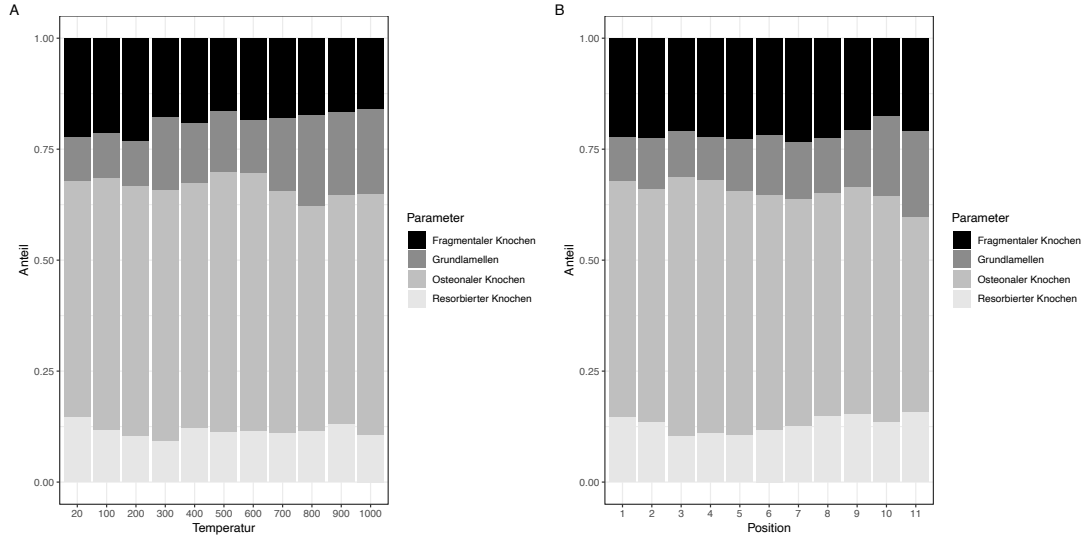


Abbildung 52: Mittige Femurkompakta: A. Veränderung der Anteile fragmentalen, lamellären, osteonalen und resorbierten Knochens über die Verbrennungstemperaturen der Verbrennungsreihe (RT bis 1000 °C), B. Veränderungen der prozentualen Zusammensetzung der Anteile fragmentalen, lamellären, osteonalen und resorbierten Knochens über die Positionen entlang des Femurschaftes;

Resorptionslakunen- und Osteongeometrie

Abbildung 53 zeigt zum einen die verbrennungsbedingten Änderungen der Osteon- und Resorptionslakunengeometrie jeweils im Vergleich mit den unverbrannten Referenzproben am periostalen Rand der Femurkompakta.

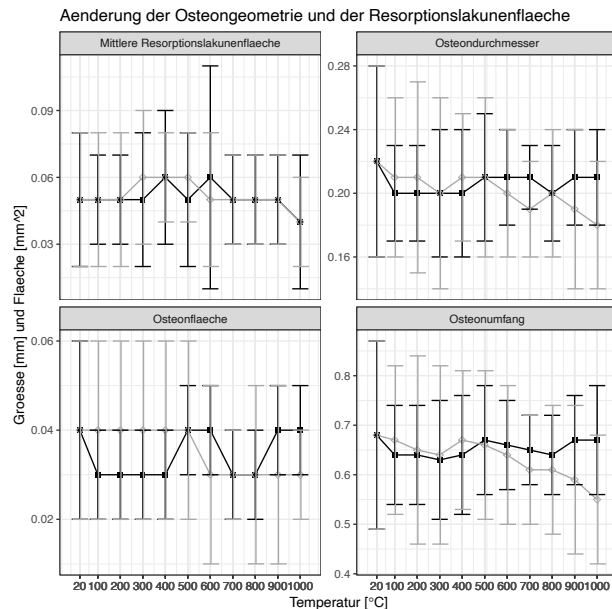


Abbildung 53: Änderung der Osteongeometrie in Form von Osteondurchmesser, Osteonfläche, Osteonumfang und Resorptionslakunenfläche über die Verbrennungstemperaturen im Vergleich mit der unverbrannten Referenz am periostalen Rand der Femurkompakta; die Verbrennungstemperaturen von 20 bis 1000°C entsprechen den Positionen 1-11 entlang des Femurschaftes; in schwarz ist der Verlauf der unverbrannten Referenzen dargestellt, in grau die Veränderungen über die Verbrennungstemperaturen; die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung, berechnet einzeln für jede Temperaturstufe bzw. Position

Osteonfläche, Osteondurchmesser und Osteonumfang zeigen temperaturinduzierte Schrumpfungen auf, welche sich vor allem ab einer Temperatur von 500 °C mit bis zu -30 % bei der Osteonfläche, bis zu -17 % bei Osteonumfang und Osteondurchmesser manifestieren. Generell zeigen sich Schwankungen zwischen 0,04 und 0,03 mm² für die Osteonfläche, 0,55 und 0,68 mm für den Osteonumfang und 0,2-0,22 mm für den Osteondurchmesser im unverbrannten Zustand (Tabelle 8 im Anhang). Die Schwankungen für die Osteonfläche verhalten sich im verbrannten Zustand gleich dem unverbrannten, der Osteonumfang schwankt zwischen 0,68 (RT) und 0,55 mm (1000°C), der Osteondurchmesser zwischen 0,22 (RT) und 0,18 mm (1000 °C). Bei der Resorptionslakunenfläche treten Schwankungen zwischen 0,04 und 0,05 mm² in der Größe bis 800 °C auf, ansonsten verhält sie sich gleich den Schwankungen im unverbrannten Knochen.

Abbildung 54 zeigt die Änderungen der Osteongeometrie und der Resorptionslakunengeometrie in der *Mitte* der Femurkompakta. Wie am *periostalen Rand* ist Fläche der Resorptionslakunen ist sowohl für die verbrannten als auch die unverbrannten Proben deutlichen Schwankungen unterworfen. Die Trends verlaufen dabei weitestgehend gleich.

Osteondurchmesser, Osteonfläche und Osteonumfang zeigen ebenfalls wie am *periostalen Rand* dieselben Trends über die Verbrennungstemperaturen hinweg. Ab 700 °C zeigen alle drei Parameter eine deutliche Abnahme gegenüber den unverbrannten Proben, mit einer Schrumpfung um bis zu 25 % für die Osteonfläche und 15 % für Osteondurchmesser und Osteonumfang (Tabelle 12 im Anhang).

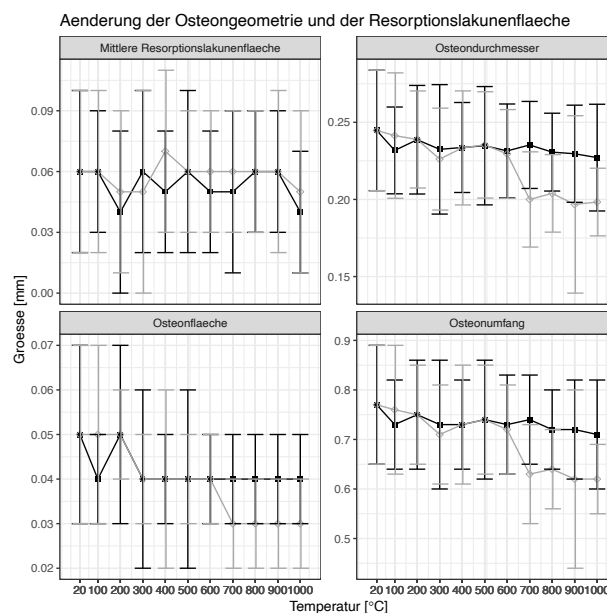


Abbildung 54: Änderung der Osteongeometrie in Form von Osteondurchmesser, Osteonfläche, Osteonumfang und Resorptionslakunenfläche über die Verbrennungstemperaturen im Vergleich mit der unverbrannten Referenz in der *Mitte* der Femurkompakta; die Verbrennungstemperaturen von 20 bis 1000°C entsprechen den Positionen 1-11 entlang des Femurschaftes; in schwarz ist der Verlauf der unverbrannten Referenzen dargestellt, in grau die Veränderungen über die Verbrennungstemperaturen; die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung, berechnet einzeln für jede Temperaturstufe bzw. Position;

Metabolismus-abhängige Parameter (AOC, Aktivierungsfrequenz, OPD und BFR)

Im Falle der Metabolismus-abhängigen Parameter am *periostalen Rand* der Femurkompakta (Abbildung 55 und Tabelle 9 im Anhang) zeigt die Aktivierungsfrequenz einen nahezu gleichen Verlauf zwischen unverbrannten und verbrannten Proben über die Positionen hinweg (unverbrannt: 0,76 bis

0,63/mm²/Jahr, verbrannt: 0,56 bis 0,92/mm²/Jahr). Die Rate der verbrannten Proben weist deutliche Schwankungen auf und steigt bei der höchsten Temperatur deutlich an (+44 %). Für die OPD zeigt sich ab 600 °C bis hin zu 1000 °C ein Anstieg in der Differenz zwischen verbrannter und unverbrannter Probe deutlich an (31 % bei 1000 °C).

Die AOC steigt ab sich 600°C (+47 %) bei den verbrannten Proben deutlich an gegenüber den unverbrannten Proben. Bei der Bone formation rate (Knochenbildungsrate) zeigen verbrannte und unverbrannte Proben ebenfalls einen nahezu identischen Verlauf. Abgesehen von einer leicht erhöhten Rate für die verbrannten Proben ab 600 °C (+32 %) bis 1000°C (+31 %) mit einem leichten Rückgang bei 700°C (-2 %).

OPD, AOC und Aktivierungsfrequenz zeigen für die unverbrannten Proben eine Verringerung über die Positionen des Schaftes hinweg.

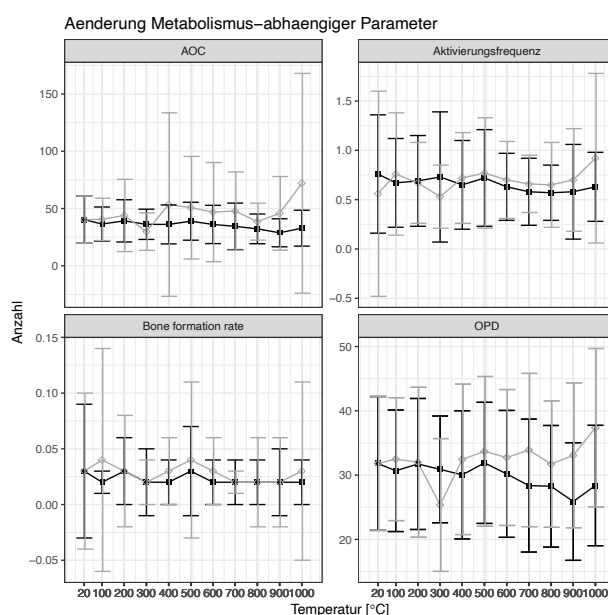


Abbildung 55: Änderung der Metabolismus-abhängigen AOC, Aktivierungsfrequenz, Bone formation rate und OPD über die Verbrennungstemperaturen im Vergleich mit der unverbrannten Referenz am periostalen Rand der Kompakta; die Verbrennungstemperaturen von 20 bis 1000°C entsprechen den Positionen 1-11 entlang des Femurschaftes; in schwarz ist der Verlauf der unverbrannten Referenzen dargestellt, in grau die Veränderungen über die Verbrennungstemperaturen; die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung, berechnet einzeln für jede Temperaturstufe bzw. Position;

Im Falle der *mittigen Femurkompakta* (Abbildung 56 und Tabelle 13 im Anhang) zeigen AOC, Aktivierungsfrequenz und OPD nahezu identische Trends auf. Bis zu einer Temperatur von 700 °C sind die Raten jeweils nahezu identisch mit dem Verlauf der unverbrannten Proben. Ab 700 °C beginnen AOC (+52 %) und OPD (+18 %) der verbrannten Proben anzusteigen. Ab 800 °C ist auch für die Aktivierungsfrequenz (+17,30%) ein Anstieg erkennbar. Die AOC verringert sich zwischen 800 und 900 °C wieder nahezu auf den Wert der unverbrannten Proben, gefolgt von einem Anstieg bei 1000 °C (+66 %). Die OPD weist zwischen 800 und 900 °C ebenfalls einen leichten Einbruch in Richtung des Verlaufs der unverbrannten Proben auf, gefolgt von einem erneuten, aber verringertem, Anstieg bei 1000 °C (+10 %). Die Bone formation rate (Knochenbildungsrate) scheint weitaus mehr verbrennungsbedingten Schwankungen unterlegen zu sein als die drei anderen Metabolismus-abhängigen Parameter.

Hier zeigen sich die größten verbrennungsbedingten Veränderungen bei 700 (-30 %) und 1000°C (31 %), dazwischen treten schwankende negative prozentuale Abweichungen zwischen -8 und -14 % auf.

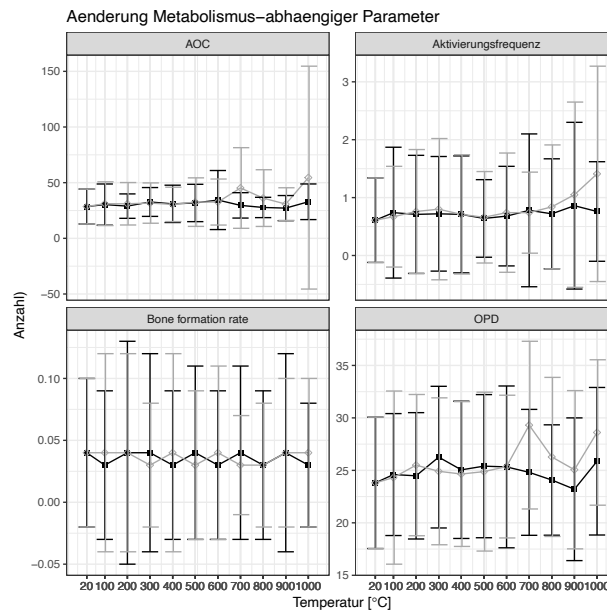


Abbildung 56: Änderung der Metabolismus-abhängigen AOC, Aktivierungsfrequenz, Bone formation rate und OPD über die Verbrennungstemperaturen im Vergleich mit der unverbrannten Referenz in der Kompaktmitte; die Verbrennungstemperaturen von 20 bis 1000°C entsprechen den Positionen 1-11 entlang der Femurdiaphyse; in schwarz ist der Verlauf der unverbrannten Referenzen dargestellt, in grau die Veränderungen über die Verbrennungstemperaturen; die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung, berechnet einzeln für jede Temperaturstufe bzw. Position;

3.5.2) Schrumpfungskoeffizient und Schrumpfung der histomorphometrischen Parameter

Im Folgenden wird auf die hitzebedingte Schrumpfung der gezählten histomorphometrischen Parameter eingegangen. Zunächst erfolgte die Applizierung des Schrumpfungskoeffizienten auf das Femurprobenkollektiv im **periostalen** Bereich der Kompakta. Der Schrumpfungskoeffizient sollte es ermöglichen, eine Rückrechnung der verbrannten Proben auf den Ausgangswert der unverbrannten korrespondierenden Referenzproben bzw. eine Näherung an deren Wert zu erzielen. Dabei wurden die Werte Dicken- und Breitenschrumpfung für jedes Fragment jedes Individuums gesondert einbezogen bzw. berechnet. Ziel war es, durch die Applizierung eines solchen Schrumpfungskoeffizienten auf histomorphometrische Parameter für die Erstellung linearer Modelle und die Einbeziehung in histologische Altersschätzungsmethoden, die Werte der verbrannten Proben an, die der unverbrannten anpassen zu können. Die Einbeziehung dieses Schrumpfungskoeffizienten ergab, dass sich die Ergebnisse der Zählungen der histomorphometrischen Parameter der verbrannten Proben entgegen der vorherigen Erwartungen nicht denen der unverbrannten Referenzen annähern. Der Schrumpfungsparameter wurde für jedes Individuum einzeln bei jeder Verbrennungsstufe aus dem Quotienten der jeweilig gemessenen Dicken- und Breitenschrumpfung errechnet. Die Dicken- und Breitenschrumpfung wurde für jedes Fragment der Verbrennungsreihe auf jeder Temperatur einzeln gemessen. Auch für die Proben, an welchen nur die Veränderung zwischen RT und 1000 °C untersucht wurde, wurden vor und nach der Verbrennung Dicke und Breite des Fragments gemessen. In Tabelle 2 im Anhang sind alle Proben mit zugehörigem Schrumpfungskoeffizienten und dem prozentualen

Gewichtsverlust aufgelistet. Bei der *periostalen und mittigen* Auswertung der Auswirkung eines Schrumpfkoeffizienten wurde darauf geachtet, solche Proben, bei denen entweder der Schrumpfkoeffizient, die unverbrannte Probe oder die verbrannte Probe keine Angaben hatten (Wert = 0 oder NA) auszuschließen, um daraus entstehende Fehlinterpretationen zu vermeiden. In Tabelle 14 (**Periost**) und Tabelle 15 (**Mitte**) im Anhang sind die Werte aufgelistet, bei denen sich durch die Einbeziehung des Schrumpfkoeffizienten ein an die unverbrannte Probe genäherter Wert im Vergleich zum gezählten Wert der verbrannten Probe ergab.

Am *periostalen Rand* konnte für die sekundären Osteone und Havers'schen Kanäle bei 6 % aller Proben ein besserer Wert erzielt werden, für Typ-II-Osteone, nicht-Havers'sche Kanäle und Resorptionslakunen bei circa 9 % und für die Volkmann'schen Kanäle in 7 % der Fälle.

In der *Kompaktmitte* konnte bei den sekundären Osteone in 9 %, bei Typ-II-Osteonen in 15-16 %, für Osteonfragmente und Havers'sche Kanäle in 7 % und für Resorptionslakunen und nicht-Havers'sche Kanäle in 11 % der Fälle ein Wert erzielt werden, welcher näher an dem der unverbrannten Referenz liegt.

Die Werte aus der prozentualen Zusammensetzung am *periostalen Rand* ergaben für den Anteil an Generallamellen für 13% der Proben bessere Ergebnisse, für den Anteil an osteonalem Knochen bei 4%, für den Anteil an resorbiertem Knochen bei 11% und für den Anteil an fragmentalem Knochen bei 10%. In der *Kompaktmitte* erzielte der Schrumpfkoeffizient bei resorbiertem Knochen bei 15 %, bei osteonalem Knochen bei 4 % und bei fragmentalem Knochen bei 9 % der Probe ein genähertes Ergebnis.

Es zeigte sich, dass vor allem *jüngere* Individuen (WF45 und FS01-13), Individuen der Altersklasse *Maturitas* (WF38) und *sehr alte* Individuen (z.B. WF29a, WF29b und WF30) durch den Schrumpfkoeffizienten an die unverbrannte Probe **genäherte Werte** aufweisen. Aber auch bei Individuen der mittleren Altersklasse (WF38) zeigte sich in der *Kompaktmitte* ein positiver Einfluss des Schrumpfkoeffizienten.

Zum Test eines linearen Zusammenhangs zwischen den histomorphometrischen Parametern und der Schrumpfung in Fragmentbreite und Fragmentdicke wurde mithilfe der *Pearson-Korrelation* der Korrelationskoeffizient (r) berechnet. Bei der Auswertung der Auswirkung eines Schrumpfkoeffizienten wurde darauf geachtet, solche Proben, bei denen entweder der Schrumpfkoeffizient, die unverbrannte Probe oder die verbrannte Probe keine Angaben hatten (Wert = 0 oder NA) auszuschließen, um daraus entstehende Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Die Korrelation zwischen der Schrumpfung in Dicke und Breite mit den gezählten histomorphometrischen Parametern am ***periostalen Rand*** und in der ***Mitte der Kompakta*** ist in Abbildung 57A und 57B gezeigt.

Es ist erkennbar, dass sich zwischen den Parametern und den Schrumpfungswerten keine signifikante positive Korrelation ergibt. Einige histomorphometrische Parameter korrelieren allerdings in ***Periost***

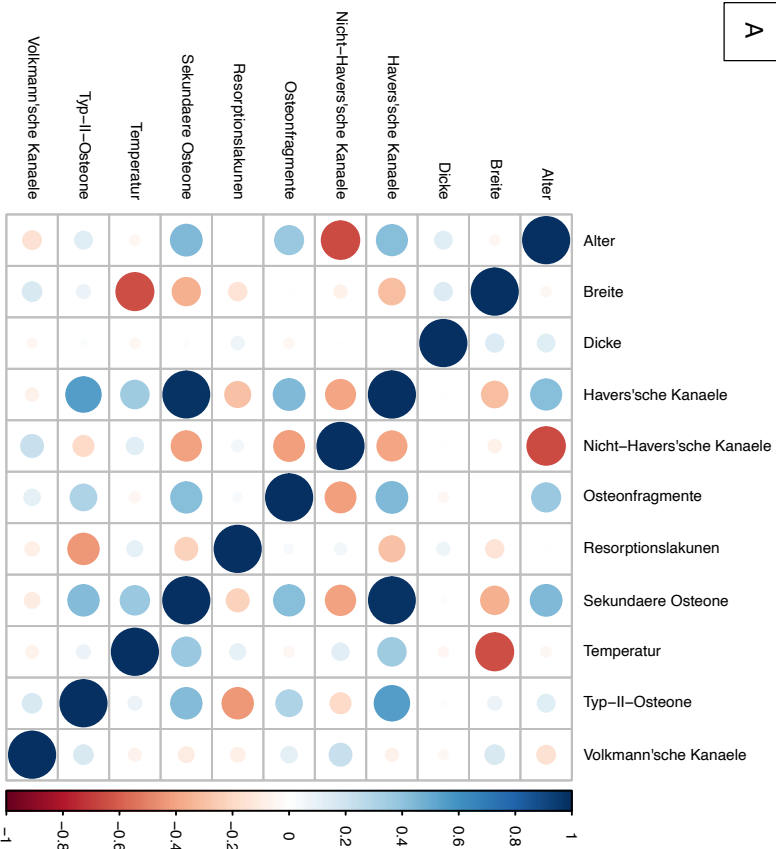
und **Kompaktmitte** positiv miteinander (Osteonfragmente und sekundäre Osteone, Typ-II-Osteone und sekundäre Osteone).

Die gezählten Parameter zeigen **periostal** eine leicht negative Korrelation mit der Fragmentdicke ($r \approx 0,2$). Nicht-Havers'sche Kanäle, Resorptionslakunen, Osteonfragmente und Typ-II-Osteone korrelieren leicht negativ mit der Fragmentbreite ($r \approx -0,2$ bis $-0,6$). Temperatur und sekundäre Osteone korrelieren dagegen stark negativ mit der Fragmentbreite ($r \approx -0,4$ bis $-0,8$).

Im Falle der prozentualen Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur und der Schrumpfung in Dicke und Breite kann **periostal** und **mittig** ebenfalls nur eine geringfügig negative Korrelation festgestellt werden ($r \approx 0$ bis $-0,6$) (Abbildung 3 und 6 im Anhang). Nur der prozentuale Anteil fragmentalen Knochens korreliert **mittig** geringfügig positiv mit der Breitenschrumpfung ($r \approx 0,2$).

Berechnete histomorphometrische Parameter der Osteongeometrie (wie Osteonfläche, Osteondurchmesser, Osteonumfang) und die Resorptionslakunenfläche korrelieren leicht negativ mit der Schrumpfung in Breite und Dicke ($r \approx -0,4$ bis $-0,6$) (Abbildung 4 und 5 im Anhang). In der **Kompaktmitte** dagegen zeigt die Osteongeometrie (Osteonfläche, Osteondurchmesser und Osteonumfang) eine geringfügig positive Korrelation mit der Schrumpfung der Fragmentbreite ($r \approx 0,4$). In der **Kompaktmitte** korrelieren Breiten- und Dickenschrumpfung geringfügig positiv miteinander ($r \approx 0,2$ bis $0,4$). Sie korrelieren zudem geringfügig negativ mit der Temperatur (Temp), Havers'schen und nicht-Havers'schen Kanälen und sekundären Osteonen ($r \approx -0,2$ bis $-0,4$).

A



B

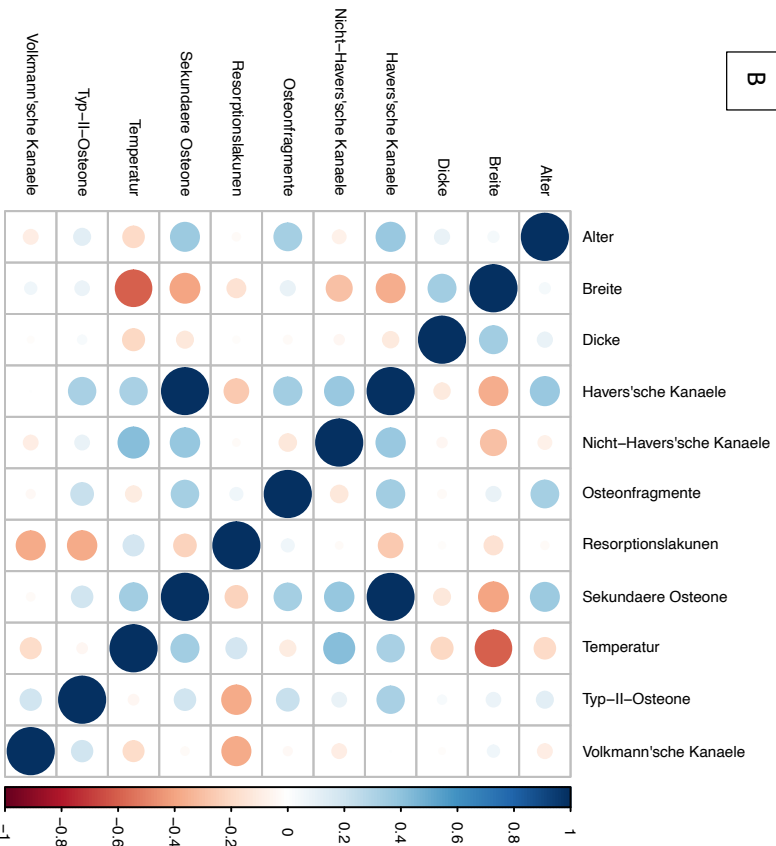


Abbildung 57. A. Korrelation zwischen Breiten- und Dicken schrumpfung mit den gezählten histomorphometrischen Parametern im mittleren Bereich der Kompakta. B. Korrelation zwischen Breiten- und Dicken schrumpfung mit den gezählten histomorphometrischen Parametern im mittleren Bereich der Kompakta. die Farbgebung der Kreise reflektiert den Wert des Korrelationskoeffizienten (r), dunkelblau: stark positive Korrelation ($r=1$), rot: stark negative Korrelation ($r=-1$), weiß: keine Korrelation ($r=0$) – wie in der Skalierung der Legende angegeben; Farbe und Größe der Kreise sind proportional zum Wert des Korrelationskoeffizienten.

3.5.3) Statische Auswertung der verbrennungsbedingten Veränderung

3.5.3.1.) Verteilung der histomorphometrischen Parameter

Periostal

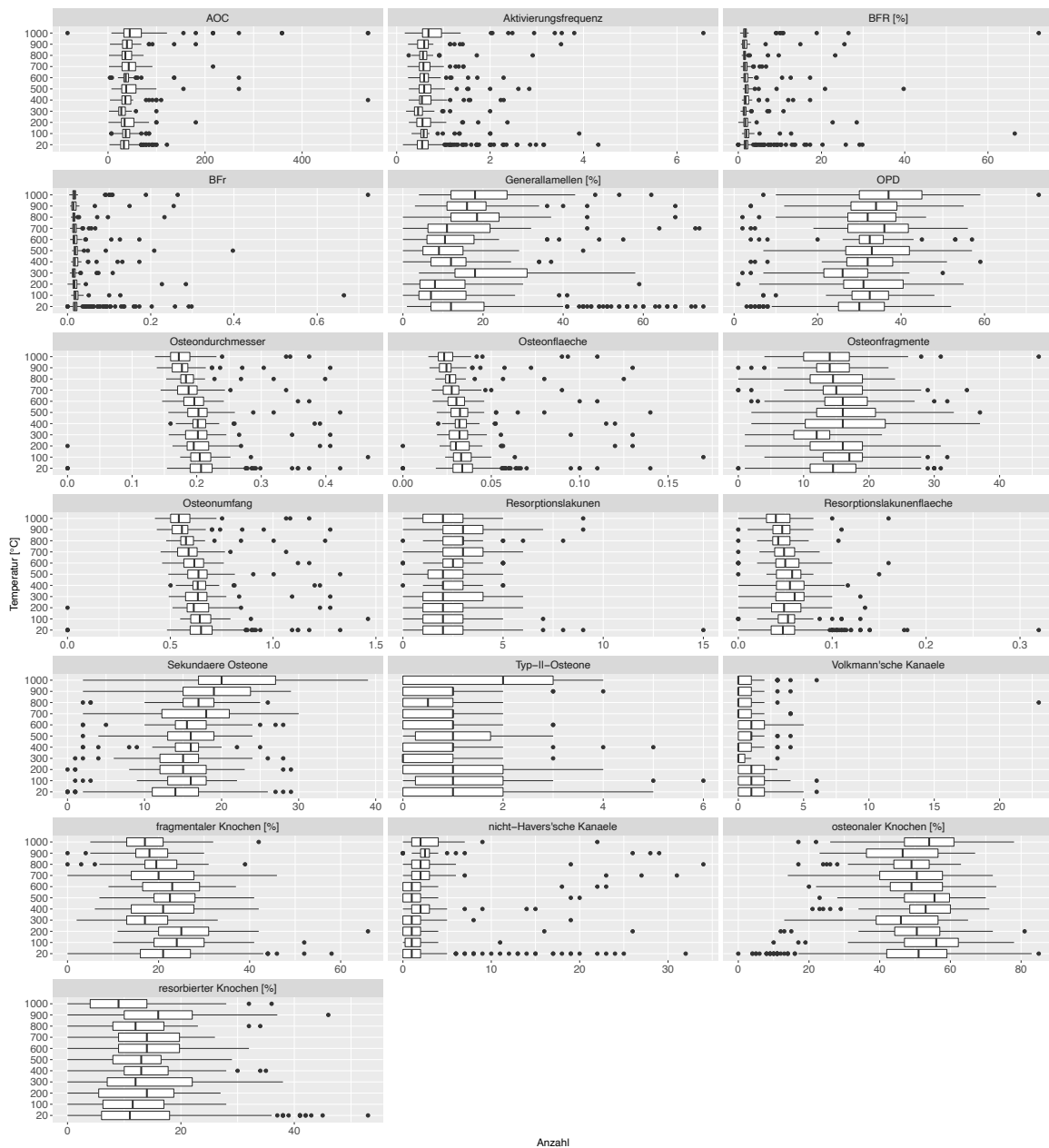


Abbildung 58: Boxplot zur Veranschaulichung der Datenverteilung der einzelnen histomorphometrischen Parameter über die Verbrennungstemperaturen (unv. – 1000 °C) in der periostalen Femurkompakta; die histomorphometrischen Parameter wurden in einem Gitternetz von 1 mm² gezählt, bzw. basierend auf den gezählten histomorphometrischen Parametern berechnet; X-Achse: Anzahl der histomorphometrischen Parameter bzw. Größe oder Rate des betreffenden Parameters, Y-Achse: Verbrennungstemperatur von 20-1000°C;

In Abbildung 58 ist die Verteilung aller Parameter im **periostalen Bereich** der Kompakta über die Verbrennungstemperaturen dargestellt. Die Verbrennungstemperatur von 20°C steht dabei für die unverbrannten Proben (RT) über alle Positionen gemittelt. Auf die Abbildung der Verteilung von Havers'schen Kanälen und intakten Osteonen wurde in dieser Grafik verzichtet, da es sich um dieselben Verteilungen wie von sekundären Osteonen bzw. sekundären und Typ-II-Osteonen zusammen handelt.

Die Verteilung der sekundären Osteone zeigt im Median eine deutliche verbrennungsbedingte Verschiebung an und auch die Verteilung der Anzahl sekundärer Osteone nimmt verbrennungsbedingt zu. Dies zeigt sich bei einer Verbrennungstemperatur von 700, 900 und 1000 °C am deutlichsten.

OPD und sekundäre Osteone weisen über die Verbrennungstemperaturen Schwankungen auf und sind bei 1000 °C leicht erhöht im Vergleich zum unverbrannten Zustand.

Die Zahl der Volkmann'schen Kanäle verändert sich über die Verbrennungstemperaturen auch deutlich. Dies ist hierbei maßgeblich bedingt durch einen Ausreißer-Datenpunkt bei 800 °C.

Die Zahl der Resorptionslakunen und deren Fläche verringern sich geringfügig durch die Verbrennung. Für die Anzahl der Resorptionslakunen lässt sich eine verbrennungsbedingte Schwankung im Median zwischen 600 und 900 °C erkennen, welcher sich bei 1000 °C wieder dem vorherigen Wertebereich annähert.

Für die nicht-Havers'schen Kanäle zeigt sich bei 400 °C und zwischen 700 und 1000 °C eine leichte Erhöhung des Medians und eine Zunahme der Wertestreuung. Die Osteonfragmente zeigen einen leichten verbrennungsbedingten Rückgang zwischen den unverbrannten Proben mit steigender Verbrennungstemperatur.

AOC, Aktivierungsfrequenz und Knochenbildungsrate weisen nur eine unwesentliche Veränderung in ihrer Anzahl über die Verbrennungstemperaturen hinweg auf, allerdings sind AOC, OPD und Aktivierungsfrequenz auf der höchsten Verbrennungsstufe leicht erhöht. Dies ist allerdings auch dadurch bedingt, dass die Skalierung der Abbildung weiter gefasst werden musste, um die Streuung der Werte der unverbrannten Referenzproben und der höchsten Verbrennungsstufe (1000 °C) gänzlich zu erfassen.

Bei den prozentualen Anteilen fragmentalen, resorbierten, osteonalen und lamellaren Knochens sind deutlichere Schwankungen erkennbar, wobei der prozentuale Anteil fragmentalen Knochens bei der höchsten Verbrennungstemperatur nur geringfügig sinkt im Vergleich mit den unverbrannten Proben. Der Anteil an Generallamellen nimmt im Vergleich zwischen dem unverbrannten Zustand bei einer Verbrennungstemperatur von 1000 °C zu. Der Anteil resorbierten Knochens ist bei der höchsten Verbrennungsstufe geringfügig niedriger als bei den unverbrannten Probe, schwankt allerdings sichtlich über die Verbrennungstemperaturen. Der Prozentsatz osteonalen Knochens ist relativ unverändert. Die Zahl der nicht-Havers'schen Kanäle ist bis zu einer Temperatur von 600 °C relativ unverändert und steigt danach kontinuierlich geringfügig an.

Osteonumfang, Osteonfläche und Osteondurchmesser sinken kontinuierlich über die Verbrennungstemperaturen hinweg.

Mittig

Die Verteilung und temperaturinduzierte Veränderung der Quantität der histomorphometrischen Parameter im ***mittigen Bereich*** der Kompakta über die Temperaturstufen der Verbrennungsreihen ist in Abbildung 59 zu sehen. Die „Verbrennungstemperatur“ von 20°C steht für die gemittelten unverbrannten Referenzproben.

In der Abbildung wird deutlich, dass AOC, Aktivierungsfrequenz und Knochenbildungsrate durch die hohe Spannweite der Werte nahezu keine verbrennungsbedingten Veränderungen erkennen lassen, lediglich die Aktivierungsfrequenz ist bei 1000 °C deutlich erhöht.

Die prozentualen Anteile resorbierten und osteonalen Knochens weisen über die Verbrennungstemperaturen nur geringe Schwankungen auf. Der Median liegt für den Anteil resorbierten Knochens leicht unter dem Referenzwert der unverbrannten Proben. Für den prozentualen Anteil osteonalen Knochens ist er hingegen leicht erhöht. Der Prozentsatz fragmentalen Knochens nimmt über die Verbrennungstemperaturen deutlich ab, der Anteil an Generallamellen dagegen steigt sichtlich im Vergleich zu den unverbrannten Proben.

Auch die Zahl der nicht-Havers'schen Kanäle steigt durch die Verbrennung an. Osteondurchmesser, Osteonumfang und Osteonfläche verringern sich durch die Temperatureinwirkung stetig bis auf 1000 °C. Die Zahl der Volkmann'schen Kanäle, Typ-II-Osteone und der Resorptionslakunen weist geringfügige verbrennungsbedingte Veränderungen auf.

Die Zahl der sekundären Osteone erhöht sich durch dem Temperatureinfluss bis zu einer Verbrennungstemperatur von 1000 °C, ebenso wie die OPD. Die Zahl der Osteonfragmente verringert sich dagegen durch den Einfluss der Verbrennungstemperaturen.

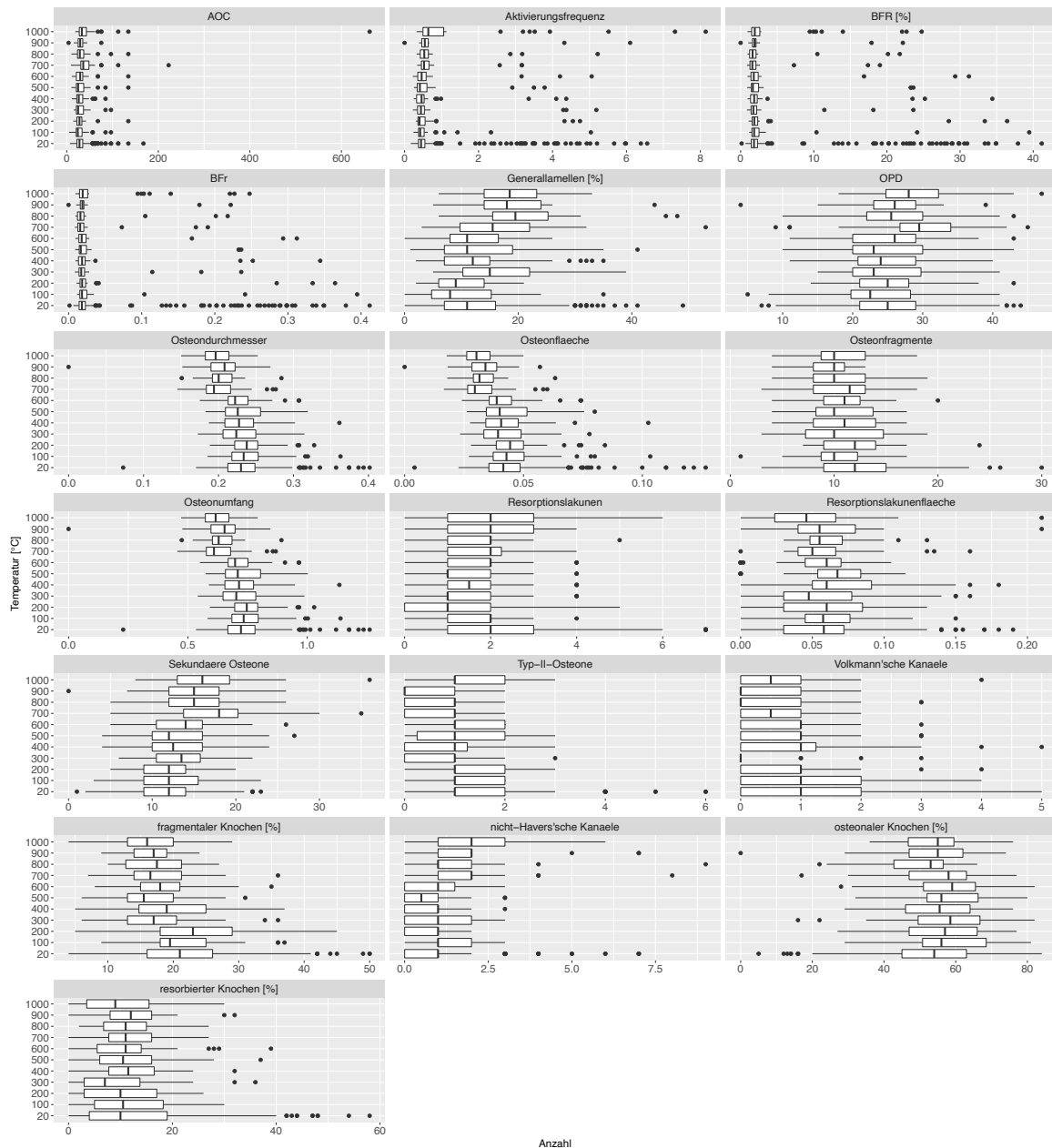


Abbildung 59: Boxplot zur Veranschaulichung der Datenverteilung der einzelnen histomorphometrischen Parameter über die Verbrennungstemperaturen (unv. – 1000 °C) in der mittlerigen Femurkompakta; die histomorphometrischen Parameter wurden in einem Gitternetz von 1 mm² gezählt, bzw. basierend auf den gezählten histomorphometrischen Parametern berechnet; X-Achse: Anzahl der histomorphometrischen Parameter bzw. Größe oder Rate des betreffenden Parameters, Y-Achse: Verbrennungstemperatur von 0-1000°C;

3.5.3.2) Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung der Daten

Zuerst wurde mithilfe des **Shapiro-Wilk-Test** auf eine Normalverteilung der Daten getestet und auf eine temperaturinduzierte Veränderung dieser Verteilung.

Basierend auf dieser Auswertung kann dann in nachfolgenden statistischen Tests entweder mit Tests für normalverteilte oder nicht-normalverteilte Datensätze weiter verfahren werden. In der Nullhypothese H_0 wird davon ausgegangen, dass für den Datensatz eine Normalverteilung vorliegt, die Alternativhypothese H_1 geht davon aus, dass die Daten nicht normalverteilt sind. Mithilfe des durch den Shapiro-Wilk-Test ermittelten p-Wert des Tests wird die Nullhypothese dann abgelehnt, wenn der p-Wert kleiner ist als das festgelegte Signifikanzniveau α . Ein p-Wert von 0,05 (5 %) stellt dabei ein

signifikantes, ein p-Wert von 0,01 (1 %) ein sehr signifikantes und ein p-Wert von 0,001 (0,1 %) ein hoch signifikantes Ergebnis dar.

Der Test wurde zum einen für die unverbrannten Proben, zum anderen für die Verbrennungsstufen einzeln durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen der Arbeiten von Müller (2017) und Mussauer (2017) wurde zu diesem Zeitpunkt der Datenauswertung davon ausgegangen, dass keine Unterschiede zwischen den Positionen entlang des Femurschaftes bestehen, wodurch der Test direkt auf den gesamten Datensatz der unverbrannten Proben angewendet wurde. Es konnte gezeigt werden, dass im Falle der unverbrannten Proben am **Periost** keiner der Parameter normalverteilt war (Tabelle 16 im Anhang). In der Kompaktmitte war bei den unverbrannten Referenzproben lediglich die OPD normalverteilt (Tabelle 22 im Anhang).

Periostal

Die Verteilung der histomorphometrischen Parameter der verbrannten Proben ergab keine eindeutigen Ergebnisse. In Tabelle 7 sind die Parameter aufgelistet, bei denen über die Verbrennungstemperaturen und im unverbrannten Zustand eine Normalverteilung festgestellt werden konnte. Die gesamten Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests sind in Tabelle 16 im Anhang aufgezeigt.

Tabelle 7: Aufzählung der histomorphometrischen Parameter für die sich mittels des Shapiro-Wilk-Tests am Periost eine Normalverteilung ergab; ein p-Wert von 0,05 stellt dabei ein signifikantes, ein p-Wert von 0,01 ein sehr signifikantes und ein p-Wert von 0,001 ein hochsignifikantes Ergebnis dar dafür, dass es sich um NICHT-normalverteilte Werte handelt;

PARAMETER	SIGNIFIKANZ	TEMPERATUR [°C]	PARAMETER	SIGNIFIKANZ	TEMPERATUR [°C]
OSTFRAG	N.S.	100	FRAGKNO	N.S.	600
RESKNO	N.S.	100	SEKOST	N.S.	700
FRAGKNO	N.S.	100	OSTINT	N.S.	700
OSTFRAG	N.S.	200	OSTFRAG	N.S.	700
OPD	N.S.	200	HAVERS	N.S.	700
RESKNO	N.S.	200	RESKNO	N.S.	700
SEKOST	N.S.	300	OSTKNO	N.S.	700
OSTINT	N.S.	300	FRAGKNO	N.S.	700
OSTFRAG	N.S.	300	RESLAKFL	N.S.	700
OPD	N.S.	300	OSTFRAG	N.S.	800
HAVERS	N.S.	300	FRAGKNO	N.S.	800
FRAGKNO	N.S.	300	AOC	N.S.	800
RESLAKFL	N.S.	300	SEKOST	N.S.	900
OSTFRAG	N.S.	400	OSTINT	N.S.	900
OPD	N.S.	400	OSTFRAG	N.S.	900
RESKNO	N.S.	400	OPD	N.S.	900
FRAGKNO	N.S.	400	HAVERS	N.S.	900
RESLAKFL	N.S.	400	RESKNO	N.S.	900
SEKOST	N.S.	500	OSTKNO	N.S.	900
OSTINT	N.S.	500	FRAGKNO	N.S.	900
OSTFRAG	N.S.	500	RESLAKFL	N.S.	900
OPD	N.S.	500	SEKOST	N.S.	1000
HAVERS	N.S.	500	OSTINT	N.S.	1000
RESKNO	N.S.	500	OPD	N.S.	1000
FRAGKNO	N.S.	500	HAVERS	N.S.	1000
OSTFRAG	N.S.	600			
RESKNO	N.S.	600			
OSTKNO	N.S.	600			

Mittig

In Tabelle 8 sind die Parameter dargestellt, für welche sich für den Shapiro-Wilk-Test über die Verbrennungstemperaturen eine Normalverteilung ergab. Die gesamten Ergebnisse des Tests für die Kompaktmitte sind in Tabelle 22 im Anhang aufgezeigt.

Tabelle 8: Aufzählung der histomorphometrischen Parameter für die sich mittels des Shapiro-Wilk-Tests in der Kompaktmitte eine Normalverteilung ergab; ein p-Wert von 0,05 stellt dabei ein signifikantes, ein p-Wert von 0,01 ein sehr signifikantes und ein p-Wert von 0,001 ein hochsignifikantes Ergebnis dar dafür, dass es sich um NICHT-normalverteilte Werte handelt (SEKOST = Sekundäre Osteone, OSTINT = intakte Osteone, OSTFRAG = Osteonfragmente, HAVERS = Havers'sche Kanäle, RESLAKFL = Resorptionslakunenfläche, GENLAM = Generallamellen, OSTFL = Osteonfläche, OSTU = Osteonumfang, OSTD = Osteondurchmesser, FRAGKNO = fragmentaler Knochen, OSTKNO = osteonaler Knochen, RESKNO = resorbierter Knochen);

PARAMETER	P-WERT	SIGNIFIKANZ	TEMPERATUR [°C]	PARAMETER	P-WERT	SIGNIFIKANZ	TEMPERATUR [°C]
OPD	0,07	N.S.	RT	SEKOST	0,17	N.S.	600
SEKOST	0,52	N.S.	100	OSTINT	0,20	N.S.	600
OSTINT	0,61	N.S.	100	OSTFRAG	0,27	N.S.	600
OSTFRAG	0,079	N.S.	100	OPD	0,54	N.S.	600
OPD	0,38	N.S.	100	HAVERS	0,20	N.S.	600
HAVERS	0,61	N.S.	100	GENLAM	0,25	N.S.	600
RESKNO	0,16	N.S.	100	FRAGKNO	0,13	N.S.	600
OSTKNO	0,17	N.S.	100	SEKOST	0,21	N.S.	700
RESLAKFL	0,05	N.S.	100	OSTINT	0,22	N.S.	700
SEKOST	0,33	N.S.	200	OSTFRAG	0,66	N.S.	700
OSTINT	0,12	N.S.	200	HAVERS	0,29	N.S.	700
OPD	0,21	N.S.	200	RESKNO	0,60	N.S.	700
HAVERS	0,12	N.S.	200	OSTKNO	0,24	N.S.	700
GENLAM	0,05	N.S.	200	FRAGKNO	0,19	N.S.	700
OSTKNO	0,45	N.S.	200	SEKOST	0,62	N.S.	800
FRAGKNO	0,95	N.S.	200	OSTINT	0,28	N.S.	800
OSTU	0,05	N.S.	200	OSTFRAG	0,60	N.S.	800
OSTD	0,05	N.S.	200	OPD	0,52	N.S.	800
SEKOST	0,63	N.S.	300	HAVERS	0,28	N.S.	800
OSTINT	0,67	N.S.	300	RESKNO	0,16	N.S.	800
OSTFRAG	0,11	N.S.	300	OSTKNO	0,08	N.S.	800
OPD	0,09	N.S.	300	FRAGKNO	0,23	N.S.	800
HAVERS	0,67	N.S.	300	OSTU	0,13	N.S.	800
GENLAM	0,06	N.S.	300	OSTD	0,13	N.S.	800
OSTKNO	0,20	N.S.	300	SEKOST	0,70	N.S.	900
OSTFL	0,07	N.S.	300	OSTINT	0,49	N.S.	900
OSTU	0,48	N.S.	300	OSTFRAG	0,39	N.S.	900
OSTD	0,48	N.S.	300	OPD	0,05	N.S.	900
SEKOST	0,48	N.S.	400	RESLAK	0,18	N.S.	900
OSTINT	0,55	N.S.	400	HAVERS	0,49	N.S.	900
OSTFRAG	0,20	N.S.	400	RESKNO	0,26	N.S.	900
OPD	0,34	N.S.	400	GENLAM	0,14	N.S.	900
HAVERS	0,55	N.S.	400	FRAGKNO	0,99	N.S.	900
RESKNO	0,48	N.S.	400	OSTFL	0,28	N.S.	900
OSTKNO	0,52	N.S.	400	OSTFRAG	0,56	N.S.	1000
FRAGKNO	0,88	N.S.	400	GENLAM	0,72	N.S.	1000
SEKOST	0,10	N.S.	500	OSTKNO	0,54	N.S.	1000
OSTINT	0,16	N.S.	500	FRAGKNO	0,34	N.S.	1000
OSTFRAG	0,25	N.S.	500	OSTFL	0,31	N.S.	1000
OPD	0,53	N.S.	500	OSTU	0,74	N.S.	1000
HAVERS	0,16	N.S.	500	OSTD	0,74	N.S.	1000
OSTKNO	0,73	N.S.	500				
FRAGKNO	0,42	N.S.	500				

Da sich sowohl **periostal** als auch **mittig** eine hohe Variation der Parameterverteilung feststellen ließ, und die Berechnungen von OPD, intakten Osteonen und Havers'schen Kanälen auf die Anzahlen von sekundären Osteonen und Osteonfragmenten beziehen und somit durch deren Verteilung beeinflusst sind und nicht gesondert betrachtet werden können, wurde bei den nachfolgenden statistischen Tests davon ausgegangen, dass es sich um „nicht-normalverteilte“ Datensätze handelt.

3.5.3.3) Wilcoxon-Rangsummentest auf signifikante Unterschiede

Anschließend an den *Shapiro-Wilk-Test* wurden die Datensätze der verbrannten und der korrespondierenden unverbrannten Proben auf signifikante Unterschiede in den Anzahlen der einzelnen histomorphometrischen Parameter bei verschiedenen Temperaturen, zwischen verschiedenen Temperaturstufen, im Vergleich zwischen der unverbrannten Referenzprobe und der

verbrannten Probe und zwischen den verschiedenen unverbrannten Positionen entlang des Femurschaftes getestet. Dafür wurde der **Wilcoxon-Rangsummentest** verwendet. Mit diesem Test wird die Signifikanz der Übereinstimmung zweier Verteilungen überprüft. Dieser Test kann angewendet werden als Alternative zu einem t-Test, wenn es sich um nicht-normalverteilte Datensätze und zwei gepaarte Stichproben handelt. Die Nullhypothese wird abgelehnt, wenn das Signifikanzniveau $\alpha < 0,05$ ist. Bei einem p-Wert von 0,05 (5 %) handelt es sich bei diesem Test um ein signifikantes, bei einem p-Wert von 0,01 (1 %) um ein sehr signifikantes und bei einem p-Wert von 0,001 (0,1 %) um ein hoch signifikantes Ergebnis.

Als erstes wurden zur ersten Übersicht am **periostalen Rand** und in der **Kompaktmitte** die **generellen Unterschiede in den Parameterzahlen innerhalb einer Temperaturstufe** getestet (Tabelle 5 und 6 sowie 17 und 23 im Anhang).

Anhand von Tabelle 9 konnte für das **Periost** festgestellt werden, dass sich die Anzahl der signifikanten Unterschiede der Parameterzahlen innerhalb einer Temperaturstufe deutlich anhäuft, je höher die Verbrennungstemperatur ist.

*Tabelle 9: Wilcoxon-Rangsummentests innerhalb der Temperaturstufen der Verbrennungsreihe auf signifikante Unterschiede in den Parameterzahlen; der p-Wert wird durch die Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert ($\leq 0,001$), ** für einen sehr signifikanten Wert ($\leq 0,01$) und * für einen signifikanten Wert ($\leq 0,05$); Abkürzungen: NonHavers=nicht-Havers'sche Kanäle, GenLam = Generallamellen, SekOst= sekundäre Osteone, TypII Ost= Typ-II-Osteone, ResLak= Resorptionslakunen, VolkM= Volkmann'sche Kanäle, FragKno = fragmentaler Knochen, OstKno= osteonaler Knochen; PctBfr = prozentuale BFR, ResLakFl= Resorptionslakunenfläche, OstInt = intakte Osteone;*

PARAMETER	SIGNIFIKANZ	TEMPERATUR [°C]	PARAMETER	SIGNIFIKANZ	TEMPERATUR [°C]
VOLKM	*	100	SEKOST	***	800
GENLAM	***	100	TYPIOST	*	800
FRAGKNO	*	100	OSTINT	***	800
NONHAVERS	*	200	HAVERS	***	800
GENLAM	**	200	NONHAVERS	**	800
FRAGKNO	**	200	VOLKM	**	800
TYPIOST	***	300	GENLAM	**	800
OSTFRAG	***	300	OSTFL	***	800
OPD	**	300	OSTU	***	800
VOLKM	***	300	OSTD	***	800
GENLAM	***	300	BFR	**	800
FRAGKNO	***	300	PCTBFR	**	800
RESLAKFL	*	300	SEKOST	***	900
AKTFR	**	300	TYPIOST	*	900
BFR	**	300	OSTINT	***	900
PCTBFR	**	300	OPD	*	900
AOC	**	300	RESLAK	***	900
SEKOST	*	400	HAVERS	***	900
NONHAVERS	*	400	NONHAVERS	***	900
VOLKM	**	400	VOLKM	**	900
RESLAKFL	*	400	RESKNO	**	900
SEKOST	*	500	GENLAM	*	900
OSTINT	*	500	FRAGKNO	**	900
OPD	*	500	OSTFL	***	900
HAVERS	*	500	OSTU	***	900
GENLAM	*	500	OSTD	***	900
RESLAKFL	*	500	BFR	***	900
AOC	*	500	PCTBFR	***	900
SEKOST	*	600	AOC	*	900
OPD	*	600	SEKOST	***	1000
OSTFL	**	600	TYPIOST	***	1000
OSTU	**	600	OSTINT	***	1000
OSTD	**	600	OPD	***	1000
AOC	*	600	HAVERS	***	1000
SEKOST	***	700	NONHAVERS	***	1000

OSTINT	**	700	RESKNO	**	1000
OPD	**	700	GENLAM	***	1000
PARAMETER	SIGNIFIKANZ	TEMPERATUR [°C]	PARAMETER	SIGNIFIKANZ	TEMPERATUR [°C]
RESLAK	*	700	FRAGKNO	***	1000
HAVERS	**	700	OSTFL	***	1000
NONHAVERS	*	700	OSTU	***	1000
OSTFL	***	700	OSTD	***	1000
OSTU	***	700	RESLAKFL	***	1000
OSTD	***	700	AKTFR	***	1000
AOC	**	700	BFR	**	1000
			PCTBFR	**	1000
			AOC	***	1000

In Tabelle 10 sind die Parameter aufgezeigt, für welche sich in der **Kompaktmitte** innerhalb der Temperaturstufen der Verbrennungsreihe signifikante Unterschiede in der Anzahl, Größe oder der Rate ergaben. Wie am periostalen Rand der Kompakta ist erkennbar, dass sich die Zahl der signifikant unterschiedlichen Parameterzahlen häuft, je höher die Verbrennungstemperatur ist. Aber auch bei einer Verbrennungstemperatur von 300 °C ist eine Häufung erkennbar.

*Tabelle 10: Wilcoxon-Rangsummentests innerhalb der Temperaturstufen der Verbrennungsreihe auf signifikante Unterschiede in den Parameterzahlen; der p-Wert wird durch die Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert ($\leq 0,001$), ** für einen signifikanten Wert ($\leq 0,01$) und * für einen sehr signifikanten Wert ($\leq 0,05$); Abkürzungen: NonHavers=nicht-Havers'sche Kanäle, GenLam = Generallamellen, SekOst= sekundäre Osteone, TypII-Osteone, ResLak= Resorptionslakunen, VolkM= Volkmann'sche Kanäle, FragKno = fragmentaler Knochen, OstKno= osteonaler Knochen;*

PARAMETER	SIGNIFIKANZ	TEMPERATUR [°C]	PARAMETER	SIGNIFIKANZ	TEMPERATUR [°C]
NONHAVERS	**	100	SEKOST	***	800
GENLAM	*	100	TYPII-OST	**	800
SEKOST	*	300	NONHAVERS	***	800
TYPII-OST	*	300	VOLKM	**	800
RESLAK	*	300	GENLAM	***	800
VOLKM	***	300	FRAGKNO	**	800
GENLAM	**	300	SEKOST	**	900
FRAGKNO	***	300	TYPII-OST	**	900
TYPII-OST	*	400	OSTFRAG	**	900
OSTFRAG	*	500	NONHAVERS	***	900
OSTKNO	*	500	VOLKM	*	900
FRAGKNO	***	500	GENLAM	**	900
SEKOST	*	600	FRAGKNO	**	900
OSTKNO	*	600	SEKOST	***	1000
FRAGKNO	**	600	OSTFRAG	*	1000
SEKOST	***	700	NONHAVERS	***	1000
TYPII-OST	*	700	GENLAM	***	1000
NONHAVERS	***	700	FRAGKNO	***	1000
GENLAM	**	700			
FRAGKNO	**	700			

Daraufhin wurde bei **allen Temperaturstufen die Parameteranzahl bei der jeweiligen Verbrennungstemperatur gegen die Parameteranzahl bei der zugehörigen unverbrannten Referenzprobe** getestet (Abbildung 60A und 60B und Tabelle 18 und 24 im Anhang).

Am **periostalen Rand** ergaben sich bei 100 °C im Vergleich mit der unverbrannten Referenz signifikante Unterschiede in der Anzahl Resorptionslakunen und des Anteils osteonalen Knochens, bei 200 °C im Anteil fragmentalen Knochens. Bei 300 °C traten bei mehreren Parametern signifikante Abweichungen zur korrespondierenden Probe auf, nämlich in der Anzahl der Typ-II-Osteone, der Osteonfragmente, der OPD, der Anzahl nicht-Havers'scher und Volkmann'scher Kanäle, im Anteil lamellaren und fragmentalen Knochens, in der Aktivierungsfrequenz, der Knochenbildungsrate und der AOC. Bei 400 °C differierten nur die Zahl der sekundären und intakten Osteone, der Havers'schen und nicht-

Havers'schen Kanäle und der Anteil fragmentalen Knochens von der Referenz. Bei einer Verbrennungstemperatur von 500 °C divergierte nur die Resorptionslakunenfläche, bei 600 °C nur die Zahl der Volkmann'schen Kanäle signifikant von der korrespondierenden Referenzprobe. Ab einer Verbrennungstemperatur von 700 °C häuften sich die signifikanten Abweichungen von dem Vergleichsprobenmaterial. Ab einer Temperatur von 700 °C bis zu 1000 °C wich die Osteongeometrie signifikant von der der unverbrannten Proben ab. Auch die Zahl der sekundären und intakten Osteone und der Havers'schen Kanäle zeigte zwischen 700 und 1000 °C signifikante Unterschiede zur Referenz. Bei 700, 900 und 1000 °C wichen zudem OPD, Aktivierungsfrequenz und AOC signifikant von der Referenz ab, bei 800 °C die Resorptionslakunenfläche, bei 900 °C die Zahl der Resorptionslakunen, bei 900 und 1000 °C die Zahl der nicht-Havers'schen Kanäle und bei 1000 °C noch die Volkmann'schen Kanäle (Abbildung 60A und Tabelle 18 im Anhang).

In der **Kompaktmitte** differierte bei 100 °C nur die Anzahl der nicht-Havers'schen Kanäle signifikant von der unverbrannten Referenz. Bei 300 °C gab es bei den Typ-II-Osteonen, den Volkmann'schen Kanälen und den Generallamellen und dem Anteil fragmentalen Knochens signifikante Abweichungen zu den Vergleichsproben. Die Verbrennungstemperatur von 500 °C bewirkte für die Zahl der Osteonfragmente signifikante Unterschiede. Bei 300, 500 und 600 °C gab es signifikante Divergenzen im Anteil fragmentalen Knochens zwischen verbrannten und unverbrannten Proben. Zudem lagen bei 600 °C Divergenzen im Anteil osteonalen Knochens und in der Zahl sekundärer Osteone vor. Zwischen 700 und 1000 °C traten jeweils signifikante Unterschiede in der Zahl sekundärer und intakter Osteone, Havers'scher Kanäle, der Osteongeometrie und der Aktivierungsfrequenz auf. Bei 700 °C gab es zudem signifikante Unterschiede im Anteil lamellaren und fragmentalen Knochens zur Referenz. Die Verbrennungsstufen von 700, 800 und 1000 °C bewirkten jeweils signifikante Abweichungen in der Zahl nicht-Havers'scher Kanäle, bei 700 und 1000 °C für die OPD und die AOC. Bei 800 °C unterschieden sich darüber hinaus Volkmann'sche Kanäle und der Anteil an Generallamellen von den Werten der unverbrannten Vergleichsproben signifikant (Abbildung 60B und Tabelle 24 im Anhang).

Es zeigte sich, dass die Unterschiede zwischen unverbrannten und verbrannten Proben im **mittleren Bereich** der Femurkompakta insgesamt geringer ausfielen als im **periostalen Bereich**.

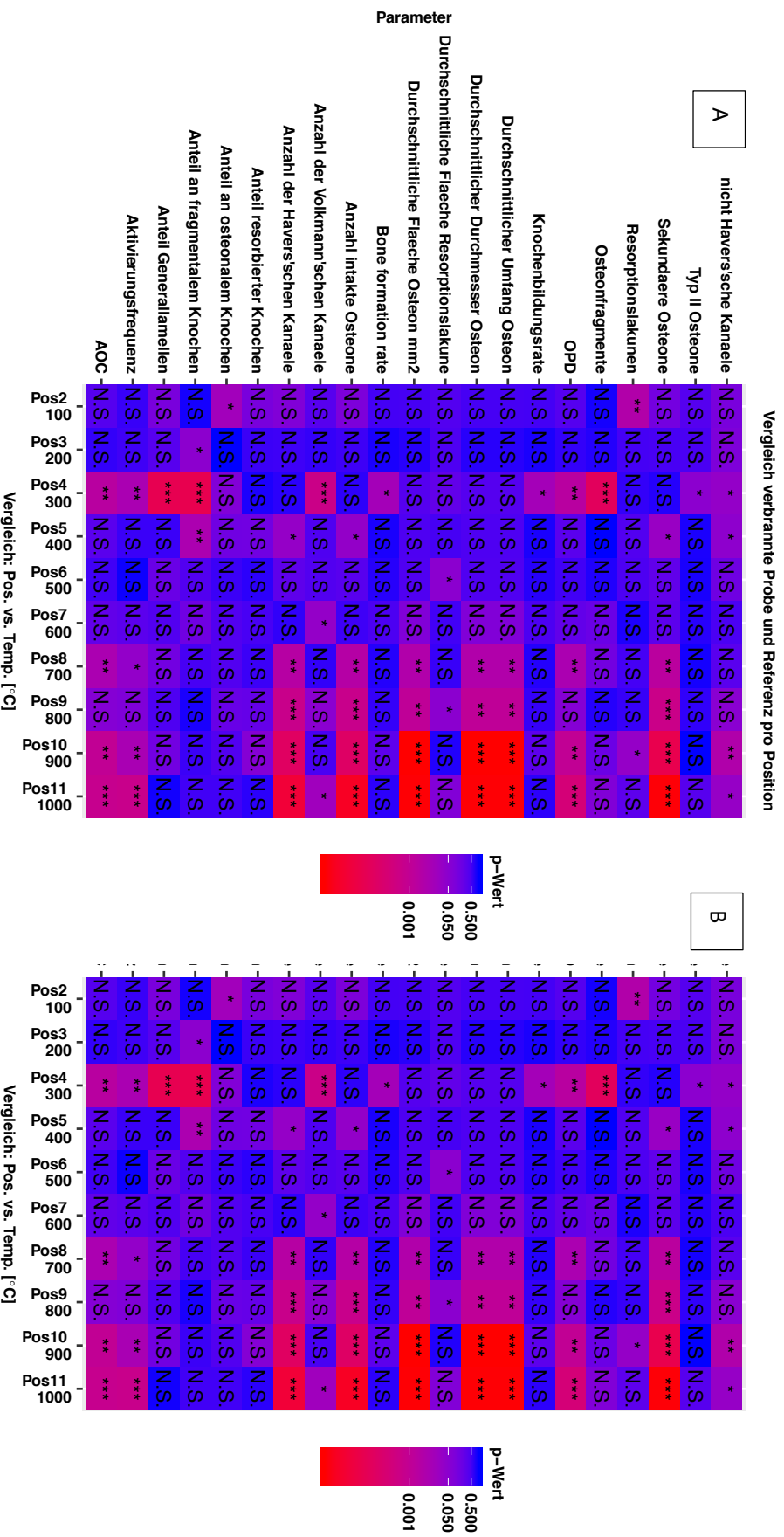


Abbildung 60: Wilcoxon-Rangsummentest zum Vergleich auf signifikante Unterschiede zwischen der verbrannten Probe und der unverbrannten Referenzprobe entlang der elf Positionen des Femurschaftes bzw. der elf Verbrennungsstufen (RT-1000°C). A, Periostraler Rand der Kompakta, B, Kompaktmitte; der p-Wert des Wilcoxon-Tests wird durch die Farbgebung und die Bezeichnungen verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert ($\leq 0,001$), ** für einen sehr signifikanten Wert ($\leq 0,01$) und * für einen signifikanten Wert ($\leq 0,05$).

Um zu testen, ob die signifikanten Unterschiede zur unverbrannten Referenzprobe vor allem durch den Einfluss der Temperatureinwirkung während der Verbrennung entstanden sind, wurde als nächstes getestet, ob sich die **Zahl der histomorphometrischen Parameter zwischen den Temperaturstufen** signifikant ändert (Abbildung 61A und 61B und Tabelle 15 und 25 im Anhang).

Dabei ergaben sich am **periostalen Rand** für einige Parameter zwischen aufeinanderfolgenden Temperaturstufen signifikante Unterschiede (Abbildung 61A). Zwischen der RT und 100 °C gab es signifikante Unterschiede in der Zahl der Volkmann'schen Kanäle und dem Anteil lamellaren und fragmentalen Knochens. Bei 100 und 200 °C zeigten sich keinerlei Unterschiede. Zwischen 200 und 300 °C divergierten die Anzahl der Typ-II-Osteone, der Osteonfragmente, der OPD, der Volkmann'schen Kanäle, der Anteil an Generallamellen und fragmentalen Knochens, die Aktivierungsfrequenz und die AOC. Bei 300 und 400 °C zeigten sich ebenfalls vermehrt signifikante Unterschiede, und zwar in der Anzahl der Osteonfragmente, der OPD, der nicht-Havers'schen Kanäle, den Anteilen an lamellarem und osteonalem Knochen, der Aktivierungsfrequenz, der Knochenbildungsrate und der AOC. Bei 400 und 500 °C gab es keine signifikanten Abweichungen. Zwischen 600 und 700 °C unterschied sich nur die Zahl der Volkmann'schen Kanäle signifikant, zwischen 700 und 800 °C nur der Anteil an Generallamellen. Im Vergleich von 800 und 900 °C unterschied sich die Osteongeometrie, im Vergleich von 900 zu 1000 °C differierten die Anzahl sekundärer und intakter Osteone, Typ-II-Osteone, Resorptionslakunen, Havers'scher Kanäle, die Anteile osteonalen und resorbierten Knochens und die Aktivierungsfrequenz.

Der Test aufeinanderfolgender Temperaturstufen in der **Kompaktmitte** ist in Abbildung 61B gezeigt. Dabei ist erkennbar, dass sich zwischen 100 und 200 °C nur die Anzahl der nicht-Havers'schen Kanäle signifikant unterschied. Bei 200 und 300 °C traten signifikante Abweichungen zwischen Typ-II-Osteonen, Volkmann'schen Kanälen und dem Anteil an fragmentalen und lamellaren Knochen auf. Zwischen 300 und 400 °C kam es zu signifikanten Unterschieden in der Zahl der Volkmann'schen Kanäle. Die Temperaturstufen 600 und 700 °C wies die höchste Zahl an signifikanten Divergenzen auf. Hier unterschieden sich die Zahl sekundärer und intakter Osteone, die OPD, die Zahl Havers'scher und nicht-Havers'scher Kanäle, der Anteil an Generallamellen, die Osteongeometrie, die Aktivierungsfrequenz und die AOC. Zwischen 700 und 800 °C traten signifikante Unterschiede bei intakten Osteonen, OPD, Havers'schen Kanälen und der AOC auf. Bei 900 und 1000 °C unterschied sich nur die Zahl der Typ-II-Osteone signifikant. Wie schon beim Test zwischen unverbrannten und verbrannten Proben war auch beim Test zwischen Temperaturstufen die Zahl der signifikanten Abweichungen geringer als im periostalen Bereich der Femurkompakta.

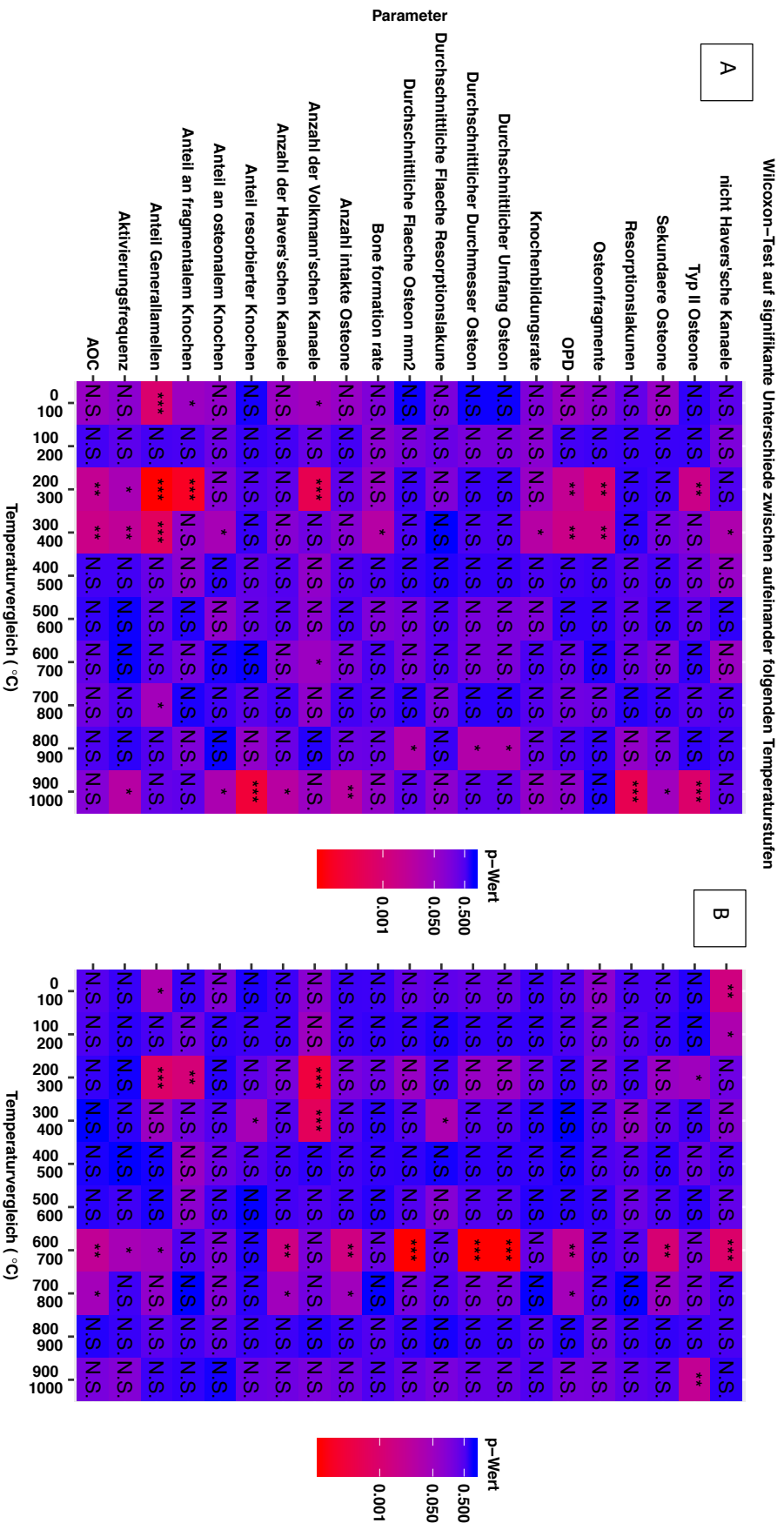


Abbildung 61: Wilcoxon-Rangsummentest zum Vergleich auf signifikante Unterschiede zwischen aufeinander folgenden Temperaturstufen der experimentell krenierten Proben der Verbrennungsreihe: A. Periostraler Rand der Kompakta, B. Kompaktamitte, der p-Wert des Wilcoxon-Tests wird durch die Farbgebung und die Bezeichnungen verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert ($\leq 0,001$), ** für einen sehr signifikanten Wert ($\leq 0,01$) und * für einen signifikanten Wert ($\leq 0,05$).

Zuletzt wurde getestet, ob sich diese **Unterschiede in der Parameterzahl bereits bei den unverbrannten Referenzproben zwischen den Positionen entlang des Femurschaftes** finden. Es wurden alle Positionen miteinander verglichen (Abbildung 62 (Periost) und 63 (Mitte) und Tabelle 20 und 26 im Anhang).

Am **Periost** zeigten sich die meisten signifikanten Unterschiede aller Positionen zu den am weitesten distal am Femurschaft gelegenen Positionen 10 und 11. Über die Länge des Femurschaftes treten zwar bereits signifikante Unterschiede zwischen Parametern auf, am häufigsten sind diese jedoch im Vergleich zu Position 11 zu finden. Lediglich zwischen Position 10 und 11 traten diese zahlreichen Unterschiede nicht auf. Position 1, 3 und 6 zeigen vermehrte signifikante Abweichungen ab Position 8 bis Position 11, Position 2,4,5 und 7 zu Position 10 und 11, Position 8 und 9 weisen in den meisten Parametern signifikant von Position 11 ab.

In der **Kompaktmitte** fiel die Zahl der signifikanten Unterschiede, wie schon bei den beiden vorherigen Untersuchungen, wesentlich geringer aus als im periostalen Bereich der Kompakta. Es traten über die Diaphyse verteilt zwischen den Positionen vereinzelt Unterschiede auf, auch hier waren diese vor allem zwischen weit voneinander liegenden Positionen präsent und im Vergleich mit den Positionen 10 und 11.

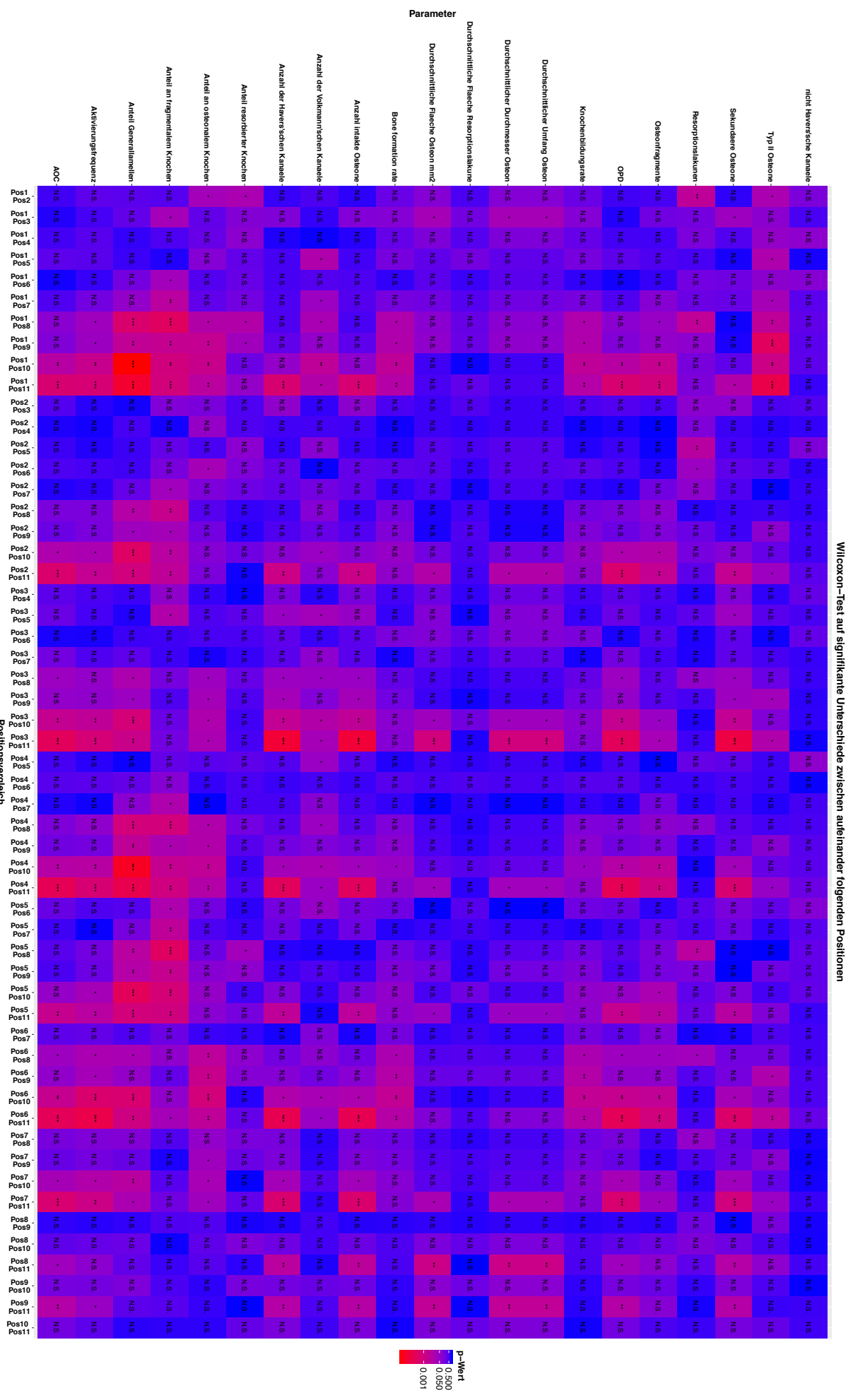


Abbildung 62: Wilcoxon-Rangsummentest zum Test auf signifikante Unterschiede zwischen den Positionen des unerbrannten Femurschafes am peristalen Rand der Kompakta; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert ($\leq 0,001$), ** für einen sehr signifikanten Wert ($\leq 0,01$) und * für einen signifikanten Wert ($\leq 0,05$).

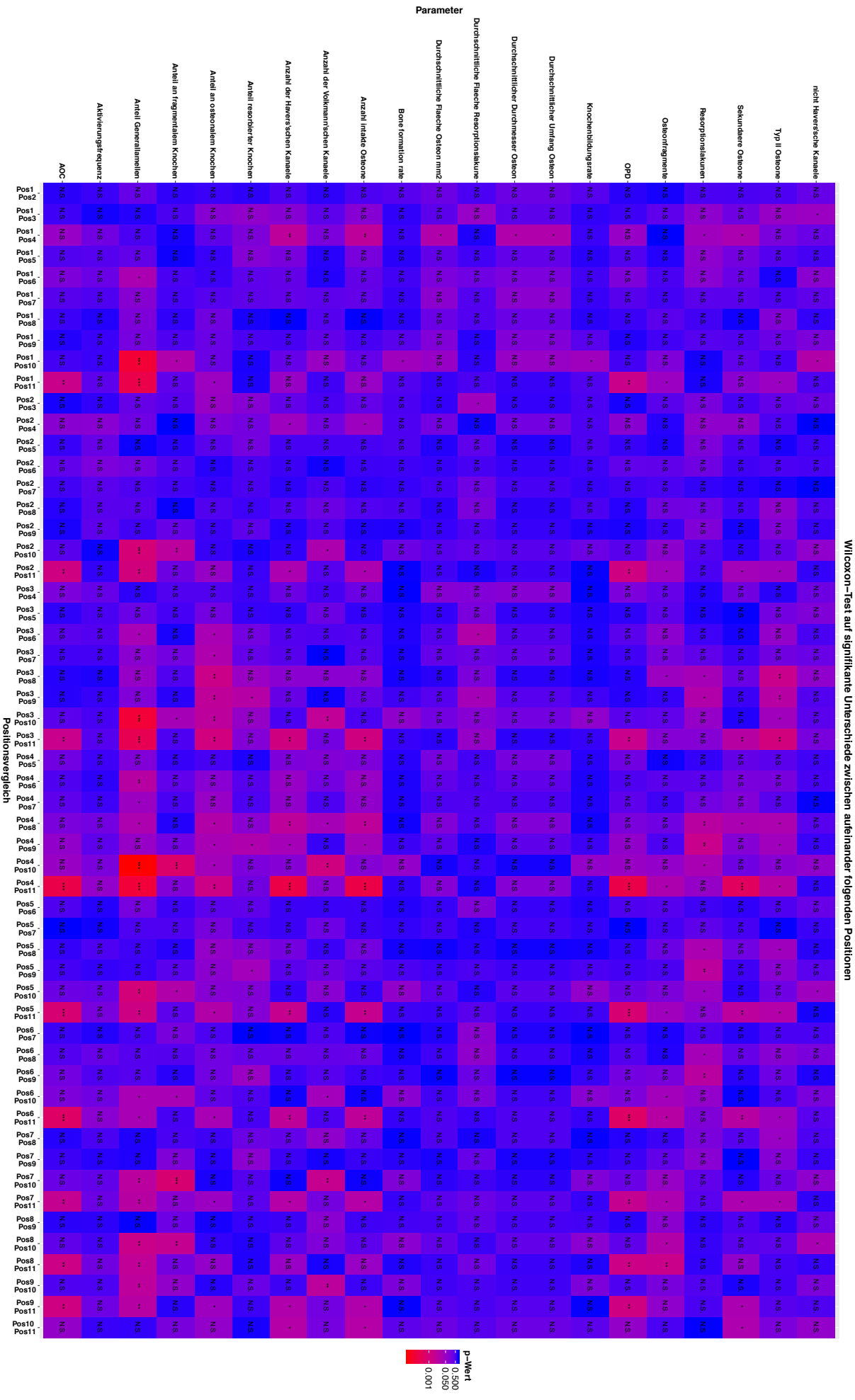


Abbildung 63: Wilcoxon-Rangsummentest zum Test auf signifikante Unterschiede zwischen den Positionen des unverbrennten Femurschiffes in der Kompaktante; der p-Wert wird durch die Farbgebung und die Bezeichnungen verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert ($\leq 0,001$), ** für einen sehr signifikanten Wert ($\leq 0,01$) und * für einen signifikanten Wert ($\leq 0,05$).

3.5.3.4) Korrelation

Um den Test auf Zusammenhänge zwischen Parametern um Individualalter, Position und Geschlecht zu erweitern, wurden *Korrelationstests* nach Pearson verwendet. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson ist ein Maß für den linearen Zusammenhang zwischen zwei quantitativen Variablen. Die exakt gegenläufige Korrelation von männlichem und weiblichem Geschlecht in beiden Datensätzen ist entsprechend der Erwartung, da weibliches und männliches Geschlecht binär kodiert sind und sich damit gegenseitig ausschließen.

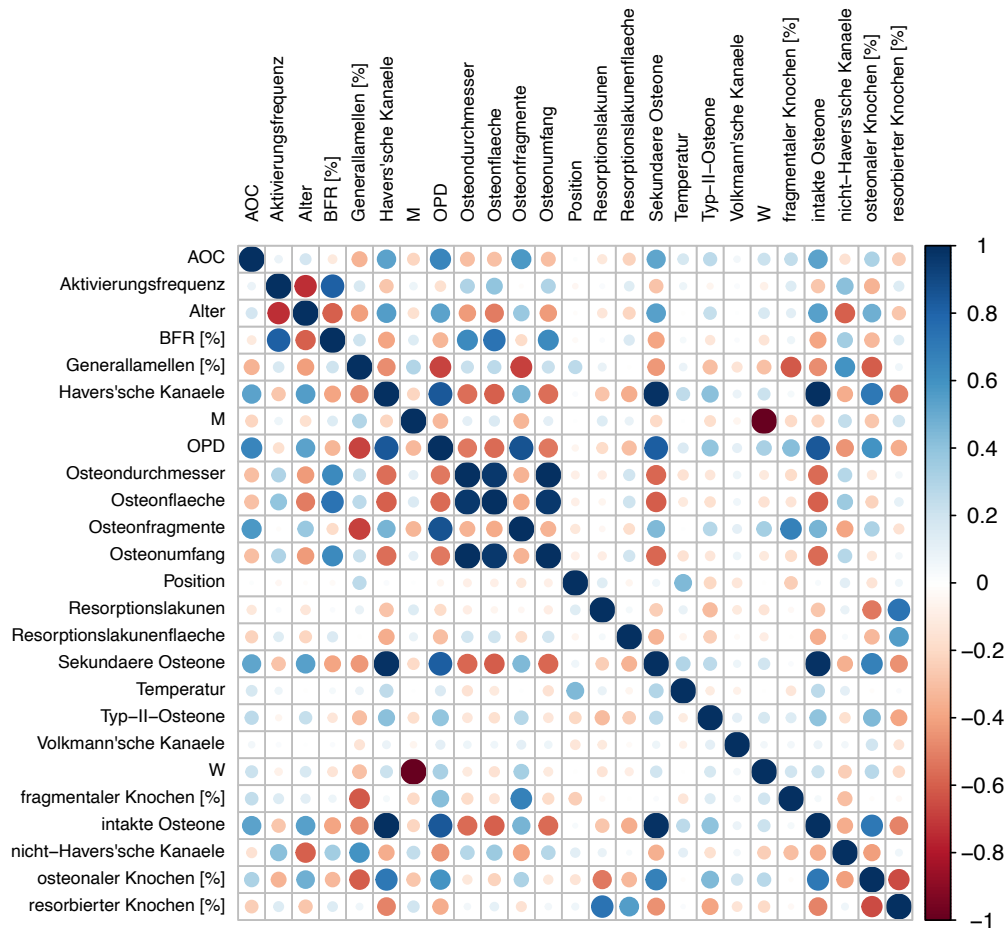


Abbildung 64: Korrelation der histomorphometrischen Parameter miteinander und mit der Temperatur, dem Geschlecht (M und W), dem Alter (Age) und der Position; die roten Kästchen stehen für eine stark negative Korrelation ($r = -1$), die blauen Kästchen für eine stark positive Korrelation ($r = 1$), bei farblosen (weiß) Kästchen liegt der Korrelationswert bei 0; Farbe und Größe der Kreise sind proportional zum Wert des Korrelationskoeffizienten;

In Abbildung 64 ist die *Korrelation* nach Pearson zwischen histomorphometrischen Parametern, sowie mit dem Alter (Age), dem Geschlecht (M und W) und der Position am **periostalen Rand der Kompakta** dargestellt.

Sekundäre und intakte Osteone, Havers'sche Kanäle und OPD weisen eine stark positive Korrelation untereinander und mit dem Individualalter auf ($r \approx 0,6$ bis 1). Die Position weist eine leicht positive Korrelation mit dem Anteil an Generallamellen und der Temperatur auf ($r \approx 0,2$ bis 0,4). Aktivierungsfrequenz, Knochenbildungsrate und Osteongeometrie zeigen untereinander eine stark positive Korrelation und eine leicht positive Korrelation zur Resorptionslakunenfläche ($r \approx 0,2$ bis 1).

OPD und AOC haben eine starke Korrelation miteinander ($r = \text{ca. } 0,6$) und eine schwach positive Korrelation zu Temperatur und Individualalter ($r \approx 0,2$ bis $0,4$).

Eine negative Korrelation ist erkennbar zwischen dem Individualalter, der OPD und der AOC jeweils mit der Aktivierungsfrequenz, der „Osteongeometrie“ (OstU, OstD, OstFI) und der Knochenbildungsrate ($r \approx -0,2$ bis $-0,6$). Auffallend ist, dass die beiden Geschlechter (M und W) konträr zueinander mit den Parametern korrelieren. Zeigt das weibliche Geschlecht (W) eine stark positive Korrelation auf, ist für das männliche Geschlecht (M) eine stark negative Korrelation erkennbar und umgekehrt.

So ist erkennbar, dass sich für das männliche Geschlecht eine geringfügig positive Korrelation mit den prozentualen Anteilen resorbierten Knochens und Generallamellen ergibt und eine geringfügig negative Korrelation mit den Anteilen fragmentalen und osteonalen Knochens. Dies verhält sich für das weibliche Geschlecht exakt gegenläufig.

Abbildung 65 zeigt die Korrelation der histomorphometrischen Parameter miteinander und mit dem Individualalter, der Temperatur, dem Geschlecht und der Position entlang des Femurschaftes in der **Kompaktmitte**.

Es zeigt sich eine stark bis leicht positive Korrelation zwischen Individualalter, osteonalem und fragmentalem Knochen, OPD, Volkmann'schen Kanälen, sekundären und intakten Osteonen und Havers'schen Kanälen ($r \approx 0,1$ bis $0,4$). Die Position zeigt eine leicht positive Korrelation mit sekundären Osteonen, nicht-Havers'schen Kanälen und dem prozentualen Anteil an Generallamellen.

Die Temperatur korreliert leicht mit intakten und sekundären Osteonen, Havers'schen Kanälen, der OPD, nicht-Havers'schen Kanälen und den Generallamellen ($r \approx 0,1$ bis $0,3$).

Die Anteile resorbierten und fragmentalen Knochens korrelieren geringfügig miteinander ($r = \text{ca. } 0,1$), ebenso wie der Anteil resorbierten Knochens und Resorptionslakunen ($r \approx 0,6$ bis $0,8$), und der Anteil fragmentalen Knochens und Osteonfragmente ($r \approx 0,6$).

Auch in diesem Fall ist ersichtlich, dass das männliche Geschlecht (M) und das weibliche Geschlecht (W) genau entgegengesetzte Korrelationen aufweisen. Osteongeometrie, prozentuale Knochenbildungsrate und Aktivierungsfrequenz korrelieren stark positiv miteinander, ebenso Alter, OPD und AOC. Eine negative Korrelation zeigt sich zwischen Individualalter, OPD, AOC jeweils mit der Osteongeometrie, Aktivierungsfrequenz und Knochenbildungsrate. Ebenfalls negativ korreliert die Osteongeometrie mit Position und Temperatur.

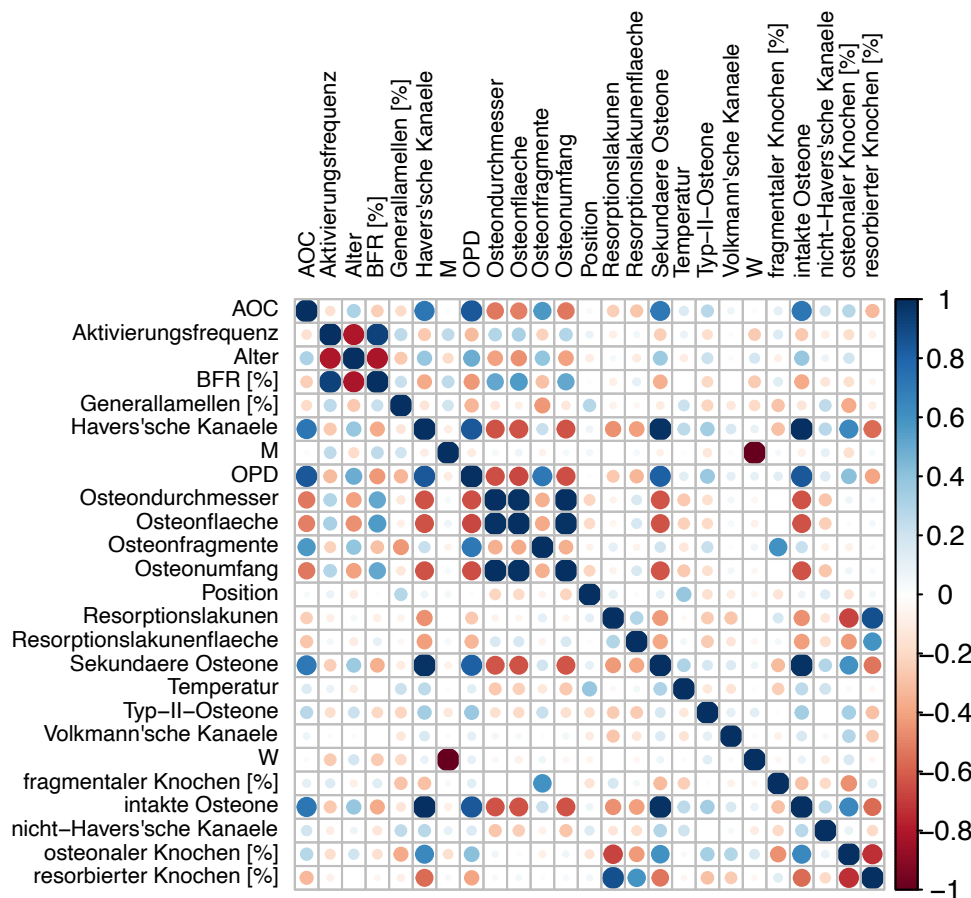


Abbildung 65: Korrelation der histomorphometrischen Parameter gegeneinander und mit der Temperatur, dem Geschlecht (M und W), dem Alter (Age) und der Position; die roten Kästchen stehen für eine stark negative Korrelation ($r = -1$), die blauen Kästchen für eine stark positive Korrelation ($r = 1$), bei farblosen (weiß) Kästchen liegt der Korrelationskoeffizient bei 0; Farbe und Größe der Kreise sind proportional zum Wert des Korrelationskoeffizienten;

3.5.3.5) Outlier-removal

Mithilfe der im R-Package „MVOutlier“ vorhandenen „PCOut-Methode“ wurden Ausreißer aus dem Datensatz entfernt. Die Methode basiert auf robusten Distanzen vom Mittelpunkt der Daten, ist multivariat und auch auf nicht-normalverteilte Daten anwendbar. Zudem kann diese Methode auf solche Daten angewendet werden, deren Änderung auf sogenannten „sekundären Prozessen“ beruht (bspw. Alter, Umwelt, Geschlecht oder in diesem Fall der Verbrennungstemperatur), was dazu führt, dass im Vergleich zu den restlichen Daten „extreme“ Werte nicht zwangsläufig als Ausreißer eingestuft werden. Es werden die oberen und unteren 2 % der Werte am Extremwert (Grenzwert) untersucht (im 97,5 % Quartil) und ggf. aus dem Datensatz entfernt. Der Test wurde nur anhand der im histologischen Feld gezählten (=unabhängigen) histomorphometrischen Parameter durchgeführt. Zeilen im Datensatz, in denen für einige oder auch nur einzelne der unabhängigen histomorphometrischen Parameter Ausreißer bzw. extreme Abweichungen von den restlichen Daten mithilfe der PCOut-Methode detektiert wurden, wurden vollständig aus dem Datensatz entfernt um einen möglichen Beeinflussung dieser Parameter auf die Erstellung der linearen Regressionsmodelle.

Durch diese Methode konnten am **periostalen Rand der Kompakta** insgesamt 129 Zeilen (entsprechend 129 Datenpunkte auf 21 histomorphometrische Parameter = 2709 Einzeldaten, Tabelle

21 im Anhang) aus dem Datensatz entfernt werden, sodass dieser nach Entfernen der Ausreißer noch 888 Zeilen umfasste (Tabelle 3 im Anhang auf CD). Bei den als Ausreißer deklarierten Datenzeilen handelte es sich um Individuen aller im Datensatz vertretenen Altersklassen, mit einer Altersspanne zwischen 16 und 91 Jahren. Von der Altersklasse *Adultas* wurden nur drei Datenzeilen als Ausreißer identifiziert, von der Altersklasse *Maturitas* zehn Datenzeilen und von der Altersklasse *Senilis* 52 Datenzeilen. Für das Individuum WF45 (16 Jahre, Altersklasse *Juvenis*) wurden alle vorhandenen Datenpunkte als Ausreißer identifiziert und aus dem Gesamtdatensatz entfernt (n=62, 49 % des Gesamtoutlierdatensatzes). Insgesamt 56 als Outlier identifizierte Datenzeilen entstammten aus den unverbrannten Referenzproben (RT), acht Zeilen einer Verbrennungstemperatur von 100 °C, vier von 200 °C, drei von 300°C, sechs von 400 °C, fünf von 700 °C, sechs von 800°C, sieben von 900 °C und 27 von 1000 °C. Der Ausreißer-Test wurde zusätzlich noch gesondert für die gezählten (unabhängigen) Parameter durchgeführt, wobei zusätzliche 11 Datenzeilen Extremwerte enthielten, sodass die Datenzeilen als Ausreißer aus dem Datensatz entfernt wurden. Diese 11 Datenzeilen wurden anschließend auch aus dem Gesamtdatensatz entfernt, zur graphischen Darstellung der Verteilung nach Bereinigung des Datensatzes. In Abbildung 66 ist die Verteilung der histomorphometrischen Parameter nach dem Entfernen der Ausreißer dargestellt. In dieser Abbildung sind auch die Anzahlen der Havers'schen Kanäle und der intakten Osteone miteinbezogen. Im Vergleich zu Abbildung 58 aus Kapitel 3.5.3.1 zeigt sich, dass die AOC eine geringere Spannbreite aufweist als zuvor, wodurch sich ein geringer temperaturbedingter Anstieg zwischen RT und 1000 °C erkennen lässt. Für die Aktivierungsfrequenz treten zwischen 100 und 400 °C verbrennungsbedingte Schwankungen hervor, im Vergleich von unverbrannten Proben (0 °C) und 400 bis 1000°C scheinen die Raten einander angenähert im Median. Die Knochenbildungsrate lässt nun auf temperaturbedingte Schwankungen zwischen 100 und 900°C schließen, aber im Vergleich sind auch hier die Werte der unverbrannten Referenzen (0 °C) denen der höchsten Verbrennungsstufe (1000 °C) im Median stark genähert. Für die übrigen Parameter ist erkennbar, dass sich an der Verteilung bzw. verbrennungsbedingten Entwicklung durch das Entfernen der Ausreißer keine maßgeblichen Veränderungen ergeben haben. Demzufolge scheint die Ausreißer-Bereinigung des Datensatzes maßgeblich für die Begrenzung der Spannbreiten der Metabolismus-abhängigen Parameter relevant gewesen zu sein. Darauf basierend wurde bei der Erstellung der Regressionsgleichungen sowohl mit dem bereinigten als auch mit dem unbereinigten Datensatz gearbeitet.

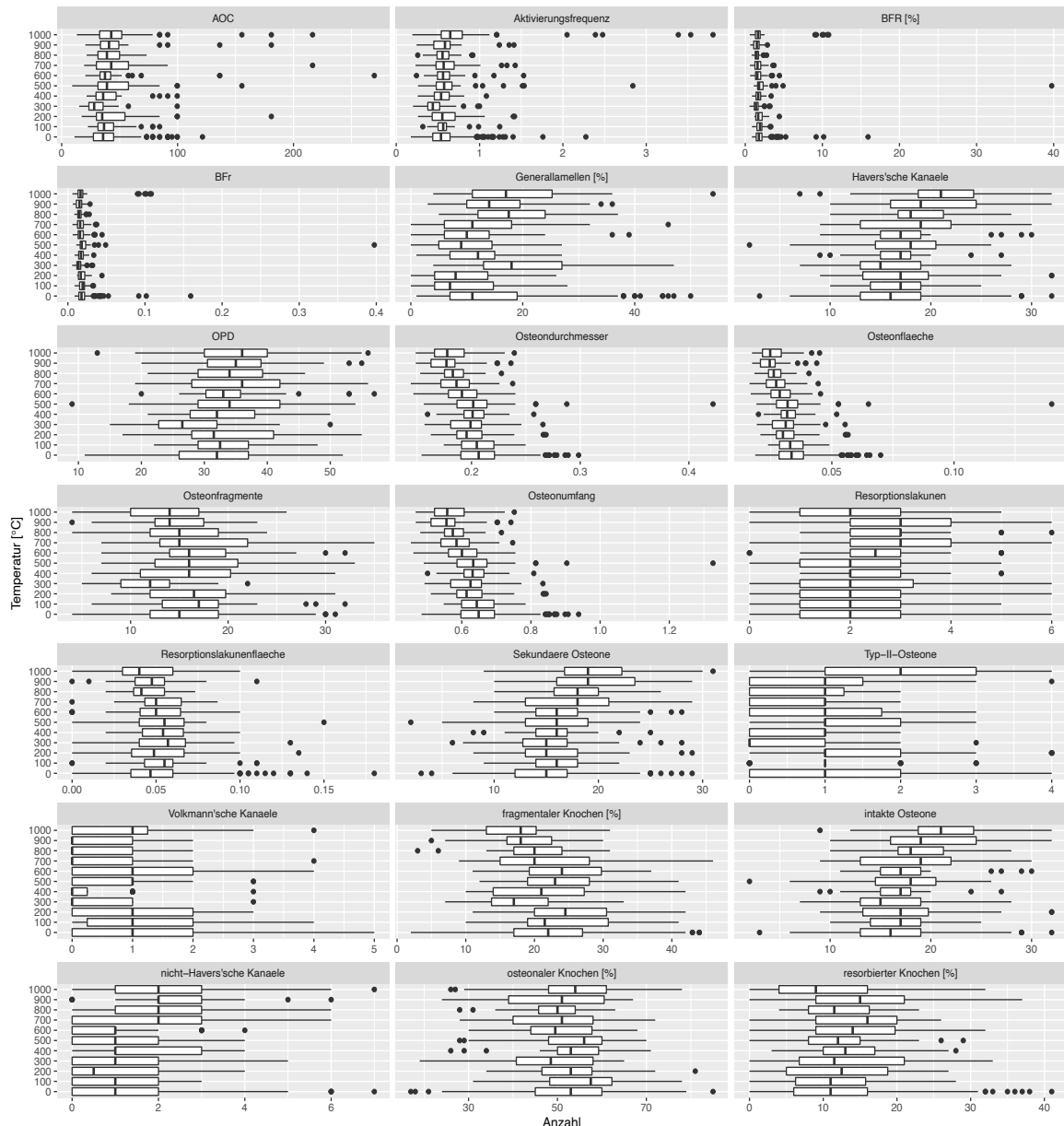


Abbildung 66: Boxplot zur Veranschaulichung der Datenverteilung der einzelnen histomorphometrischen Parameter über die Verbrennungstemperaturen (unv. – 1000 °C) in der periostalen Femurkompakta nach Outlier-removal; die histomorphometrischen Parameter wurden in einem Gitternetz von 1mm² gezählt, bzw. basierend auf den gezählten histomorphometrischen Parametern berechnet; X-Achse: Anzahl, Y-Achse: Verbrennungstemperatur von 0-1000°C (wobei 0 für die unverbrannte Probe steht und der Raumtemperatur RT entspricht);

Durch die PCOut-Methode wurden im **mittigen Bereich der Femurkompakta** insgesamt 91 Datenzeilen (entsprechend 91 Datenpunkten für 21 histomorphometrische Parameter = 1911 Einzelwerte) (Tabelle 27 im Anhang) entfernt, sodass der restliche Datensatz noch 751 Zählungen enthielt (Tabelle 4 im Anhang auf CD). Insgesamt wurden 17 Datenzeilen von Individuen der Altersklasse *Juvenis* (WF45), zwei der Altersklasse *Adultas*, vier der Altersklasse *Maturitas* und 68 Individuen der Altersklasse *Senilis* als Ausreißer identifiziert. Insgesamt 47 Datenzeilen stammten aus den Daten der unverbrannten Referenzproben, die restlichen Ausreißer verteilten sich über die Temperaturen der Verbrennungsreihe (2x100 °C, 2x200 °C, 3x300 °C, 5x400 °C, 2x500 °C, 4x600 °C, 10x700 °C, 6x800 °C, 5x900 °C, 5x1000 °C). Der Ausreißer-Test wurde zusätzlich noch gesondert für die gezählten

(unabhängigen) Parameter durchgeführt, wobei nur 85 Datenzeilen als Ausreißer aus dem Datensatz entfernt wurden.

In Abbildung 67 ist die Verteilung der histomorphometrischen Parameter nach dem Entfernen der Ausreißer dargestellt. In dieser Abbildung sind auch die Anzahlen der Havers'schen Kanäle und der intakten Osteone miteinander verglichen. Im Vergleich mit Abbildung 59 in Kapitel 3.5.3.1 vor dem Entfernen der Ausreißer zeigt sich nun für die AOC eine geringere Spannweite und eine deutliche Fluktuation der Werte zwischen RT (=0 °C) und 1000 °C. Auch die nicht-Havers'schen Kanäle und der Anteil resorbierten Knochens verringern sich in ihrer Gesamtspannweite der Werte.

Darüber hinaus ist jedoch erkennbar, dass sich durch das Entfernen der Ausreißer keine Abweichungen in den verbrennungsbedingten Veränderungen der Parameter ergeben haben. Deshalb wurde auch für diesen Datensatz bei der Erstellung der Regressionen bzw. linearen Modell sowohl der bereinigte als auch der unbereinigte Datensatz verwendet.

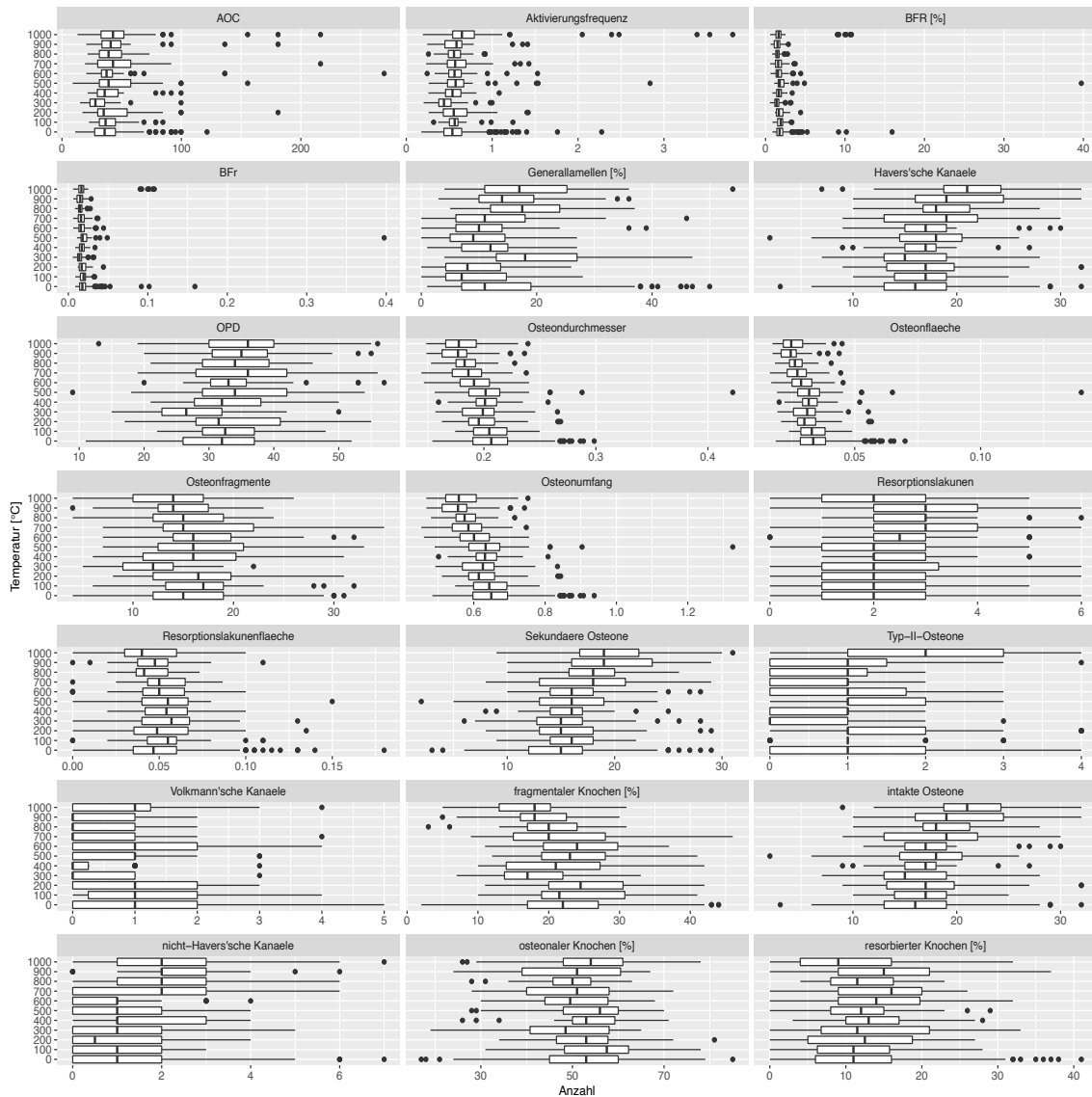


Abbildung 67: Boxplot zur Veranschaulichung der Datenverteilung der einzelnen histomorphometrischen Parameter über die Verbrennungstemperaturen (unv. – 1000 °C) nach Outlier-removal in der mittlerigen Femurkompakta; die histomorphometrischen Parameter wurden in einem Gitternetz von 1mm² gezählt, bzw. basierend auf den gezählten histomorphometrischen Parametern berechnet X-Achse: Anzahl, Y-Achse: Verbrennungstemperatur von 0-1000°C (wobei 0 für die unverbrannte Probe steht und der Raumtemperatur RT entspricht);

3.5.3.6) Geschlechtsunterschiede

Im Folgenden wurde der Datensatz des Femurprobenkollektivs auf Geschlechtsunterschiede getestet. Dies erfolgte basierend auf der Tatsache, dass sowohl **periostal** als auch **mittig** die Korrelation der beiden Geschlechter mit den histomorphometrischen Parametern jeweils gegensätzlich zueinander verläuft. Dies ist wiederum dadurch bedingt, dass bei der Korrelation in Kapitel 3.5.4.1.4 die histomorphometrischen Parameter nur mit einem der Geschlechter positiv bzw. negativ korrelieren können, da die Geschlechter als Parameter im Gesamtdatensatz binär kodiert sind. Bei der getrennten Betrachtung beider Datensätze wird die Korrelation der Parameter *innerhalb* des jeweiligen Geschlechts untersucht.

Die Verteilung der histomorphometrischen Parameter im **periostalen Bereich** der Femurkompakta bei Männern und Frauen (Abbildung 68) zeigt für die prozentuale Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur keine deutlichen geschlechtsbedingten Unterschiede auf und zeigen die gleiche verbrennungsbedingte Entwicklung. AOC-Rate, sekundäre Osteone, Typ-II-Osteone, Resorptionslakunen und Resorptionslakunenfläche, Volkmann'sche Kanäle und nicht-Havers'sche Kanäle weisen ebenfalls keine Unterschiede zwischen den Geschlechtern auf, wobei sich allerdings für die männlichen Individuen bei AOC und nicht-Havers'schen Kanälen eine größere Spannbreite der Werte erkennen lässt. Die Aktivierungsfrequenz und die prozentuale Knochenbildungsrate sind bei männlichen Individuen wesentlich höher bzw. breiter gefasst als bei weiblichen Individuen. Osteonfläche, Osteondurchmesser und Osteonumfang zeigen die gleiche verbrennungsbedingte Veränderung auf, wobei die Schrumpfung in der Osteongeometrie bei weiblichen Individuen deutlicher ausfällt.

Die Verteilung der histomorphometrischen Parameter im **mittigen** Bereich der Femurkompakta bei Männern und Frauen ist in Abbildung 69 gezeigt. Wie bereits am **periostalen Rand** weisen die prozentuale Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur, Resorptionslakunenfläche, sowie Osteondurchmesser und Osteonumfang zeigen die gleiche verbrennungsbedingte Veränderung auf. Bei den männlichen Individuen ist die Osteonfläche geringfügig größer als bei weiblichen Individuen, bei beiden tritt aber die temperaturinduzierte Schrumpfung auf. Dagegen ist der Wertebereich bei weiblichen Individuen generell größer. Im Vergleich zum **periostalen Rand** ist die Aktivierungsfrequenz in der **Kompaktmitte** bei den männlichen Individuen deutlich höher als bei den weiblichen Individuen, die AOC dagegen ist bei weiblichen Individuen gegenüber den männlichen erhöht. Die Anzahl und verbrennungsbedingte Entwicklung sekundärer Osteone, Osteonfragmente, Typ-II-Osteone, Resorptionslakunen und Volkmann'scher Kanäle ist bei beiden Geschlechtern nahezu gleich. Die prozentuale Knochenbildungsrate ist für das Kollektiv der männlichen Individuen bei einer Verbrennungstemperatur von 1000 °C deutlich erhöht gegenüber der weiblichen Individuen. Die maximale Anzahl nicht-Havers'scher Kanäle ist für das männliche Kollektiv leicht erhöht.

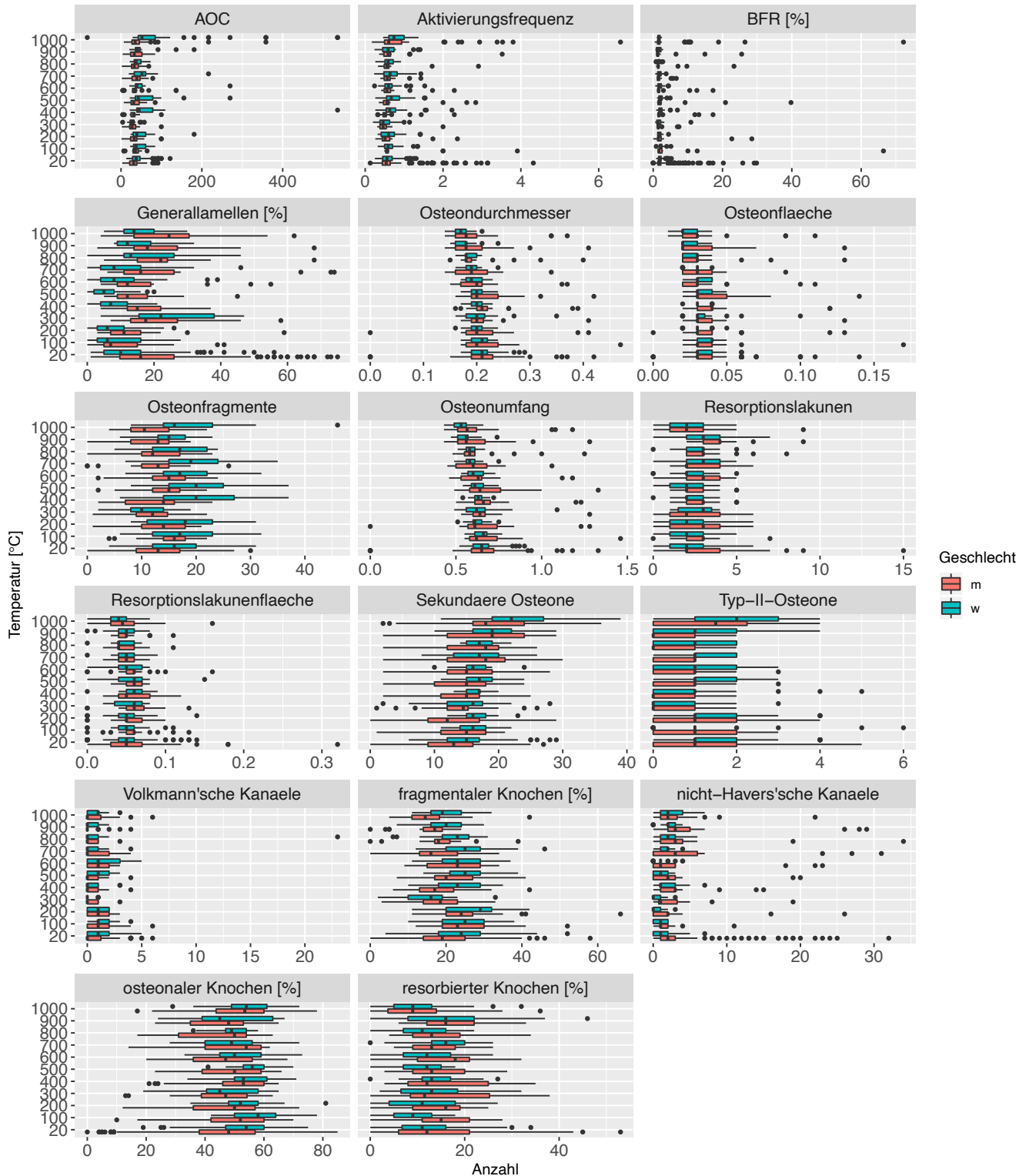


Abbildung 68: Boxplot zur Veranschaulichung der Datenverteilung der einzelnen histomorphometrischen Parameter über die Verbrennungstemperaturen (unv. – 1000 °C) in der periostalen Femurkompakta der weiblichen (grün) und männlichen (rot) Individuen; die histomorphometrischen Parameter wurden in einem Gitternetz von 1 mm² gezählt, bzw. basierend auf den gezählten histomorphometrischen Parametern berechnet; X-Achse: Anzahl der histomorphometrischen Parameter bzw. Größe oder Rate des betreffenden Parameters, Y-Achse: Verbrennungstemperatur von 20-1000°C;

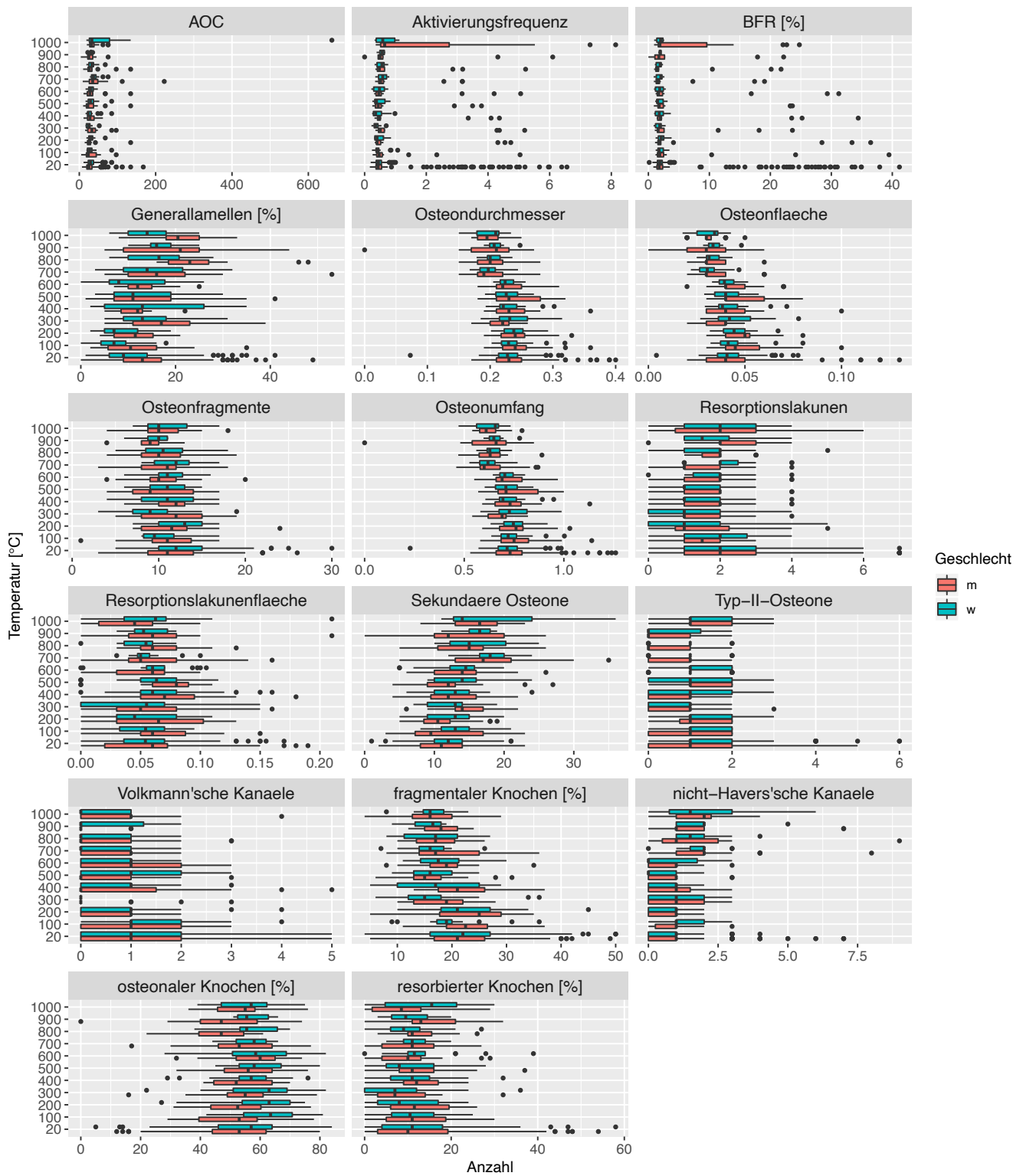


Abbildung 69: Boxplot zur Veranschaulichung der Datenverteilung der einzelnen histomorphometrischen Parameter über die Verbrennungstemperaturen (unv. – 1000 °C) in der mittigen Femurkompakta der weiblichen (grün) und männlichen (rot) Individuen; die histomorphometrischen Parameter wurden in einem Gitternetz von 1 mm² gezählt, bzw. basierend auf den gezählten histomorphometrischen Parametern berechnet; X-Achse: Anzahl der histomorphometrischen Parameter bzw. Größe oder Rate des betreffenden Parameters, Y-Achse: Verbrennungstemperatur von 20-1000°C;

Ein **Shapiro-Wilk-Test** auf die Datensätze der männlichen und weiblichen Individuen getrennt ergab für den **periostalen Rand** und für die **Kompaktamitte**, dass für jedes der Geschlechter über alle Verbrennungstemperaturen alle Parameter eine Normalverteilung aufweisen (Tabelle 28, 29, 32 und 33 im Anhang). Dies war bei der gemeinsamen Auswertung der Datensätze und der dabei erfolgten Applizierung des **Shapiro-Wilk-Tests** auf den Gesamtdatensatz nicht der Fall (vgl. Kapitel 3.5.3.2 Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung).

Anschließend wurde die jeweilige **Anzahl der histomorphometrischen Parameter über alle Verbrennungstemperaturen auf signifikante Unterschiede zwischen beiden Geschlechtern** getestet (Tabelle 30 und 34 im Anhang).

Im „verbrannten Zustand“ der Proben am **Periost** traten für die Temperatur von 20 °C (Abbildung 70A) ebenfalls signifikante Unterschiede auf. Dies ist dadurch bedingt, dass alle unverbrannten Referenzproben der elf Positionen entlang des Femurschaftes in dieser Darstellung in dieser Temperaturstufe (20 °C) zusammengefasst sind. Dadurch können sich wiederum signifikante Unterschiede zwischen den Parametern innerhalb der elf Positionen ergeben können. Insgesamt fanden sich am Periost über die Verbrennungsstufen verteilt 26 signifikante Geschlechtsunterschiede. Besonders häufig wiesen osteonale Parameter und davon abhängige prozentuale Bestandteile der Knochenmikrostruktur signifikante Divergenzen auf. Die meisten geschlechtsbedingten Unterschiede waren bei der höchsten Temperaturstufe (1000 °C) zu beobachten.

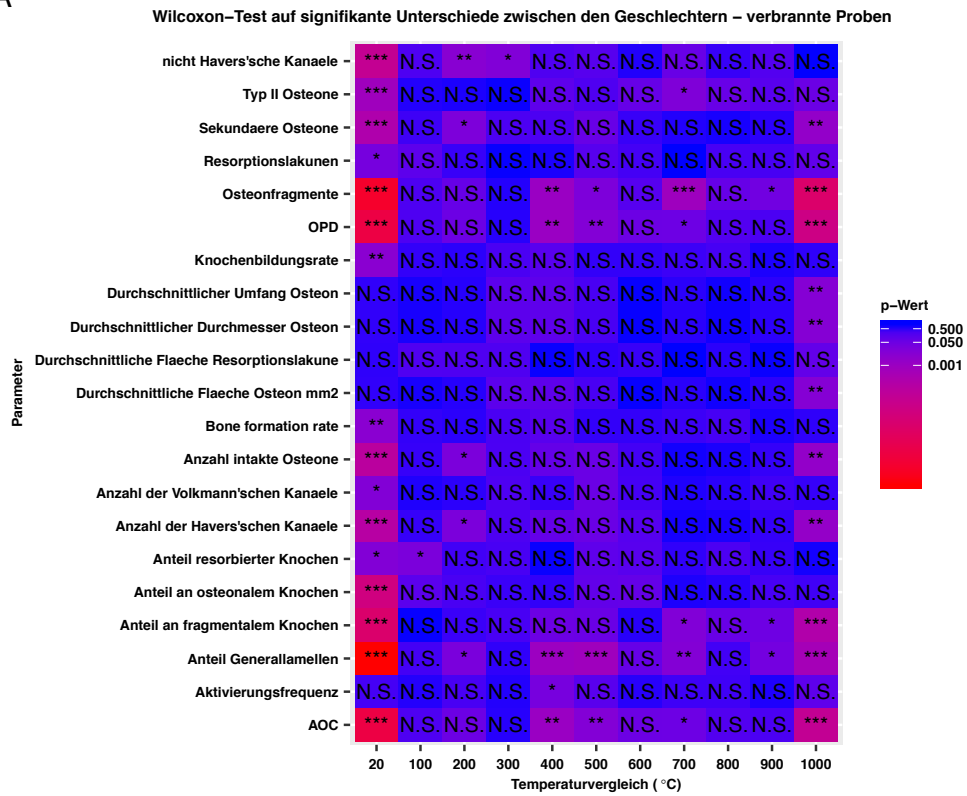
In der **Kompaktamitte** konnten über alle Verbrennungstemperaturen und alle Parameter insgesamt nur sieben signifikante Unterschiede zwischen den Häufigkeiten der Parameter ermittelt werden (Abbildung 71B). Bei 500 °C differierte bspw. die Zahl der Volkmann'schen Kanäle, bei 800 °C der Anteil osteonaler und lamellaren Knochens und bei 1000 °C der Anteil an Generallamellen. Damit waren die geschlechtsbedingten Unterschiede entlang der Verbrennungsreihe im **mittigen Bereich** der Femurkompakta wesentlich geringer als im **periostalen Bereich**.

Danach wurde ein **Wilcoxon-Rangsummentest** durchgeführt, um zu untersuchen, ob sich die **Anzahlen der histomorphometrischen Parameter zwischen männlichen und weiblichen Individuen** entlang der **unverbrannten Positionen** des anterioren Femurschaftes signifikant unterscheiden.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 31 (Periost) und 35 (Mitte) im Anhang aufgelistet.

Im unverbrannten Zustand entlang der Positionen des anterioren Femurschaftes waren **periostal** insgesamt 38 Parameter signifikant unterschiedlich zwischen beiden Geschlechtern (Abbildung 70B). Bei Position 1 zeigten sich 11 Divergenzen, bei Position vier einer, bei Position 2, 3 und 7 jeweils zwei und bei 5, 6, 8 und 10 vier bis sechs signifikante Unterschiede. In der **Kompaktamitte** konnten insgesamt 22 geschlechtsbedingte Unterschiede festgestellt werden (Abbildung 71B). Bei Position 1, 5, 7 und 9 fand sich jeweils nur ein signifikanter Unterschied, bei Position 2 und 6 fanden sich jeweils zwei signifikante Divergenzen. Bei Position 3 waren es insgesamt acht signifikant unterschiedliche Parameter und bei Position 11 waren sechs Parameter signifikant verschieden.

A



B

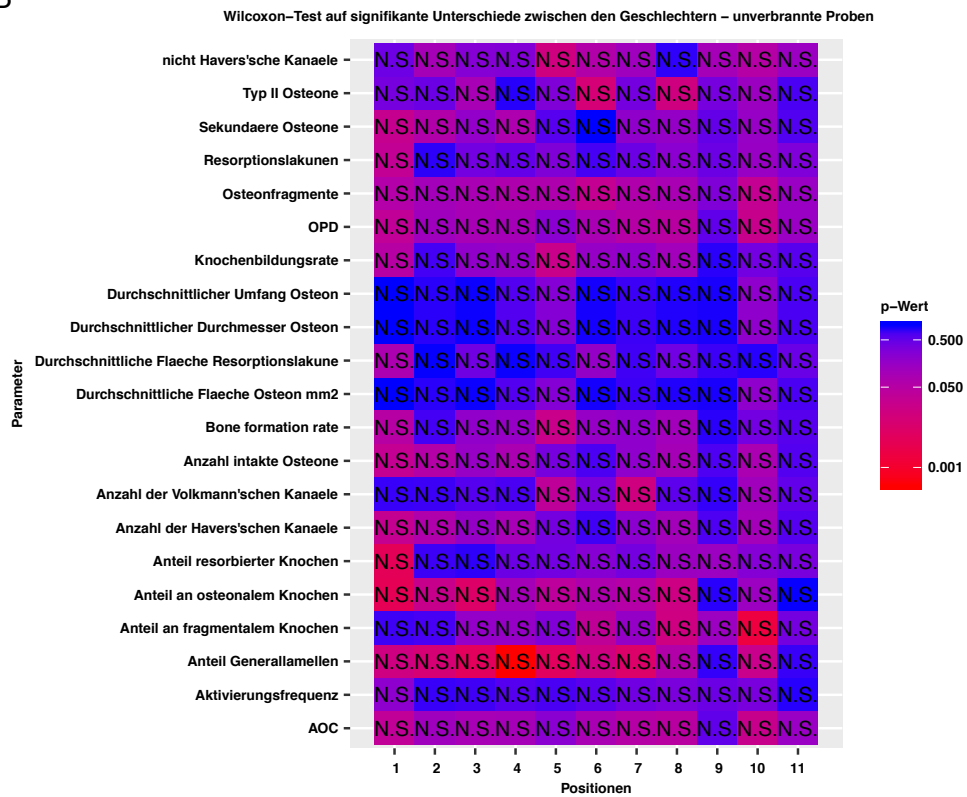
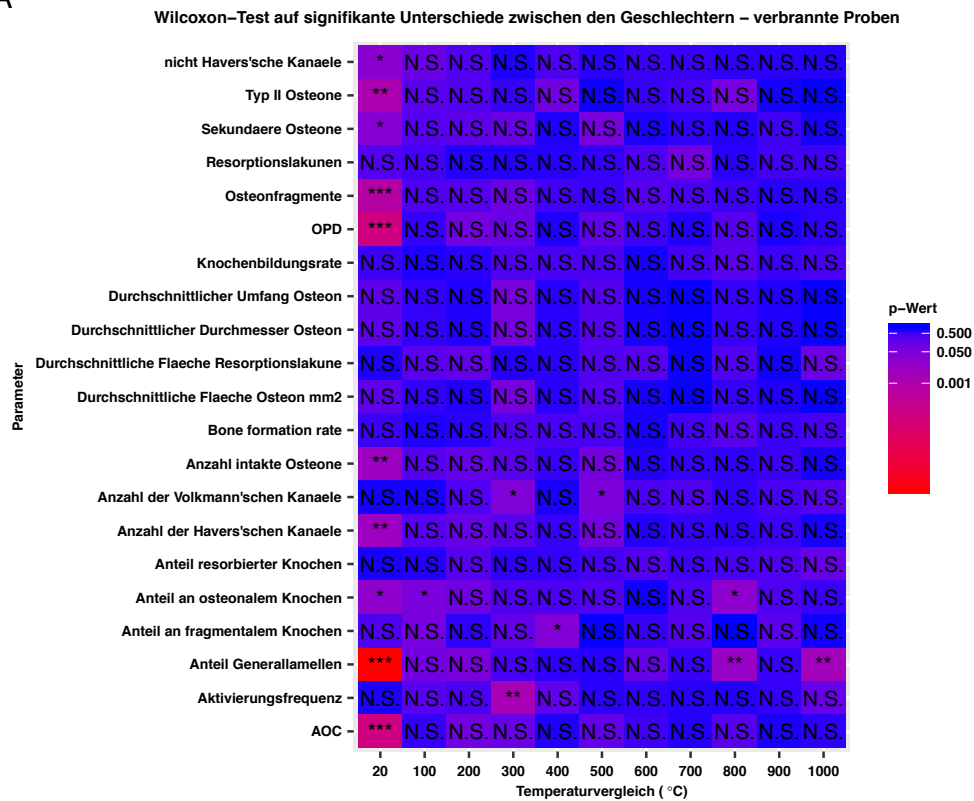


Abbildung 70: Periost: A – Wilcoxon-Test auf signifikante Unterschiede der experimentell kremierten Proben zwischen männlichem und weiblichen Geschlecht; B – Wilcoxon-Test auf signifikante Unterschiede zwischen den Geschlechtern entlang der Positionen des Femurschaftes; der p-Wert wird durch die Farbgebung und die Bezeichnungen verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert ($\leq 0,001$), ** für einen sehr signifikanten Wert ($\leq 0,01$) und * für einen signifikanten Wert ($\leq 0,05$);

A



B

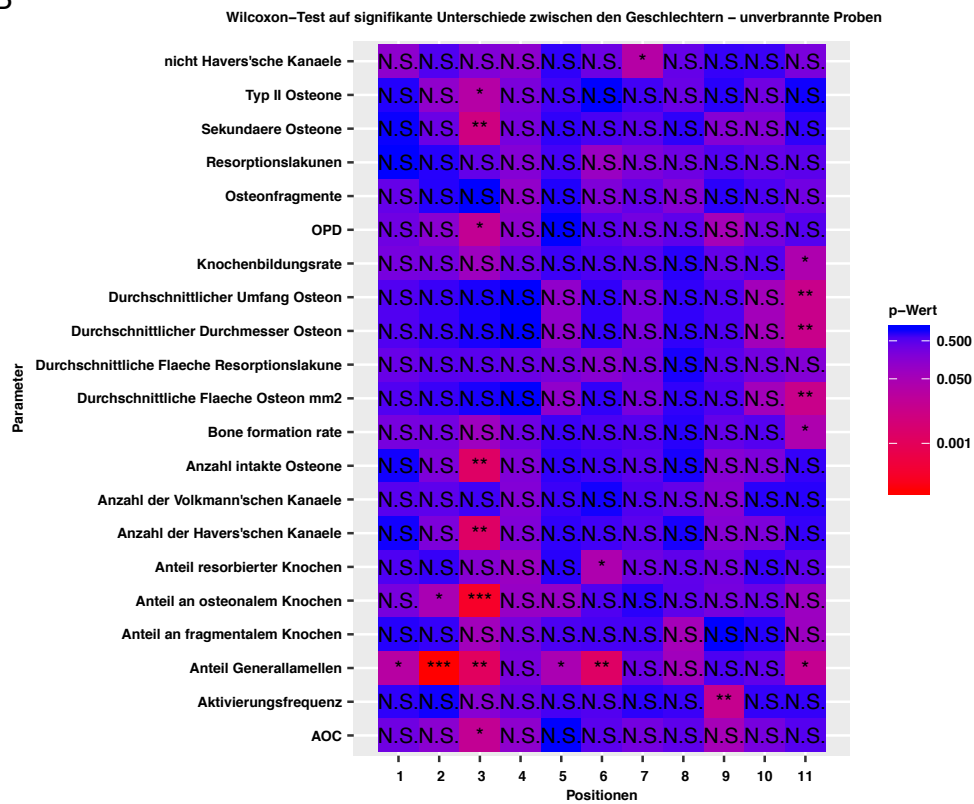


Abbildung 71: Kompaktmitte: A – Wilcoxon-Test auf signifikante Unterschiede der experimentell kremierten Proben zwischen männlichem und weiblichen Geschlecht; B – Wilcoxon-Test auf signifikante Unterschiede zwischen den Geschlechtern entlang der Positionen des Femurschaftes; der p-Wert wird durch die Farbgebung und die Bezeichnungen verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert ($\leq 0,001$), ** für einen sehr signifikanten Wert ($\leq 0,01$) und * für einen signifikanten Wert ($\leq 0,05$);

Daraufhin wurden die **histomorphometrischen Parameter gegeneinander und gegen das Alter und die Verbrennungstemperatur getrennt nach Geschlecht** korreliert. Abbildung 72A und 73A zeigen die Korrelation bei männlichen, Abbildung 72B und 73B die Korrelation bei weiblichen Individuen in Periost und Kompaktmitte.

Periostal und **mittig** weisen sekundäre und intakte Osteone, Havers'sche Kanäle, AOC und Aktivierungsfrequenz eine stark positive Korrelation miteinander in beiden Geschlechtern auf.

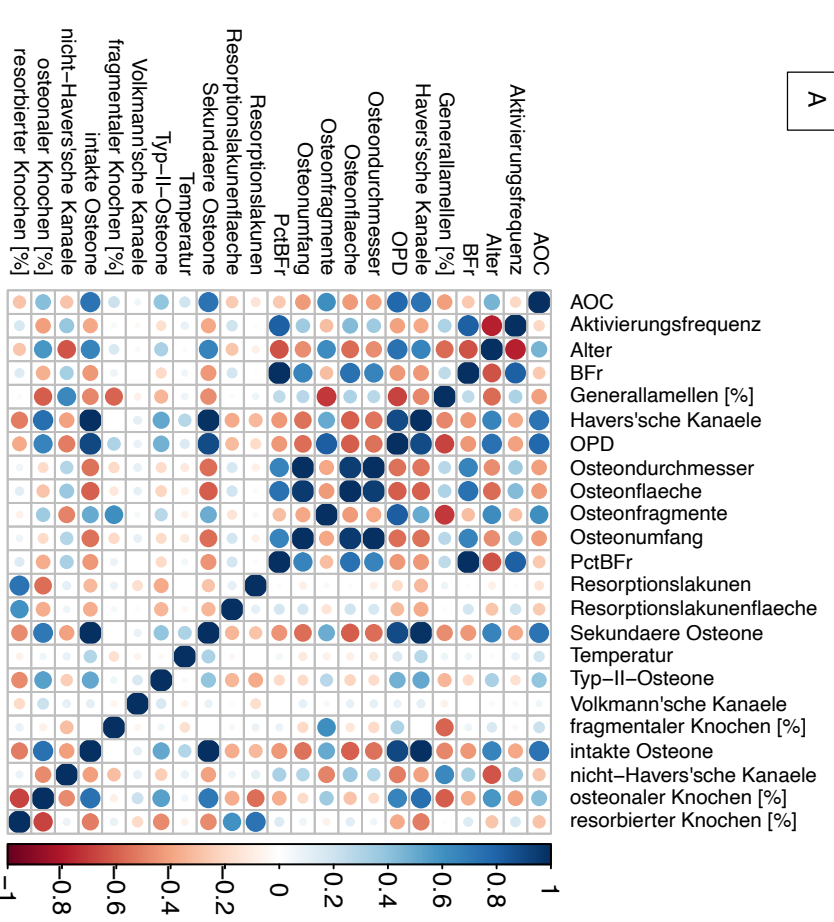
In der **Kompaktmitte** bei männlichen Individuen korrelieren diese Parameter zudem noch mit den Typ-II-Osteonen, Osteonfragmenten, der Aktivierungsfrequenz, dem Anteil osteonalen Knochens und dem Individualalter. Zudem zeigen diese Parameter eine leichte bis starke Korrelation mit OPD, Osteonfragmenten, osteonalem Knochen und Individualalter. **Periostal** zeigt die Osteongeometrie bei männlichen Individuen eine schwach bis stark positive Korrelation mit Aktivierungsfrequenz und Knochenbildungsrate, bei weiblichen Individuen ist diese Korrelation stark negativ.

Die Temperatur korreliert bei beiden Geschlechtern und in beiden **Bereichen der Kompakta** positiv mit sekundären und intakten Osteonen und Havers'schen Kanälen und negativ mit den Parametern der Osteongeometrie. Zudem korrelieren bei beiden Geschlechtern am **Periost** in der **Kompaktmitte** Osteongeometrie, Anteil an Generallamellen und Alter stark negativ mit sekundären und intakten Osteonen, OPD, AOC und Aktivierungsfrequenz.

Demnach ist bei diesem Korrelationstest die Korrelation der beiden Geschlechter mit den Parametern nicht so gegenläufig, wie bei der Gesamtkorrelation (nicht getrennt nach weiblichem und männlichem Datensatz in Kapitel 3.5.4.4).

Da zum einen die getrennten Datensätze nicht für eine Erstellung von Regressionsgleichungen genügen würden und zum anderen im Falle von Leichenbranduntersuchungen meist keine sichere Geschlechtsangabe getroffen werden kann, wurde bei der Erstellung der Regressionsgleichungen bzw. der linearen Modelle der Gesamtdatensatz verwendet.

A



B

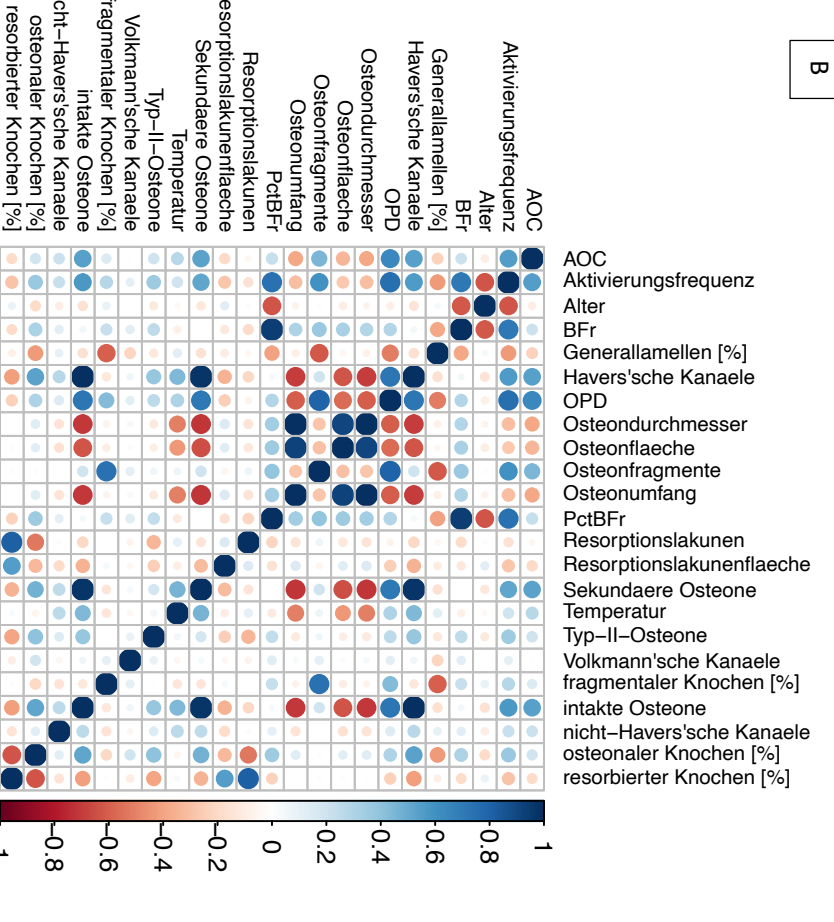
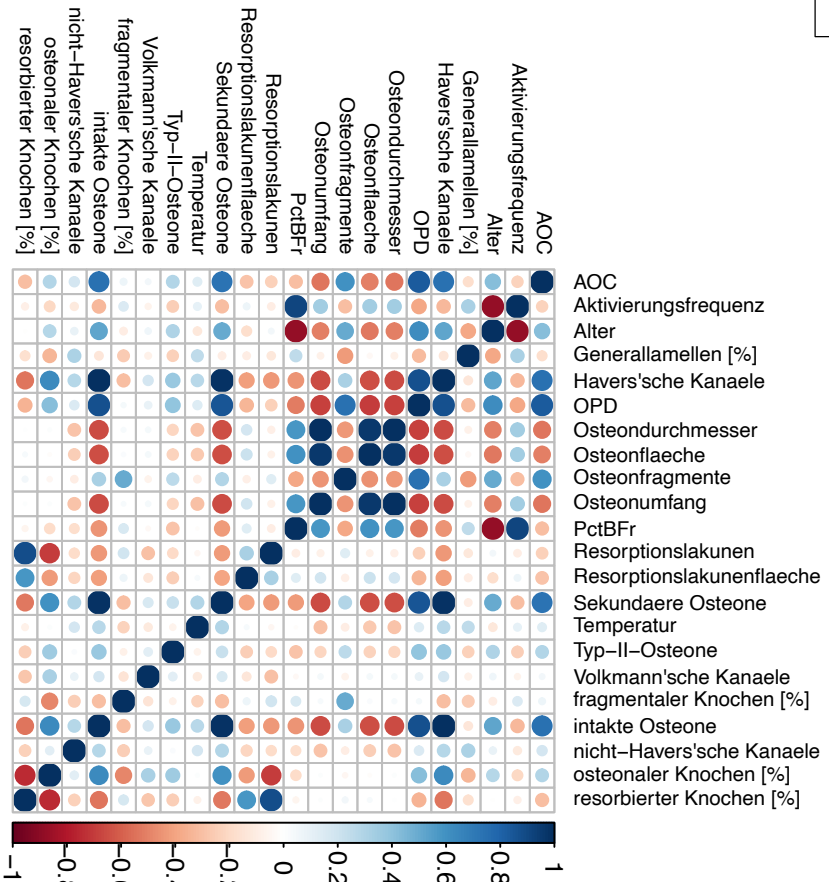
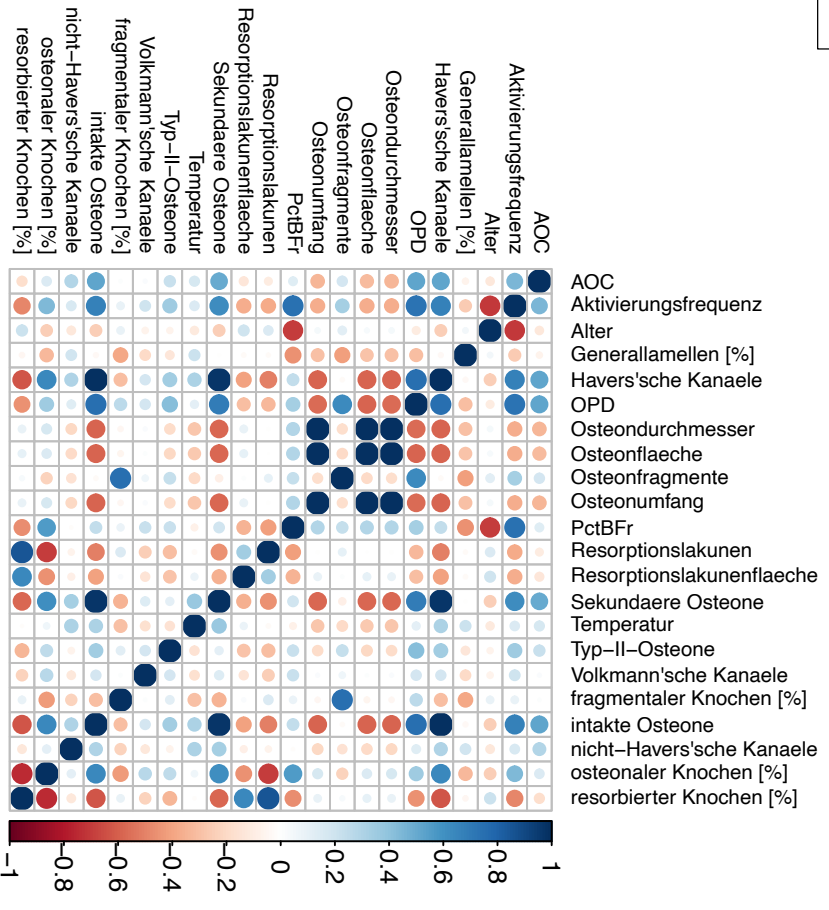


Abbildung 72: A. Korrelation der histomorphometrischen Parameter männlicher Individuen und mit der Temperatur und Alter (Age); die blauen Kästchen stehen für eine stark positive Korrelation ($r=1$), die roten Kästchen für eine stark negative Korrelation ($r=-1$), die farblosen (weiß) Kästchen liegt der Korrelationswert bei 0; Farbe und Größe der Kreise sind proportional zum Wert des Korrelationskoeffizienten;

A



B



3.5.3.7) Vergleich periostal und mittig

Um zu prüfen, ob Regressionsgleichungen bzw. multivariate lineare Modelle, welche anhand des **periostalen** Randes der Femurkompakta erstellt wurden auch im **mittigen** Bereich anwendbar sind wurde getestet, ob sich die Parameterzahlen zwischen dem **mittigen** und **periostalen** Bereich einerseits im unverbrannten Zustand zwischen den Positionen entlang des Femurschaftes und andererseits über die Temperaturen der Verbrennungsreihe signifikant unterscheiden.

Dies erfolgte zunächst im direkten Vergleich von Abbildung 58 und Abbildung 59.

Für die Osteonfragmente zeigte sich dabei, dass die Veränderungen in der Mitte der Kompakta konstanter und geringfügiger ausfallen als periostal gelegen.

Bei der Betrachtung der prozentualen Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur wurde deutlich, dass der Anteil resorbierten Knochens im **mittigen** und **periostalen** Bereich nahezu gleich ist, wobei der Anteil an Generallamellen am **periostalen** Rand leicht erhöht ist im Vergleich zur **Kompaktamitte** (sowohl unverbrannt als auch verbrannt). Der Anteil osteonaler Knochens ist dagegen mittig geringfügig höher.

Die Osteongeometrie ist mittig leicht erhöht im Vergleich zum periostalen Rand, die Resorptionslakunenfläche dagegen verhält sich mittig und periostal gleich.

OPD und AOC sind periostal im unverbrannten und verbrannten Zustand stärker ausgeprägt, allerdings weist der mittige Bereich der Kompakta auch hier geringere Spannbreiten auf.

Die Knochenbildungsrate und die Aktivierungsfrequenz sind im unverbrannten Zustand in der Kompaktamitte leicht erhöht, im verbrannten Zustand nähern sich die beiden Bereiche bei der Knochenbildungsrate einander an.

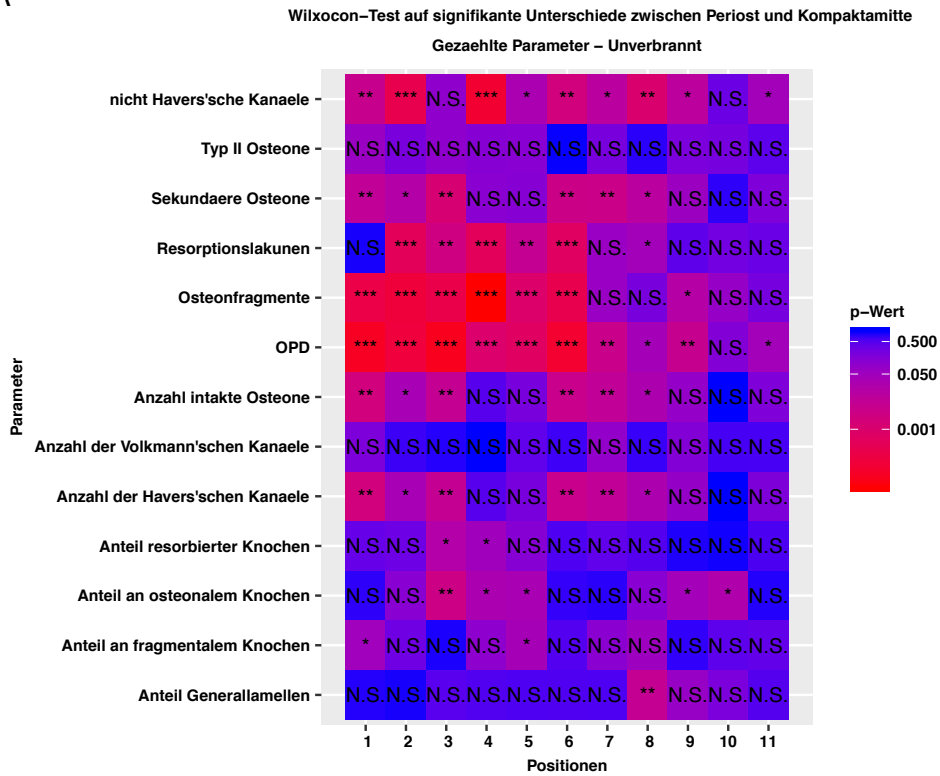
Die Rate der Aktivierungsfrequenz ist im verbrannten Zustand im mittigen Bereich gegenüber dem periostalen Rand vermehrt.

Entlang der elf Positionen des Femurschaftes im *unverbrannten* Zustand zeigten sich über alle Positionen hinweg bei dem **Wilcoxon-Rangsummentest** für die meisten Parameter signifikante Unterschiede (Tabelle 36 im Anhang und Abbildung 74A und 75A).

Auch im *verbrannten* Zustand unterschieden sich die meisten Parameter zwischen dem mittigen und dem periostalen Bereich der Femurkompakta signifikant (Tabelle 37 im Anhang und Abbildung 74B und 75B) nach dem **Wilcoxon-Rangsummentest**.

Darauf basierend wurden die multivariaten linearen Modelle zur Erhebung von Regressionen zur Individualaltersschätzung getrennt voneinander erstellt. Zudem wurde daraus geschlussfolgert, dass sich eine Anwendung linearer Modelle aus dem periostalen Rand eines Knochenfragments nicht für die Anwendung in der Kompaktamitte empfiehlt.

A



B

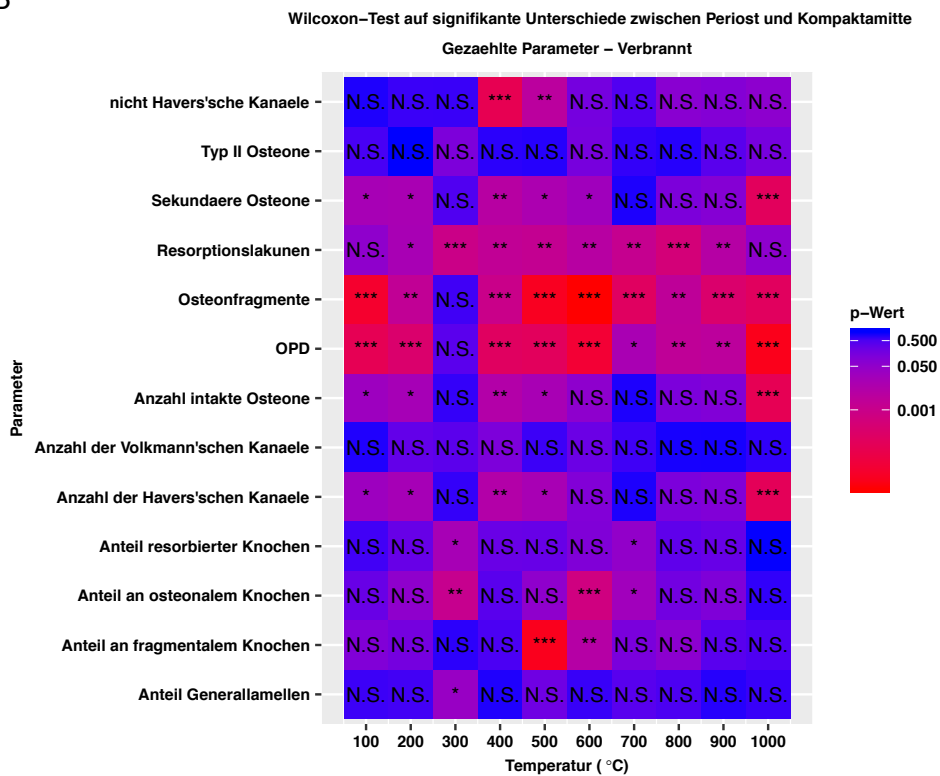
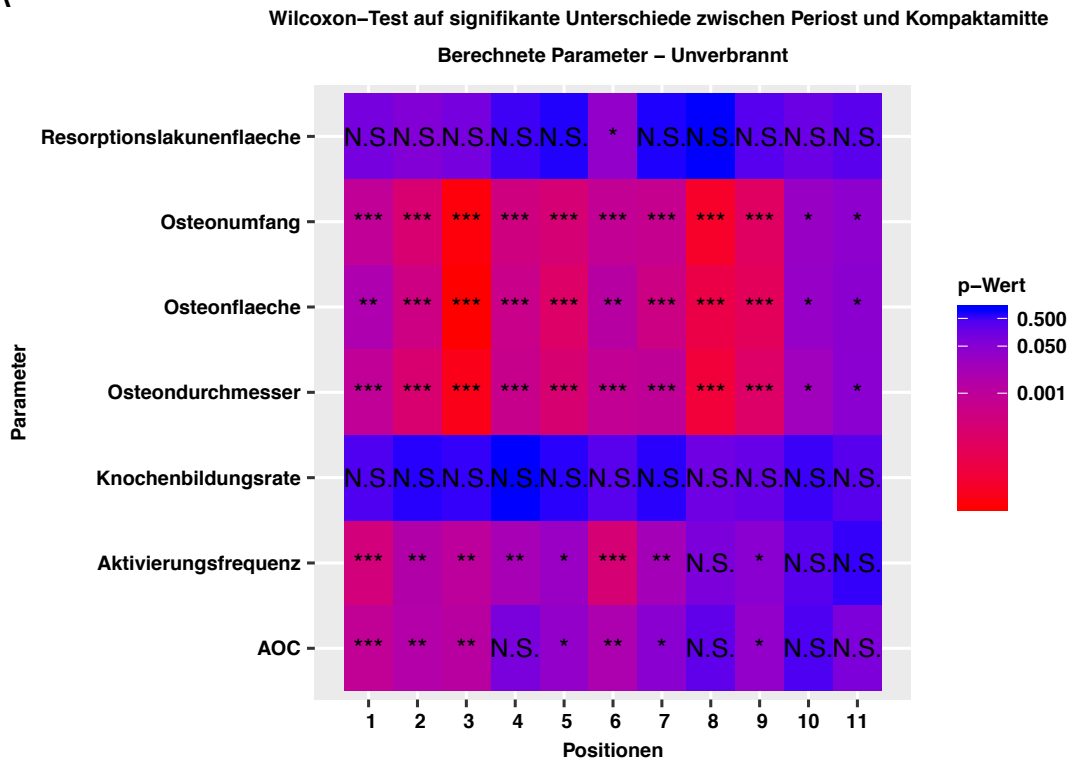


Abbildung 74: A. Wilcoxon-Test auf signifikante Unterschiede der gezählten histomorphometrischen Parameter entlang der unverbrannten Positionen des anterioren Femurschaftes zwischen periostalem Rand und Kompaktmitte; B. Wilcoxon-Test auf signifikante Unterschiede der berechneten Parameter entlang der unverbrannten Positionen des Femurschaftes zwischen Periost und Mitte der Kompakta; der p-Wert wird durch die Farbgebung und die Bezeichnungen verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert ($\leq 0,001$), ** für einen sehr signifikanten Wert ($\leq 0,01$) und * für einen signifikanten Wert ($\leq 0,05$);

A



B

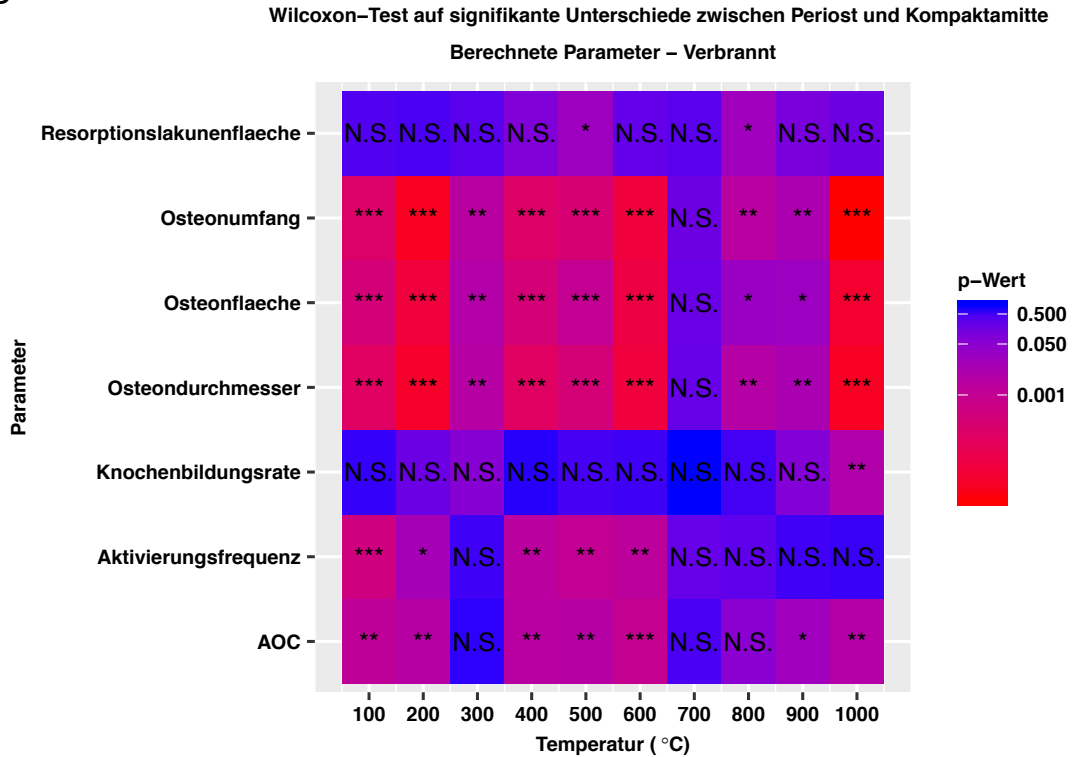


Abbildung 75: A. Wilcoxon-Test auf signifikante Unterschiede der berechneten histomorphometrischen Parameter entlang der Temperaturstufen der Verbrennungsreihe zwischen periostalem Rand und Kompaktamitte; B: Wilcoxon-Test auf signifikante Unterschiede der berechneten Parameter entlang der Temperaturstufen der Verbrennungsreihe zwischen Periost und Mitte der Kompakta; der p-Wert wird durch die Farbgebung und die Bezeichnungen verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert ($\leq 0,001$), ** für einen sehr signifikanten Wert ($\leq 0,01$) und * für einen signifikanten Wert ($\leq 0,05$);

3.5.4) Erstellung von Regressionsgleichungen

3.5.4.1) Periostale Auswertung

Die Erstellung von linearen Modellen zur Aufstellung neuer Regressionsgleichungen erfolgte mithilfe der freien Programmiersprache R. Die in das jeweilige lineare Modell einbezogenen Parameter wurden aufgrund ihrer Relevanz innerhalb der Knochenmikrostruktur und ihrer Relevanz bzw. ihrem Einfluss in Bezug auf andere Parameter ausgewählt. Zunächst wurden lineare Modelle anhand des Gesamtdatensatzes des Femurprobenkollektivs (siehe Tabelle 1 im Anhang auf CD) erstellt, erst ohne und anschließend mit Entfernung von Ausreißern, durch das R-Package MVOulier.

Anhand dieser Datensätze konnten keine Regressionsmodelle erstellt werden, welche die Daten hinreichend repräsentierten und erklärten, oder eine histologische Individualaltersschätzung ermöglichten, weshalb ein Datensatz aus den gemittelten Werten der jeweils drei Einzelzählungen pro Individuum und Position bzw. Temperaturstufe erstellt wurde (Tabelle 5 im Anhang auf CD). Vor der Erhebung linearer Regressionsmodelle wurde auch dieser Datensatz durch das R-Package MVOulier von Ausreißern im Datensatz bereinigt (Tabelle 38 im Anhang). Zudem wurde Individuum WF45 aus dem Testdatensatz entfernt, da durch dieses Individuum die Regressionstests maßgeblich negativ beeinflusst wurden. Bei jedem der Regressionstests ergab sich für WF45 eine zu weit gefasste Spannbreite der histologischen Alterswerte und eine starke Abweichung der mittleren Differenz zwischen histologischem und tatsächlichem Alter. Mittels des übrigen Datensatzes konnten insgesamt vier Regressionsmodelle aufgestellt werden, welche den Datensatz sinnvoll repräsentierten.

1.) Lineares Modell:

Tabelle 11 beschreibt die verwendeten Parameter der vier linearen Modelle.

Tabelle 11: Parameter für die linearen Modelle 1, 2, 3 und 4 am periostalen Rand der Kompakta;

Modell 1	$\text{lm}(\text{formula}=\text{Age} \sim 0+\text{Temp}+\text{SekOst}+\text{TypIIost}+\text{OstFrag}+\text{ResLak}+\text{Havers}+\text{NonHavers}+\text{VolkM}+\text{ResKno}+\text{GenLam}+\text{OstKno}+\text{FragKno}, \text{Daten}=\text{GesTab}-\text{Femur periostal})$
Modell 2	$\text{lm}(\text{formula}=\text{Alter} \sim 0+\text{Temp}+\text{ResLak}+\text{ResLakFl}+\text{ResKno}+\text{OstD}+\text{OstFl}+\text{OstU}+\text{AktFr}+\text{BFR}, \text{Daten}=\text{GesTab}-\text{Femur periostal})$
Modell 3	$\text{lm}(\text{formula}=\text{Alter} \sim 0+\text{Temp}+\text{OPD}+\text{AktFr}+\text{BFR}+\text{AOC}+\text{Geschlecht}, \text{Daten}=\text{GesTab}-\text{Femur periostal})$
Modell 4	$\text{lm}(\text{formula}=\text{Alter} \sim 0+\text{Temp}+\text{GenLam}+\text{ResKno}+\text{OstKno}+\text{FragKno}+\text{Geschlecht}, \text{Daten}=\text{GesTab}-\text{Femur periostal})$

In **Modell 1** wurden alle gezählten histomorphometrischen Parameter in das Modell einbezogen.

In **Modell 2** wurden die Parameter der Osteon- und Resorptionslakunengeometrie, sowie Aktivierungsfrequenz und BFR einbezogen.

Modell 3 basiert auf den Metabolismus-abhängigen Parametern und dem Geschlecht.

Modell 4 beinhaltet die prozentualen Parameter der Knochenmikrostruktur und das Geschlecht.

Alle Modelle haben die Temperatur miteinbezogen und wurden durch den Nullpunkt des Koordinatensystems gelegt.

2.) Residuen:

Tabelle 12: Übersicht (Ausdehnung, Symmetrie und Quartile) über die Verteilung der Residuen mit Minimum, Maximum, 25% und 75% Quartile und Median;

Modell	Min	1Q	Median	3Q	Max
Modell 1	-27,31	-5,38	-0,34	5,52	23,06
Modell 2	-22,4247	-4,8057	0,2886	4,2333	30,2491
Modell 3	-6,1017	-2,2211	-0,3875	1,1721	14,8151
Modell 4	-27,1471	-6,5487	-0,9449	7,3800	22,4002

Tabelle 12 zeigt eine Übersicht über die Verteilung der Residuen. Residuen stellen die Differenz zwischen dem beobachteten und dem vorhergesagten (geschätzten) Wert der abhängigen Variable (berechnetes Individualalter, Y) dar. Hierbei werden die minimale und maximale Abweichung, sowie die Verteilung im ersten und dritten Quartil (1Q = $\frac{1}{4}$ der Werte liegen darunter, 3Q = $\frac{3}{4}$ der Werte liegen darunter) und der Median der Residuen aufgezeigt.

Die minimale (negative) Abweichung liegt bei **Modell 1** bei -27,3 und die maximale (positive Abweichung) bei 23,1. Die Verteilung im ersten und dritten Quartil ist ungefähr symmetrisch (1Q= -5,3 und 3Q=5,5) und der Median liegt nahe um den Nullpunkt (-0,34).

Die minimale (negative) Abweichung in **Modell 2** findet sich bei -22,4 und die maximale (positive Abweichung) bei 30,2. Die Verteilung im ersten und dritten Quartil ist symmetrisch (1Q=-4,8 und 3Q=4,2). Der Median liegt am Nullpunkt (0,2).

Die minimale (negative) Abweichung in **Modell 3** liegt bei -6,1 und die maximale (positive Abweichung) bei 14,8. Die Verteilung im ersten und dritten Quartil ist relativ symmetrisch (1Q=-2,2 und 3Q=1,1). Der Median liegt nahe am Nullpunkt (-0,3).

Die minimale (negative) Abweichung in **Modell 4** beträgt -27,1 und die maximale (positive Abweichung) 22,4. Die Verteilung im ersten und dritten Quartil ist nicht genau symmetrisch (1Q= -6,5 und 3Q=7,3). Der Median liegt nahe am Nullpunkt (-0,94).

3.) Koeffizienten:

Tabelle 13 zeigt die mithilfe der KQ-Methode (*Methode der kleinsten Quadrate*) geschätzten Koeffizienten der Parameter, deren Standardfehler, die Teststatistik und den zugehörigen p-Wert. Bei der KQ-Methode handelt es sich um die *Methode der kleinsten Quadrate*. Eine Regression wird so durch die Punkte gelegt, dass die Summe der Quadrate (Residuen) minimal ist.

Tabelle 13: Geschätzte Koeffizienten (mithilfe der KQ-Methode) der Parameter, deren zugehöriger Standardfehler, Teststatistik (Schätzung/Standardfehler mit $H_0: \beta_i=0$, vs. $H_1: \beta_i \neq 0$ – welche besagt dass der jeweilige Parameter einen bzw. keinen Einfluss hat) und der zur Teststatistik gehörende p-Wert samt dessen Signifikanz;

Modell	Parameter	Schätzung	Standardfehler	t-Wert	Pr(> t)	Signifikanz
Modell 1	Temperatur	-0,003713	0,002499	-1,486	0,138861	
	Sekundäre Osteone	2,529416	152,478471	0,017	0,986781	
	Typ-II-Osteone	3,843415	152,311872	0,025	0,979894	
	Osteonfragmente	-0,270825	0,297930	-0,909	0,364437	
	Resorptionslakunen	-6,100267	1,554665	-3,924	0,000120	***
	Havers'sche Kanäle	-1,563284	152,472525	-0,010	0,991830	
	Nicht-Havers'sche Kanäle	2,868601	0,810822	3,538	0,000502	***
	Volkman'sche Kanäle	0,933207	1,084572	0,860	0,390583	
	resorbierter Knochen [%]	1,507034	0,251403	5,995	9,44e-09	***
	Generallamellen [%]	1,049703	0,102433	10,248	< 2e-16	***
	osteonaler Knochen [%]	0,298766	0,088687	3,369	0,000907	***
	fragmentaler Knochen [%]	1,120422	0,189670	5,907	1,49e-08	***
Modell 2	Temperatur	-3,303e-03	1,853e-03	-1,782	0,0762	.
	Resorptionslakunen	-2,611e-01	1,665e+00	-0,157	0,8756	
	Resorptionslakunenfläche	5,462e+01	6,089e+01	0,897	0,3708	
	resorbierter Knochen [%]	-4,880e-01	3,192e-01	-1,529	0,1278	
	Osteondurchmesser	1,786e+02	1,689e+02	1,057	0,2918	
	Osteonfläche	-3,371e+02	1,801e+02	-1,872	0,0627	.
	Osteonumfang	1,291e+02	5,546e+01	2,327	0,0209	*
	AktFr	9,037e+01	8,068e+00	11,202	<2e-16	***
	BFR	-4,349e+01	2,769e+00	-15,707	<2e-16	***
Modell 3	Temperatur	-1,357e-03	8,318e-04	-1,631	0,1044	
	OPD	1,192e+00	9,592e-02	12,428	<2e-16	***
	Aktivierungsfrequenz	-1,037e+02	4,731e+00	-21,928	<2e-16	***
	BFR	2,536e+00	1,075e+00	2,360	0,0192	*
	AOC	3,728e-01	4,135e-02	9,016	<2e-16	***
	M	7,507e+01	2,017e+00	37,217	<2e-16	***
	W	7,724e+01	2,104e+00	36,704	<2e-16	***
Modell 4	Temperatur	-1,958e-03	2,309e-03	-0,848	0,397	
	Generallamellen [%]	2,215e+02	1,344e+02	1,648	0,101	
	Resorbierter Knochen [%]	2,210e+02	1,344e+02	1,644	0,102	
	osteonaler Knochen [%]	2,211e+02	1,344e+02	1,645	0,102	
	fragmentaler Knochen [%]	2,214e+02	1,344e+02	1,647	0,101	
	M	-2,205e+04	1,344e+04	-1,640	0,103	
	W	-2,205e+04	1,344e+04	-1,640	0,103	

Unter den ausgewählten Parametern stellten bei **Modell 1** nur die Zahl der Resorptionslakunen (0,000120), nicht-Havers'schen Kanäle (0,000502) und die prozentuale Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur (ResKno=9,44e-09, GenLam=<2e-16, OstKno=0,000907, FragKno=1,49e-08) einen signifikanten Einfluss für das lineare Modell zur Beschreibung des Datensatzes dar.

Innerhalb der ausgewählten Parameter in **Modell 2** stellten der Osteonumfang (0,0209), die Aktivierungsfrequenz (<2e-16) und die Knochenbildungsrate (<2e-16) einen signifikanten Einfluss für das lineare Modell zur Beschreibung des Datensatzes dar.

Bei den für die Erstellung von **Modell 3** ausgewählten Parametern hatten alle Parameter abgesehen von der Temperatur einen signifikanten Einfluss für das lineare Modell zur Beschreibung des Datensatzes dar (OPD, AktFr, AOC, M, W=<2e-16, BFR=0,0192).

Durch die Schätzung der Koeffizienten, des Standardfehlers, der Errechnung des t-Wertes samt p-Wert in **Modell 4** wurde deutlich, dass keiner der Parameter einen signifikanten Einfluss hat, wodurch die Nullhypothese verworfen wird.

4.) Statistik

In Tabelle 14 ist die zu den jeweiligen linearen Modellen gehörige Statistik aufgezeigt.

Tabelle 14: Statistische Auswertung zu Modell 1, 2, 3 und 4 samt Residuenstandardfehler (RSE), R^2 , korrigiertes R^2 , F-Statistik und zugehörigem p-Wert; DF=Freiheitsgrade;

Modell	Residuenstandardfehler (RSE)	R^2	Korrigiertes R^2	F-Statistik	p-Wert
Modell 1	9,177 bei 199 DF	0,9862	0,9854	1184 bei 12 und 199 DF	< 2,2e-16
Modell 2	7,609 bei 202 DF	0,9904	0,9899	2306 bei 9 und 202 DF	< 2,2e-16
Modell 3	3,407 bei 204 DF	0,998	0,998	1,49e+04 bei 7 und 204 DF	< 2,2e-16
Modell 4	10,03 bei 204 DF	0,9831	0,9825	1694 bei 7 und 204 DF	< 2,2e-16

Der RSE beschreibt den Fehler (die Standardabweichung) des linearen Modells durch die Wurzel der Quadratsumme der Residuen dividiert durch $n-k$, mit $n-k$ = Anzahl der Freiheitsgrade, n =Anzahl der Beobachtungen, und k =Anzahl der Regressoren. Je kleiner der RSE eines Modells, desto besser passt dieses auf den Datensatz. Das unzentrierte und zentrierte (korrigierte) R^2 kennzeichnen den Prozentsatz, mit welchem das Modell die zugrundeliegenden Daten beschreiben kann. Das korrigierte R^2 berücksichtigt die Anzahl der Freiheitsgrade und ist bei multiplen linearen Regressionen zu verwenden. Die F-Statistik beschreibt den F-Test der zur statistischen Erueierung der Nullhypothese $H_0: \beta_i=0$, vs. $H_1: \beta_i \neq 0$ mit 12 Zählergraden und 199 Nennergraden (=Freiheitsgraden=DF) zugehörig ist, samt dem zum Test gehörigen p-Wert. Je größer der Wert der F-Statistik und je kleiner der p-Wert, desto besser ist die Regressionsgerade als Annäherung an den ihr zugrundeliegenden Datensatz.

Der große F-Wert und der kleine p-Wert in **Modell 1 und Modell 2** stehen für eine verhältnismäßig gute Anpassung der Geraden an den Datensatz. Der sehr große F-Wert und der zugehörige kleine p-Wert in **Modell 3** sprechen für eine sehr gute Anpassung an die Daten.

Der F-Wert ist in **Modell 4** im Vergleich zu **Modell 3** wesentlich geringer, obgleich der p-Wert immer noch signifikant ist.

5.) Regressionsgleichung

In Tabelle 15 sind die durch die linearen Modelle 1, 2, 3 und 4 generierten Regressionsgleichungen aufgezeigt.

Tabelle 15: Regressionsgleichungen zu den Modellen 1,2,3 und 4;

Modell 1	$Y=0,00373*[\text{Temperatur}]+2,53*[\text{Sekundäre Osteone}]+3,84*[\text{TypII Osteone}]-0,27*[\text{Osteonfragmente}]-6,1*[\text{Resorptionslakunen}]-1,56*[\text{Havers'sche Kanäle}]+2,87*[\text{Nicht-Havers'sche Kanäle}]+0,93*[\text{Volkmann'sche Kanäle}]+1,51*[\text{resorbierter Knochen}]+1,1*[\text{Generallamellen}]+0,3*[\text{osteonaler Knochen}]+1,12*[\text{fragmentaler Knochen}]$
Modell 2	$Y=-3,03e-03*[\text{Temperatur}]-2,611e-01*[\text{Resorptionslakunen}]+5,462e+01*[\text{Resorptionslakunenfläche}]-4,880e-01*[\text{resorbierter Knochen}]+1,78e+02*[\text{Osteondurchmesser}]-3,371e+02*[\text{Osteonfläche}]+1,291e+02*[\text{Osteonumfang}]+9,037e+01*[\text{Aktivierungsfrequenz}]-4,349e+01*[\text{BFR}]$
Modell 3	$Y= -1,357e-03*[\text{Temperatur}]+1,1,92e+00*[\text{OPD}]-1,037e+02*[\text{Aktivierungsfrequenz}]+2,536e+00*[\text{BFR}]+3,728e-01*[\text{AOC}]+7,507e+01*[\text{Männlich}]+7,724e+01*[\text{Weiblich}]$
Modell 4	$Y= -19,58e-03*[\text{Temperatur}]+2,215e+02*[\text{Generallamellen}]+2,210e+02*[\text{resorbierter Knochen}]+2,211e+02*[\text{osteonaler Knochen}]+2,214e+02*[\text{fragmentaler Knochen}]-2,205e+04*[\text{Männlich}]-2,205e+04*[\text{Weiblich}]$

6.) Plots zur Beurteilung der Güte des Regressionsmodells

Modell 1:

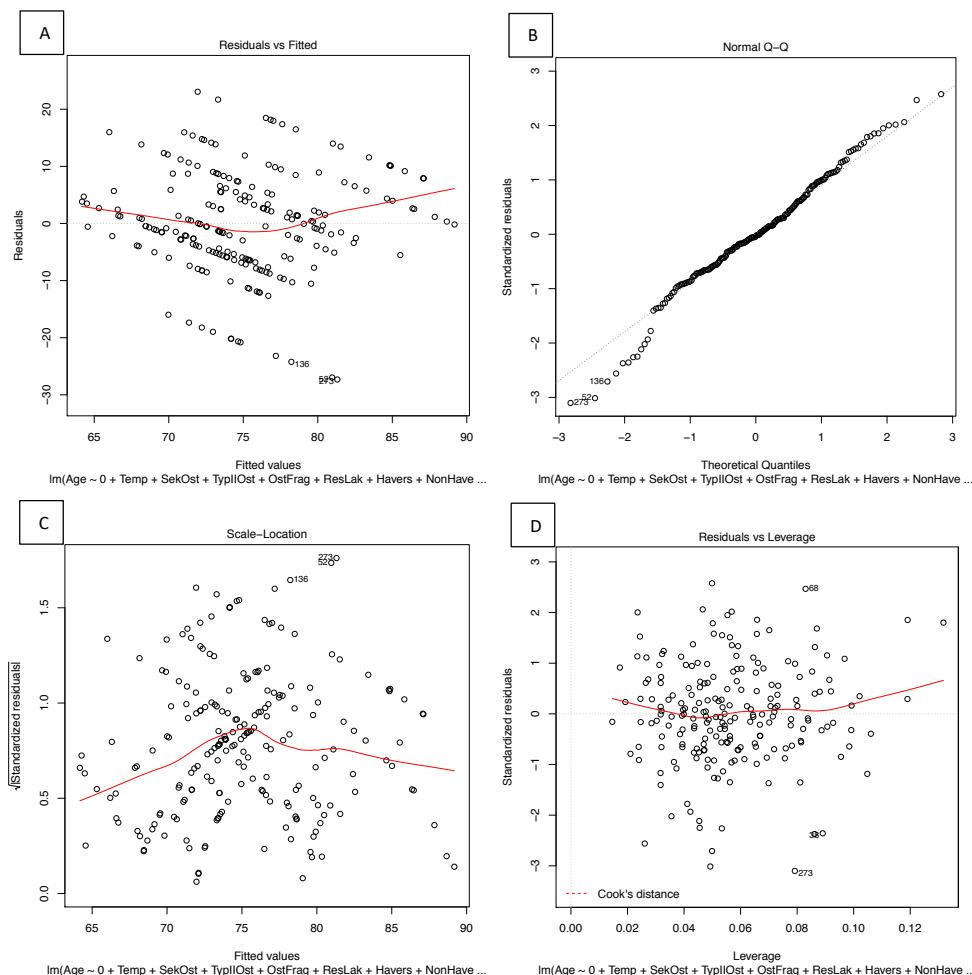


Abbildung 76: Plots zur Beurteilung der Güte der Regression; A: Residuen gegen die vom Modell vorhergesagten Werte (fitted values), B: QQ-Plot: Quartile der standardisierten Residuen (standardized residuals) gegen die Quartile der Normalverteilung (theoretical quantiles), C: Scale-Location-Plot zur Analyse, ob die Standardabweichung der Residuen über den Bereich der erklärten Variablen gleich bleibt, D: Cook's Distance Plot zur Herausarbeitung einflussnehmender Datenpunkte (Wert >1 sind stark einflussnehmend);

Abbildung 76 zeigt vier Graphen, welche zur Beurteilung der „Güte“ des multivariaten linearen Regressionsmodells dienen. Der Plot „Residuals vs. Fitted“ (Abbildung 76A) testet die Annahme eines linearen Verhältnisses zwischen den Variablen und ob die gleiche Varianz entlang der Regressionslinie

besteht (Homoskedastizität). Dieser Graph trägt die Werte der Residuen gegen die vom Modell vorhergesagten Werte auf. In diesem Fall handelt es sich um einen mittelmäßig guten „Residuen vs. Fitted“-Plot, da zwar Muster erkennbar, diese aber nicht ganz eindeutig sind. Die Verteilung entlang der Nulllinie scheint relativ symmetrisch zu sein, die Regressionslinie verläuft annähernd gerade.

Der „Normal-Q-Q-Plot“ (Abbildung 76B) ist ein „Quartil-Quartil“-Plot, der zur Überprüfung der Normalverteilungsannahme der Parameter dient. Dabei werden die Quartile der Residuen gegen die theoretischen Quartile der Standardnormalverteilung aufgetragen. In diesem Fall werden starke Abweichungen zwischen den Verteilungen aufgezeigt, da sowohl die niedrigen als auch die hohen Quartile unter- bzw. oberhalb der gezeichneten Geraden liegen. Nur wenn alle Punkte auf der Geraden liegen, sind die Verteilungen identisch. Demnach zeigen sich in den höheren und niedrigeren Quartilen größere bzw. respektive kleinere Werte als in der Normalverteilung. Diese Abweichungen sind in den niedrigeren Quartilen stärker als in den niedrigeren.

Der „Scale-Location“-Plot (Abbildung 76C) zeigt an, ob die Residuen gleichmäßig entlang der Vorhersagegrenzen verteilt sind. Dafür werden in diesem Graph die vom Modell vorhergesagten Werte gegen die Quadratwurzel der standardisierten Residuen aufgetragen. Damit kann auf Homoskedastizität geprüft werden. Diese liegt vor, wenn die Linie horizontal verläuft und die Daten symmetrisch verteilt sind. In diesem Fall liegt allerdings nur eine annähernd horizontale Linie vor, was daran liegt, dass die Residuen der vorhergesagten Werte eine größere Verteilung zeigen. Die Werte scheinen relativ gleichmäßig ober- und unterhalb verteilt zu sein.

Der „Residuals vs. Leverage“-Plot (Abbildung 76D) dient dazu, Proben mit starkem Einfluss auf den Datensatz zu identifizieren. Nicht alle Ausreißer in einem Datensatz besitzen einen großen Einfluss auf die Regressionslinie, sofern sie dem Trend des restlichen Datensatzes folgen. Andere Datenpunkte besitzen einen großen Einfluss und können die Ergebnisse verändern. In dieser graphischen Darstellung wird nicht nach Verteilungen, sondern nach Ausreißern gesucht, vor allem in der oberen rechten und unteren linken Ecke des Graphs, welche Punkte darstellen, an welchen sich einflussreiche Ausreißer befinden. In dieser Abbildung lassen sich keine einflussreichen Datenpunkte erkennen, zudem liegt kein Datenpunkt außerhalb der Cook's Distance. Diese errechnet sich prinzipiell aus dem Einfluss der beobachteten Werte und den Residuen, je größer beide Werte sind, desto größer ist der Wert der Cook's Distance). Zudem wurden Ausreißer aus dem Datensatz bereits vor der Erstellung der linearen Modelle entfernt. Dieses lineare Modell sollte nur dann verwendet werden, wenn tatsächlich alle der verwendeten histomorphometrischen Parameter vorhanden und quantifizierbar sind. Generell gilt, dass ein lineares Modell so einfach wie möglich gehalten werden sollte, mit möglichst wenig Termen in der Regressionsgleichung. Vor allem bei kremierten Knochenfragmenten könnte die Anwendung dieses Modells nur schwer durchführbar sein.

Modell 2:

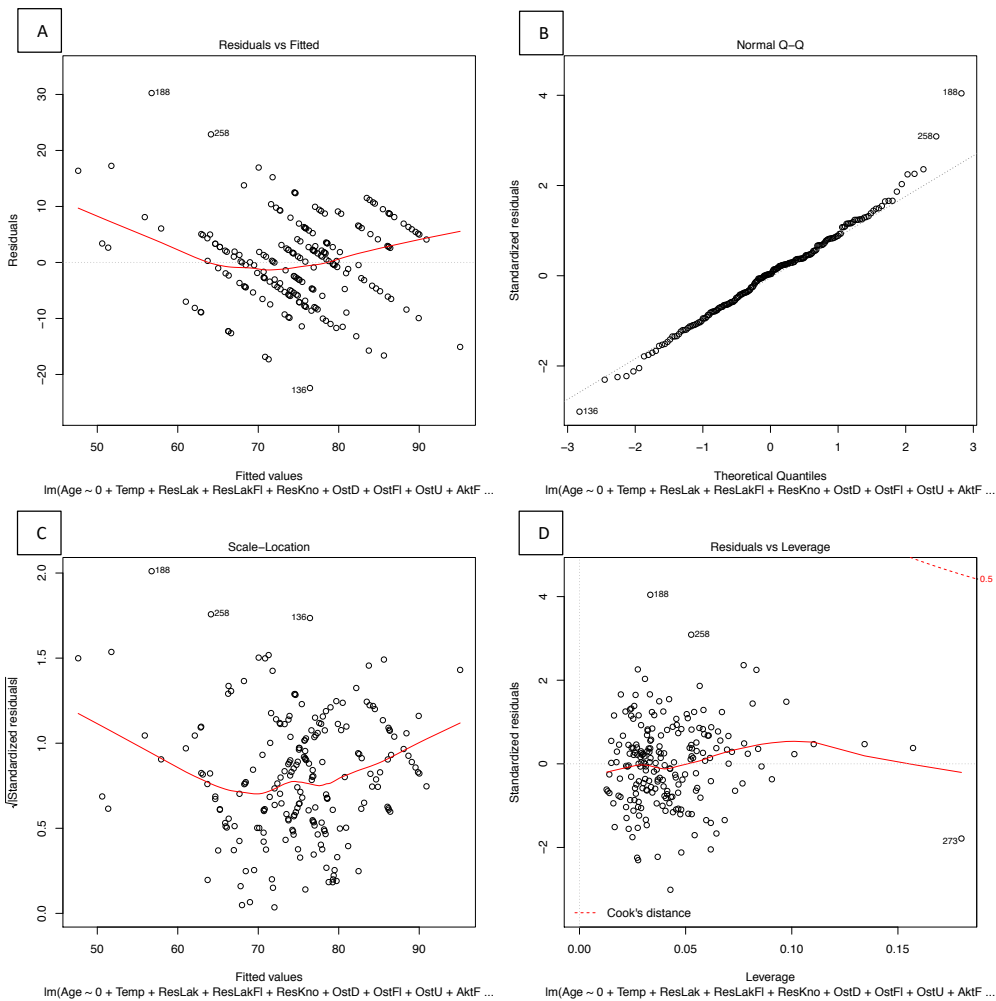


Abbildung 77: Plots zur Beurteilung der Güte der Regression; A: Residuen gegen die vom Modell vorhergesagten Werte (fitted values), B: QQ-Plot: Quartile der standardisierten Residuen (standardized residuals) gegen die Quartile der Normalverteilung (theoretical quantiles), C: Scale-Location-Plot zur Analyse, ob die Standardabweichung der Residuen über den Bereich der erklärten Variablen gleich bleibt, D: Cook's Distance Plot zur Herausarbeitung einflussnehmender Datenpunkte (Wert >1 sind stark einflussnehmend);

Im Residuals vs. Fitted-Plot (Abbildung 77A) sind keine klaren Muster in den Daten zu erkennen und sie scheinen symmetrisch entlang der Nulllinie verteilt. Die Regressionslinie verläuft fast horizontal. Der Q-Q-Plot (Abbildung 77B) zeigt für die oberen Quartile eine höhere Abweichung an, im mittleren und unteren Bereich scheinen die Werte der Normalverteilung zu entsprechen. Der Scale-Location-Plot (Abbildung 77C) zeigt nur im mittigen Bereich einen horizontalen Verlauf, was im oberen und unteren Bereich auf eine breitere Verteilung der Daten schließen lässt. Im Residuals vs. Leverage-Plot (Abbildung 77D) ist zu sehen, dass die Zeilen 188, 258 und 273 einen Einfluss auf den Datensatz haben, allerdings liegt kein Datenpunkt außerhalb der Cook's Distance. Die Werte scheinen annähernd gleichmäßig (symmetrisch um die Nulllinie) verteilt.

Modell 3:

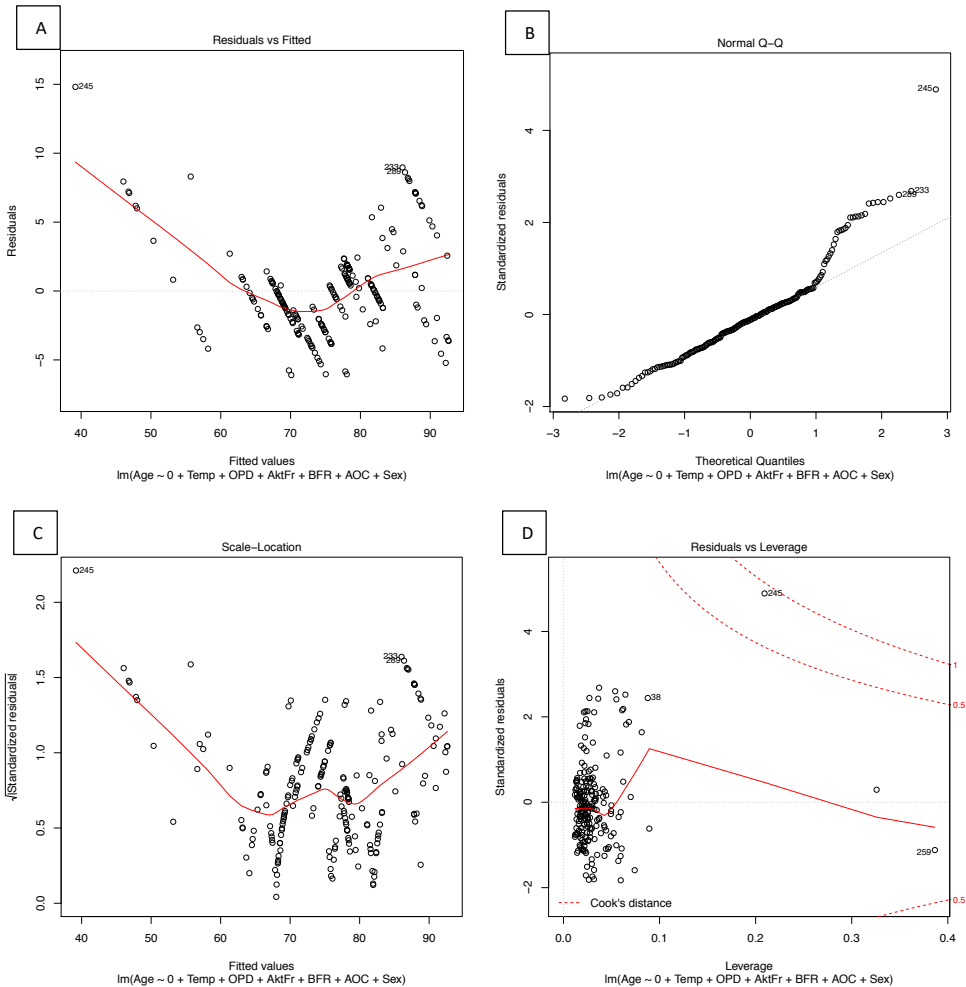


Abbildung 78: Plots zur Beurteilung der Güte der Regression; A: Residuen gegen die vom Modell vorhergesagten Werte (fitted values), B: QQ-Plot: Quartile der standardisierten Residuen (standardized residuals) gegen die Quartile der Normalverteilung (theoretical quantiles), C: Scale-Location-Plot zur Analyse, ob die Standardabweichung der Residuen über den Bereich der erklärten Variablen gleich bleibt, D: Cook's Distance Plot zur Herausarbeitung einflussnehmender Datenpunkte (Wert >1 sind stark einflussnehmend);

Der Residuals vs. Fitted-Plot (Abbildung 78A) zeigt keine gleichmäßige Verteilung der Daten und Datenzeile 245 scheint einen Ausreißer darzustellen. Die Regressionslinie verläuft nicht horizontal. Auch im Q-Q-Plot (Abbildung 78B) ist erkennbar, dass in den höheren Quartilen die Werte nach positiv von der Normalverteilung abweichen. Auch in diesem Fall stellt Zeile 245 einen Ausreißer dar. Der Scale-Location-Plot (Abbildung 78C) zeigt keine horizontale Linie, was darauf schließen lässt, dass die Werte nicht gleichmäßig verteilt sind, sondern stärker streuen. Im Residuals vs. Leverage-Plot (Abbildung 78D) ist erkennbar, dass sich Datenzeile 245 außerhalb der Cook's Distance befindet, und somit einen großen Einfluss auf die Regression besitzt. Auch Datenzeile 259 liegt nahe an der Cook's Distance. Trotz hohen F-Wertes und kleinem p-Wert passt das Modell nach Abbildung 78A-D nicht gut zu den Daten.

Modell 4:

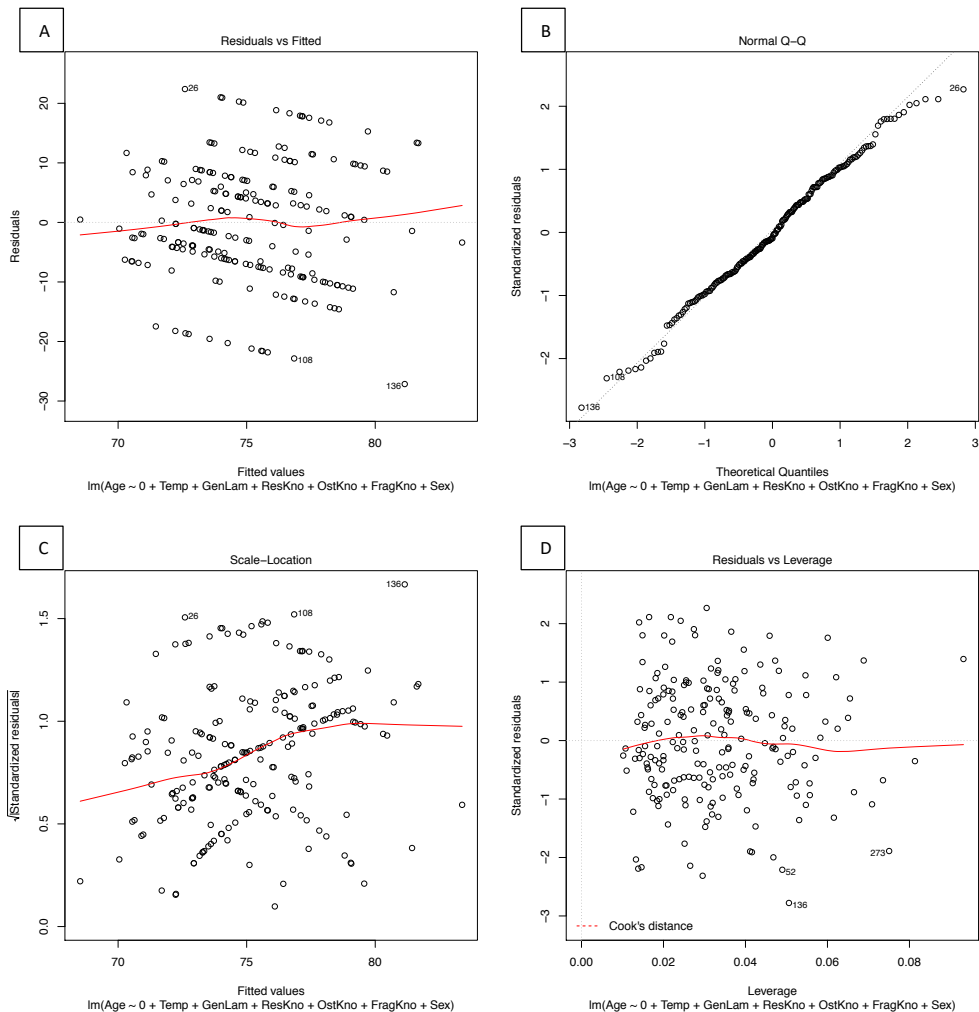


Abbildung 79: Plots zur Beurteilung der Güte der Regression; A: Residuen gegen die vom Modell vorhergesagten Werte (fitted values), B: QQ-Plot: Quartile der standardisierten Residuen (standardized residuals) gegen die Quartile der Normalverteilung (theoretical quantiles), C: Scale-Location-Plot zur Analyse, ob die Standardabweichung der Residuen über den Bereich der erklärten Variablen gleich bleibt, D: Cook's Distance Plot zur Herausarbeitung einflussnehmender Datenpunkte (Wert >1 sind stark einflussnehmend);

Der Residuals vs. Fitted- Plot (Abbildung 79A) weist kein Muster auf, die Datenpunkte sind symmetrisch um die Nulllinie verteilt. Im Q-Q-Plot (Abbildung 79B) ist erkennbar, dass die Daten nahezu komplett normalverteilt sind, in den höheren und niedrigeren Quartilen jedoch leichte Abweichungen von der Normalverteilung bestehen. Der Scale-Location-Plot (Abbildung 79C) zeigt zunächst einen leicht ansteigenden, dann einen stärker ansteigenden Verlauf und ist zuletzt horizontal. Die Werte scheinen weitgehend gleichmäßig verteilt zu sein. Im Residuals vs. Leverage-Plot (Abbildung 79D) ist kein deutlicher Ausreißer aus den Daten auszumachen, keiner der Datenpunkte besitzt nach der Cook's Distance einen gravierenden Einfluss auf die Regression. Trotz eines hohen RSEs passt das Modell gut zum Datensatz.

Modelltest 1:

Im Rahmen der Modelltests wurde, mithilfe eines in R geschriebenen Skripts, zufällig 1/3 der Daten aus dem Gesamtdatensatz ausgewählt, um damit einen „*Testdatensatz*“ zu bilden. Die übrigen 2/3 des Datensatzes wurden als „*Trainingsdatensatz*“ verwendet, anhand dessen das lineare Modell 1 getestet werden sollte. Dafür wurde bei jedem Modelltest, das zuvor erstellte Regressionsmodell erneut, mithilfe des *Trainingsdatensatzes*, mit denselben histomorphometrischen Parametern erstellt. Dies erfolgte durch eine Schleife insgesamt 100-mal – mithilfe des Trainingsdatensatzes wurden 100 verschiedene Datensätze und demzufolge auch lineare Modelle und Regressionsgleichungen erstellt. Die dabei entstandene Regressionsgleichung wurden dann ebenso oft (100-mal) auf den *Testdatensatz* angewendet, um das histologische Alter der Individuen zu berechnen. Anschließend wurden die Differenzen zwischen tatsächlichem und errechnetem Individualalter berechnet und graphisch dargestellt.

In Abbildung 80 wurden die im Modelltest zu *Modell 1* generierten Formeln auf den *Testdatensatz* angewendet und die Differenz zwischen tatsächlichem und mittels der Regressionsgleichung errechnetem Sterbealter für jedes Individuum des *Trainingsdatensatzes* (über alle Positionen und Temperaturstufen gemittelt) aufgetragen.

Es ergibt sich für Individuen WF4, WF38 und WF37 eine maximale Abweichung von über 40 Jahren. Die Abweichung der übrigen Individuen bewegt sich zwischen 5 bis 10 Jahren, betrachtet man den Median. Für die Individuen WF4, WF38 und WF37 liegt der Median der Abweichungen dagegen bei 18-25 Jahren. Gemessen an der Standardabweichung der Formel aus Modell 1 von $\pm 9,18$ Jahren (RSE) fallen letztlich nur fünf Individuen auch im Median aus den Grenzen der Standardabweichung.

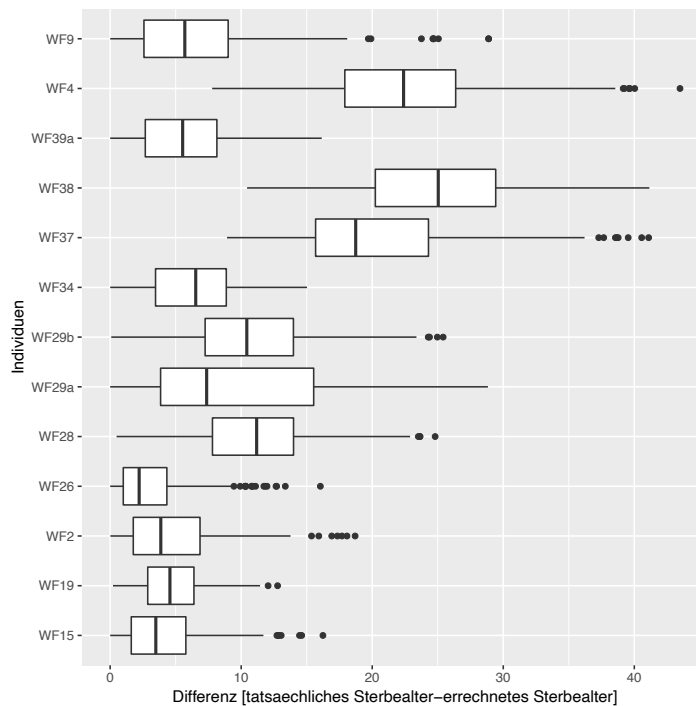


Abbildung 80: Graphische Darstellung der histologisch geschätzten Alterswerte mithilfe der in Modell 1 erstellten Regressionsgleichung, X-Achse: Differenz zwischen tatsächlichem Sterbealter und errechnetem Sterbealter, Y-Achse: Individuen;

Modelltest 2:

In Abbildung 81 ist gezeigt, wie sich die in Modell 2 bzw. am Testdatensatz (1/3 des Gesamtdatensatzes) erstellte Regressionsgleichung an einem Trainingsdatensatz (2/3 des Gesamtdatensatzes) verhält (vgl. Modelltest 1). Die maximale Abweichung liegt, gemessen am Median für die jeweiligen Individuen, zwischen ca. drei und ca. 17 Jahren, die Individuen WF37 und WF38 zeigen allerdings eine maximale Abweichung von knapp bis zu 40 Jahren. Durch die Standardabweichung der Formel von $\pm 7,61$ (RSE) Jahren fallen nur Individuum WF4 und WF38 im Median nicht in diesen Bereich.

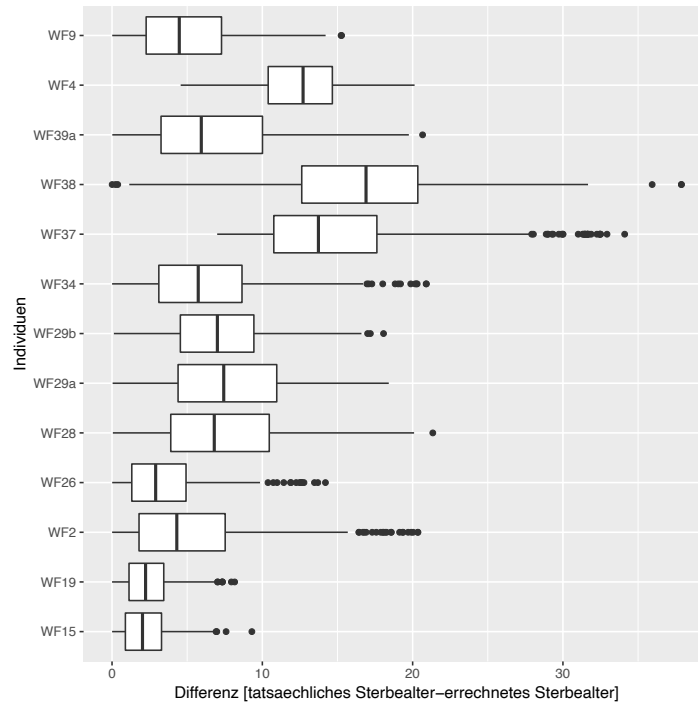


Abbildung 81: Graphische Darstellung der histologisch geschätzten Alterswerte mithilfe der in Modell 2 erstellten Regressionsgleichung, X-Achse: Differenz zwischen tatsächlichem Sterbealter und errechnetem Sterbealter, Y-Achse: Individuen;

Modelltest 3:

Der Modelltest anhand des Testdatensatzes aus dem Gesamtdatensatz zeigt für die meisten Individuen eine Abweichung mit einem Median von unter bzw. bis zu 10 Jahren, mit einer maximalen Abweichung von knapp 25 Jahren (WF28). Nur Individuum WF38 zeigt eine Abweichung von bis zu 70 Jahren, mit einem Median von über 10 Jahren (Abbildung 82). Ohne die Individuen WF38, WF28 und WF4 wäre die Differenz zwischen tatsächlichem und errechnetem Sterbealter nur sehr gering. Gemessen an der Standardabweichung (RSE) von $\pm 3,407$ Jahren.

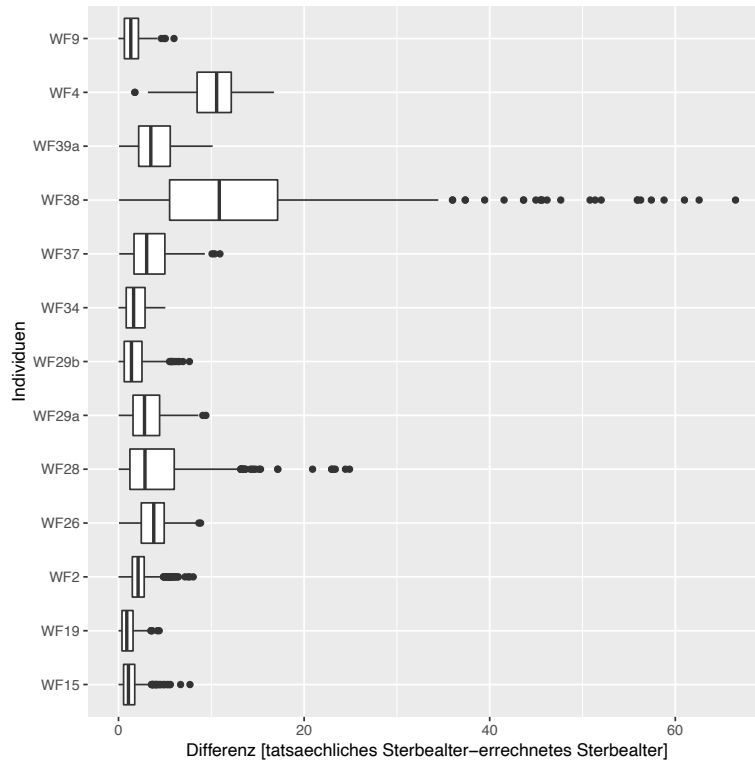


Abbildung 82: Graphische Darstellung der histologisch geschätzten Alterswerte mithilfe der in Modell 3 erstellten Regressionsgleichung, X-Achse: Differenz zwischen tatsächlichem Sterbealter und errechnetem Sterbealter, Y-Achse: Individuen;

Modelltest 4:

Der Modelltest zu Modell 4 (Abbildung 83) anhand des Testdatensatzes aus dem Gesamtdatensatz zeigt eine maximale Abweichung von knapp 35-40 Jahren für die Individuen WF4 und WF38. Die anderen Individuen schwanken in ihrer Abweichung im Median zwischen 5 bis knapp 20 Jahren, mit einer maximalen Abweichung von knapp 30 Jahren. Durch die Standardabweichung (RSE) von $\pm 10,03$ Jahren passen nur WF4 und WF38 im Median nicht in das Modell.

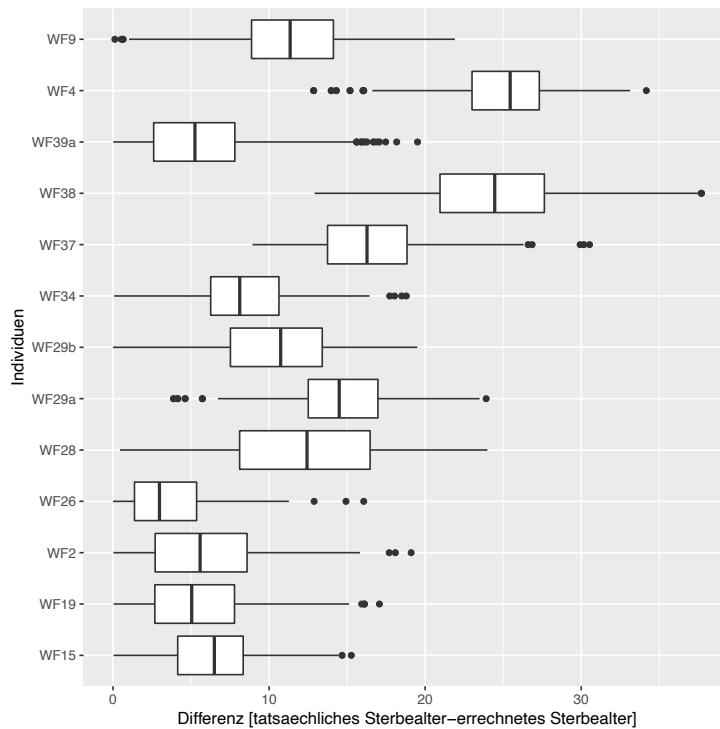


Abbildung 83: Graphische Darstellung der histologisch geschätzten Alterswerte mithilfe der in Modell 4 erstellten Regressionsgleichung, X-Achse: Differenz zwischen tatsächlichem Sterbealter und errechnetem Sterbealter, Y-Achse: Individuen;

ANOVA

Eine ANOVA (Analysis of Variance) unter Einbeziehung aller vier multivariaten linearen Regressionsmodelle hat ergeben, dass Modell 4 am besten zu den Daten passt ($p < 2,2e-16 = ***$). Die Analysis of Variance bezieht sich auf das Verhältnis der Variation zwischen den Gruppen zu der Variation innerhalb der Gruppen, wobei die „gruppeninterne“ Variation die Abweichung der Einzeldaten vom Gruppen-Mittelwert misst.

Positionstests:

Durch die Erstellung von linearen Modellen für jede einzelne Position am Gesamtdatensatz wurde versucht herauszufinden, ob bestimmte Positionen entlang der anterioren Femurdiaphyse bestehen, welche einen starken Einfluss auf das Ergebnis einer histologischen Altersbestimmung tragen. Dabei wurde in jedem Modell abwechselnd eine der elf Positionen nicht miteinbezogen. Dies wurde durchgeführt, um zu sehen, ob eine der elf Positionen entlang des Femurschaftes nach der KQ-Methode einen stärkeren Einfluss auf die Regressionsmodelle nimmt als die anderen Positionen. Dabei

zeigte sich, dass keine Position als stark abweichend oder einflussnehmend herausgearbeitet werden konnte.

3.5.4.2) Mittige Auswertung

Zur Erstellung linearer Modelle für den mittigen Bereich der Femurkompakta wurden ebenfalls Mittelwerte aus den drei Einzelzählungen pro Individuum und Position bzw. Temperatur gebildet, da sich für den Gesamtdatensatz bzw. den Ausreißer-bereinigten Gesamtdatensatz keine Modelle herausarbeiten ließen, welche den Datensatz hinreichend repräsentieren und beschreiben konnten. Vor der Erstellung der linearen Regressionsmodelle wurde auch dieser Datensatz zuerst mittels des R-Packages MVO outlier von Ausreißern bereinigt (Tabelle 39 im Anhang). Darüber hinaus wurden ebenfalls die Individuen WF45, WF38 und WF5 aus dem Testdatensatz entfernt, da durch diese Individuen die Regressionstests maßgeblich beeinflusst wurden. Mittels des restlichen Datensatzes (Tabelle 6 im Anhang auf CD) konnten auch in diesem Fall vier Regressionsmodelle zur histologischen Individualaltersschätzung verbrannter Proben erstellt werden.

1.) Lineares Modell

Tabelle 16 beschreibt die verwendeten Parameter der vier linearen Modelle.

Tabelle 16: Parameter für die linearen Modelle 1, 2, 3 und 4 in der Mitte der Kompakta;

<i>Modell 1</i>	$\text{lm}(\text{formula}=\text{Alter}\sim 0+\text{Temp}+\text{SekOst}+\text{TypIIost}+\text{OstFrag}+\text{ResLak}+\text{Havers}+\text{NonHavers}+\text{VolkM}+\text{ResKno}+\text{GenLam}+\text{OstKno}+\text{FragKno}, \text{Daten}=\text{GesTab} - \text{Femur mittig})$
<i>Modell 2</i>	$\text{lm}(\text{formula}=\text{Alter}\sim 0+\text{Temp}+\text{OPD}+\text{AktFr}+\text{BFR}+\text{AOC}+\text{Geschlecht}, \text{Daten}=\text{GesTab} - \text{Femur mittig})$
<i>Modell 3</i>	$\text{lm}(\text{formula}=\text{Alter}\sim 0+\text{ResLak}+\text{ResKno}+\text{ResLakFl}+\text{FragKno}+\text{GenLam}+\text{OstD}+\text{OstFl}+\text{OstU}+\text{AktFr}+\text{BFR}, \text{Daten}=\text{GesTab} - \text{Femur mittig})$
<i>Modell 4</i>	$\text{lm}(\text{formula}=\text{Alter}\sim 0+\text{Temp}+\text{GenLam}+\text{ResKno}+\text{OstKno}+\text{FragKno}+\text{Geschlecht}, \text{Daten}=\text{GesTab} - \text{Femur mittig})$

In **Modell 1** wurden alle gezählten histomorphometrischen Parameter in das Modell einbezogen.

In **Modell 2** wurden die Metabolismus-abhängigen Parameter und dem Geschlecht einbezogen.

Modell 3 basiert auf den Parametern der Osteon- und Resorptionslakunengeometrie, sowie Aktivierungsfrequenz und BFR.

Modell 4 beinhaltet die prozentualen Parameter der Knochenmikrostruktur und das Geschlecht.

Alle Modelle haben die Temperatur miteinbezogen und wurden durch den Nullpunkt des Koordinatensystems gelegt.

2.) Residuen

Tabelle 17: Übersicht (Ausdehnung, Symmetrie und Quartile) über die Verteilung der Residuen mit Minimum, Maximum, 25% und 75% Quartile und Median;

Modell	Min	1Q	Median	3Q	Max
<i>Modell 1</i>	-43,892	-7,125	0,505	7,740	33,900
<i>Modell 2</i>	-19,657	-5,927	-1,891	5,148	22,307
<i>Modell 3</i>	-54,734	-6,315	-0,547	9,352	27,321
<i>Modell 4</i>	-26,360	-6,485	-1,504	5,406	24,022

Tabelle 17 zeigt eine Übersicht über die Verteilung der Residuen.

In **Modell 1** liegt die minimale (negative) Abweichung bei -43,9 und die maximale (positive Abweichung) bei 33,9. Die Verteilung im ersten und dritten Quartil ist symmetrisch (1Q=-7,1 und 3Q=7,7) und der Median liegt nahe um den Nullpunkt (0,5). Für **Modell 2** findet sich die minimale (negative) Abweichung bei -19,7 und die maximale (positive Abweichung) bei 22,3. Die Verteilung im ersten und dritten Quartil ist nicht symmetrisch (1Q=-6,3 und 3Q=9,3), der Median liegt relativ nahe um den Nullpunkt (-0,5). Die minimale (negative) Abweichung von **Modell 3** liegt bei -26,3 und die maximale (positive Abweichung) bei 24. Die Verteilung im ersten und dritten Quartil ist nahezu symmetrisch (1Q=-6,4 und 3Q=5,4), der Median liegt nur relativ nahe um den Nullpunkt (-1,5).

Die Verteilung im ersten und dritten Quartil ist symmetrisch (1Q=-5,9 und 3Q=5,1) und der Median liegt relativ nahe um den Nullpunkt (-1,9). Die minimale (negative) Abweichung in **Modell 4** findet sich bei -54,7 und die maximale (positive Abweichung) bei 27,3 Jahren.

3.) Koeffizienten

Tabelle 18 zeigt die mithilfe der KQ-Methode geschätzten Koeffizienten der Parameter, deren Standardfehler, die Teststatistik und den zugehörigen p-Wert.

*Tabelle 18: Geschätzte Koeffizienten (mithilfe der KQ-Methode) der Parameter, deren zugehöriger Standardfehler, Teststatistik (Schätzung/Standardfehler mit $H_0: \beta_i=0$, vs. $H_1: \beta_i \neq 0$ – welche besagt dass der jeweilige Parameter einen bzw. keinen Einfluss hat) und der zur Teststatistik gehörende p-Wert samt dessen Signifikanz; Signifikanzkodierung des p-Wertes: *** = 0,001, ** = 0,01, * = 0,05;*

Modell	Parameter	Schätzung	Standardfehler	t-Wert	Pr(> t)	Signifikanz
Modell 1	Temperatur	-1,440e-02	4,236e-03	-3,398	0,000835	***
	Sekundäre Osteone	2,032e+02	2,169e+02	0,937	0,350088	
	Typ-II-Osteone	2,029e+02	2,167e+02	0,936	0,350473	
	Osteonfragmente	3,256e+00	6,563e-01	4,960	1,62e-06	***
	Resorptionslakunen	-4,155e+00	2,598e+00	-1,599	0,111547	
	Havers'sche Kanäle	-2,020e+02	2,170e+02	-0,931	0,352974	
	Nicht-Havers'sche Kanäle	1,916e+00	1,890e+00	1,014	0,311876	
	Volkman'sche Kanäle	-2,987e-01	1,682e+00	-0,178	0,859279	
	Resorbierter Knochen [%]	1,520e+00	3,840e-01	3,958	0,000109	***
	Generallamellen [%]	6,187e-01	1,769e-01	3,498	0,000591	***
	Osteonaler Knochen [%]	4,051e-01	1,170e-01	3,464	0,000666	***
	fragmentaler Knochen [%]	-1,049e+00	3,219e-01	-3,258	0,001339	**
Modell 2	Temperatur	-0,004061	0,002622	-1,549	0,12317	
	OPD	0,124220	0,605353	0,205	0,83764	
	Aktivierungsfrequenz	-4,448398	3,124073	-1,424	0,15616	
	BFR	-1,718328	0,606727	-2,832	0,00514	**
	AOC	0,127273	0,266116	0,478	0,63303	
	M	73,726155	7,913203	9,317	< 2e-16	***
	W	72,397536	8,238125	8,788	1,03e-15	***

Modell	Parameter	Schätzung	Standardfehler	t-Wert	Pr(> t)	Signifikanz
<i>Modell 3</i>	Resorptionslakunen	1,3015	2,1995	0,592	0,554779	
	resorbierter Knochen [%]	-0,3637	0,3897	-0,933	0,351845	
	Resorptionslakunenfläche	47,8796	53,0445	0,903	0,367915	
	fragmentaler Knochen [%]	0,6155	0,1678	3,669	0,000319	***
	Generallamellen [%]	0,6905	0,1449	4,766	3,84e-06	***
	Osteondurchmesser	103,5237	250,6427	0,413	0,680069	
	Osteonfläche	-1072,6022	188,4584	-5,691	4,96e-08	***
	Osteonumfang	111,1408	81,9008	1,357	0,176456	
	Aktivierungsfrequenz	-3,8396	3,3514	-1,146	0,253435	
	BFR	-2,2718	0,6382	-3,560	0,000473	***
<i>Modell 4</i>	Temperatur	-6,635e-03	4,304e-03	-1,542	0,125	
	Generallamellen [%]	6,903e+01	2,071e+02	0,333	0,739	
	Resorbierter Knochen [%]	6,961e+01	2,071e+02	0,336	0,737	
	osteonaler Knochen [%]	6,941e+01	2,071e+02	0,335	0,738	
	Fragmentaler Knochen [%]	6,884e+01	2,070e+02	0,332	0,740	
	M	-6,856e+03	2,071e+04	-0,331	0,741	
	W	-6,853e+03	2,071e+04	-0,331	0,741	

Unter den für die Erstellung von **Modell 1** ausgewählten Parametern die Parameter „sekundäre Osteone“, „Typ-II-Osteone“, „Resorptionslakunen“, „Havers’sche Kanäle“, „nicht-Havers’sche Kanäle“ und „Volkman’sche Kanäle“ **keinen** signifikanten Einfluss und die Nullhypothese kann für diese Parameter verworfen werden (Temp=0,000835, OstFrag=1,62e-06, ResKno=0,000109, GenLam=0,000591, OstKno=0,00066, FragKno=0,001339).

Von den zur Erhebung des linearen **Modells 2** gewählten Parametern waren nur die Knochenbildungsrate (BFR, $p=0,00514$), sowie das männliche und weibliche Geschlecht ($M=<2e-16$, $W=1,03e-15$) von signifikantem Einfluss.

Die zur Erhebung des linearen **Modells 3** ausgewählten Parameter hatten der prozentuale Anteil fragmentalen (0,000319) und lamellären (3,84e-06) Knochens, die Osteonfläche (4,96e-08) und die Knochenbildungsrate (0,000473) einen signifikanten Einfluss.

Unter den für die Erstellung des linearen **Modells 4** ausgewählten Parametern hatte kein Parameter einen signifikanten Einfluss zur Beschreibung des Datensatzes.

4.) Statistik

In Tabelle 19 ist die zu den jeweiligen linearen Modellen gehörige Statistik aufgezeigt.

Tabelle 19: Statistische Auswertung zu Modell 1, 2, 3 und 4 samt Residuenstandardfehler (RSE), R², korrigiertes R², F-Statistik und zugehörigem p-Wert; DF=Freiheitsgrade;

Modell	Residuenstandardfehler (RSE)	R ²	Korrigiertes R ²	F-Statistik	p-Wert
Modell 1	13,42 bei 180 DF	0,9685	0,9664	461,1 bei 12 und 180 DF	< 2,2e-16
Modell 2	9,729 bei 185 DF	0,983	0,9823	1526 bei 7 und 185 DF	< 2,2e-16
Modell 3	10,19 bei 182 DF	0,9816	0,9806	972,1 bei 10 und 182 DF	< 2,2e-16
Modell 4	15,58 bei 185 DF	0,9564	0,9547	579,3 bei 7 und 185 DF	< 2,2e-16

Der (gemessen am Umfang des Datensatzes) relativ kleine F-Wert von **Modell 1** zeigt, dass trotz signifikantem p-Wert das Modell keine gute Beschreibung der Daten zu liefern scheint.

Der hohe F-Wert und der kleine p-Wert von **Modell 2** zeigen, dass das Modell eine gute Beschreibung des Datensatzes darstellt. Der höhere F-Wert von **Modell 3** (im Vergleich zu **Modell 4**) zeigt, dass es sich bei diesem Modell um eine relativ gute Beschreibung der Daten handelt.

Der relativ kleine F-Wert von **Modell 4** sagt aus, dass es sich bei dem Modell um eine schlechtere Beschreibung des Datensatzes handelt.

5.) Regressionsgleichung

In Tabelle 20 sind die durch die linearen Modelle 1, 2, 3 und 4 generierten Regressionsgleichungen aufgezeigt.

Tabelle 20: Regressionsgleichungen zu den Modellen 1,2,3 und 4;

Modell 1	$Y = -1,440e-02 \cdot [\text{Temperatur}] + 2,032e+02 \cdot [\text{Sekundäre Osteone}] + 2,029e+02 \cdot [\text{Typ-II-Osteone}] + 3,256e+00 \cdot [\text{Osteonfragmente}] - 4,155e+00 \cdot [\text{Resorptionslakunen}] - 2,020e+02 \cdot [\text{Havers'sche Kanäle}] + 1,916e+00 \cdot [\text{Nicht-Havers'sche Kanäle}] - 2,987e-01 \cdot [\text{Volkmann'sche Kanäle}] + 1,520e+00 \cdot [\text{resorbierter Knochen}] + 6,187e-01 \cdot [\text{Generallamellen}] + 4,051e-01 \cdot [\text{osteonaler Knochen}] - 1,049e+00 \cdot [\text{fragmentaler Knochen}]$
Modell 2	$Y = -0,004061 \cdot [\text{Temperatur}] + 0,124220 \cdot [\text{OPD}] + 4,448398 \cdot [\text{Aktivierungsfrequenz}] - 1,718328 \cdot [\text{BFR}] + 0,127273 \cdot [\text{AOC}] + 73,726155 \cdot [\text{Männlich}] + 72,397536 \cdot [\text{Weiblich}]$
Modell 4	$Y = 1,3015 \cdot [\text{Resorptionslakunen}] - 0,3637 \cdot [\text{resorbierter Knochen}] + 47,8796 \cdot [\text{Resorptionslakunenfläche}] + 0,6155 \cdot [\text{fragmentaler Knochen}] + 0,6905 \cdot [\text{Generallamellen}] + 103,5237 \cdot [\text{Osteondurchmesser}] - 1072,6022 \cdot [\text{Osteonfläche}] + 111,1408 \cdot [\text{Osteonumfang}] - 3,8396 \cdot [\text{Aktivierungsfrequenz}] - 2,2718 \cdot [\text{BFR}]$
Modell 3	$Y = -6,635e-03 \cdot [\text{Temperatur}] + 6,903e+01 \cdot [\text{Generallamellen}] + 6,961e+01 \cdot [\text{resorbierter Knochen}] + 6,941e+01 \cdot [\text{osteonaler Knochen}] + 6,884e+01 \cdot [\text{fragmentaler Knochen}] - 6,856e+03 \cdot [\text{Männlich}] - 8,853e+03 \cdot [\text{Weiblich}]$

6.) Plots zur Beurteilung der Güte der linearen Modelle

Modell 1:

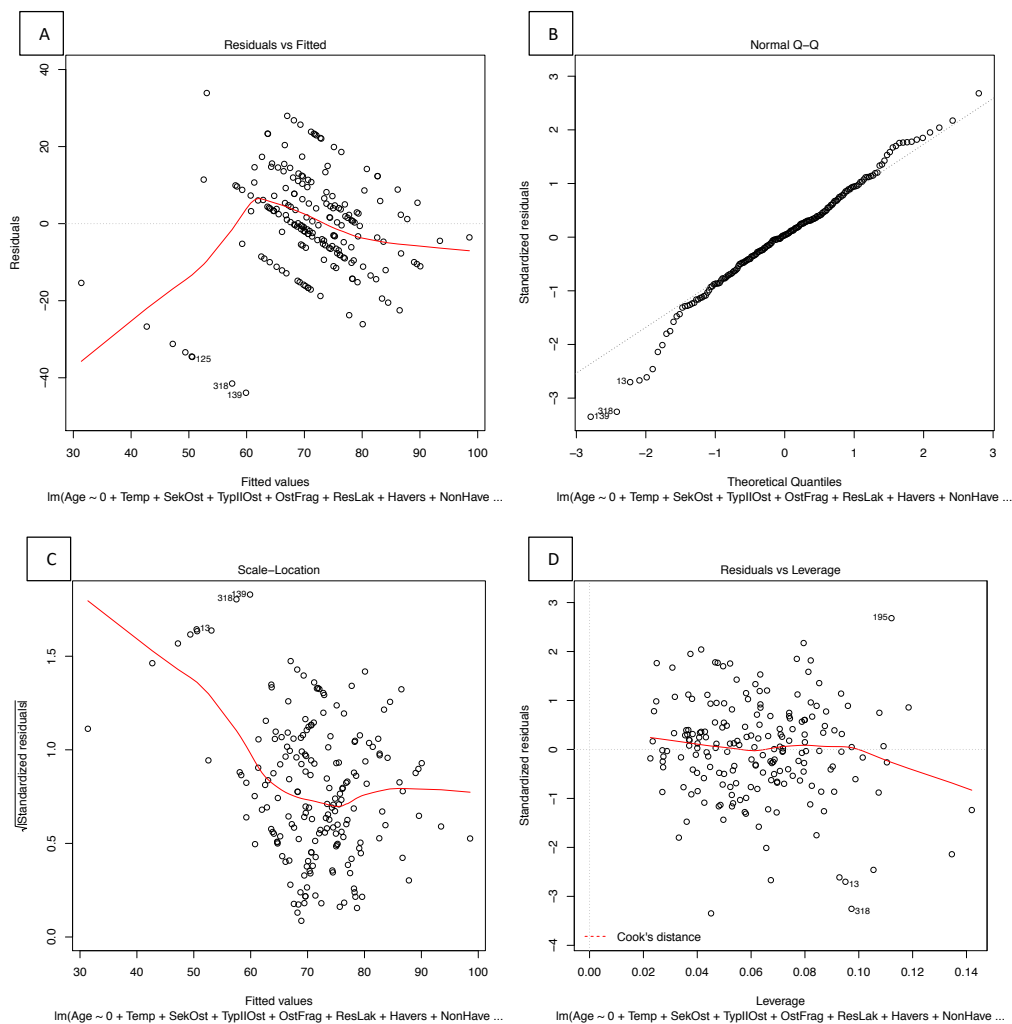


Abbildung 84: Plots zur Beurteilung der Güte der Regression; A: Residuen gegen die vom Modell vorhergesagten Werte (fitted values), B: QQ-Plot: Quartile der standardisierten Residuen (standardized residuals) gegen die Quartile der Normalverteilung (theoretical quantiles), C: Scale-Location-Plot zur Analyse, ob die Standardabweichung der Residuen über den Bereich der erklärten Variablen gleich bleibt, D: Cook's Distance Plot zur Herausarbeitung einflussnehmender Datenpunkte (Wert >1 sind stark einflussnehmend);

Der Residuals vs. Fitted-Plot (Abbildung 84A) zeigt, dass die Zeilen 125, 318 und 139 Ausreißer im Gesamtdatensatz zu sein scheinen, wobei die Regressionslinie nicht horizontal verläuft. Der restliche Datensatz scheint symmetrisch an der Nulllinie verteilt zu sein und zeigt kein deutliches Muster auf. Der Q-Q-Plot (Abbildung 84B) zeigt, dass die Daten in den unteren Quartilen negativ von der Normalverteilung abweichen (niedriger sind), in den höheren Quartilen ist nur eine leichte Abweichung erkennbar. Ansonsten sind die Daten normalverteilt. Im Scale-Location-Plot (Abbildung 84C) zeigt sich, dass zuerst ein Abfall der Linie, beeinflusst durch die Lage der einflussreichen Datenzeilen 13, 318 und 139, erkennbar ist, danach zeigt sich eine gleichmäßige Verteilung und die Linie verläuft annähernd horizontal. Der Residuals vs. Leverage-Plot (Abbildung 84D) zeigt für drei Datenpunkte (Zeile 195, 13 und 318) eine Abweichung vom Gesamtdatensatz, allerdings weisen sie nach Cook's Distance keinen gravierenden Einfluss auf die Regression auf.

Modell 2:

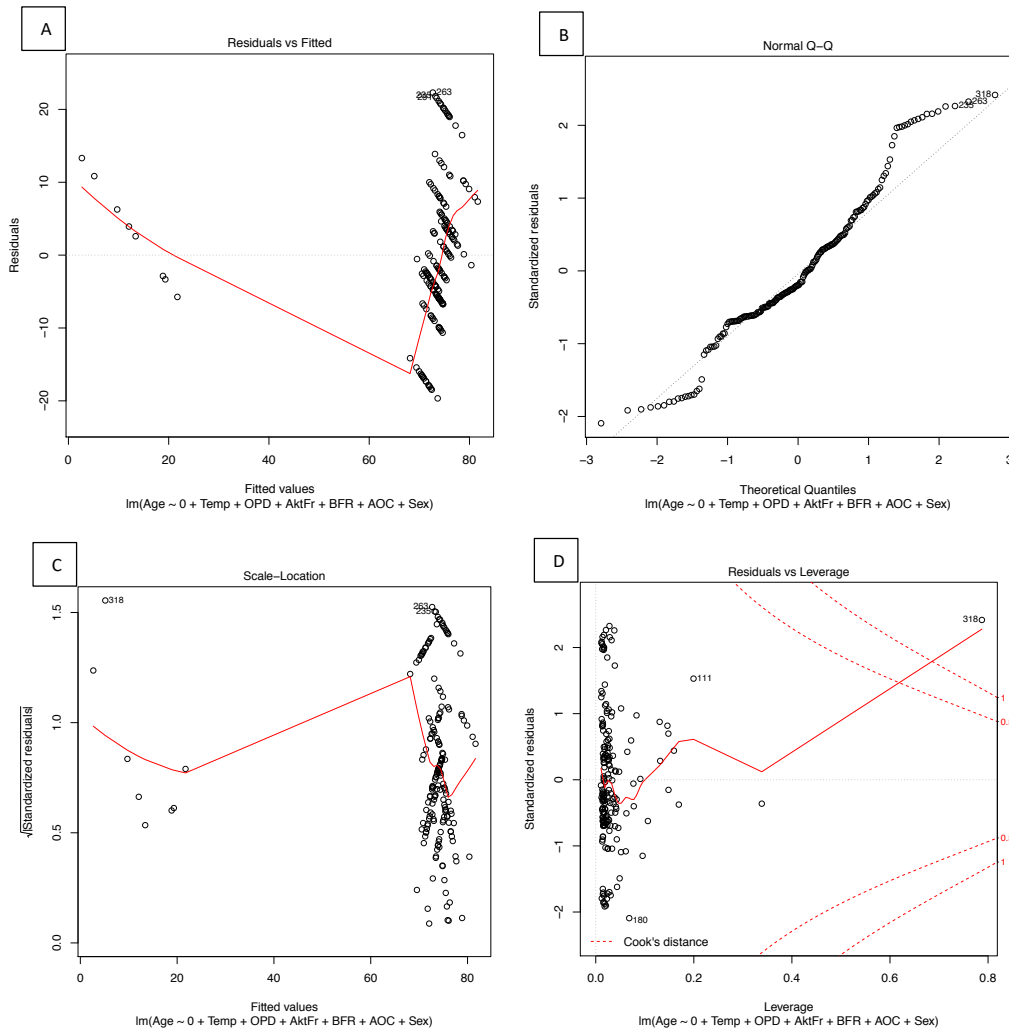


Abbildung 85: Plots zur Beurteilung der Güte der Regression; A: Residuen gegen die vom Modell vorhergesagten Werte (fitted values), B: QQ-Plot: Quantile der standardisierten Residuen (standardized residuals) gegen die Quantile der Normalverteilung (theoretical quantiles), C: Scale-Location-Plot zur Analyse, ob die Standardabweichung der Residuen über den Bereich der erklärten Variablen gleich bleibt, D: Cook's Distance Plot zur Herausarbeitung einflussnehmender Datenpunkte (Wert >1 sind stark einflussnehmend);

Die Daten im Residuals vs. Fitted-Plot (Abbildung 85A) zeigen eine deutliche gesamte Verschiebung des Gesamtdatensatzes auf, wovon einige Datenpunkte deutlich abweichen. Der restliche Datensatz scheint um die Nulllinie symmetrisch verteilt zu sein. Im Q-Q-Plot (Abbildung 85B) ist deutlich erkennbar, dass in den höheren und niedrigeren Quartilen eine positive bzw. negative Abweichung von der Normalverteilung vorliegt. Auch im mittleren Datenbereich liegen Abweichungen zur Normalverteilung vor. Der Scale-Location-Plot (Abbildung 85C) zeigt keine horizontale Linie und die Daten sind ebenfalls verschoben, dort aber symmetrisch. Im Residuals vs. Leverage-Plot (Abbildung 85D) ist für einen Datenpunkt eine Abweichung von der Cook's Distance erkennbar (Zeile 318). Dieser Datenpunkt scheint einen großen Einfluss auf die Regression zu tragen. Entgegen des hohen Wertes der F-Statistik samt p-Wert scheint das Modell nicht gut zu den Daten zu passen. Einerseits, da sich im Residuals vs. Fitted- Plot kein „Fit“ auf die Daten ergeben hat und eine deutliche Verschiebung nach rechts aufweist. Andererseits durch die Abweichung von der Normalverteilung im Q-Q-Plot und die Verschiebung im Scale-Location-Plot.

Modell 3:

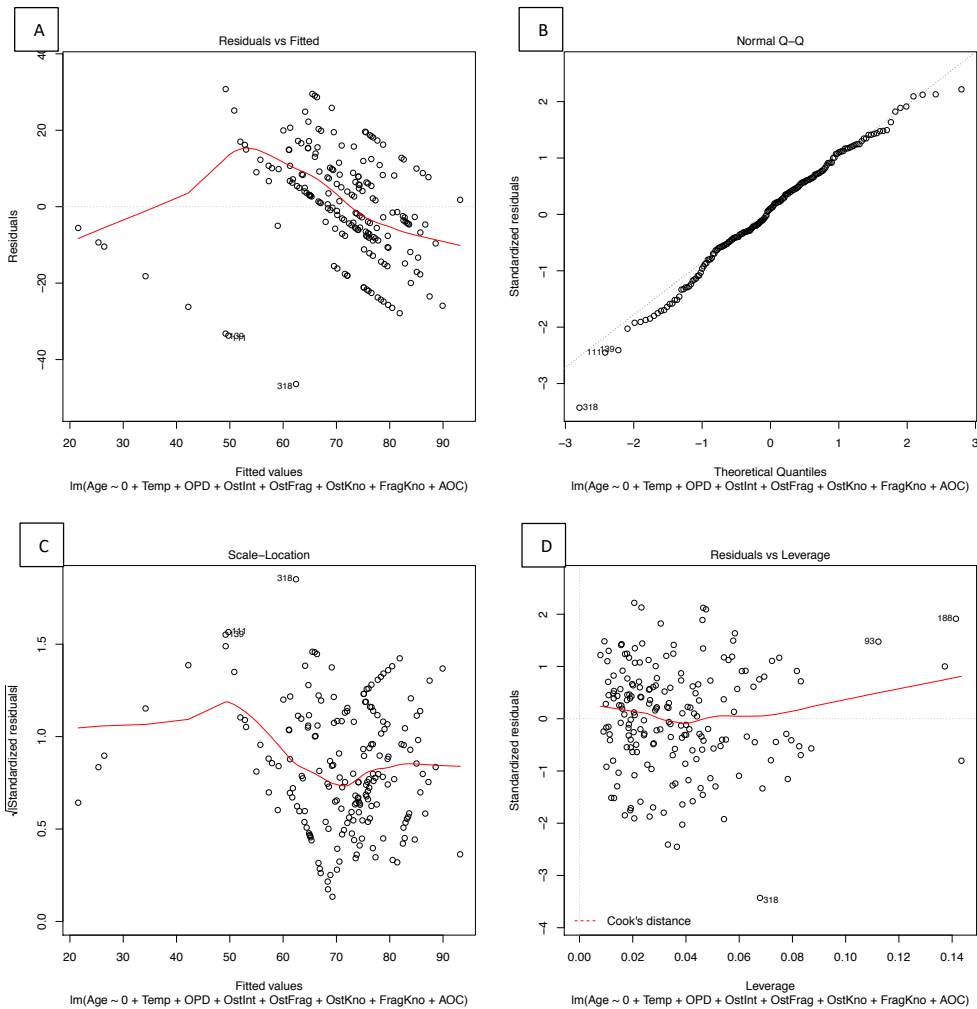


Abbildung 86: Plots zur Beurteilung der Güte der Regression; A: Residuen gegen die vom Modell vorhergesagten Werte (fitted values), B: QQ-Plot: Quartile der standardisierten Residuen (standardized residuals) gegen die Quartile der Normalverteilung (theoretical quantiles), C: Scale-Location-Plot zur Analyse, ob die Standardabweichung der Residuen über den Bereich der erklärten Variablen gleich bleibt, D: Cook's Distance Plot zur Herausarbeitung einflussnehmender Datenpunkte (Wert >1 sind stark einflussnehmend);

Im Residuals vs. Fitted-Plot (Abbildung 86A) sind zunächst abweichende Datenpunkte von der Gesamtverteilung, danach eine symmetrische Verteilung ohne Verteilungsmuster um die Nulllinie herum zu sehen. Der Q-Q-Plot (Abbildung 86B) zeigt weitgehend eine Normalverteilung auf, mit geringfügigen Abweichungen in den oberen und unteren Quartilen. Der Scale-Location-Plot (Abbildung 86C) zeigt anfangs eine nahezu horizontale Linie, die im mittleren Bereich leicht ansteigt, wieder abfällt und dort eine größere Verteilung aufweist und zum Schluss horizontal verläuft. Der Residuals vs. Leverage-Plot (Abbildung 86D) zeigt keine Datenpunkte außerhalb der Cook's Distance, jedoch scheinen die Zeilen 93, 188 und 318 einen größeren Einfluss auf den Datensatz zu haben.

Modell 4:

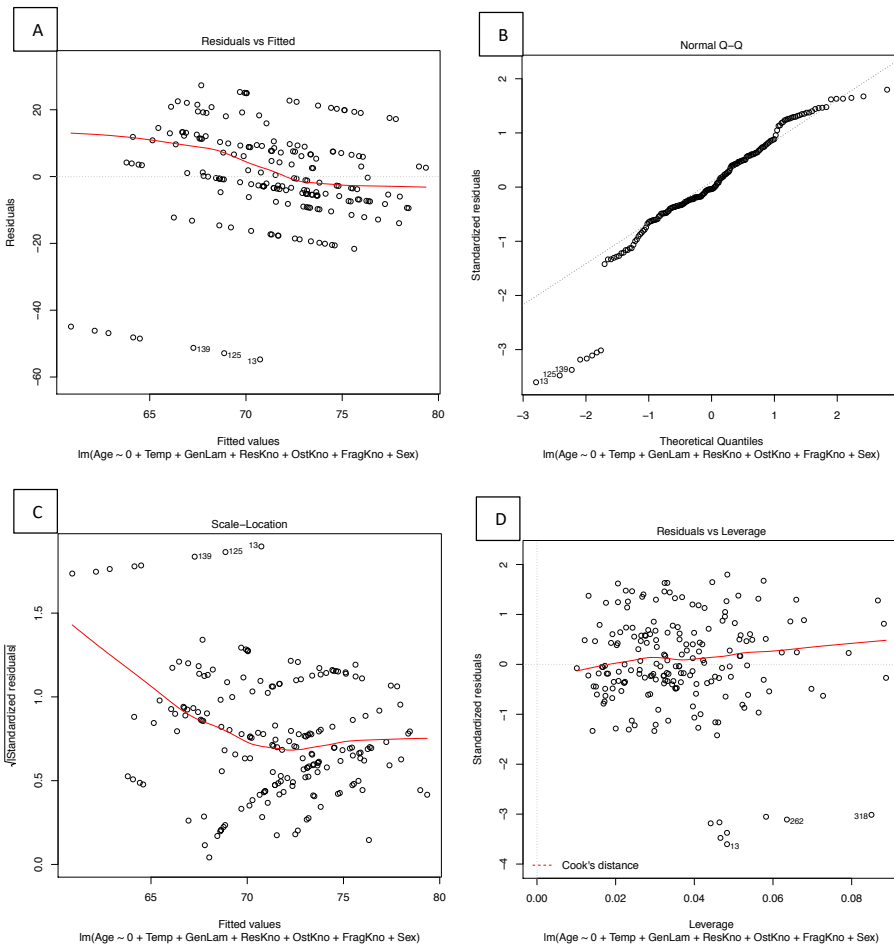


Abbildung 87: Plots zur Beurteilung der Güte der Regression; A: Residuen gegen die vom Modell vorhergesagten Werte (fitted values), B: QQ-Plot: Quartile der standardisierten Residuen (standardized residuals) gegen die Quartile der Normalverteilung (theoretical quantiles), C: Scale-Location-Plot zur Analyse, ob die Standardabweichung der Residuen über den Bereich der erklärten Variablen gleich bleibt, D: Cook's Distance Plot zur Herausarbeitung einflussnehmender Datenpunkte (Wert >1 sind stark einflussnehmend);

Im Residuals vs. Fitted-Plot (Abbildung 87A) ist eine symmetrische Verteilung der Daten, um die Nulllinie zu sehen, diese weist kein erkennbares Muster auf. Die Zeilen 139, 125 und 13 scheinen von dieser Verteilung abzuweichen. Der Q-Q-Plot (Abbildung 87B) zeigt in den niederen Quartilen eine negative Abweichung von der Normalverteilung, ansonsten scheinen die Daten normalverteilt zu sein. Der Scale-Location-Plot (Abbildung 87C) zeigt zuerst einen absteigenden, dann einen horizontalen Verlauf und eine symmetrische Verteilung. Der Residuals vs. Leverage-Plot (Abbildung 87D) zeigt, dass die Zeilen 13, 262 und 318 von der Verteilung der restlichen Datenpunkte abweicht, allerdings liegt kein Datenpunkt außerhalb der Cook's Distance und weist somit keinen gravierenden Einfluss auf die Regression auf. Entgegen F-Statistik und p-Wert scheint das Modell gut zu den Daten zu passen.

Modelltest 1:

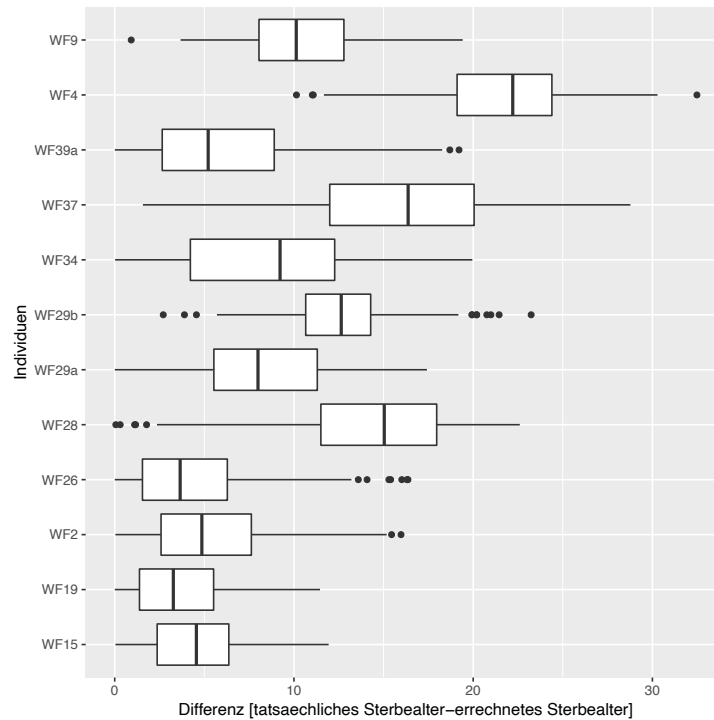


Abbildung 88: Graphische Darstellung der histologisch geschätzten Alterswerte mithilfe der in Modell 4 erstellten Regressionsgleichung, X-Achse: Differenz zwischen tatsächlichem Sterbealter und errechnetem Sterbealter, Y-Achse: Individuen;

Im Rahmen der Modelltests wurde, mithilfe eines in R geschriebenen Skripts, zufällig 1/3 der Daten aus dem Gesamtdatensatz ausgewählt, um damit einen „*Testdatensatz*“ zu bilden. Die übrigen 2/3 des Datensatzes wurden als „*Trainingsdatensatz*“ verwendet, anhand dessen das lineare Modell 1 getestet werden sollte. Dafür wurde bei jedem Modelltest, das zuvor erstellte Regressionsmodell erneut, mithilfe des *Trainingsdatensatzes*, mit denselben histomorphometrischen Parametern erstellt. Dies erfolgte durch eine Schleife insgesamt 100-mal – mithilfe des Trainingsdatensatzes wurden 100 verschiedene Datensätze und demzufolge auch lineare Modelle und Regressionsgleichungen erstellt. Die dabei entstandene Regressionsgleichung wurden dann ebenso oft (100-mal) auf den *Testdatensatz* angewendet, um das histologische Alter der Individuen zu berechnen. Anschließend wurden die Differenzen zwischen tatsächlichem und errechnetem Individualalter berechnet und graphisch dargestellt.

In Modelltest 1 (Abbildung 88) ist erkennbar, dass für die Individuen WF26, WF2, WF19 und WF15 die Abweichung über die Temperaturstufen und Positionen im Median bei ca. 5 Jahren liegt, für die anderen Individuen streut die Abweichung im Median stark und liegt im Median bei minimal 5 (WF39a) und maximal 22 (WF4) Jahren. Die maximale Abweichung beträgt 32 Jahre (WF4). Durch die Standardabweichung (RSE) von $\pm 13,42$ Jahren fällt keines der Individuen im Median aus dem Modell heraus.

Modelltest 2:

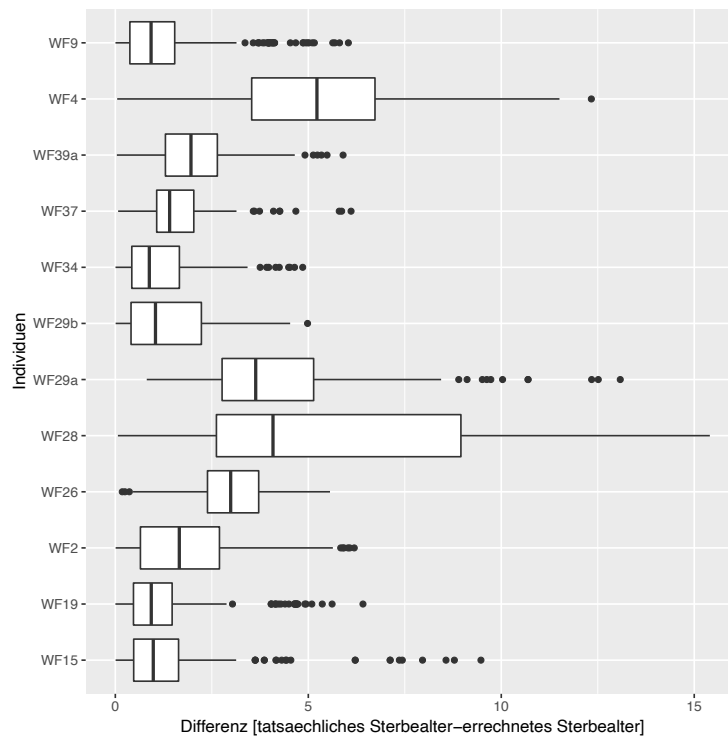


Abbildung 89: Graphische Darstellung der historisch geschätzten Alterswerte mithilfe der in Modell 4 erstellten Regressionsgleichung, X-Achse: Differenz zwischen tatsächlichem Sterbealter und errechnetem Sterbealter, Y-Achse: Individuen;

Der Modelltest zeigt für den Testdatensatz aus dem Gesamtdatensatz eine maximale Differenz zwischen tatsächlichem und errechnetem Sterbealter von nur 15 Jahren (Abbildung 89). Für die meisten Individuen liegt die Abweichung im Median bei unter 3 Jahren, die Individuen WF29a und WF28 zeigen eine mittlere Abweichung von ca. 4 Jahren. Nur Individuum WF4 zeigt eine mittlere Abweichung von 5 Jahren. WF28 zeigt die breiteste Verteilung der Differenzen an. Durch die Standardabweichung (RSE) von $\pm 9,729$ Jahren liegt der Median aller Individuen innerhalb der Standardabweichungsgrenzen.

Modelltest 3:

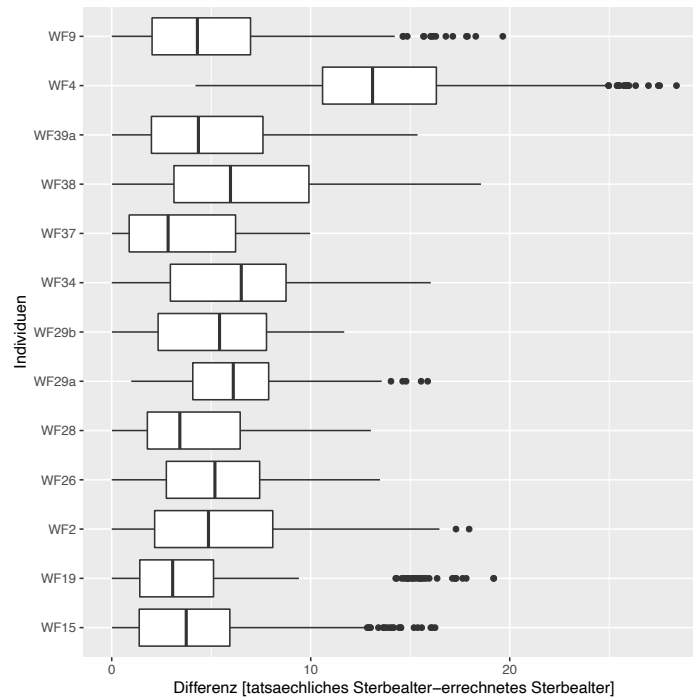


Abbildung 90: Graphische Darstellung der histologisch geschätzten Alterswerte mithilfe der in Modell 4 erstellten Regressionsgleichung, X-Achse: Differenz zwischen tatsächlichem Sterbealter und errechnetem Sterbealter, Y-Achse: Individuen;

Der Modelltest (Abbildung 90) zeigt eine maximale Differenz zwischen errechnetem und tatsächlichem Alter von über 30 Jahren. Die meisten Individuen zeigen im Median eine Abweichung von knapp 5 bis 7 Jahre im Median, nur für das Individuum WF4 liegt der Median mit ca. 12 Jahren höher. Die größte Spanne ist ebenfalls bei Individuum WF4 vorzufinden, mit einer maximalen Abweichung von knapp 30 Jahren. Durch die Standardabweichung von $\pm 10,19$ Jahren liegen alle Individuen im Median innerhalb der Standardabweichung.

Modelltest 4:

Im Modelltest (Abbildung 91) zeigt sich eine maximale Differenz zwischen tatsächlichem und errechnetem Alter unter Verwendung der Regression auf Modell 3 auf den zufälligen Testdatensatz aus dem Gesamtdatensatz von knapp 30 Jahren. Die Individuen WF26, WF2, WF19 und WF15 zeigen im Median eine Abweichung von knapp 5-7 Jahren, für die Individuen WF9, WF39a, WF37, WF34, WF29a, WF29a und WF28 liegt der Median zwischen 8 und 15 Jahren. Bei Individuum WF4 liegt der Median am höchsten mit knapp 23 Jahren. Dieses Individuum zeigt auch die höchste Differenz zum tatsächlichen Alter von knapp 30 Jahren. Durch die Standardabweichung (RSE) von $\pm 15,58$ Jahren liegen alle Individuen im Median innerhalb der Standardabweichung. Dadurch die Standardabweichungsgrenzen allerdings so breit gefasst, dass sie über die Grenzen einer Altersklasse (20 Jahre) hinausgehen.

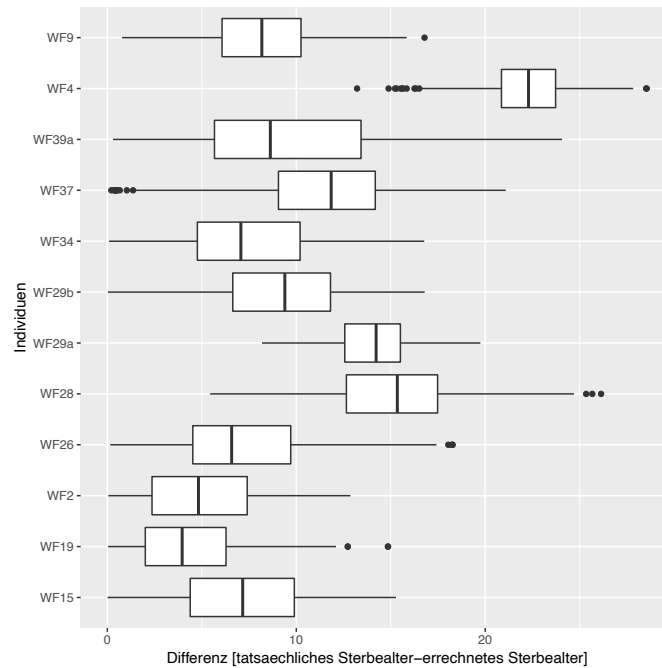


Abbildung 91: Graphische Darstellung der histologisch geschätzten Alterswerte mithilfe der in Modell 4 erstellten Regressionsgleichung, X-Achse: Differenz zwischen tatsächlichem Sterbealter und errechnetem Sterbealter, Y-Achse: Individuen;

ANOVA

Eine ANOVA (Analysis of Variance) unter Einbeziehung aller vier multivariaten linearen Regressionsmodelle hat ergeben, dass Regressionsmodell 3 am besten zu den Daten passt ($p < 2,2 \cdot 10^{-16}$ ***). Die Analysis of Variance bezieht sich auf das Verhältnis der Variation zwischen den Gruppen zu der Variation innerhalb der Gruppen, wobei die „gruppeninterne“ Variation die Abweichung der Einzeldaten vom Gruppen-Mittelwert misst.

Positionstests:

Durch den „Positionstest“ wurde getestet, ob Parameter existieren, welche das Ergebnis einer histologischen Altersschätzung maßgeblich beeinflussen könnten. Hierbei wurden lineare Modelle, basierend auf den elf Positionen entlang des Femurschaftes, als einzelne Parameter aufgestellt. Dabei wurde alternierend jeweils ein Parameter aus dem linearen Modell entfernt und im Vergleich mit dem linearen Modell betrachtet, welches alle Parameter beinhaltet. Dabei konnte für keine der Positionen ein signifikanter Einfluss festgestellt werden.

3.5.4.3) Test der Regressionsmodelle auf „echte Leichenbrände“ und Streufunde

Die erstellten Regressionsformeln zu den multiplen linearen Modellen des Femurs (mittig und periostal) wurden anhand des archäologischen Probenmaterials der Streufunde und „echten Leichenbrände“ getestet. In Tabelle 21 sind die Ergebnisse der histologischen Altersbestimmung mit Modell 1 und 4 für das Periost und Modell 1 und 3 für die Kompaktmitte dargelegt. Modell 2 und 3 am Periost und Modell 2 und 4 aus der Kompaktmitte konnten nicht getestet werden, da das Probenmaterial in zu schlechtem Zustand war, um alle dafür benötigten histomorphometrischen Parameter zu beurteilen bzw. zu berechnen. Es wird ersichtlich, dass sich die Ergebnisse der für das

Periost generierten Formeln in den Ergebnissen der histologischen Altersbestimmung häufig gleichen oder sehr ähnlich sind – ebenso wie die Ergebnisse der histologischen Altersbestimmungen mit den für die Kompaktmitte generierten Formeln. Dies gilt vorwiegend für die Ergebnisse der Streufundproben und für das Individuum Trudering 153. Bei den Ergebnissen der „echten Leichenbrände“ ist augenscheinlich, dass sich die Ergebnisse von Modell 1 *periostal* und Modell 1 *mittig* nahezu gleichen bzw. die Ergebnisse von Modell 4 *periostal* und Modell 3 *mittig*, da diese jeweils auf denselben histomorphometrischen Parametern beruhen.

Tabelle 21: Histologische Altersbestimmung der „echten Leichenbrände“ und „Streufundproben“ mit den Regressionsformeln aus Modell 1 und Modell 4 aus dem Periost, sowie Modell 1 und Modell 3 aus der Kompaktmitte im Vergleich zum morphologischen Alter;

Probe	Modell 1 <i>periostal</i> SEE±7,6 Jahre	Modell 4 <i>periostal</i> SEE±10,03 Jahre	Modell 1 <i>mittig</i> SEE±13,42 Jahre	Modell 4 <i>mittig</i> SEE±15,58 Jahre	<i>Morphologisches</i> Alter
Garching-Alz 9	90,9	73,1	94,7	71,4	Mind. Juvenil
Kleinaitingen 14	93,4	73,7	80,6	67,5	Mind. Adult
Kleinaitingen 40	88,7	80,9	91,9	61,1	Mind. Adult
Königsbrunn-Zeller	90,2	74,9	92,5	69,7	Mind. Juvenil
SF10	88,4	77,9	67,2	68,5	Unbestimmt
SF11	87,6	81,0	61,2	59,8	Unbestimmt
SF2	80,1	75,4	64,7	68,0	Unbestimmt
SF3	77,0	81,7	40,6	58,5	Unbestimmt
SF4	81,0	79,9	55,3	67,4	Unbestimmt
SF7	84,9	79,8	59,0	68,2	Unbestimmt
SF8	87,3	77,1	69,6	68,0	Unbestimmt
SF9	77,7	78,5	66,7	67,7	Unbestimmt
Trudering 153	89,6	84,4	62,8	57,5	Mind. Adult
SF6	NA	NA	53,2	60,1	Unbestimmt
Garching-Alz 15	NA	NA	84,7	62,1	21-24 Jahre

3.6) Tibia

Grundsätzlich kann die nachfolgende Auswertung der Tibiae nur als richtungsweisend für nachfolgende Studien angesehen werden, maßgeblich aufgrund des geringen Probenumfangs (n= 5 vgl. von RT und 1000 °C, n=5 Verbrennungsreihen).

Da sich wie im Falle der *Femora* bis zu einer Verbrennungstemperatur von 600 bzw. 700°C keine signifikanten Veränderungen feststellen lassen und diese überwiegend dem verbrennungsbedingten Verlauf der *Femora* entsprechen wird im Folgenden nur auf Unterschiede eingegangen.

3.6.1) Veränderung histomorphometrischer Parameter über die Verbrennungstemperaturen

Entsprechend der Auswertung für das *Femurprobenkollektiv* wurde auch bei dem Kollektiv der *Tibiae* die Veränderung der histomorphometrischen Parameter über die Verbrennungstemperaturen der Verbrennungsreihe (20-1000 °C) im Vergleich mit den unverbrannten Referenzen untersucht. Die ausgezählten Rohdaten des periostalen und mittigen Bereichs der Tibiakompakta sind in Tabelle 7 und 8 im Anhang auf CD zu finden. In den nachfolgenden Abbildungen sind die unverbrannten Referenzen in *schwarz*, die verbrannten Proben in *grau* dargestellt. In den Tabellen 40 bis 49 im Anhang sind die Daten zu den Parameterveränderungen dargestellt, mit Standardabweichung, Mittelwert, Minimum und Maximum.

Die verbrennungsbedingten Veränderungen von Osteonen (intakte, sekundäre und Typ-II-Osteone) und Osteonfragmenten sind in Abbildung 92A (Periost), 93A (Mitte) gezeigt.

Intakte sowie sekundäre Osteone zeigen zwar *periostal* und *mittig* einen verbrennungsbedingten Anstieg bei den verbrannten Proben und eine Abnahme bei den unverbrannten Referenzen, jedoch zeigt sich diese nicht so deutlich wie bei den *Femora*. Die Zunahme der Zahlen der Osteonfragmente über den unverbrannten und verbrannten Schaft hinweg von proximal nach distal ist für die *Tibiae* größeren Schwankungen unterworfen als bei den *Femora*. Die Resorptionslakunen (Abbildung 92B und 93B) zeigen nicht wie für die *Femora* eine verbrennungsbedingte Zunahme bis 800°C gefolgt von einem rapiden Absinken. In der *Tibia* lassen die Resorptionslakunen dagegen unverbrannt wie verbrannt einen Anstieg nach distal erkennen. Die nicht-Haver'schen Kanäle bei den *Tibiae* am *periostalen Rand* und in der *Kompaktmitte* sind im verbrannten und unverbrannten Zustand grundlegend starken Schwankungen unterworfen und die Anzahl scheint weniger stabil verteilt. Die Resorptionslakunenfläche (Abbildung 92C und 93C) zeigt bei den *Tibiae* wie bereits bei den *Femora* unverbrannt und verbrannt Schwankungen über den Schaft bzw. die Verbrennungstemperaturen auf. Osteondurchmesser und Osteonumfang zeigen eine deutliche verbrennungsbedingte Schrumpfung. Die Änderung Metabolismus-abhängiger Parameter ist in Abbildung 92D und 93B zu sehen. Auch bei diesen Parametern verhalten sich im Wesentlichen für die *Tibiae* die verbrennungsbedingten Änderungen gleichsam denen der *Femora*.

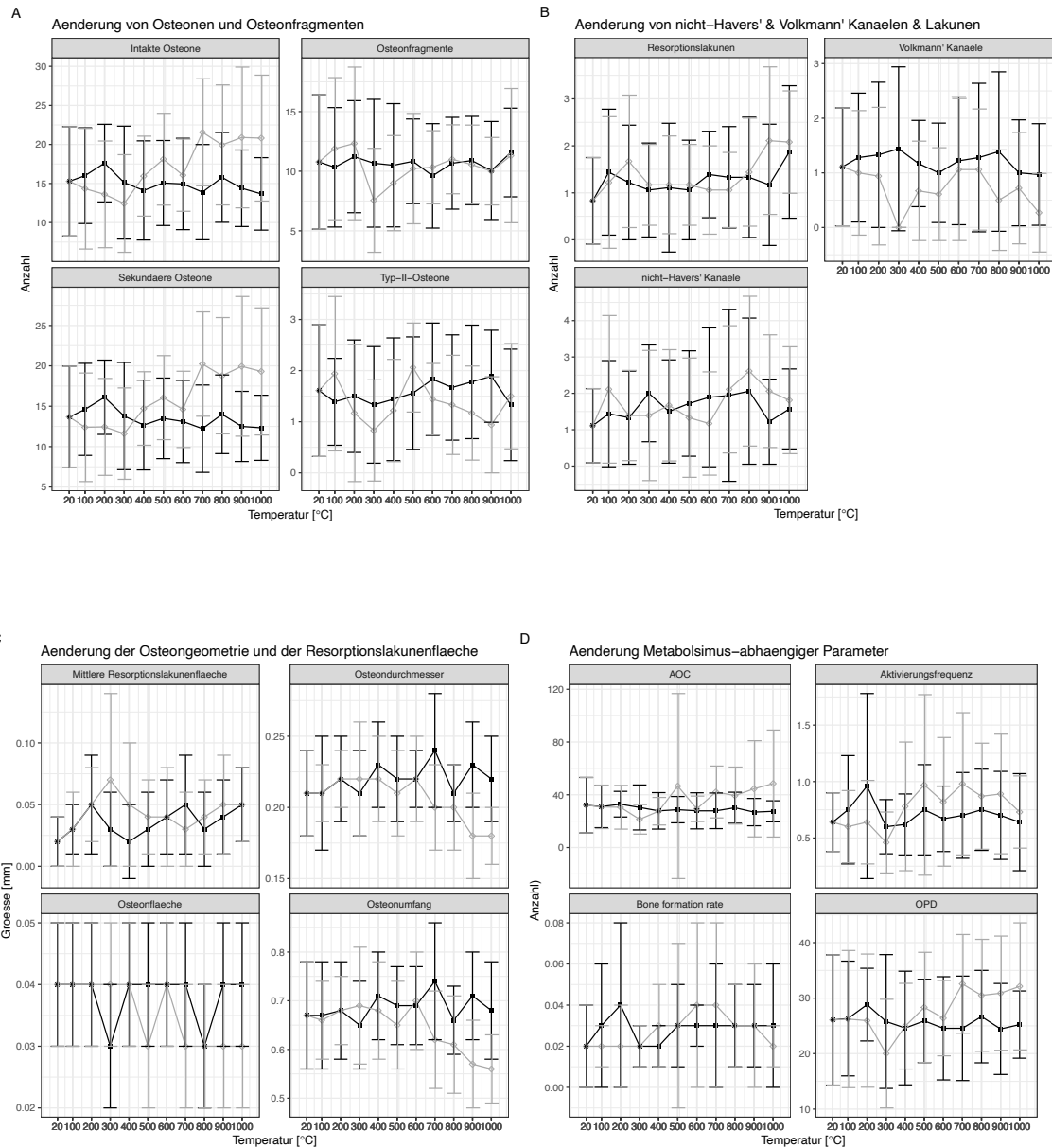


Abbildung 92: A. Verlauf der verbrennungsbedingten Änderung von intakten und sekundären Osteonen, Osteonfragmenten und Typ-II-Osteonen im Vergleich mit dem Verlauf der unverbrannten Referenzproben, B. Temperaturbedingte Änderungen von nicht-Havers'schen und Volkmann'schen Kanälen sowie Resorptionslakunen, C. Änderung der Osteongeometrie und Resorptionslakunenfläche, D. Änderung Metabolismus-abhängiger Parameter; die auf der X-Achse aufgetragenen Verbrennungstemperaturen von 20-1000°C entsprechen den Positionen 1-11 entlang der anterioren Tibiadiaphyse; in schwarz ist der Verlauf der unverbrannten Referenzen dargestellt, in grau die Veränderungen über die Verbrennungstemperaturen; die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung, die für jede Temperaturstufe bzw. Position einzeln berechnet wurde;

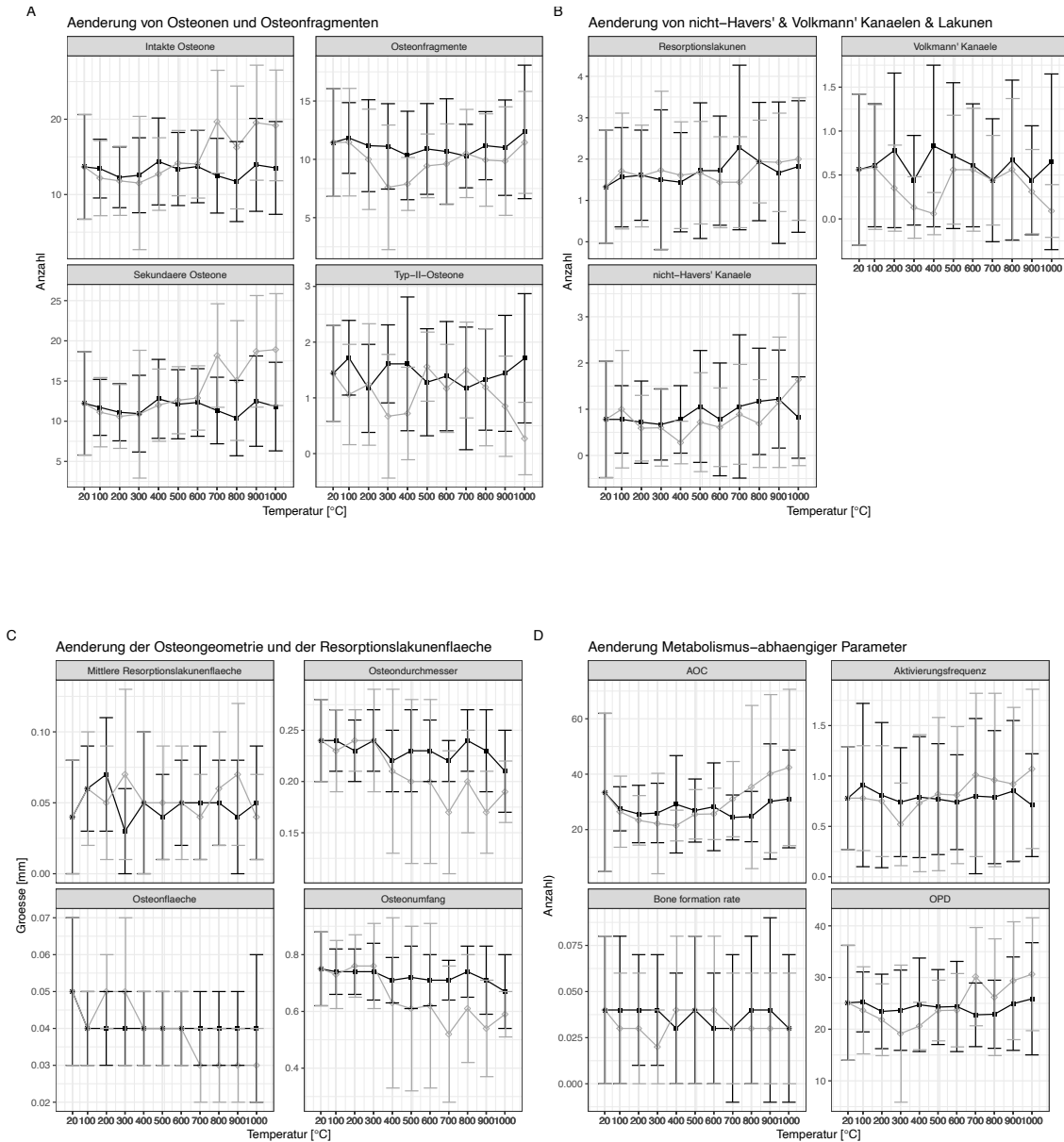


Abbildung 93: A. Verlauf der verbrennungsbedingten Änderung von intakten und sekundären Osteonen, Osteonfragmenten und Typ-II-Osteonen im Vergleich mit dem Verlauf der unverbrannten Referenzproben, B. Temperaturbedingte Änderungen von nicht-Havers'schen und Volkmann'schen Kanälen sowie Resorptionslakunen, C. Änderung der Osteogeometrie und Resorptionslakunenfläche, D. Änderung Metabolismus-abhängiger Parameter; die auf der X-Achse aufgetragenen Verbrennungstemperaturen von 20-1000°C entsprechen den Positionen 1-11 entlang der anterioren Tibiadiaphyse; in schwarz ist der Verlauf der unverbrannten Referenzen dargestellt, in grau die Veränderungen über die Verbrennungstemperaturen; die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung, berechnet einzeln für jede Temperaturstufe bzw. Position;

Die Änderung der prozentualen Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur über den anterioren Tibiaschaft (Abbildung 94A und 95A) und über die Verbrennungstemperaturen (Abbildung 94B und 95B) macht deutlich, dass sich die prozentualen Anteile auch für die **Tibiadiaphyse** wie bei den **Femora** verhalten.

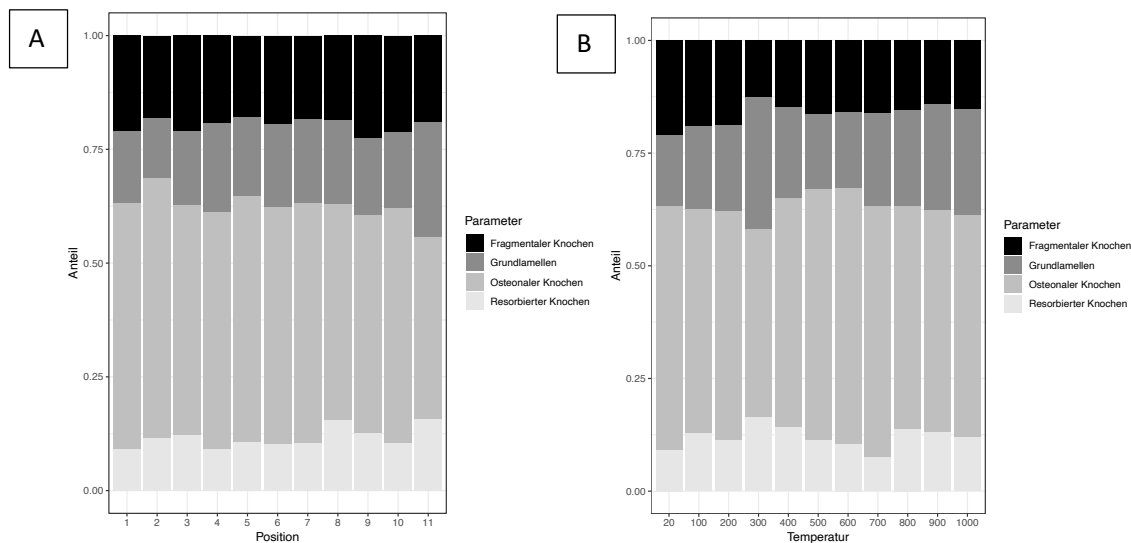


Abbildung 94: Veränderung der prozentualen Zusammensetzung der Anteile der Knochenmikrostruktur aus fragmentalem, lamellärem, osteonalem und resorbiertem Knochen über die Verbrennungstemperaturen (A) und Positionen (B) entlang des anterioren Tibiaschaftes am Periost;

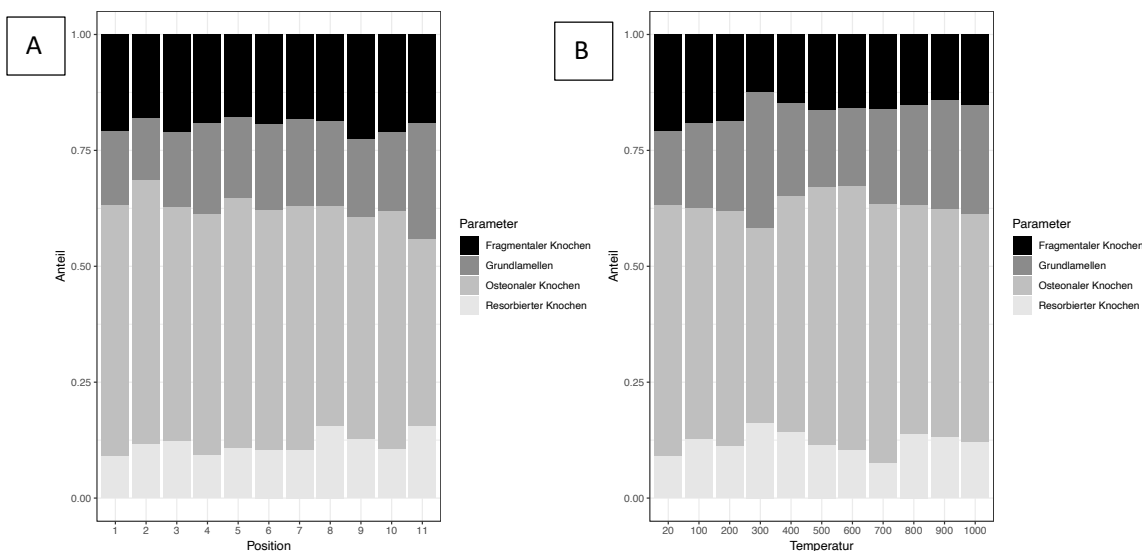


Abbildung 95: Veränderung der prozentualen Zusammensetzung der Anteile der Knochenmikrostruktur aus fragmentalem, lamellärem, osteonalem und resorbiertem Knochen über die Verbrennungstemperaturen (A) und Positionen (B) entlang des Tibiaschaftes;

Schrumpfung

Nachfolgend wird auf die hitzebedingte Schrumpfung der gezählten histomorphometrischen Parameter eingegangen.

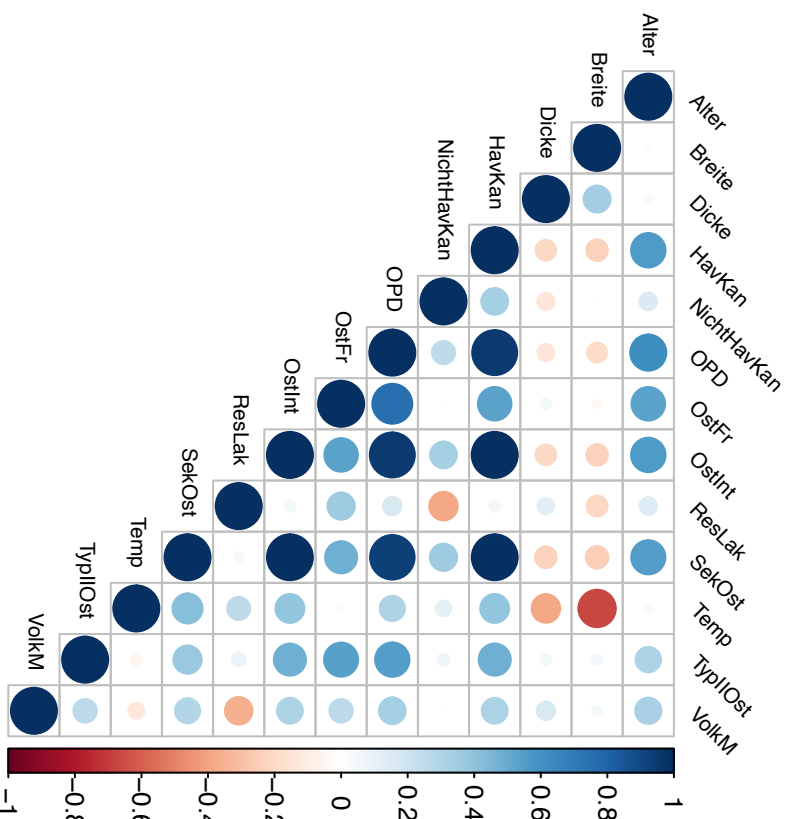
Die Einbeziehung des Koeffizienten zeigte, dass sich die Ergebnisse der Zählungen der histomorphometrischen Parameter der verbrannten Proben am **periostalen Rand** nicht denen der unverbrannten Referenzen annähern. Bei der Auswertung der Auswirkung der Schrumpfungskoeffizienten wurde darauf geachtet, solche Proben, bei denen entweder der Schrumpfungskoeffizient, die unverbrannte Probe oder die verbrannte Probe keine Angaben hatten (Wert = 0 oder NA) auszuschließen, um daraus entstehende Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Dadurch, dass sich am Periost und in der Kompaktamitte nur in weniger als 50% der Fälle bessere Werte ergeben haben, spricht dies gegen die Verwendung eines Schrumpfungskoeffizienten.

In Tabelle 50 (Periost) und 51 (Kompaktmitte) im Anhang sind die Werte bzw. Individuen aufgelistet, bei denen sich für den **periostalen Bereich der Tibiakompakta** durch die Einbeziehung des Schrumpfungsparmeters ein an die unverbrannte Probe besser genäherter Wert im Vergleich zum gezählten Wert der verbrannten Probe ergab.

Abbildung 96A (Periost) und 96B (Mitte) zeigen die Korrelationen der Breiten- und Dickenschumpfung im **periostalen** Bereich der Tibiakompakta mit den gezählten histomorphometrischen Parametern und der Temperatur. Die Schumpfung in Dicke und Breite weist nur eine positive Korrelation miteinander auf ($r \approx 0,6$), mit den histomorphometrischen Parametern zeigt sich eine schwach bis stark negative Korrelation ($r \approx -0,2$ bis $-0,4$). Die gezählten osteonalen histomorphometrischen Parameter korrelieren stark positiv untereinander und mit der Temperatur.

A



B

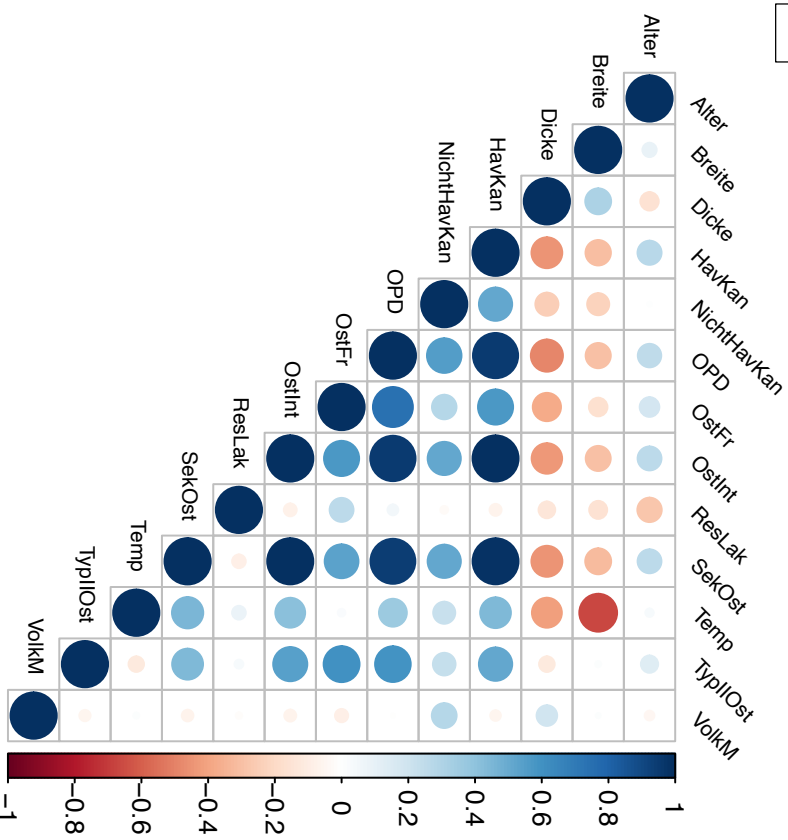


Abbildung 96: A. Korrelation zwischen Breiten- und Dickenstrumpfung mit den gezählten histomorphometrischen Parametern im periostalen Bereich der Tibiakompakta; B. Korrelation zwischen Breiten- und Dickenstrumpfung mit den gezählten histomorphometrischen Parametern im mittleren Bereich der Tibiakompakta; SekOst= sekundäre Osteone, TypIIost=Typ-II-Osteone, OstFr=Osteonfragmente, Temp=Temperatur, ResLak=Resorptionsläkunen, VolkM= Volkmann'sche Kanäle, NichtHavKan=nicht Havers'sche Kanäle, OstInt = intakte Osteone; die Farbgebung der Quadrate reflektiert den Wert des Korrelationskoeffizienten (adjusted R squared), dunkelblau: stark positive Korrelation, rot: stark negative Korrelation; Farbe und Größe der Kreise sind proportional zum Wert des Korrelationskoeffizienten;

3.6.2) Statische Auswertung der verbrennungsbedingten Veränderung

Die statistische Auswertung der verbrennungsbedingten Veränderungen wurde für das Kollektiv der **Tibiaproben** im Vergleich zum **Femurprobenkollektiv** vereinfacht durchgeführt, da in diesem Fall nur fünf Verbrennungsreihen und fünf Proben von dem Vergleich zwischen RT und 1000 °C vorhanden waren. Daher können die Ergebnisse dieser Tests nur Trends als Basis für nachfolgende Untersuchungen anzeigen.

3.6.2.1) Periostale und mittige Auswertung

Verteilung der histomorphometrischen Parameter

Die Verteilung und Veränderung der histomorphometrischen Parameter im **periostalen** Bereich der Tibiakompakta ist in Abbildung 97A gezeigt. Die Veränderung der Verteilung der histomorphometrischen Parameter im **mittigen** Bereich der Tibiakompakta ist in Abbildung 97B gezeigt.

Periostal zeigen AOC, Aktivierungsfrequenz und Knochenbildungsrate zeigen nur einen leichten verbrennungsbedingten Rückgang auf. **Mittig** finden sich bei AOC und Aktivierungsfrequenz deutliche Schwankungen, gefolgt von einer sichtbaren Zunahme in den oberen Verbrennungstemperaturen

Die prozentualen Anteile der Mikrostruktur (FragKno, GenLam, OstKno und ResKno) sind **periostal** und **mittig** starken temperaturbedingten Fluktuationen unterworfen, jedoch ist für die Generallamellen ein Anstieg, für fragmentalen und osteonalen Knochen ein leichter Rückgang erkennbar.

Für die Osteongeometrie und die Resorptionslakunenfläche zeigt sich eine deutliche temperaturbedingte Schrumpfung, wohingegen für die Zahl der sekundären Osteone, der nicht-Havers'schen Kanäle und der Osteonfragmente ein Anstieg zu verzeichnen ist.

Für Volkmann'sche Kanäle und Typ-II-Osteone kann aufgrund des geringen Vorkommens kein verbrennungsbedingter Trend festgestellt werden.

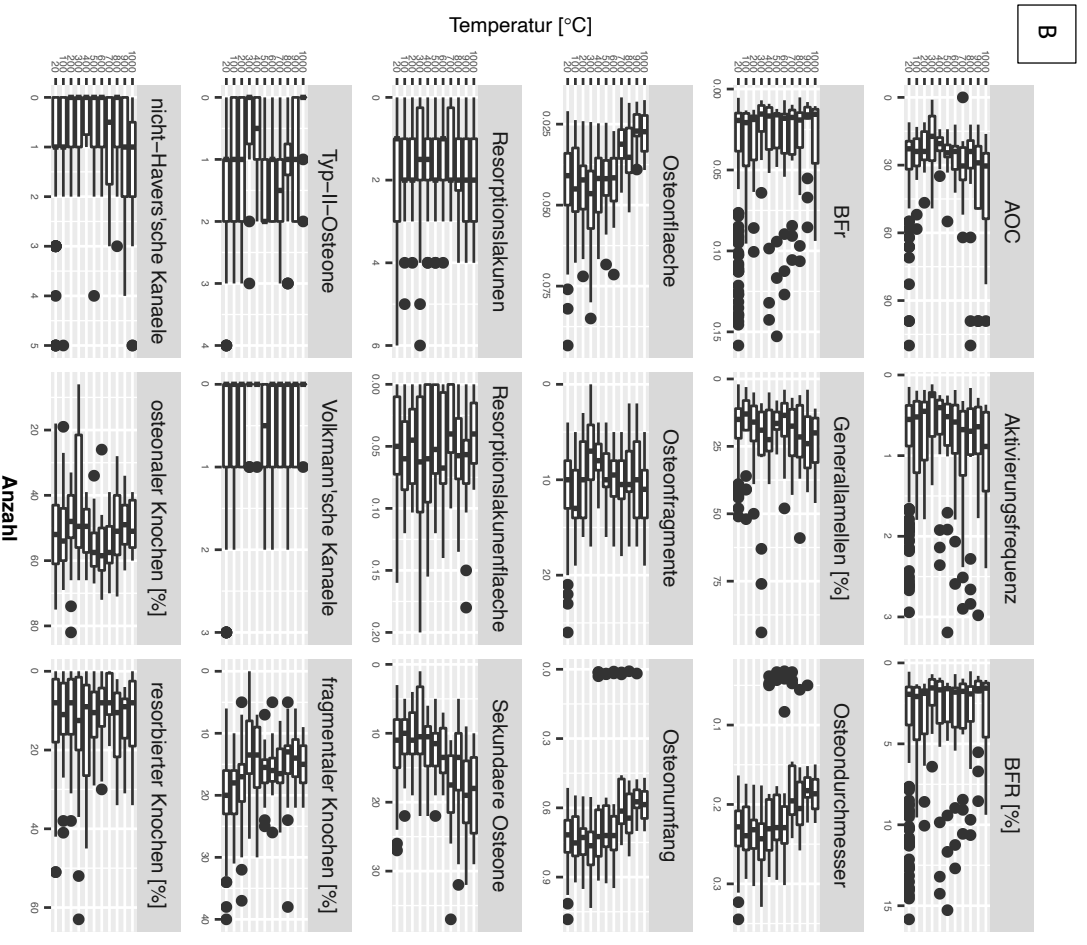
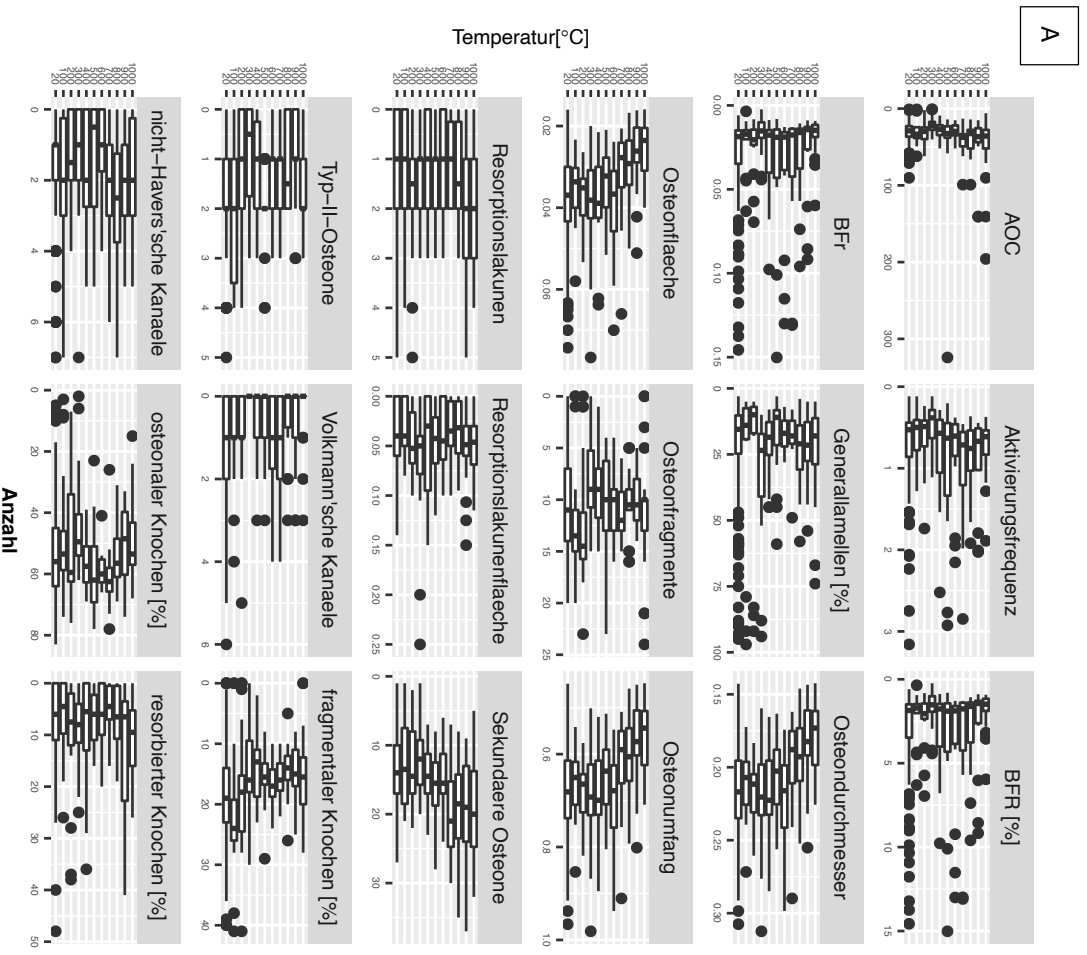


Abbildung 97: A. Boxplot zur Veranschaulichung der Datenverteilung der einzelnen histomorphometrischen Parameter am Periof, B. Boxplot zur Veranschaulichung der Datenverteilung der einzelnen histomorphometrischen Parameter in der Kompaktmitte; X-Achse: Anzahl, Y-Achse: Verbrennungstemperatur von 20-1000°;

3.6.2.2) Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung der Daten

Anhand des **Shapiro-Wilk-Tests** auf Normalverteilung der Daten konnte festgestellt werden, dass die meisten Parameter im unverbrannten und verbrannten Zustand im **periostalen** und **mittigen** Bereich der Kompakta **keine** Normalverteilung aufweisen (Tabelle 52 und 53 im Anhang). Dadurch und da die Verteilungen der Parameter zwischen den Temperaturstufen stark schwanken wurde im Weiteren davon ausgegangen, dass es sich um nicht-normalverteilte Datensätze handelt.

3.6.2.3) Wilcoxon-Rangsummentest auf signifikante Unterschiede

Im nächsten Schritt wurden im periostalen und mittigen Bereich der Kompakta **Wilcoxon-Rangsummentests** durchgeführt zur Untersuchung **signifikanter Unterschiede** zwischen den **unverbrannten Positionen entlang des Tibiaschaftes**, zwischen den **verbrannten Proben der Verbrennungsreihe** und den **jeweilig korrespondierenden Referenzen** und zwischen **aufeinanderfolgenden Temperaturstufen**.

Der **Positionsvergleich** entlang des Schaftes lieferte im **periostalen** und **mittigen Bereich** der Kompakta signifikante Unterschiede bspw. in den prozentualen Anteilen der Knochenmikrostruktur, der Resorptionslakunenfläche und Osteongeometrie und in den osteonalen Parametern (Abbildung 98 (Mitte) und Abbildung 99 (Periost) und Tabelle 54 und 55 im Anhang).

Der **Vergleich zwischen verbrannter Probe und unverbrannter Referenz** in der **Kompaktamitte** erbrachte für die prozentualen Anteile der Knochenmikrostruktur und die osteonalen Parameter in den höheren Bereichen verbrennungsbedingte Unterschiede (Abbildung 100A und Tabelle 56 im Anhang). Im **periostalen Bereich** waren vor allem osteonale und Metabolismus-abhängige Parameter signifikant verschieden von der unverbrannten Referenz (Abbildung 100B und Tabelle 57 im Anhang).

Der **Vergleich zwischen den Temperaturstufen** zeigte im **mittigen Bereich** und **periostalen Bereich** der Kompakta vor allem für osteonale und Metabolismus-abhängige Parameter signifikante Unterschiede. Typ-II-Osteone bei 400 bis 500°C und (Abbildung 101A (Mitte), Abbildung 101B (Periost), sowie Tabelle 58 und 59 im Anhang).

Generell zeigten sich im **mittigen** Bereich der Kompakta weniger signifikante Unterschiede als am **periostalen** Rand des Knochenfragments. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen aus Kapitel 3.5.4.1.3 und Kapitel 3.5.4.2.3 für das Femur.

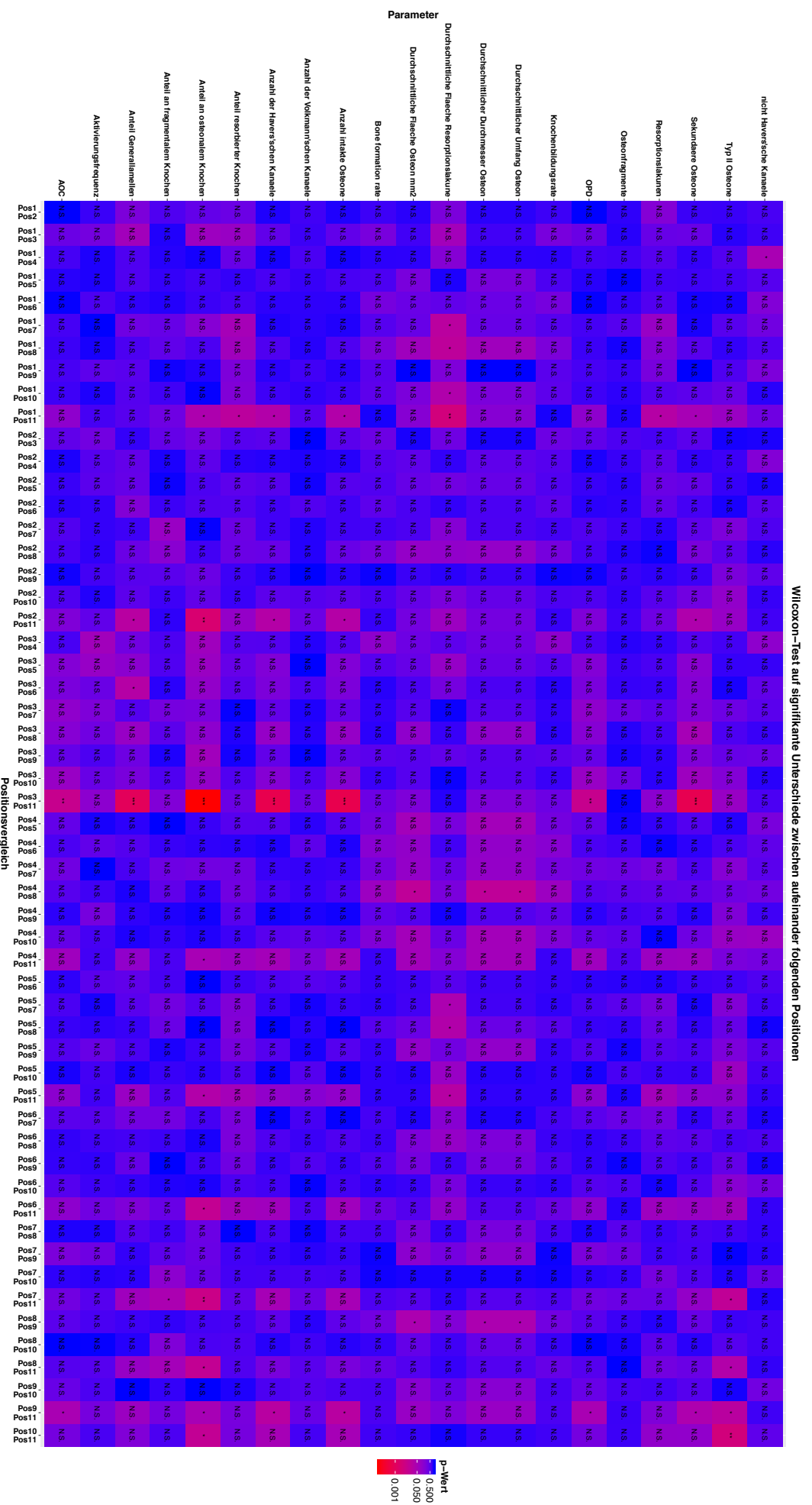


Abbildung 98: Wilcoxon-Rangsummentest zum Test auf signifikante Unterschiede zwischen den Positionen des unverbrannten Tibiaschaftes aus der Mitte der Tibiakompakta; der p-Wert des Wilcoxon-Tests wird durch die Farbgebung und die Bezeichnungen verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen sehr signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05).

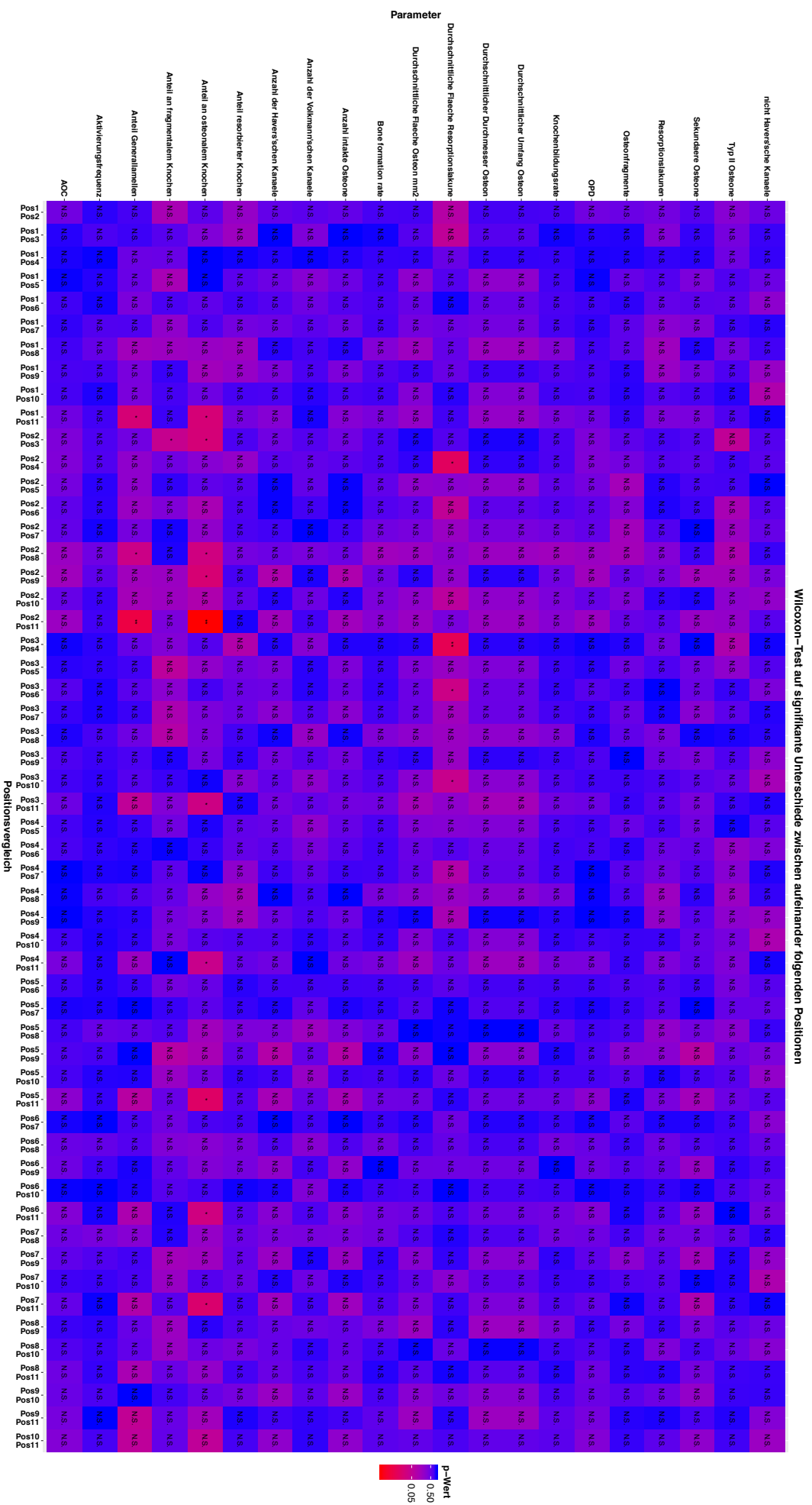


Abbildung 99: Wilcoxon-Rangsummentest zum Test auf signifikante Unterschiede zwischen den Positionen des unverbrannten Tibiaschafes am peritostalen Rand der Kompakta; der p-Wert des Wilcoxon-Tests wird durch die Farbgebung und die Bezeichnungen verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert ($\leq 0,001$), ** für einen sehr signifikanten Wert ($\leq 0,01$) und * für einen signifikanten Wert ($\leq 0,05$).

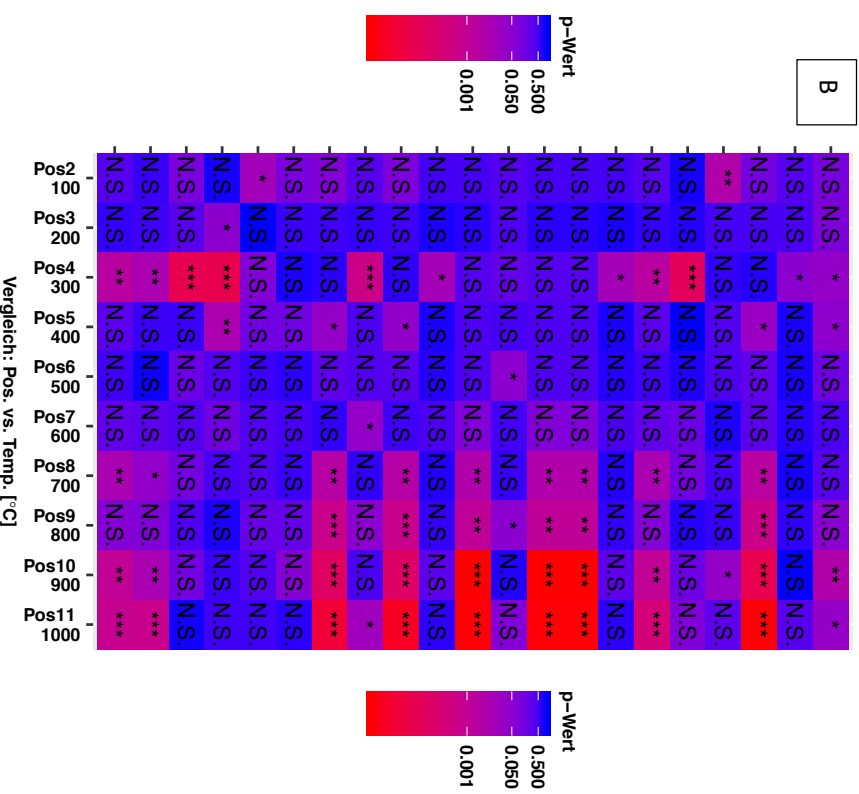
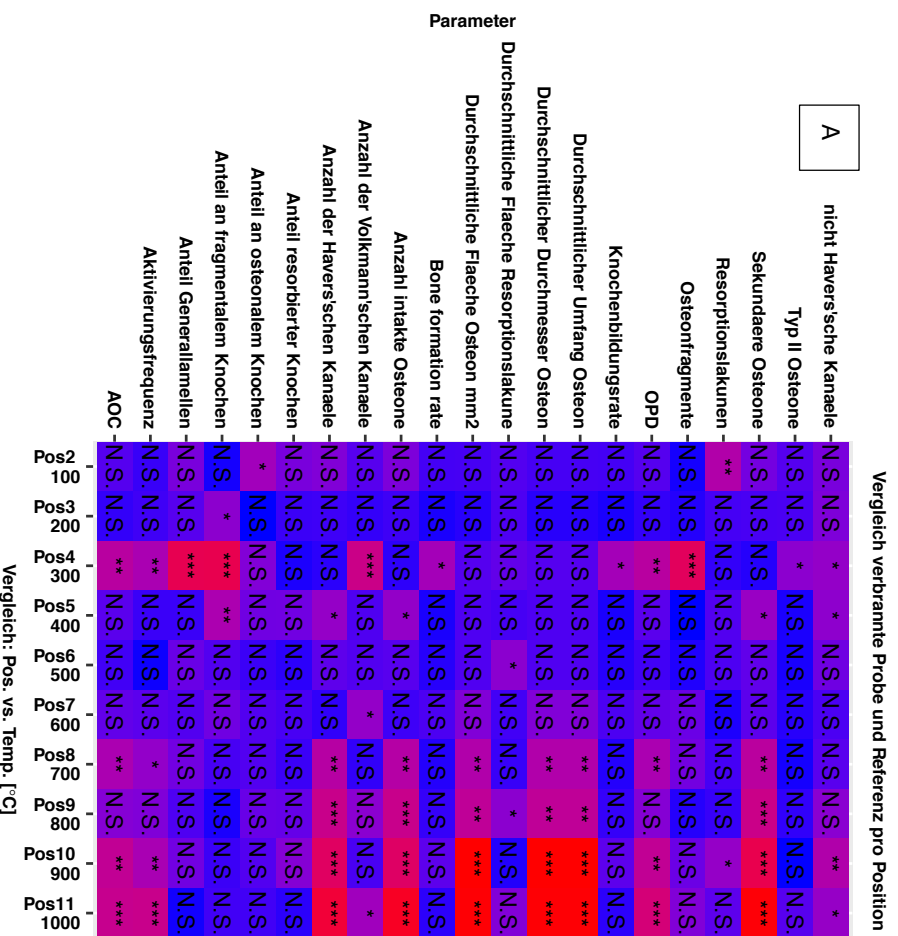


Abbildung 100: Wilcoxon-Rangsummentest zum Vergleich auf signifikante Unterschiede zwischen der verbrannten Probe und der unverbrannten Referenzprobe entlang der elf Positionen des Tibiaschaftes bzw. der elf Verbrannungsstufen (RT-1000°C): A. Kompaktmitte; B. Perist; der p-Wert wird durch die Farbgebung und die Bezeichnungen verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert ($\leq 0,001$), ** für einen sehr signifikanten Wert ($\leq 0,01$) und * für einen signifikanten Wert ($\leq 0,05$)

Wilcoxon-Test auf signifikante Unterschiede zwischen aufeinander folgenden Temperaturstufen

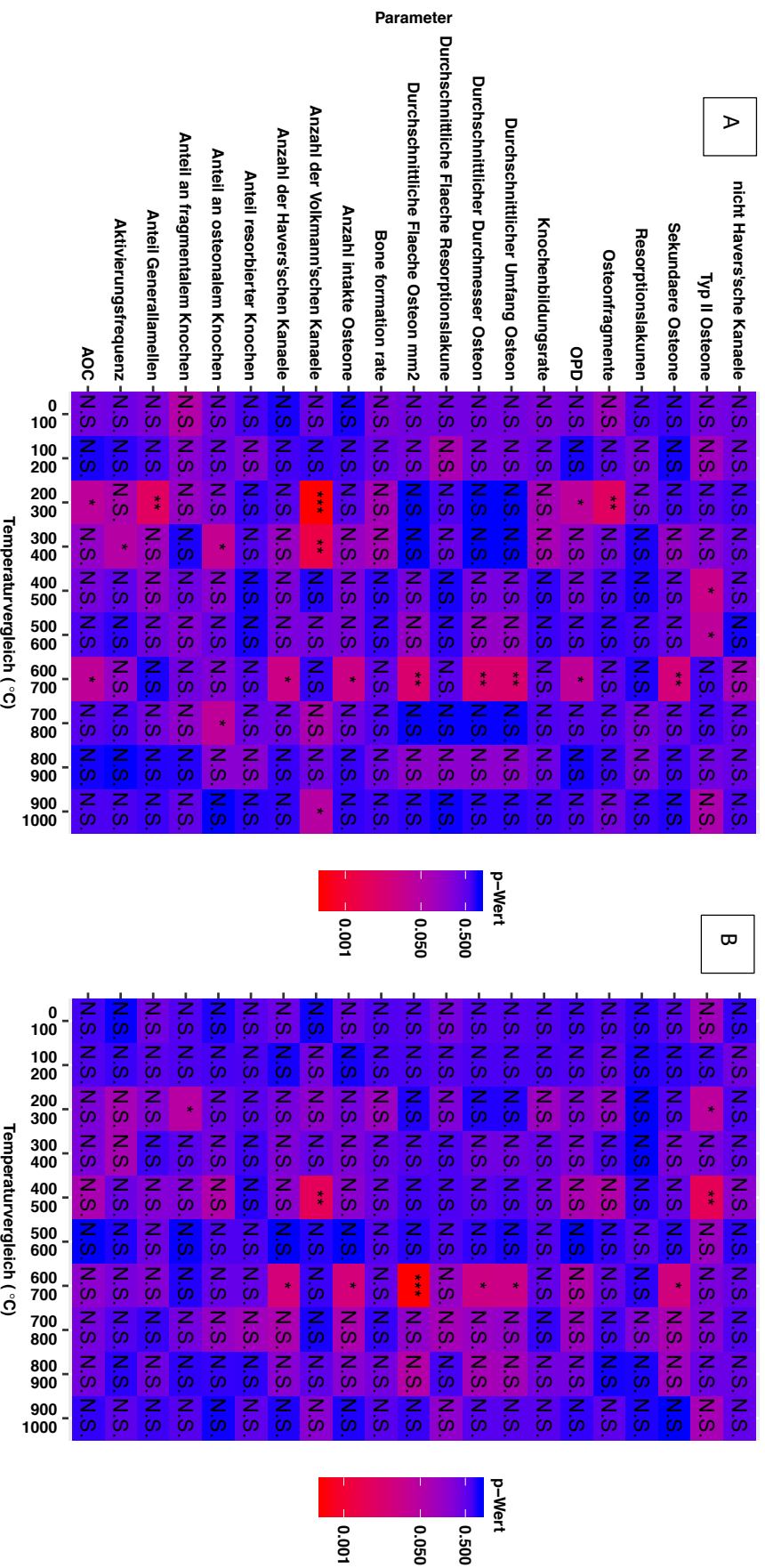


Abbildung 101: Wilcoxon-Rangsummentest zum Vergleich auf signifikante Unterschiede zwischen aufeinander folgenden Temperaturstufen der experimentell kramierten Proben der Verbrennungsreihe: A. Kompaktantite, B. Perlast; der p-Wert wird durch die Farbgebung und die Bezeichnungen verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert ($\leq 0,001$), ** für einen sehr signifikanten Wert ($\leq 0,01$) und * für einen signifikanten Wert ($\leq 0,05$).

3.6.2.4) Korrelation

Periostale und mittige Auswertung

Abbildung 102A (Periost) und 102B (Mitte) zeigen die Korrelation der unabhängigen (gezählten) und abhängigen (berechneten) histomorphometrischen Parameter im **periostalen** und **mittigen** Bereich der Kompakta miteinander und mit Position, Alter, Temperatur und Geschlecht.

Es ist deutlich, dass Volkmann'sche Kanäle, fragmentaler Knochen, Alter, Osteonfragmente, weibliches Geschlecht, Typ-II-Osteone, prozentualer Anteil osteonalen Knochens, AOC, OPD, sekundäre und intakte Osteone und Havers'sche Kanäle **periostal** und **mittig** positiv bis stark positiv miteinander korrelieren. Vor allem osteonaler Knochen, AOC, OPD, sekundäre und intakte Osteone und Havers'sche Kanäle korrelieren stark positiv miteinander.

Stark negativ korrelieren dagegen Generallamellen, Osteongeometrie, und prozentuale Knochenbildungsrate mit Alter, Osteonfragmenten, Typ-II-Osteonen, osteonalem Knochen, AOC, OPD, sekundären und intakten Osteonen und Havers'schen Kanälen.

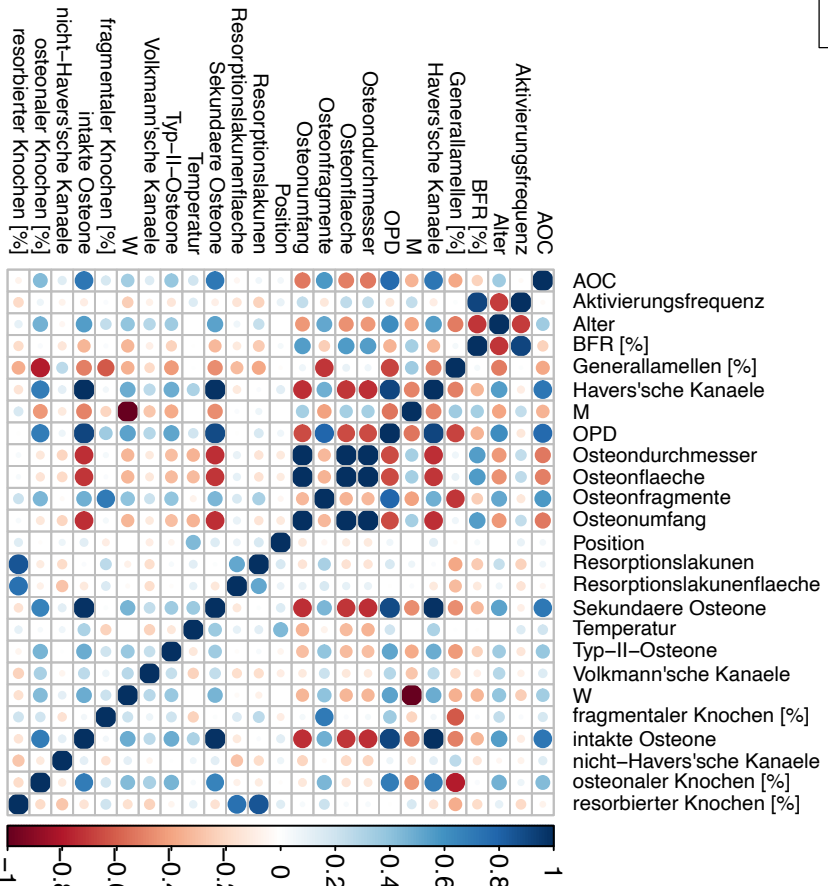
Die Position und das Individualalter zeigen eine Korrelation mit AOC, OPD, sekundären Osteonen, intakten Osteonen und Havers'schen Kanälen.

Das Individualalter korreliert zudem mit Resorptionslakunen, Resorptionslakunenfläche und dem Anteil resorbierten Knochens. Osteongeometrie, Anteil an Generallamellen, prozentuale Knochenbildungsrate und Aktivierungsfrequenz korrelieren ebenfalls schwach bis stark miteinander. Für dieselben Parameter lässt sich eine schwach bis stark negative Korrelation mit osteonalem Knochen, Typ-II-Osteonen, Osteonfragmenten, AOC, OPD, sekundären Osteonen, intakten Osteonen und Havers'schen Kanälen erkennen.

Wie bereits bei der Auswertung der **Femora** an **Periost** und **Kompaktamitte**, zeigen weibliches und männliches Geschlecht exakt konträre Korrelationen. Das ist erwartet, da weibliches und männliches Geschlecht binär kodiert sein und sich damit gegenseitig ausschließen.

Dabei korreliert beispielsweise das männliche Geschlecht in der periostalen Tibiakompakta und der Kompaktamitte negativ mit Havers'schen Kanälen, das weibliche Geschlecht korreliert mit diesen Parametern positiv.

A



B

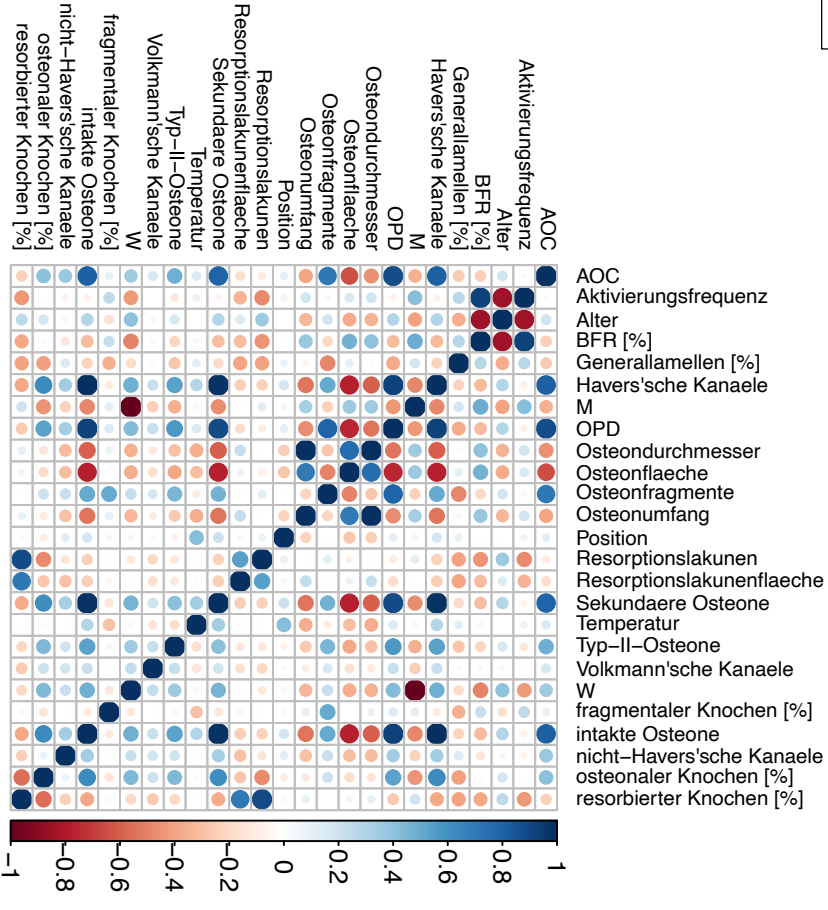
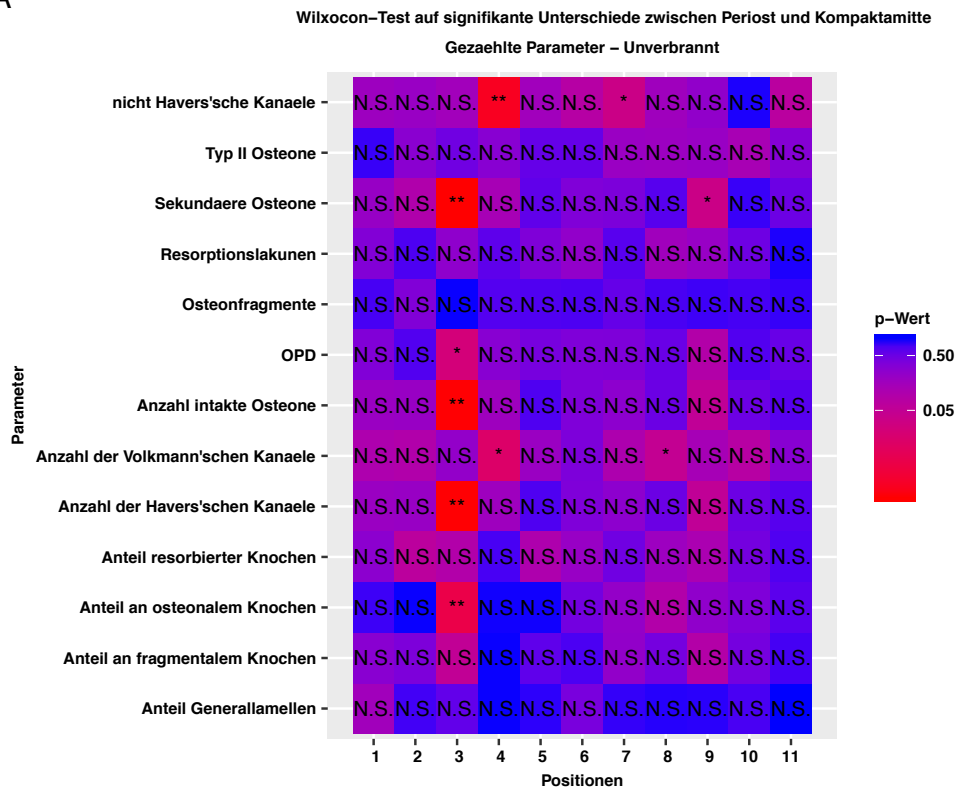


Abbildung 102: A. Korrelation der unabhängigen (gezählten) und abhängigen (berechneten) histomorphometrischen Parameter gegeneinander und mit der Temperatur, dem Geschlecht (M und W), dem Alter (Age) und der Position am periostalen Rand der Kompakta. B. Korrelation der unabhängigen (gezählten) und abhängigen (berechneten) histomorphometrischen Parameter gegeneinander und mit der Temperatur, dem Geschlecht (M und W), dem Alter (Age) und der Position in der Kompakta; die roten Kästchen stehen für eine stark negative Korrelation ($r = -1$), die blauen Kästchen für eine stark positive Korrelation ($r = 1$), bei farblosen (weiß) Kästchen liegt der Wert des Korrelationskoeffizienten bei 0; Farbe und Größe der Kreise sind proportional zum Wert des Korrelationskoeffizienten.

3.6.2.5) Vergleich von periostal und mittig

Zum Vergleich der Datensätze aus dem **periostalen** und **mittigen** Bereich der Tibiakompakta wurde der **Wilcoxon-Rangsummentest** verwendet. Dabei wurde auf signifikante Unterschiede zwischen den **gezählten und berechneten** histomorphometrischen Parametern **im verbrannten und unverbrannten Zustand** getestet. Im Falle der **unverbrannten** Proben konnten insgesamt nur 20 signifikante Unterschiede über alle Positionen und Parameter ermittelt werden. Die **verbrannten Proben** zeigten zwischen dem **mittigen** und dem **periostalen** Bereich der Kompakta zeigten über alle Temperaturbereiche hinweg signifikante Unterschiede in der Osteon- und Resorptionslakunengeometrie und in der Anzahl osteonaler Parameter. (Tabelle 60 im Anhang, Abbildung 103A und B und Abbildung 104A und B).

A



B

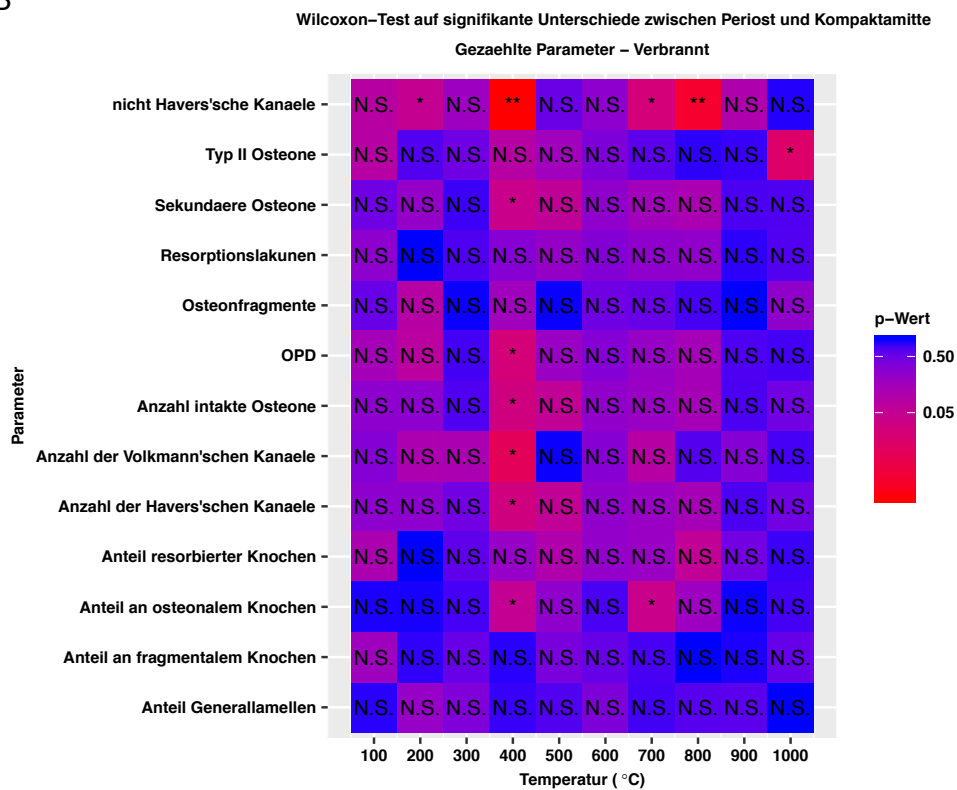
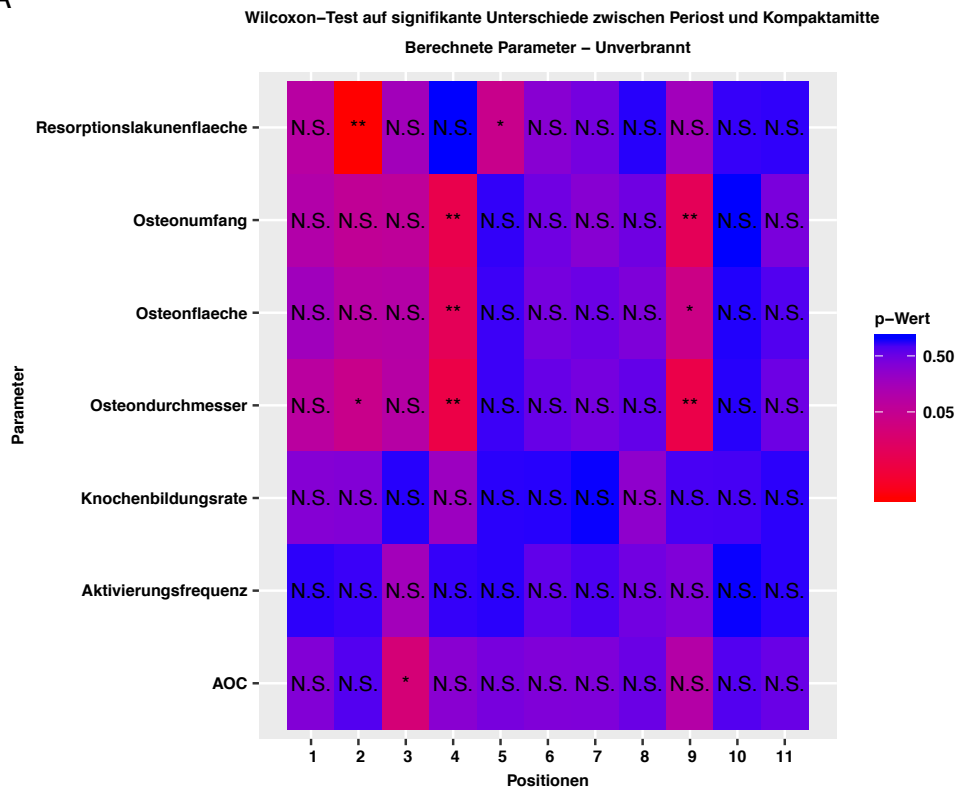


Abbildung 103: A. Wilcoxon-Test auf signifikante Unterschiede der gezählten histomorphometrischen Parameter entlang der unverbrannten Positionen des anterioren Femurschaftes zwischen periostalem Rand und Kompaktamitte; B: Wilcoxon-Test auf signifikante Unterschiede der berechneten Parameter entlang der verbrannten Proben des Tibiaschaftes zwischen Periost und Mitte der Kompakta; der p-Wert wird durch die Farbgebung und die Bezeichnungen verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert ($\leq 0,001$), ** für einen signifikanten Wert ($\leq 0,01$) und * für einen signifikanten Wert ($\leq 0,05$);

A



B

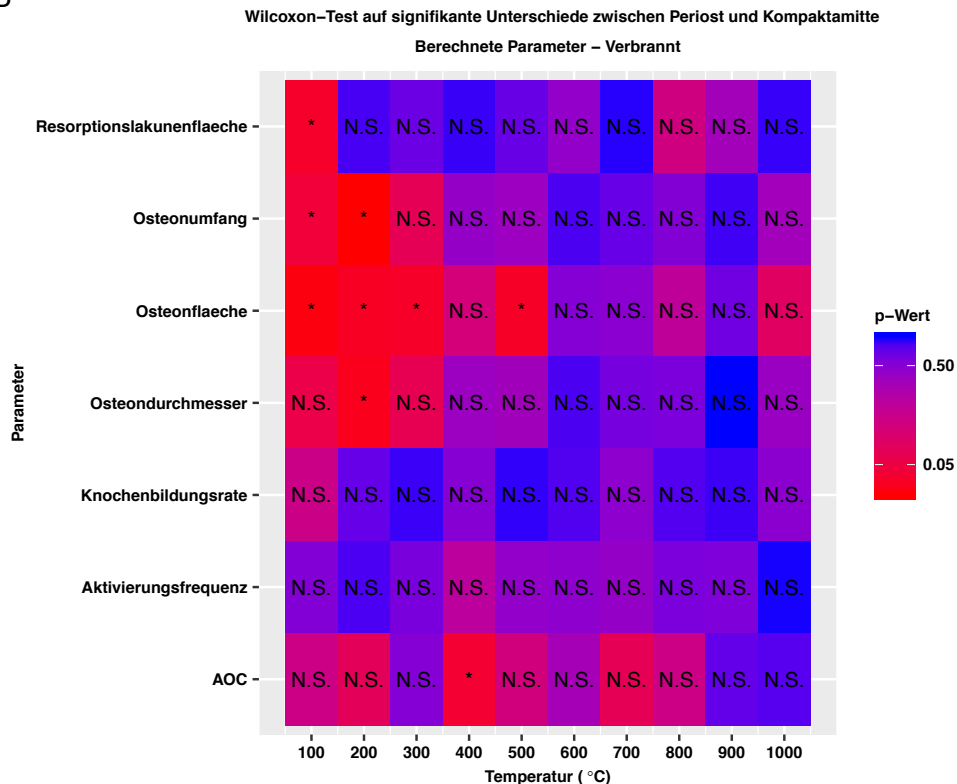


Abbildung 104: A: Wilcoxon-Test auf signifikante Unterschiede der berechneten histomorphometrischen Parameter entlang der Positionen des Tibiaschaftes zwischen periostalem Rand und Kompaktamitte; B: Wilcoxon-Test auf signifikante Unterschiede der berechneten Parameter entlang der Temperaturstufen der Verbrennungsreihe zwischen Periost und Mitte der Kompakta; der p-Wert wird durch die Farbgebung und die Bezeichnungen verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert ($\leq 0,001$), ** für einen signifikanten Wert ($\leq 0,01$) und * für einen signifikanten Wert ($\leq 0,05$);

3.6.3) Erstellung von Regressionsgleichungen

Auch für das Kollektiv der Tibiaproben wurde die Erstellung linearer Modelle zur Aufstellung neuer Regressionsgleichungen mithilfe der freien Programmiersprache R durchgeführt. Die in das jeweilige lineare Modell einbezogenen Parameter wurden auch bei diesen Proben aufgrund ihrer Relevanz innerhalb der Knochenmikrostruktur und ihrer Relevanz bzw. ihrem Einfluss in Bezug auf andere Parameter ausgewählt. Zunächst wurden lineare Modelle anhand des Gesamtdatensatzes des Tibiakollektivs (siehe Tabelle 7 und 8 im Anhang auf CD) erstellt, zuerst ohne und anschließend mit Entfernung von Ausreißern. Für das Entfernen der Ausreißer wurde das R-Package MVOutlier verwendet. Da sich mit diesem bereinigten Datensatz keine verwendbaren Regressionsgleichungen aufstellen ließen, wurden die jeweils drei Zählungen pro Positionen bzw. Temperaturstufe jedes Individuums gemittelt und diese Daten zur Erstellung der Regressionen verwendet. Danach wurden mithilfe des R-Packages MVOutlier Ausreißer aus dem Datensatz entfernt (Tabelle 62 und 59 im Anhang).

Die erstellten linearen Modelle des Tibiakollektivs können nur als „Vorstudien“ für nachfolgende Untersuchungen verstanden werden, da das Kollektiv (5 Verbrennungsreihen, 5 RT vs. 1000 °C-Vergleiche) zu klein war, um robuste lineare Modelle aufstellen zu können. Aufgrund des kleinen Datensatzes konnten zudem keine Modelltests durchgeführt werden, weshalb nachfolgend für den periostalen und mittigen Bereich der Tibiakompakta nur jeweils ein Modell vorgestellt wird.

1.) Lineares Modell

Tabelle 22 beschreibt die verwendeten Parameter der beiden linearen Modelle.

Tabelle 22: Parameter für die linearen Modelle 1, 2, 3 und 4 am periostalen Rand der Kompakta;

Modell 1	lm(formula=Alter~0+Temp+OPD+AktFr+BFR+AOC+Geschlecht, Daten = GesTab - Tibia periostal)
Modell 2	lm(formula = Age ~ 0 + Temp + OPD + AktFr + BFR + AOC + Sex, data = GesTab - Tibia mittig)

Beide Modelle basieren auf den Metabolismus-abhängigen Parametern, dem Geschlecht und der Temperatur. Zudem wurden die Modelle durch den Nullpunkt des Koordinatensystems gelegt.

2.) Residuen

Tabelle 23: Übersicht (Ausdehnung, Symmetrie und Quartile) über die Verteilung der Residuen mit Minimum, Maximum, 25% und 75% Quartile und Median;

Modell	Min	1Q	Median	3Q	Max
Modell 1 - periostal	-16,263	-5,498	-0,669	5,511	27,162
Modell 2 - mittig	-18,693	-5,557	-1,455	8,119	17,843

Tabelle 23 zeigt eine Übersicht über die Verteilung der Residuen.

Die minimale (negative) Abweichung von **Modell 1** liegt bei -16,2 und die maximale (positive Abweichung) bei 27,1. Die Verteilung im ersten und dritten Quartil ist symmetrisch (1Q=-5,4, 3Q=5,5), der Median liegt nahe um den Nullpunkt (-0,7).

Die minimale (negative) Abweichung von **Modell 2** findet sich bei -18,7 und die maximale (positive Abweichung) bei 17,8. Die Verteilung im ersten und dritten Quartil ist nicht symmetrisch (1Q=-5,6 und 3Q=8,1), der Median liegt nur relativ nahe um den Nullpunkt (-1,4).

3.) Koeffizienten

Tabelle 24 zeigt die mithilfe der KQ-Methode geschätzten Koeffizienten der Parameter, deren Standardfehler, die Teststatistik und den zugehörigen p-Wert.

Tabelle 24: Geschätzte Koeffizienten (mithilfe der KQ-Methode) der Parameter, deren zugehöriger Standardfehler, Teststatistik (Schätzung/Standardfehler mit $H_0: \beta_i=0$, vs. $H_1: \beta_i \neq 0$ – welche besagt dass der jeweilige Parameter einen bzw. keinen Einfluss hat) und der zur Teststatistik gehörende p-Wert samt dessen Signifikanz; Signifikanzkodierung des p-Wertes: *** = 0,001, ** = 0,01, * = 0,05;

Modell	Parameter	Schätzung	Standardfehler	t-Wert	Pr(> t)	Signifikanz
Modell 1 - periostal	Temperatur	0,005889	0,003257	1,808	0,074262	
	OPD	1,161015	0,332680	3,490	0,000785	***
	Aktivierungsfrequenz	-48,024950	9,815036	-4,893	4,97e-06	***
	BFR	2,659375	2,078363	1,280	0,204355	
	AOC	-0,111390	0,109595	-1,016	0,312477	
	M	63,637711	7,461259	8,529	6,78e-13	***
	W	60,460373	7,578832	7,978	8,32e-12	***
Modell 2 - mittig	Temperatur	-8,279e-04	4,267e-03	-0,194	0,846594	
	OPD	2,276e+00	1,200e+00	1,897	0,061067	
	Aktivierungsfrequenz	-2,732e+01	6,952e+00	-3,929	0,000169	***
	BFR	-1,046e+00	1,413e+00	-0,740	0,461085	
	AOC	-1,198e+00	8,051e-01	-1,488	0,140295	
	M	6,731e+01	9,438e+00	7,132	2,64e-10	***
	W	6,035e+01	9,751e+00	6,189	1,87e-08	***

Unter den ausgewählten Parametern für **Modell 1** stellten nur die OPD (0,000785), Aktivierungsfrequenz (4,97e-06) und das männliche (6,78e-13) und weibliche (8,32e-12) Geschlecht einen signifikanten Einfluss für das lineare Modell zur Beschreibung des Datensatzes dar.

Innerhalb der für **Modell 2** ausgewählten Parametern hatte die Aktivierungsfrequenz (0,000169), sowie das männliche (2,64e-10) und weibliche (1,87e-08) Geschlecht einen signifikanten Einfluss.

4.) Statistik

In Tabelle 25 ist die zu den jeweiligen linearen Modellen gehörige Statistik aufgezeigt.

Tabelle 25: Statistische Auswertung zu Modell 1, 2, 3 und 4 samt Residuenstandardfehler (RSE), R^2 , korrigiertes R^2 , F-Statistik und zugehörigem p-Wert; DF=Freiheitsgrade;

Modell	Residuenstandardfehler (RSE)	R^2	Korrigiertes R^2	F-Statistik	p-Wert
Modell 1	9,01 bei 81 DF	0,983	0,9815	669 bei 7 und 81 DF	< 2,2e-16
Modell 2	10,67 bei 88 DF	0,9737	0,9716	465,8 bei 7 und 88 DF	< 2,2e-16

Der relativ niedrige F-Wert von **Modell 1** zeigt, dass das Modell keine sehr gute Beschreibung des Datensatzes darstellt. Der niedrige F-Wert von **Modell 2** zeigt, dass das **Modell 2** eine noch schlechtere Beschreibung des Datensatzes als **Modell 1** im periostalen Bereich darstellt.

5.) Regressionsgleichung

In Tabelle 26 sind die durch die linearen Modelle 1 und 2 generierten Regressionsgleichungen aufgezeigt.

Tabelle 26: Regressionsgleichungen zu den Modellen 1 und 2

Modell 1	$Y = 0,005889 \cdot [\text{Temperatur}] + 1,161015 \cdot [\text{OPD}] - 48,024950 \cdot [\text{Aktivierungsfrequenz}] + 2,659375 \cdot [\text{BFR}] - 0,111390 \cdot [\text{AOC}] + 63,637711 \cdot [\text{Männlich}] + 60,460373 \cdot [\text{Weiblich}]$
Modell 2	$Y = -8,279e-04 \cdot [\text{Temperatur}] + 2,276e+00 \cdot [\text{OPD}] - 2,732e+01 \cdot [\text{Aktivierungsfrequenz}] - 1,046e+00 \cdot [\text{BFR}] - 1,198e+00 \cdot [\text{AOC}] + 6,731e+01 \cdot [\text{Männlich}] + 6,035e+01 \cdot [\text{Weiblich}]$

6.) Plots zur Beurteilung der Güte der Regressionsmodelle

Modell 1 – periostal:

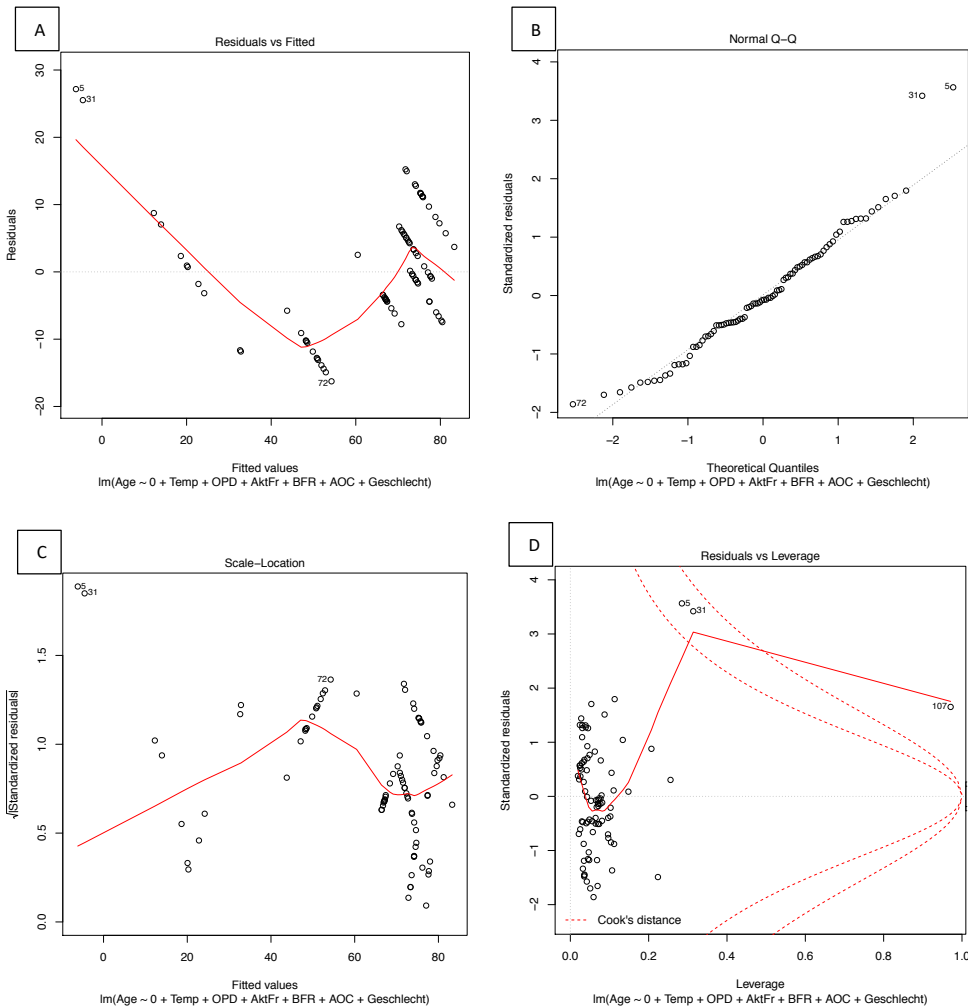


Abbildung 105: Plots zur Beurteilung der Güte der Regression; A: Residuen gegen die vom Modell vorhergesagten Werte (fitted values), B: QQ-Plot: Quartile der standardisierten Residuen (standardized residuals) gegen die Quartile der Normalverteilung (theoretical quantiles), C: Scale-Location-Plot zur Analyse, ob die Standardabweichung der Residuen über den Bereich der erklärten Variablen gleich bleibt, D: Cook's Distance Plot zur Herausarbeitung einflussnehmender Datenpunkte (Wert >1 sind stark einflussnehmend);

Im Residuals vs. Fitted-Plot (Abbildung 105A) ist keine eindeutig symmetrische Verteilung ohne Verteilungsmuster um die Nulllinie herum zu sehen. Die Daten scheinen nicht gleichmäßig verteilt zu sein. Der Q-Q-Plot (Abbildung 105B) zeigt weitgehend eine Normalverteilung auf, mit geringfügigen Abweichungen in den oberen und unteren Quartilen. Der Scale-Location-Plot (Abbildung 105C) zeigt keine horizontale Linie, was auf eine größere Verteilung der Daten hinweist. Der Residuals vs. Leverage-Plot (Abbildung 105D) zeigt drei Datenpunkte außerhalb der Cook's Distance (Zeile 107, 5

und 31). Diese Datenpunkte nehmen einen maßgeblichen Einfluss auf die Regression. Nach F-Statistik, p-Wert und RSE scheint das Modell nicht gut auf die zugrundeliegenden Daten zu passen.

Modell 2 – mittig:

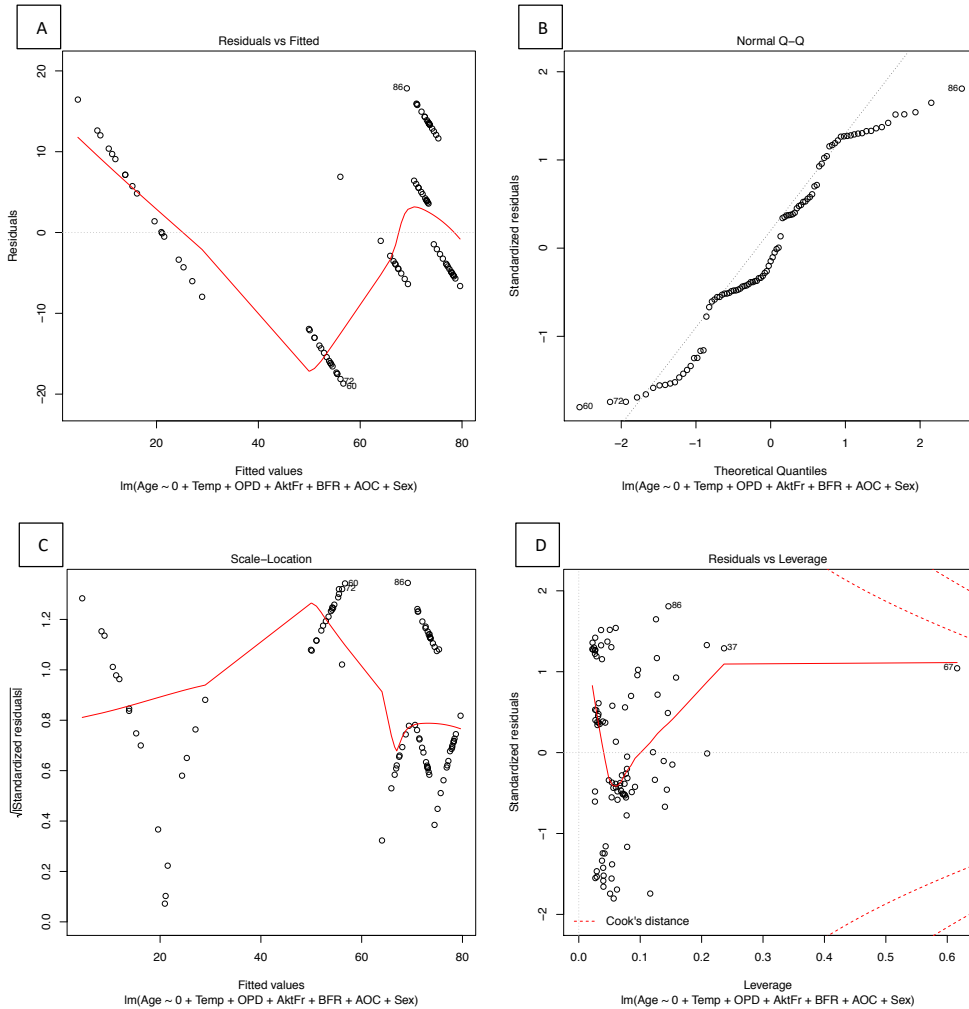


Abbildung 106: Plots zur Beurteilung der Güte der Regression; A: Residuen gegen die vom Modell vorhergesagten Werte (fitted values), B: Q-Q-Plot: Quantile der standardisierten Residuen (standardized residuals) gegen die Quantile der Normalverteilung (theoretical quantiles), C: Scale-Location-Plot zur Analyse, ob die Standardabweichung der Residuen über den Bereich der erklärten Variablen gleich bleibt, D: Cook's Distance Plot zur Herausarbeitung einflussnehmender Datenpunkte (Wert >1 sind stark einflussnehmend);

Im Residuals vs. Fitted-Plot (Abbildung 106A) ist eine relativ symmetrische Verteilung ohne Verteilungsmuster um die Nulllinie herum zu sehen. Die Daten scheinen nicht gleichmäßig verteilt zu sein. Der Q-Q-Plot (Abbildung 106B) zeigt deutliche Abweichungen von einer Normalverteilung auf, mit Abweichungen in allen Quantilen. Der Scale-Location-Plot (Abbildung 106C) zeigt keine horizontale Linie, was auf eine größere Verteilung der Daten hinweist. Der Residuals vs. Leverage-Plot (Abbildung 106D) zeigt einen Datenpunkt nahe der Cook's Distance (Zeile 67). Dieser Datenpunkt könnte einen signifikanten Einfluss auf die Regression innehaben.

4.) Diskussion

Durch die Anwendung bereits bestehender histologischer Altersbestimmungsmethoden auf das im Rahmen dieser Dissertation experimentell verbrannte Knochenmaterial zeigte sich, dass neue Methoden für die histologische Individualaltersschätzung verbrannten Knochenmaterials dringend benötigt werden. Die bisherigen, speziell zu diesem Zweck erstellten Methoden (Hummel und Schutkowski, 1993), sind leider nicht in ausreichendem Maße praktikabel bzw. können nicht universal auf jedes Kollektiv angewendet werden. Auch histologische Altersbestimmungsformeln für unverbranntes Knochenmaterial sind nicht in geeignetem Maße auf verbrannte Knochen anwendbar (Wolf, 1999, Novacek, 2012). Die jüngsten, für verbranntes Rippenmaterial erhobenen Altersbestimmungsformeln sind ebenfalls nur eingeschränkt nutzbar, da im Leichenbrandmaterial häufig vorwiegend Langknochenfragmente erhalten sind (Absolonova et al., 2013). Durch die hohe temperaturbedingte Zerstörung der Knochenmikrostruktur der Rippen konnten durch Absolonova et al. bei der Erstellung ihres linearen Modells letztlich nur zwei histomorphometrische Parameter bewertet werden (Absolonova et al., 2013). Im Gegensatz dazu ist bei verbrannten Tibia- und Femurproben die Kompakta häufiger noch intakt und damit bewertbar. Es wurde zudem deutlich, dass (falls möglich) die bei der Kremierung vorherrschenden Verbrennungsstufen in die Regressionsformel bei der Erstellung des linearen Modells miteinbezogen werden sollten, da sich verschiedene Verbrennungsgrade unterschiedlich stark auf die Veränderung der Knochenmikrostruktur auswirken. Falls möglich wäre es zudem ratsam, das Geschlecht miteinzubeziehen, da sich Geschlechtsunterschiede auch in der Mikrostruktur verbrannten Knochenmaterials als detektierbar erwiesen haben. Um diese Geschlechtsunterschiede an Femur und Tibia noch weitreichender herausarbeiten zu können, wäre allerdings ein größeres Probenkollektiv nötig gewesen, als es im Rahmen dieser Dissertation zur Verfügung stand.

Allerdings darf dabei nicht außer Acht gelassen werden, dass der Erhalt eines solchen Kollektivs aus rechtsmedizinischem und forensischem Probenmaterial nicht selbstverständlich ist und stark von den zur Verfügung stehenden Proben abhängig ist.

Kollektive

Bei der Wahl der Kollektive muss zunächst bemerkt werden, dass es sich, aufgrund des Westfriedhofprobenkollektivs, insgesamt um ein stark überaltertes Kollektiv handelte. Die durch Grabauflösungen erhaltenen Femora und Tibiae stammen zumeist von Individuen aus der Altersklasse *Senilis*. Nur die Individuen WF45 (*Juvenis*), WF47 (*Adultas*), WF49 (*Maturitas*) und WF38 (*Maturitas*) fallen nicht in diesen Bereich. Auch das Probenmaterial aus dem rechtsmedizinischen Institut der LMU München setzt sich vorwiegend aus älteren Individuen zusammen, da sich diese wohl eher dazu bereit erklärt haben als Körperspender zu dienen, als jüngere Individuen (FS01-13, *Adultas*). Allerdings erwies sich dies als vorteilhaft für die zugrundeliegende Fragestellung bezüglich der Entwicklung von Altersbestimmungsformeln für senile (verbrannte) Individuen. Für eine allgemeinere Fragestellung wäre günstiger gewesen, ein Kollektiv desselben Probenumfangs zu untersuchen, welches gleichmäßig

zusammengesetzt ist aus Individuen aller Altersklassen. Allerdings lässt sich grundlegend auf das Probenmaterial solcher Studien nur in geringem Maße Einfluss nehmen.

Dem jüngsten Individuum des Datensatzes der Femora, Individuum WF45 (*Juvenis*) wurde von Hoke (Hoke, 2017) eine Knochenumbastörung zugeschrieben. Im Vergleich mit den von Pfeiffer et al. (Pfeiffer, 2006) beschriebenen Phasen zur Einteilung der Knochenmikrostruktur subadulter Individuen würde Individuum WF45 in die Stufen II-III fallen, was einem Individualalter von 5 bis 17 Jahren entspricht. Allerdings geht die Tendenz zu Stufe III, was einem Individualalter von 10 bis 17 Jahren entspricht und damit das Individualalter des Individuums WF45 von 16 Jahren inkludiert. Daher kann die von Hoke (Hoke, 2017) vermutete Knochenumbastörung nicht bestätigt werden.

Demzufolge wurde das Individuum bei der Auswertung verbrennungsbedingter Änderungen der Knochenmikrostruktur, dem Test der bestehenden Regressionsformeln und der statistischen Auswertung nicht aus dem Datensatz entfernt. Durch die Ausreißer-Entfernung wurden allerdings alle Daten von Individuum WF45 entfernt für die nachfolgende Erstellung der Regressionsmodelle und histologischen Altersbestimmungsformeln für **senile Individuen**.

Da das Westfriedhofsmaterial bereits in der Dissertation von Hoke (Hoke, 2017) verwendet wurde, konnte auf die Beprobung des Knochenmaterials kein Einfluss genommen werden. Die Beprobung des mittleren Femurschaftes, wie sie für die Dissertation von Hoke (Hoke, 2017) vorgenommen wurde, erwies sich dennoch als vorteilhaft. Dies lag daran, dass von Gocha und Agnew (Gocha und Agnew, 2016) festgestellt wurde, dass sich am mittleren Femurschaft eine OPD findet, welche das *chronologische Individualalter* am besten abbildet. Zudem eignet sich die anteriore Femurkompakta für die Erstellung von linearen Regressionsmodellen, da im Falle von kremiertem Knochenmaterial die Probenahme oft eingeschränkt ist. Das anteriore Femur ist jedoch oftmals im Leichenbrand erhalten und kann leicht auch von unerfahrenen Bearbeitern erkannt werden.

Bei der Versuchsdurchführung muss kritisch bemerkt werden, dass bei der Versuchsplanung nicht in Betracht gezogen wurde die Temperaturstufen der Verbrennungsreihe über die Positionen zu permutieren und nicht einheitlich für das gesamte Kollektiv der Verbrennungsreihe sich in der Verbrennungstemperatur von proximal nach distal gehend von 100 auf 1000 °C schrittweise um 100 °C zu steigern. Vorteilhafter wäre gewesen, die Verbrennungstemperaturen über die Positionen des Schaftes zu vermischen und nicht bei jeder Position stets dieselbe Verbrennungsstufe zu verwenden. So hätte sich sehen lassen, ob sich jede Position bei jeder Temperatur gleich verhält, oder ob Unterschiede bestehen. Allerdings ist der Vergleich zwischen RT und 1000 °C der Westfriedhofproben und auch das Probenmaterial aus der Rechtsmedizin positionsunabhängig und zufällig aus dem Schaft entnommen worden. Diese Proben stammen teils aus dem proximalen Bereich der Diaphyse, teils aus der Schaftmitte und teils aus dem distalen Bereich, wodurch eine höhere Durchmischung – zumindest für die höchste Temperaturstufe – gewährleistet ist. Dieser Versuch (RT vs. 1000 °C) diente auch dazu zu sehen, ob sich verschiedene, zufällig gewählte Positionen entlang des Schaftes bei dieser höchsten Verbrennungsstufe gleich verhalten.

Ebenfalls kritisch zu betrachten ist, dass bei der Probenahme des Probenmaterials des Münchner Westfriedhofs während der Grabaufösungen nicht vermerkt wurde, ob es sich bei den beprobten

Femora um die linke oder rechte Seite handelt. Dies wurde für diese Dissertation nicht miteinbezogen, da über die Individuen auch nichts bezüglich Vorerkrankungen bekannt war oder in Erfahrung gebracht werden konnte. Die zufällige Beprobung der Knochen ist auch für die Verbrennungsversuche und die erwünschte Applizierbarkeit auf Leichenbrandmaterial von Vorteil, da bei den kremierten Knochenfragmenten die Körperseite in den meisten Fällen auch nicht mehr bestimmt werden kann. Außerdem war es leider nicht möglich sowohl Tibiae als auch Femora derselben Individuen zu beproben, was einen Vergleich der Parameterzahlen im verbrannten und unverbrannten Zustand zwischen beiden Knochen ermöglicht hätte.

4.1) Makroskopische und farbliche Veränderungen

Bereits die makroskopischen Veränderungen der Knochenfragmente durch die verschiedenen einwirkenden Verbrennungstemperaturen hatten einen maßgeblichen Einfluss auf die Verwendbarkeit der Knochenfragmente zur histologischen Untersuchung.

Der *mittige Bereich* der Kompakta war für die überwiegende Anzahl der Individuen nach der Verbrennung intakt und lieferte zum Teil während der Auswertung stabilere (einheitlichere) Ergebnisse bezüglich der temperaturinduzierten Veränderungen als der *periostale Rand*. Zudem sollte der *mittige Bereich* das tatsächliche (kalendarische) Sterbealter des Individuums im histologischen Schnitt besser abbilden als der periostale Rand, da im *periostalen Bereich* durch appositionelles Dickenwachstum auch bei älteren Individuen neuer Knochen angebaut wird und die Struktur daher jünger erscheinen kann (Bell et al., 2001). Bei der Untersuchung konnte außerdem festgestellt werden, dass mikrobielle Degradation bzw. taphonomische Prozesse am verbrannten Knochenmaterial nicht mehr detektierbar sind im Vergleich zum unverbrannten Referenzprobenmaterial.

Die makroskopischen farblichen Veränderungen der verbrannten Proben verliefen konsistent zu den in der Literatur beschriebenen Farbwechseln durch Temperatureinwirkung (Shipman et al., 1984, Absolonova et al., 2012).

4.1.2) Schrumpfung und prozentualer Gewichtsverlust

Die *Femora* zeigten die größte Schrumpfung in Höhe, Dicke und Breite bei Verbrennungstemperaturen zwischen 900 und 1000 °C. Die Schrumpfung verlief weder innerhalb noch zwischen den Temperaturstufen einheitlich, sondern differentiell, wie auch von Thompson (Thompson, 2005) bei der experimentellen Verbrennung von Schafknochen festgestellt. Ebenso wie bei Thompson (Thompson, 2005) konnte am Kollektiv der Westfriedhofproben vereinzelt eine *negative* Schrumpfung beobachtet werden, bei der sich der Knochen durch eine hitzebedingte Torsion vergrößert statt verkleinert. Dies ließ sich beispielsweise bei einer Temperatur von 500 °C beobachten, da in diesem Temperaturbereich eine thermische Expansion im Knochen stattfindet (Harbeck et al., 2011), die für die Fragmentdicke eine Ausdehnung von ca. 11% zufolge hat. Der von Thompson (Thompson, 2005) durchgeführte *t-Test* bestätigte die Signifikanz der auftretenden Dimensionsunterschiede. Bei einer Temperatur von 200 bis 300 °C zeigte sich eine stärkere Schrumpfung in der Fragmentdicke als in Höhe und Breite, was sowohl der Degradation der organischen Matrix, als auch dem Austritt von Wasser nach dem Aufbrechen der

Hydroxylbindungen und dem Verlust des Kristallwassers zugrunde liegen könnte (Marques et al., 2018, Reidsma et al., 2016, Harbeck et al., 2011). Zwischen 600 und 700 °C war eine deutliche prozentuale Schrumpfung in allen drei untersuchten Dimensionen bemerkbar, was durch den CO₂-Verlust in diesem Temperaturbereich bedingt sein könnte (Harbeck et al., 2011) (Herrmann, 1976a, Marques et al., 2018). Über 700°C kommt es zu Veränderungen in der Kristallstruktur durch den Anstieg der Kristallgröße und der Neuordnung von OH⁻ und PO₄³⁻, wodurch eine weitere Schrumpfung in Höhe, Breite und Dicke hervorgerufen werden kann (Holden et al., 1995a, Marques et al., 2018, Harbeck et al., 2011, Greiner et al., 2018, Greiner et al., 2019).

Für die *Tibiae* zeigte sich eine Reduzierung der Schrumpfung in Höhe, Breite und Dicke ab einer Verbrennungstemperatur von 700 bis hin zu 1000 °C. Zuvor waren die hitzebedingten Schrumpfungen starken Schwankungen unterworfen. Dies ist dadurch zu erklären, dass es sich bei den Tibiaproben um ein wesentlich kleineres Kollektiv als bei den Femora handelte.

Bei beiden Probenkollektiven (*Femora* und *Tibiae*) zeigte sich bei den prozentualen Gewichtsverlusten zwischen 700 bis über 800 °C noch leichte eine Änderung auf. Nach Eckert et al. (Eckert et al., 1988) tritt zwischen 700 und 800 °C kein signifikanter Gewichtsverlust mehr auf, da die Organik bereits vollständig vergangen ist. Auch nach Herrmann (Herrmann, 1972a, Herrmann, 1976b) schreitet der Verlust der Organik bis zu einer Verbrennungstemperatur von 700 °C voran wodurch bis zu dieser Temperaturstufe der meiste Gewichtsverlust erfolgt. Ebenso bestehen die mineralogischen Veränderungen fort bis zu einer Verbrennungstemperatur von 650-750 °C, wodurch bis zu diesen Temperaturen noch weitere und größere Gewichtsverluste feststellbar sein sollten. Aber auch bei Verbrennungstemperaturen von 800 °C und höher finden im Bioapatit des Knochens mineralogische Veränderungen statt, wie beispielsweise die Entstehung von Buchwaldit (Greiner et al., 2019). Für die Schrumpfung in Höhe, Breite und Dicke deckt sich dies mit den verbrennungsbedingten Veränderungen an Rechtsmedizin- und Westfriedhofmaterial, welche bis über 800 °C hinaus bestehen. Allerdings handelt es sich bei den Kollektiven des Münchner Westfriedhofs um bodengelagertes Knochenmaterial, wenn auch manchmal mit relativ kurzer Liegezeit (acht bis 60 Jahre). Dadurch kann im Knochen bereits weniger Organik als ursprünglich vorhanden sein, wodurch die Schrumpfung möglicherweise bereits früher eintritt als bei frischem Knochenmaterial ohne Bodenlagerung.

Denkbare Fehlerquellen bei der Erhebung von Höhen-, Breiten- und Dickenschumpfung sowie dem Gewichtsverlust könnte die Position der Proben im verwendeten Muffelofen sein, da sich bei späteren Untersuchungen zeigte, dass nicht für alle Positionen im Ofen die gleiche Hitzeeinwirkung besteht. Positionen weiter vorne im Ofen waren weniger stark exponiert als solche etwas weiter hinten im Ofen. Zusätzlich hatte die Phase des Abkühlens einen Einfluss auf die Schrumpfung, da die Proben zum Abkühlen im Ofen gelassen wurden, um die tatsächlichen Zustände des Knochens im Nachgang einer Scheiterhaufenverbrennung ohne vorzeitiges Ablöschen und darauffolgendes Aufsammeln der Knochenreste zu imitieren. Dies diente zudem dem Zweck, die Proben nicht zu porös werden zu lassen, um ein anschließendes Einbetten nicht zu erschweren und im Anschluss histologische Schnitte der Knochenproben anfertigen zu können.

Einbeziehung eines Korrekturfaktors

Der hinzugezogene **Korrekturfaktor** aus Dicken- und Breitenschrumpfung konnte nur wenige an die Werte der unverbrannten Probe genäherte Ergebnisse für die histomorphometrischen Parameter erzielen. Trotz der individuellen Berechnung des Korrekturfaktors für jedes Individuum einzeln bei jeder Temperaturstufe. Für die meisten Individuen führte die Einbeziehung des Korrekturfaktors zu **schlechteren** Ergebnissen im Vergleich mit der unverbrannten Referenz. Daher scheint die Einbeziehung des Korrekturfaktors bei diesem Kollektiv nicht zu funktionieren.

Thompson (Thompson, 2005) beschreibt, dass die Anwendung eines Korrekturfaktors für die Schrumpfung nur dann sinnvoll ist, wenn die prozentuale Schrumpfung des betreffenden Knochens bekannt ist. Dies war hier nicht der Fall, da nur Knochenfragmente und nicht der ganze Langknochen verbrannt wurden. Nach Shipman et al. (Shipman et al., 1984) wird die prozentuale Schrumpfung anhand des ganzen Langknochens bewertet ($\left[\frac{(Größe_{vorher} - Größe_{nachher})}{Größe_{nachher}} * 100 \right]$), wodurch auch diese Methode nicht anwendbar war. Zudem ist die Schrumpfung generell nicht nur von der einwirkenden Verbrennungstemperatur, sondern vom Knochen selbst abhängig. Dabei spielen beispielsweise Knochendichte, Mineralgehalt oder Dauer der Hitzeexposition eine Rolle (Thompson, 2005, Eckert et al., 1988). Je höher der Mineralgehalt eines Knochens ist, desto weniger Schrumpfung tritt auf (Herrmann, 1977). Allerdings beschreibt Herrmann (Herrmann, 1977) eine disproportionale Schrumpfung, wodurch unter anderem Alters- und Geschlechtsdiagnose erleichtert werden. Grupe und Herrmann (Grupe und Herrmann, 1983) dagegen beschreiben eine geringere Schrumpfung durch einen erhöhten Mineralgehalt.

Da es sich bei den Westfriedhofproben um ein überaltertes Kollektiv handelt, ist dies möglicherweise nicht zwangsläufig vergleichbar mit einem Kollektiv, welches auch jüngere Individuen beinhaltet. Demzufolge können auch verbrennungsbedingte Einflüsse des Korrekturfaktors bzw. Schrumpfungsparmeters für das Westfriedhofkollektiv weniger aussagekräftig erscheinen, als dies für ein diverseres Kollektiv der Fall wäre. In diesem Fall wäre bei einem größeren Probenumfang, in welchem alle Altersklassen und Geschlechter gleichmäßig verteilt sind, die Berechnung eines solchen Korrekturfaktors pro Temperaturstufe besser möglich (Eckert et al. 1988). Darüber hinaus könnte die Dauer der Hitzeexposition im Muffelofen mit nur einer Stunde ab dem Erreichen der Zieltemperaturen und anschließendem Abkühlen im Muffelofen eventuell zu kurz sein. Vor allem im Vergleich zu prähistorischen Leichenverbrennungen, bei welchen die Temperaturen länger konstant gehalten wurden und die Verbrennung einen halben bis einen ganzen Tag andauerte (Wahl, 1981). Greiner et al. (Greiner et al., 2018) beschreiben einen entscheidenden Einfluss der Verbrennungsdauer auf das Eintreten mineralogischer Veränderungen. Diese mineralogischen Veränderungen, wie beispielsweise die Schrumpfung der Gitterparameter und der kristallographischen Elementarzelle, der Anstieg der Kristallgröße und Rekristallisierungsreaktionen nehmen darüber hinaus ebenfalls Einfluss auf die Schrumpfungsvorgänge des Knochens (Greiner et al., 2019, Greiner et al., 2018, Marques et al., 2018, Piga et al., 2018, Rogers und Daniels, 2002).

Anders als bei Thompson (Thompson, 2005) ging die prozentuale Schrumpfung der Westfriedhofproben auch bei einer Verbrennungstemperatur 1000 °C nicht über einen Prozentwert

von 30% hinaus bzw. konnte diesen nicht einmal erreichen. Dies könnte dadurch bedingt sein, dass im Gegensatz zu Thompson (Thompson, 2005) lediglich einzelne Knochenfragmente und nicht ganze Langknochen experimentell verbrannt worden sind. Leider sind dadurch auch die Regressionsformeln von Thompson (Thompson, 2005) zur Vorhersage der prozentualen Schrumpfung nicht anwendbar, da die verwendeten Parameter nicht derart quantifizierbar sind wie es für die Regressionsformel nötig wäre. Bei der Erstellung des multivariaten Modells nach Thompson (Thompson, 2005) wurden neben den dimensional Änderungen unter dem Einfluss von Temperatur und Verbrennungsdauer noch der Gewichtsverlust, Veränderungen in mechanischer Belastbarkeit, Veränderungen in der Kristallgröße und mikroskopische Porosität miteinbezogen und daraus Regressionsformeln zur Schrumpfungsvorhersage entwickelt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Verbrennung die Alters- und Geschlechtsdiagnose von Knochenmaterial maßgeblich beeinflusst (Thompson, 2005).

4.2) Mikroskopische Veränderungen

Farbliche Veränderungen

In dieser Arbeit konnten Veränderungen des farblichen Erscheinungsbildes im Kompaktadünnschnitt über hellbraun (200 °C) zu nahezu schwarz (300 °C) und darauffolgend unterschiedlichen Stufen der Braunfärbung (400-700 °C) zu einer grau-weißen Farbe (800-1000 °C) beobachtet werden. Dieselben verbrennungsbedingten Farbverläufe konnten auch bei anderen experimentellen Verbrennungsversuchen in dieser Form ermittelt werden (Holden et al., 1995a, Harbeck et al., 2011). Der hellbraunen Färbung (200 °C) der histologischen Schnitte liegt die Denaturierung des Kollagens zugrunde (Harbeck et al., 2011). Die Schwarzfärbung des histologischen Schnittes entsteht durch die Invasion oder Einlagerung primären Kohlenstoffs (Harbeck et al., 2011, Herrmann, 1972a). Die braune, grau-blaue bis schwarze Färbung, welche ab einer Temperatur von 300 °C im Knochen auftritt, kann außerdem durch die unvollständige Verbrennung organischer Substanzen im Knochen bedingt sein (Herrmann, 1972a). Durch die weitere Oxidation des Kohlenstoffs tritt anschließend eine allmähliche Aufhellung der Knochenmikrostruktur ein. Diese findet statt bis der Kohlenstoff gänzlich aus dem Knochen ausgetreten ist und dieser eine gräulich-weiße Färbung zeigt (Harbeck et al., 2011).

Die unterschiedlichen Farbveränderungen bei unterschiedlichen Verbrennungstemperaturen hatten auch einen signifikanten Einfluss auf die Sichtbarkeit der auszuwertenden histomorphometrischen Parameter. Bei 100 und 200 °C waren alle histologischen Strukturen gut erkennbar. Bei 300 °C dagegen konnten nahezu keinerlei Einzelstrukturen mehr ausgemacht werden. Lediglich Havers'sche Kanäle, nicht-Havers'sche Kanäle und Resorptionslakunen waren noch erkennbar. Zwischen 400 und 600 °C waren einzelne Parameter zumeist gut erkennbar, allerdings traten vermehrt Hitzerrisse in der Knochenmikrostruktur auf. Zwischen 700 und 1000 °C kam es zu einer kontinuierlichen Zunahme dieser Hitzerrisse und die histologischen Parameter konnten schlechter voneinander abgegrenzt werden, waren aber stets sichtbar und auswertbar. Auch bei Harbeck et al. (Harbeck et al., 2011) konnte ab 500 °C eine Zerstörung der Mikrostruktur und darüber hinaus eine reduzierte Doppelbrechung als Folge der Hitzeexposition festgestellt werden. Zudem erkannten sie, dass ab 800 °C die ursprüngliche histologische Organisation verschwindet, da keine strukturellen Elemente

mehr erkennbar sind. Dies kann anhand der in dieser Studie untersuchten Proben nicht bestätigt werden, da bis zu einer Verbrennungstemperatur von 1000 °C die histologischen Bilder zumeist gut ausgewertet werden konnten. Das deckt sich mit den Ergebnissen der Untersuchungen von Wolf (Wolf et al., 2017), in welchen die mikrostrukturellen Einheiten ab Temperaturen von 750-850 °C wieder gut erkennbar waren, nachdem sich die Diagnostizierbarkeit zuvor verschlechtert hatte. Diese Ergebnisse stimmen ebenfalls mit der Erkenntnis von Cattaneo et al. (Cattaneo et al., 1999) überein, dass die Knochenmikrostruktur (Havers'sche Systeme) bei Verbrennungstemperaturen zwischen 800 und 1200 °C noch analysierbar ist. Holden et al. (Holden et al., 1995a) legen dar, dass Osteone, Lamellen und Osteozytenlakunen nur bis 600°C intakt bleiben, da die Lamellen ab 800°C verloren gehen, Havers'sche Kanäle und Osteozytenlakunen ihre strukturelle Integrität aber bis zu einer Temperatur von 1400°C erhalten. Absolonova et al. (Absolonova et al., 2012) beschreiben, dass bei ihren experimentellen Verbrennungsversuchen an Rippenfragmenten (600-1000 °C) bei allen Verbrennungstemperaturen Mikrostrukturen präsent waren, allerdings konnten nur intakte Osteone und Havers'sche Kanäle eindeutig identifiziert werden. Sie bezeichnen die Knochenmikrostruktur bis zu einer Verbrennungstemperatur von 600 °C als nativ (unverändert). Castillo et al. (Fernandez Castillo et al., 2013) beschreiben ab 100 °C bereits eine Deformation der Havers'schen Kanäle, einhergehend mit Mikrofissuren, und ab 900 °C ein Bersten der Havers'schen Kanäle.

Wie auch bei Hanson und Cain (Hanson und Cain, 2007) konnte am untersuchten Probenmaterial beobachtet werden, dass sich die Hitzerrisse vom Havers'schen Kanal ausgehend verbreiten und es nach und nach zu einem Verlust der histologischen Strukturen kommt, der sich vor allem in den höheren Temperaturstufen manifestiert (vgl. Abbildung 18 und 21). Hanson und Cain (Hanson und Cain, 2007) konnten bei niedrigeren Verbrennungstemperaturen (100-200 °C) ebenfalls eine Schwarzfärbung der Knochenmikrostruktur durch Kohlenstoffablagerungen beobachten. Zuvor stellten auch sie keine maßgebliche Veränderung zwischen dem unverbrannten und verbrannten Knochen fest. In höheren Temperaturbereich beschrieben sie eine Abnahme der Sichtbarkeit histologischer Strukturen, welche weder bei den Proben aus der Rechtsmedizin noch für das Westfriedhofmaterial festgestellt werden konnte. Dies könnte daran liegen, dass die Dünnschnitte der verbrannten Proben vor der mikroskopischen Untersuchung bei Hanson und Cain (Hanson und Cain, 2007) nicht mit einer Tellerschleifmaschine heruntergeschliffen wurden, um die Sichtbarkeit der Mikrostruktur zu erhöhen und Strukturüberlagerungen zu entfernen. Sie stellten darüber hinaus auch für die von ihnen untersuchten unverbrannten Proben Risse im histologischen Schnitt fest. Hierdurch schlossen sie darauf, dass Risse in der Knochenmikrostruktur nicht zwangsläufig verbrennungsbedingt auftreten müssen. Für die unverbrannten Vergleichsproben aus Rechtsmedizin- und Westfriedhofmaterial konnten allerdings keine solche Risse im histologischen Schnitt, verursacht durch Bodendruck oder ähnliches, beobachtet werden.

4.3) Femora

4.3.1) Test bestehender histologischer Altersbestimmungsmethoden

Der nachfolgende Abschnitt befasst sich mit der Erläuterung und Diskussion der getesteten histologischen Regressionsformeln zur Sterbealtersschätzung sowie dem Test auf verbrennungsbedingte Veränderungen dieser Formeln gefolgt von einem abschließenden Fazit.

Regressionsformeln nach Ericksen (1991)

Der Regressionstest im **periostalen** Bereich der Femurkompakta auf die von Ericksen (Ericksen, 1991) entwickelten geschlechtsspezifischen und unspezifischen Regressionsformeln zeigte, dass sowohl für das unverbrannte als auch das verbrannte Probenmaterial die geschlechtsunspezifischen Formeln bessere Ergebnisse liefern als die geschlechtsspezifischen Formeln. Zumeist wurden bei verbrannten und unverbrannten Proben durch die Anwendung der Regressionen die Individuen histologisch zu jung eingeschätzt. Allerdings traf dies vorwiegend auf die älteren Individuen zu, wohingegen die jüngeren Individuen (WF45 und WF38) tendenziell eher zu alt eingeschätzt wurden. Für die Auswertung im **mittigen** Bereich der Femurkompakta wurden bei allen Formeln (geschlechtsspezifisch und unspezifisch) die Individuen überwiegend zu jung geschätzt. Nur bei der geschlechtsunabhängigen Formel konnten bei unverbrannten und verbrannten Proben Altersschätzungen erzielt werden, welche innerhalb der Grenzen der Standardabweichung der Regressionsformel lagen.

Die Verwendung geschlechtsspezifischer Regressionsformeln im **periostalen** und **mittigen** Bereich der Femurkompakta brachte für die *weiblichen* Individuen weitaus größere Abweichungen als für die *männlichen* Individuen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass das Kollektiv der männlichen Individuen mit den Individuen WF45 und FS01-13 solche Individuen beinhaltet, welche in die Altersklasse *Juvenis* bzw. *Adultas* fallen, wohingegen bei den weiblichen Individuen nur die Altersklassen *Maturitas* und *Senilis* vorliegen. In der Tat wurde das männliche Individuum WF45 mithilfe der geschlechtsspezifischen Regressionsformel dagegen deutlich zu alt geschätzt. Da sich allerdings für die unverbrannten Proben entlang des Femurschaftes die gleiche Entwicklung zwischen tatsächlichem und errechnetem Individualalter zeigte konnte geschlossen werden, dass durch die Applizierung verschiedener Verbrennungstemperaturen keine Verschlechterung der Ergebnisse (Differenz zwischen histologischem und tatsächlichem Alter) eintrat. Es konnten tendenziell geringere Differenzen zwischen tatsächlichem und errechnetem Alter erzielt werden.

Durch die Verbrennung der Knochenfragmente und die damit verbundene Schrumpfung der Knochenmikrostruktur und Anhäufung der histomorphometrischen Parameter scheinen die Individuen demnach nicht mehr als zu jung eingeschätzt werden. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Individuen aus dem von Ericksen (Ericksen, 1991) verwendeten Kollektiv zum Einen eine andere Altersverteilung als das im Rahmen dieser Studie verwendete Kollektiv aufweist, zum anderen könnte dies auf eine leicht abweichende Organisation der Knochenmikrostruktur durch die heterogene ethnische Zusammensetzung ihres Kollektivs hinweisen. Tatsächlich war das von Ericksen (Ericksen, 1991) zur Erstellung der Regressionen verwendete Kollektiv von der Altersverteilung allerdings ähnlich dem in dieser Arbeit vorliegenden Probenkollektiv, da sich insgesamt nur zwei Individuen darin fanden,

welche jünger als 20 Jahre waren und das mittlere Alter des Kollektivs bei 70 Jahren lag (Cosgriff-Hernández, 2012). Somit würden die Unterschiede eher auf der ethnischen Zugehörigkeit der Individuen beider Kollektive basieren. Die ethnische Zusammensetzung des Kollektivs aus Westfriedhof- und Rechtsmedizinprobenmaterial ist nicht genau bekannt, allerdings dürfte sie eher homogen ausfallen mit einer überwiegenden Anzahl an Individuen europäischen Ursprungs. Pfeiffer et al. (Pfeiffer et al., 2016) und Ericksen (Ericksen, 1991) verweisen in ihren Untersuchungen auf die Wichtigkeit populations- bzw. ethniespezifischer Altersbestimmungsmethoden. Pfeiffer et al. (Pfeiffer et al., 2016) weisen allerdings darauf hin, dass in ihren Untersuchungen spezifische Methoden im Schnitt um 50% falsche Ergebnisse lieferten, Ethnie-unspezifische Formeln dagegen bessere Ergebnisse bringen. Die Unterschiede bzw. Differenzen zwischen tatsächlichem und histologisch geschätztem Individualalter könnten auch dadurch erklärt werden, dass in dem von Ericksen (Ericksen, 1991) verwendeten Kollektiv speziell darauf geachtet wurde, keine Individuen auszuschließen – auch nicht bei möglichen vorliegenden Krankheiten. Ein weiterer Grund für die stark über die Grenzen der formeleigenen Standardabweichung hinausgehenden Differenzen zwischen tatsächlichem und histologischem Alter könnte eine unterschiedliche Definition bzw. Auslegung der histomorphometrischen Parameter sein. Dies könnte beispielsweise die unterschiedliche Bewertung am Rande des Gitternetzes gelegener Osteone sein oder die unterschiedliche Beurteilung von primären Osteonen (als osteonaler oder nicht-umgebauter Knochen). Allerdings wurde sich bei der Festlegung der Auswertungskriterien für die vorliegende Arbeit auch an der Definition der histomorphometrischen Parameter durch Ericksen (Ericksen, 1991) orientiert (vgl. Material und Methoden, Kapitel 2.2.7). Dieser Mangel an festgelegten Definitionen zur Auswertung histomorphometrischer Parameter für die Vergleichbarkeit von Studien wird auch in der Literatur bemängelt (Crowder et al., 2016, Iwaniec et al., 1998).

Für die Verwendung der Methoden nach Ericksen (Ericksen, 1991) ist grundlegend die Einbeziehung der Anzahl an Typ-II-Osteonen in die Regression zur histologischen Individualaltersschätzung als problematisch einzuordnen, da sich Typ-II-Osteone in der Knochenmikrostruktur – und allem voran bei verbranntem Probenmaterial – häufig nicht oder nicht eindeutig von „Growth-Arrest“-Osteonen unterscheiden lassen. Dies kann zu einer deutlichen Überschätzung der Anzahl der Typ-II-Osteone führen kann, was wiederum einen Einfluss auf das Ergebnis der histologischen Altersbestimmung nimmt. Problematisch bei der Verwendung der Regressionsgleichungen nach Ericksen (Ericksen, 1991) ist zudem, dass in ihrer Studie der Einfluss von externen Umweltfaktoren wie Ernährung, Arbeitsbelastung oder auch Krankheiten auf das Remodelling nicht berücksichtigt wurden, obwohl darauf geachtet wurde, kranke Individuen bewusst nicht aus dem Datensatz auszuschließen. Im Rahmen dieser Studie wurde dagegen darauf geachtet, solche Individuen mit osteoporotisch veränderter Knochenmikrostruktur nicht in die Auswertung und spätere Erhebung multivariater linearer Modelle miteinzubeziehen, um einen solchen weiteren, externen und nicht beeinflussbaren Einflussfaktor zu eliminieren.

Regressionsformeln nach Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978) für intakte Osteone

Die von Kerley (Kerley, 1965) entwickelte und von Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) korrigierte Regressionsformel für die Anzahl intakter Osteone zeigte im **periostalen** Bereich der Femurkompakta auch in diesem Fall meist eine Unterschätzung des Individualalters der Individuen. Allerdings konnten bei dieser Regressionsformel mehr histologische Alterswerte erzielt werden, welche sich innerhalb der Grenzen der formeleigenen Standardabweichung befanden. Auch im **mittigen** Bereich der Femurkompakta zeigte sich, dass tendenziell alle Individuen bis auf Individuum WF45 zu jung eingeschätzt wurden. Dies könnte darauf hinweisen, dass das von Kerley (Kerley, 1965) bei der Etablierung seiner multivariaten linearen Regressionsmodelle verwendete Kollektiv eine andere Altersstruktur (mit einem wesentlich höheren Anteil jüngerer Individuen) aufwies als das im Rahmen der Dissertation verwendete Kollektiv aus Westfriedhof- und Rechtsmedizinproben. Dadurch wäre auch erklärbar, weshalb sowohl für unverbrannte als auch für verbrannte Proben die Differenzen zwischen tatsächlichem und errechnetem Alter stark über die Grenzen der Standardabweichung hinausgehen und sich nur bei WF45 (Altersklasse *Juvenis*) alle errechneten Differenzen innerhalb der Standardabweichung bewegen.

Regressionsformeln nach Kerley (1965) bzw. Kerley und Ubelaker (1978) für Osteonfragmente

Bei der periostalen Auswertung der verbrannten und korrespondierenden unverbrannten Proben mithilfe der Regressionsformel von Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) für Osteonfragmente lagen die Differenzen am **Periost** zwischen tatsächlichem und histologisch geschätztem Alter ebenfalls häufiger innerhalb der Grenzen der formeleigenen Standardabweichung als bei der Verwendung der geschlechtsunabhängigen Regression nach Ericksen (Ericksen, 1991). Allerdings zeigte sich bei den verbrannten Proben generell eine größere Abweichung zu den Grenzen der Standardabweichung. Dies lässt darauf schließen, dass der Einfluss der Verbrennungstemperatur die Ergebnisse stärker als für die unverbrannten Referenzproben abweichen lässt.

Für den **mittigen** Bereich der Femurkompakta konnten im Vergleich zu allen anderen verwendeten Regressionsformeln die *besten* Ergebnisse (unverbrannt und verbrannt), mit den geringsten Abweichungen zwischen histologisch geschätztem und tatsächlichem Alter, erzielt werden. Dies könnte darauf hindeuten, dass diese Formel die temperaturbedingte Abwandlung der Knochenmikrostruktur kompensiert. Zum Anderen weist dies darauf hin, dass der *mittige* Bereich der Femurkompakta sich für eine histologische Altersbestimmung unverbrannter und verbrannter Proben bei dieser Formel besser eignet, als der *periostale* Rand des Knochenfragments. Der *periostale* Rand kann starken verbrennungsbedingten Veränderungen unterliegen, da die Hitze der Verbrennung von außen nach innen in den Knochen eindringt. Andererseits kann er durch taphonomische oder verbrennungsbedingte Prozesse auch nichtmehr gänzlich intakt vorliegen, was eine Auswertung, konzentriert auf den periostalen Rand, deutlich erschwert. Durch das periostale Dickenwachstum der Knochenmikrostruktur ist zudem im periostalen Bereich die Knochenmikrostruktur stets jünger als das tatsächliche *biologische bzw. kalendarische Alter* des Individuums, da dort neue Knochenstruktur

angebaut wird. Dagegen bildet der mittige Bereich der Kompakta eher das biologische bzw. kalendarische Alter des Individuums ab, da hier der Knochen bereits umgebaut wird, während im periostalen Bereich noch appositionelles Dickenwachstum erfolgt (Bell et al., 2001). Dieses appositionelle Dickenwachstum kann auch bei senilen Individuen teils noch vorhanden sein, um die Integrität des Knochens zu gewährleisten (Lazenby, 1990a, Lazenby, 1990b, Burr, 2002).

Generell birgt die Verwendung der Regressionsformeln nach Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) ein hohes Fehlerpotenzial durch die Notwendigkeit der Applizierung eines Korrekturfaktors zur Anpassung des Mikroskopsichtfeldes an das jeweilig verwendete Mikroskop (Novacek, 2012, Wolf, 1999). Aber auch die Tatsache, dass in der vorliegenden Arbeit keine vier verschiedenen histologischen Felder an vier verschiedenen Positionen gezählt wurden, sondern ein Mittelwert der Zählungen gebildet und dieser mit dem Faktor vier multipliziert wurde, birgt ein hohes Fehlerpotenzial. Durch die Bildung des Mittelwertes der Zählungen wird der Wert gerundet, was auf die Ergebnisse der Berechnung des histologischen Alters Einfluss nehmen kann.

Dies wurde so gehandhabt, da vor allem im prähistorischen Leichenbrand oft nur ein Fragment eines Knochens vorhanden ist, bzw. nur dieses eine Fragment mit Sicherheit auch nur einem Individuum zugewiesen werden kann. Bei mehreren unterschiedlichen Fragmenten hingegen kann nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden, dass diese von unterschiedlichen Individuen stammen – auch wenn sonst keine Hinweise auf eine Doppel- oder Mehrfachbestattung vorliegen. Die Auswertung im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde nur an der anterioren Femurdiaphyse durchgeführt, da diese sich zum Einen aufgrund ihres hohen Wiedererkennungswertes auch bei verbranntem Knochenmaterial gut eignet. Zum anderen ist diese Struktur im Leichenbrandmaterial auch erfahrungsgemäß häufiger vorhanden als andere Abschnitte der Diaphyse. Basierend auf den Erkenntnissen von Müller (Müller, 2017) und Mussauer (Mussauer, 2017) ist dies legitim, da sich das histologische errechnete Alter über die Diaphyse des anterioren Femurschaftes nicht verändert.

Regressionsformel nach Hummel und Schutkowski (1993)

Die mittels der Regressionsformel nach Hummel und Schutkowski (Hummel und Schutkowski, 1993) errechneten Alterswerte (**periostal** und **mittig**) sind für alle einbezogenen Individuen deutlich geringer als das tatsächliche Sterbealter der Individuen. Dass die Individuen bei der Verwendung dieser, speziell für Leichenbrandmaterial entwickelten, Methode zur histologischen Individualaltersschätzung nahezu in jedem Fall zu jung geschätzt wurden könnte zum einen daran liegen, dass bei dieser Methode ausschließlich die Havers'schen Kanäle zur Auswertung herangezogen werden. Ein sekundäres Osteon sowie ein Osteonfragment wird damit auch nur durch seinen Havers'schen Kanal als solches identifiziert. Allerdings könnte es sich dabei vor allem bei verbranntem Probenmaterial durch die schlechte Erkennbarkeit aufgrund der verbrennungsbedingten Veränderung der Knochenmikrostruktur auch um nicht-Havers'sche Kanäle, angeschnittene Volkmann'sche Kanäle, Hitzerrisse oder sogar sich gerade in der Entwicklung befindende Resorptionslakunen handeln. Dies wiederum könnte zu einer deutlichen Fehleinschätzung (Über- bzw. Unterschätzung) des

histologischen Alters führen. Zum anderen sind Havers'sche Kanäle bei verbranntem Probenmaterial, vor allem bei einer Verbrennungstemperatur von 300 °C durch den Einfluss primären Kohlenstoffs, teilweise nicht eindeutig oder nicht erkennbar. Da auch die unverbrannten Proben die gleiche hohe Abweichung zwischen tatsächlichem und errechnetem Individualalter aufzeigen, wird deutlich, dass die Anwendung der sowohl für unverbrannte als auch für verbrannte Proben ungenaue Ergebnisse liefert. Die histologische Altersbestimmung nach Hummel und Schutkowski (Hummel und Schutkowski, 1993) muss auch deshalb kritisch betrachtet werden, da sie innerhalb ihrer Veröffentlichung ihre eigens aufgestellte Regressionsformel korrigieren, weil diese durch ein Individuum mit krankhafter Veränderung der Knochenmikrostruktur negativ beeinflusst worden war. Da dies nicht auf Anhieb erkannt wurde, kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich in dem restlichen Datensatz weitere Individuen befanden, welche eine krankhafte Veränderung der Knochenmikrostruktur aufwiesen, und ebenfalls nicht erkannt wurden.

Fazit

Nach Absolonova et al. (Absolonova et al., 2013) sind Regressionsformeln, welche für unverbranntes Knochenmaterial erhoben wurden, generell nicht auf Leichenbrand anwendbar. Dies konnte durch den Test auf verbrennungsbedingte Veränderungen der Regressionsformeln nur bedingt bestätigt werden. Die Prüfung der zuvor getesteten Regressionsformeln ergab, dass sowohl die Methode zur histologischen Altersbestimmung nach Ericksen (Ericksen, 1991), als auch die Methode nach Hummel und Schutkowski (Hummel und Schutkowski, 1993) und die Methode nach Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) für beiderlei Probenarten – unverbrannt und verbrannt – ungenaue Ergebnisse liefern. Nur die Methode nach Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) für Osteonfragmente lieferte für den mittigen Bereich der Femurkompakta teils zufriedenstellende Ergebnisse. Dies war besonders für die Methode nach Hummel und Schutkowski (Hummel und Schutkowski, 1993) entgegen der Erwartungen, da diese speziell für die Anwendung auf Leichenbrandmaterial verschiedener Verbrennungsstufen entwickelt wurde. Allerdings wurde die ursprüngliche Regressionsgleichung von Hummel und Schutkowski (Hummel und Schutkowski, 1993) noch innerhalb der Publikation nachgebessert da aufgefallen war, dass für die experimentellen Verbrennungsversuche mit anschließender Auswertung der Knochenmikrostruktur ein Individuum herangezogen wurde, welches unter Osteoporose litt. Demnach kann möglicherweise nicht ausgeschlossen werden, dass sich auch unter den übrigen Individuen solche mit krankhaft veränderter Knochenmikrostruktur befanden und die Ergebnisse der histologischen Altersschätzung (unverbrannt und verbrannt) dadurch zu stark vom Individualalter abweichen. Für keine der verwendeten Formeln konnte im periostalen Bereich der Kompakta eine signifikante verbrennungsbedingte Verschlechterung der Ergebnisse herausgearbeitet werden. Dies widerspricht der bisher noch geläufigen Annahme, dass an Leichenbrand einerseits keine histologische Altersbestimmung vorgenommen werden kann und andererseits bestehende histologische Altersbestimmungsformeln nicht auf verbranntes Skelettmaterial angewendet werden können, da sich die errechneten Altersschätzungen dadurch stark verschlechtern würden. Zwar konnte festgestellt

werden, dass die geprüften Methoden zur histologischen Individualaltersschätzung in ihren Ergebnissen stark vom tatsächlichen Alter des Individuums abweichen, allerdings galt dies gleichermaßen für unverbrannte wie auch für verbrannte Proben. Erstaunlich war zudem, dass die Formel für Osteonfragmente nach Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) von allen getesteten Formeln die besten Ergebnisse für unverbrannte und verbrannte Proben lieferte. Die Tatsache, dass sich letzten Endes eine der Regressionsformeln entwickelt von Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley and Ubelaker, 1978) auch als geeignet für die Individualaltersschätzung verbrannter und unverbrannter Individuen erwiesen hat, deckt sich mit den Ergebnissen der Studie von Aiello und Molleson (Aiello und Molleson, 1993). Sie verglichen die Methoden zur histologischen Individualaltersschätzung von Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) und Samson und Branigan (Samson und Branigan, 1987) mit den Ergebnissen makroskopischer Altersbestimmungen altersbekannter unverbrannter Individuen, wobei die Methode nach Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) die genauesten Ergebnisse lieferte. Nichtsdestotrotz befürworteten sie eine zusätzliche makroskopische Beurteilung. Walker et al. (Walker et al., 1994) erzielten dagegen für ihren Test der Regressionsformeln nach Kerley (Kerley, 1965) eine mittlere Differenz zwischen chronologischem und geschätztem Alter von 20,95 Jahren bei ihrem (unverbrannten) Probenmaterial, weshalb sie die Methode nicht für die Anwendung zur histologischen Altersbestimmung empfahlen. Dabei liegt diese mittlere Differenz noch deutlich unter den in dieser Arbeit erzielten Extremwerten von unter -50 bzw. über +100 Jahren. Novacek (Novacek, 2012) und Wolf (Wolf, 1999) verwendeten die Methode nach Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) unter Einbeziehung eines Korrekturfaktors für das Sichtfeld des verwendeten Mikroskops und erzielten für ihr Probenmaterial einigermaßen zufriedenstellende Ergebnisse, vor allem in Anbetracht dessen, dass es sich um die Anwendung einer histologischen Altersbestimmungsmethode an Leichenbrandmaterial handelte. Die in dieser Arbeit festgestellte breite und unsystematische Streuung der Alterswerte (verbrannt und unverbrannt) deckt sich allerdings auch mit den Erkenntnissen der Arbeitsgruppe, wodurch von einer Verwendung der von Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) entwickelten Formeln abgeraten werden muss.

Ein weiterer Einflussfaktor, der zu den zum Teil gravierenden Unterschieden zwischen histologischem und tatsächlichem Alter der Individuen geführt haben könnte ist die Problematik, dass Alters- und Geschlechtsverteilungen von Stichproben prähistorischer Populationen nicht mit denen heutiger Populationen verglichen werden können und deren Alters- und Geschlechtsverteilung nicht als Populationsvarianz interpretiert werden sollten (Crowder et al., 2016). Abweichende Differenzen zwischen tatsächlichem und errechnetem Sterbealter eines Individuums über die Grenzen der formeleigenen Standardabweichungen hinaus können zudem von der Entnahmestelle des Knochenfragments aus dem Langknochenschaft beeinflusst sein (Pfeiffer et al., 1995). Auch durch die natürlich vorkommende Variation in der Alterungsgeschwindigkeit von Individuen wird die Genauigkeit histologischer Altersbestimmungsformeln limitiert (Maat et al., 2006). Generell können auch Unterschiede in der physischen Aktivität der Populationen anhand derer die Regressionsformeln

erstellt wurden, zu denen im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Population Divergenzen in der histologischen Altersbestimmung bewirken. Ebenso können taphonomische Effekte oder generelle methodische Unterschiede die Anwendbarkeit von Formeln begrenzen (Crowder et al., 2016). Grundlegend wäre ein Standard sowohl zur Beprobung der Knochen als auch zur Beurteilung der histomorphometrischen Parameter, zur universalen Anwendbarkeit und zum Vergleich verschiedener histologischer Altersbestimmungsmethoden hilfreich (Crowder et al., 2016, Iwaniec et al., 1998). Gemeinhin weist die Literatur aber auch gehäuft auf ein Problem der histologischen (und auch morphologischen) Individualaltersbestimmung seniler Individuen hin (Walker et al., 1994). Ziel dieser Arbeit war es daher, dieses Problem der histologischen Altersbestimmung seniler Individuen in Angriff zu nehmen.

Tibia

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Tests zweier histologischer Altersbestimmungsmethoden am Kollektiv der Tibiae (periostal und mittig) diskutiert. Dieser Test konnte aufgrund der geringen Probenumfangs nur exemplarisch für die Verbrennungsreihen der Tibiae im periostalen und mittigen Bereich der Kompakta durchgeführt werden.

Für die Regressionsformel nach **Kerley** (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) für **intakte Osteone** verhielt es sich am periostalen Rand und in der Kompaktamitte der Tibiae wie bei den zuvor untersuchten Verbrennungsreihen der Femora. Die Regressionsformel nach **Kerley** (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) für **Osteonfragmente** lieferte am Periost der Tibiakompakta ebenfalls die gleichen Ergebnisse wie zuvor bei den Femora. In der Kompaktamitte ließen sich allerdings, im Gegensatz den Ergebnissen für den Datensatz der Femora nicht die besten Ergebnisse der histologischen Altersschätzung erzielen. Für den Datensatz der Tibiae waren demnach alle verwendeten histologischen Altersbestimmungsmethoden nach Kerley (Kerley, 1965) bzw. Kerley und Ubelaker (Kerley und Ubelaker, 1978) nicht gut anwendbar, sowohl für die verbrannten als auch für die unverbrannten Proben.

Die Formel nach **Uyterschaut** (Uyterschaut, 1985) wurde speziell für die histologische Altersbestimmung der Tibiae gewählt. Dabei zeigte sich **periostal**, dass der Einfluss der Verbrennungstemperaturen bei der histologischen Altersschätzung nur bei der Hälfte der Individuen eine Rolle spielte. Diese Formel brachte somit für die Hälfte der Individuen schlechte, für die andere Hälfte gute Ergebnisse und schien unter einem verbrennungsbedingten Einfluss zu stehen. Daher scheint diese Formel von allen drei angewendeten linearen Regressionsformeln am **periostalen** Rand der Tibiae am besten geeignet zu sein. Dagegen traten sich auch bei der Regressionsformel nach Uyterschaut (Uyterschaut, 1985) in der **Kompaktamitte** keine Veränderungen der Altersschätzungen durch den Einfluss der Verbrennungstemperaturen auf.

Fazit

Für die Tibiae zeigte sich am **periostalen Rand** der Kompakta eine leichte verbrennungsbedingte Veränderung der Ergebnisse aus den histologischen Altersbestimmungsformeln im Vergleich mit den

Ergebnissen für die unverbrannten Referenzen. Diese temperaturinduzierten Veränderungen konnten für den **mittigen** Bereich der Tibiakompakta nicht erkannt werden. Dies führte zu dem Schluss, dass es sich zwar am Periost bereits um eine dicht gepackte Knochenmikrostruktur handelt, diese aber weniger dicht gepackt ist als in der **Kompaktamitte**, weswegen noch geringfügige schrumpfungsbedingte Änderungen in der Zusammensetzung der histomorphometrischen Parameter entstehen können.

4.3.2) Veränderungen der histomorphometrischen Parameter

Im Folgenden werden die verbrennungsbedingten Veränderungen der untersuchten histomorphometrischen Parameter erläutert und diskutiert. Eingehend stellt sich zunächst die Frage, ob diese verbrennungsbedingten Veränderungen, welche unter Laborbedingungen in einem Muffelofen generiert wurden, auch die tatsächlichen Veränderungen einer Scheiterhaufenverbrennung abbilden können. Durch solche experimentellen Verbrennungen können selbstverständlich nicht die gesamten Veränderungen, inklusive hitzebedingter Fissuren, Verdrehungen und Krümmungen, wie sie an Knochenmaterial aus Scheiterhaufenverbrennungen beobachtet werden können, abgebildet werden (Fairgrieve, 2007, Symes et al., 2008, Gonçalves et al., 2011). Allerdings beschreiben mehrere Autoren, dass die Schrumpfungen und Veränderungen in der Knochenmikrostruktur grundsätzlich vergleichbar sind (Absolonova et al., 2012, Hanson und Cain, 2007). Daher wurde nachfolgend davon ausgegangen, dass die experimentellen Verbrennungsversuche und deren Resultate valide Abbildungen der „realen“ Bedingungen bzw. Veränderungen einer Scheiterhaufenverbrennung darstellen.

Osteone, Osteonfragmente, nicht-Havers'sche Kanäle und Resorptionslakunen

Der kontinuierliche Anstieg in der Anzahl **sekundärer und intakter Osteone** mit steigender Verbrennungstemperatur im *periostalen* und *mittigen* Bereich der Femurkompakta kann durch die Schrumpfung des Knochens und eine damit einhergehende Anhäufung dieser Strukturen pro Flächeneinheit erklärt werden.

Bei den **Osteonfragmenten** ließ sich in der *periostalen Kompakta* zunächst ein temperaturbedingter Anstieg feststellen, der sich nach distal gehend allerdings wieder reduzierte. Sowohl im *periostalen* als auch im *mittigen* Bereich zeigten die Osteonfragmente nur einen Anstieg von maximal 15% im Vergleich zum Ausgangswert. Dies könnte durch die schlechtere Erkennbarkeit von Osteonfragmenten ab einer Verbrennungstemperatur von 700-800 °C bedingt sein, was zu einer Unterschätzung dieser Struktureinheit führt. Tendenziell sollte sich auch für die Osteonfragmente ein deutlicherer Anstieg mit steigender Verbrennungstemperatur zeigen, bedingt durch die Akkumulierung histomorphometrischer Parameter pro Flächeneinheit aufgrund der verbrennungsbedingten Schrumpfung der Knochenmatrix.

Die Einbeziehung von Osteonfragmenten in die Auswertung, welche am Rand des Gitternetzes lagen, könnte zudem auch zu einer generellen Überschätzung der Gesamtzahl an Osteonfragmenten im unverbrannten oder nur geringfügig verbrannten Zustand führen, wodurch sich Unterschiede zu

späteren stärkeren Verbrennungsstadien ergeben. Alternativ könnten am Rand des Gitternetzes gelegene Osteonfragmente fälschlicherweise als Generallamellen interpretiert werden, wodurch sich eine Unterschätzung der Gesamtzahl ergibt (Maat et al., 2006). Auch Missinterpretationen des Osteonschweifs driftender Osteone, wie sie häufig bei jüngeren Individuen (bspw. WF45) vorkommen (Robling und Stout, 1999, Pfeiffer, 2006), können zu einer Überschätzung der Zahl der Osteonfragmente insgesamt führen. Osteonschweife waren vor allem im unverbrannten Zustand und in niedrigen Temperaturbereichen erkennbar.

Die Anzahl der **nicht-Havers'schen Kanäle** schwankt sowohl bei unverbrannten Referenzproben entlang der Positionen der Diaphyse als auch über die verschiedenen Temperaturen der Verbrennungsreihe stark. Nicht-Havers'sche Kanäle können in der lichtmikroskopischen Untersuchung nur schwer von primären Osteonen unterschieden werden, da vor allem bei den verbrannten Proben die wenigen konzentrischen Lamellen des primären Osteons kaum erkannt werden können, wodurch es zu einer falschen Zuordnung kommen kann. Dadurch steigt die Zahl der nicht-Havers'schen Kanäle mit der Verbrennungstemperatur bzw. Position an.

Laut Kerley (Kerley, 1965) liegen bei Individuen älter als 55 Jahre sogar keinerlei nicht-Havers'sche Systeme mehr vor, was anhand der im Rahmen dieser Arbeit vorliegenden Kollektive jedoch falsifiziert werden konnte, da sich auch bei älteren Individuen vereinzelt nicht-Havers'sche Kanäle fanden. Allerdings konnte die größte Anzahl an nicht-Havers'schen Systemen bei dem jüngsten Individuum der Datensätze – WF45 – beobachtet werden.

Da die durchgeführten experimentellen Verbrennungsversuche auch auf prähistorisches Leichenbrandmaterial oder rezente verbrannte menschliche Knochenüberreste übertragbar sein sollen, wurde die Knochenmikrostruktur so ausgezählt, wie sie tatsächlich im histologischen Bild erkennbar war. Ohne etwaiges Vorwissen, wie beispielsweise die Verbrennungstemperatur, in Betracht zu ziehen oder zu berücksichtigen. Demzufolge wurde ein Havers'scher Kanal, wenn er nicht aussah wie ein sekundäres oder Typ-II-Osteon durch verbrennungsbedingte Veränderungen (z.B. keine konzentrischen Lamellen) als nicht-Havers'scher Kanal gewertet. Grund dafür war, dass bei der Beurteilung histologischer Schnitte prähistorischen Leichenbrandmaterials auch nur eine grobe Einschätzung der vorherrschenden Verbrennungstemperatur vollzogen werden kann und die Struktur daher nur so beurteilt werden kann, wie sie im histologischen Schnitt gesehen wird. Daher war bei der Auswertung der histologischen Schnitte auch das tatsächliche Individualalter der Individuen zunächst nicht bekannt, um dabei eine Beeinflussung zu vermeiden.

Die Zahl der **Resorptionslakunen** nimmt generell vom Endost zum Periost ab, da hier der Hauptanteil des Knochenabbaus besteht (Martin et al., 1998). Durch die temperaturbedingte Annäherung aller drei Bereiche und eventuelle ungleichmäßige Hitzeeinwirkungen auf das Knochenfragment kann die Varianz in der Zahl der Resorptionslakunen über die Temperaturen der Verbrennungsreihe in Richtung des Diaphysenendes erklärt werden, da auch hier die Kompakta dünnwandiger wird je näher man den Femurkondylen kommt, wodurch sich **Periost** und **Endost** bzw. **Mitte** und **Endost** einander annähern.

Typ-II-Osteone und Volkmann'sche Kanäle

Die Interpretation und Diskussion verbrennungsbedingter Veränderungen nicht-Havers'scher und Volkmann'scher Kanäle, Typ-II-Osteone sowie der Resorptionslakunen gestaltet sich schwierig, da sich diese Parameter sowohl im **periostalen** als auch **mittigen** Bereich der Femurkompakta nur in geringer Zahl finden – im verbrannten wie auch im unverbrannten Zustand.

Die **Typ-II-Osteone** weisen keinen eindeutigen verbrennungsbedingt veränderten Verlauf auf, da sie durch verbrennungsbedingte farbliche Veränderungen aber auch grundlegende temperaturbedingte Veränderungen der Knochenmikrostruktur nichtmehr eindeutig identifiziert werden können. Generell ist auch darauf hinzuweisen, dass Growth-Arrest- und Typ-II-Osteone vor allem im verbrannten Zustand nicht eindeutig differenziert werden können, wodurch es zu Fehleinschätzung in Form von Über- oder Unterschätzung kommen kann. Dem Vorkommen von Typ-II-Osteonen wird zudem eine Altersabhängigkeit zugeschrieben, aber auch Ernährung und Mineralbedarf des Körpers spielen eine Rolle (Jaworski et al., 1972, Pankovich et al., 1974, Ericksen, 1991, Yoshino et al., 1994, Richman et al., 1979, Watanabe et al., 1998). Für die Problematik der Differenzierung zwischen Typ-II-Osteonen und Growth-Arrest-Osteone wäre zudem dringend eine eindeutige Definition erforderlich.

Das Vorkommen der **Volkmann'schen Kanäle** hängt stark vom angesetzten Schnittwinkel des Sägemikrotoms an der Probe ab, variiert aber auch von Dünnschnitt zu Dünnschnitt im selben Schnittwinkel und ist generell gering (Cohen und Harris, 1958, Beddoe, 1977).

Für die Quantifizierung von Typ-II-Osteonen und Volkmann'schen Kanälen würde sich, aufgrund ihres geringen Vorkommens im ausgewerteten Feld, demnach eine andere Zählweise anbieten, beispielsweise eine Zählung über den gesamten Bildausschnitt in mindestens drei histologischen Bildern, um dann wieder auf eine Fläche von 1mm² rückzurechnen. Damit könnte generell eine höhere Anzahl dieser Parameter bei der Auszählung erfasst werden und deren Anzahl über eine größere Fläche gemittelt werden kann. Somit genauere Messwerte erzielt werden.

Die Vergleichbarkeit dieser Parameter zwischen dem **periostalen** und **mittigen** Bereich der Kompakta ist fraglich, da das Vorkommen durch solche äußeren Faktoren wie generell reduziertem Vorkommen, Schnittwinkel, Individualalter etc. abhängt. Die Anzahl dieser Parameter ist mit der Probenanzahl, die zur Auswertung verfügbar war, auch zu gering, um statistisch signifikante Aussagen über Veränderungen treffen zu können.

Prozentuale Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur

Im **periostalen Bereich** der Femurkompakta scheint der Einfluss der verschiedenen Temperaturstufen auf die Knochenfragmente die grundlegende Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur nicht maßgeblich zu verändern. Auffällig ist der verbrennungsbedingte Anstieg des Anteils lamellären Knochens zwischen 600 und 1000 °C, verbunden mit einer deutlichen Abnahme des Anteils an fragmentalem Knochen. Diese Entwicklung scheint sich gegenseitig zu bedingen, da durch Reste von Kohlenstoffverfärbungen, den generellen Farbwechsel und die Umstrukturierung der Knochenmikrostruktur vor allem in höheren Temperaturbereichen die Erkennbarkeit von Osteonfragmenten stark erschwert ist. Dadurch werden die möglicherweise nach wie vor von

Osteonfragmenten eingenommenen Bereiche fälschlicherweise als nicht-umgebauter Knochen (Generallamellen) interpretiert, wodurch es zu einer Überschätzung des Anteils an Generallamellen und einer Unterschätzung des Anteils fragmentalen Knochens kommt.

Der prozentuale Anteil osteonalen Knochens scheint dagegen keine maßgeblichen Veränderungen durch die Verbrennungstemperaturen aufzuweisen, da auch sekundäre Osteone und der Havers'sche Kanal in den höheren Temperaturbereichen nach wie vor identifizierbar sind. Dies gilt auch für den Anteil an Resorptionslakunen.

Im *unverbrannten Zustand* sind über die elf Positionen entlang des anterioren Femurschaftes hinweg vor allem die Anteile fragmentalen, lamellären und osteonalen Knochens deutlichen Schwankungen unterworfen. Der Anteil an resorbiertem Knochen dagegen ist auch im unverbrannten Zustand ziemlich konstant. Diese ungleichmäßige Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur widerspricht der Annahme von Müller (Müller, 2017) und Mussauer (Mussauer, 2017), dass sich entlang der anterioren Femurdiaphyse die Anzahlen histomorphometrischer Parameter und die prozentuale Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur nicht maßgeblich ändert. Dies müsste, entgegen den Annahmen von Müller (Müller, 2017) und Mussauer (Mussauer, 2017), einen Einfluss auf die histologisch bestimmten Sterbealter der Individuen entlang der Diaphyse haben. Da in den betreffenden Formeln allerdings verschiedene Fragmente desselben Knochens (an verschiedenen Positionen entlang der Diaphyse) für die Erstellung der linearen Regressionsmodelle beprobt wurden, könnten diese Unterschiede in die Regressionsgleichung integriert und damit wieder nivelliert sein. Dies würde wiederum die Schlussfolgerungen von Müller (Müller, 2017) und Mussauer (Mussauer, 2017) positiv unterstützen. Iwaniec et al. (Iwaniec et al., 1998) und Frost (Frost, 1969) beschreiben ebenfalls solche Unterschiede in der mikrostrukturellen Zusammensetzung zwischen verschiedenen Positionen entlang der Diaphyse.

Im **mittigen Bereich** der Femurkompakta zeigen sich sowohl im unverbrannten als auch im verbrannten Zustand teils deutlich abweichende Ergebnisse in der deskriptiven Analyse zu den Ergebnissen am *periostalen Rand* des Knochenfragmentes. Im *verbrannten* Zustand zeigt der Anteil resorbierten Knochens in der *Kompaktamitte* ab 400 °C eine nahezu kontinuierliche Zunahme bis 900 °C. Im Vergleich bildet sich in den Temperaturbereichen, in denen sich für den osteonalen Knochen eine Zunahme ergibt, eine Abnahme des Anteils lamellären Knochens ab, was sich dadurch erklären lassen würde, dass eine zuvor vorhandene Verschlechterung der Sichtbarkeit durch Kohlenstoffeinlagerungen in diesem Temperaturbereichen sich auflöst und osteonale Strukturen wieder besser differenziert werden können. Bei der höchsten Verbrennungsstufe von 1000 °C zeigen lamellärer Knochen und resorbierter Knochen eine Abnahme, wohingegen die Anteile fragmentalen und osteonalen Knochens ansteigen. Dies ist allerdings für dieselben Parameter im *unverbrannten* Zustand für den Übergang zwischen Position 10 und 11 zu beobachten. Darauf basierend kann vermutet werden, dass sich die generelle Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur am posterioren Ende der Femurdiaphyse bereits im unverbrannten Zustand dahingehend verändert. Tatsächlich weisen lamellärer und resorbierter Knochen der *unverbrannten* Proben einen sehr ähnlichen Verlauf wie die *verbrannten* Proben auf. Im Falle des lamellären Knochens ist dieser Verlauf

deutlicher ausgeprägt als bei den verbrannten Äquivalenten, im Falle des resorbierten Knochens geringfügig verringert. Die Anteile osteonalen und fragmentalen Knochens zeigen ebenfalls einen ähnlichen Verlauf zwischen unverbrannten Referenzproben und den Proben unter Temperatureinfluss, jedoch scheint auch hier die Verbrennung diesen Verlauf zu beeinflussen. Dies lässt den Schluss zu, dass diese Entwicklungen in ähnlichem Maße bereits für die unverbrannten Referenzproben vorhanden sind und durch die Anwendung der verschiedenen Verbrennungsstufen verstärkt oder respektive verringert werden. Für die unverbrannten Referenzproben lässt sich entlang des Femurschaftes, erneut entgegen der Annahmen von Müller (Müller, 2017) und Mussauer (Mussauer, 2017), eine Veränderung erkennen. Der Anteil osteonalen Knochens zeigt über den Schaft hinweg nach distal gehend eine Verringerung mit einer damit einhergehenden Zunahme des Anteils an resorbiertem Knochen. Je weiter distal man sich entlang des Femurschaftes im *mittigen* Bereich der Kompakta befindet, wird die Kompakta demzufolge immer dünnwandiger und dadurch beginnen mittiger und endostaler Bereich ineinander überzugehen. Dies ist durch ebendiese Zunahme resorbierten Knochens erkennbar, da der endostale Bereich der Kompakta von diesem Strukturparameter stark geprägt ist. Andererseits könnten auch die von Jaworski et al. (Jaworski et al., 1972) beschriebenen kleineren Resorptionszentren, welche nur in etwa 10-20 µm größer sind als der durchschnittliche Durchmesser inaktiver Havers'scher Kanäle, bei der Auswertung fälschlicherweise als verbrennungsbedingt erweiterter Havers'scher Kanal gewertet und damit den osteonalen Parametern zugeordnet worden sein. Dies würde entsprechend zu einer Unterschätzung der gesamten von resorbiertem Knochen eingenommenen Fläche und damit auch der Resorptionslakunenfläche führen.

Auch der Anteil an Grundlamellen zeigt einen Anstieg von der höchsten bis zur tiefsten Position entlang des Schaftes, wobei der Anteil fragmentalen Knochens sich verringert. Demnach weisen weiter distal gelegene Knochenfragmente einerseits eine dünnwandigere Kompakta auf und sind andererseits weniger stark umgebaut als proximale Bereiche. Erklärt werden könnte dies durch den Einfluss einwirkender Belastungen an der Femurdiaphyse, welche sich um das breite Kniegelenk herum (distal) besser verteilen können als entlang des Femurschaftes. Dadurch sind diese Bereiche stärker umgebaut, da sie mehr belastungsbedingtem Umbau unterliegen sind, als distal gelegene, an denen sich die Belastung besser auf die Gelenke verteilen kann. Nach Frost (Frost, 1997) stammt die größte mechanische Belastung auf den Knochen aus Muskelkontraktionen, die in konstanter Gegenrichtung zur Erdanziehungskraft stehen. Dabei erfährt der proximale Femurschaft mehr Muskelkraft als weiter distal gelegene Regionen. Allerdings steigt nach Ruff und Hayes (Ruff and Hayes, 1983a, Ruff and Hayes, 1983b) die anterior-posteriore Biegebelastung von proximal nach distal gehend an und gipfelt nahe des distalen Femurgelenks. Chan et al. (Chan et al., 2007) befanden dagegen ebenfalls, dass die Femurkompakta von proximal nach distal gehend entlang des Femurschaftes dünnwandiger wird, fanden allerdings keine signifikanten Unterschiede in der Anzahl histologischer Strukturen in verschiedenen Dünnschnitten. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Müller (Müller, 2017) und Mussauer (Mussauer, 2017). Entgegen der Annahme von Doppler (Doppler, 2008) konnte in dieser Arbeit nicht festgestellt werden, dass sich im *mittigen Bereich* der Kompakta grundsätzlich ein deutlich

höherer Anteil resorbierten Knochens findet als im *periostalen Bereich*. Allerdings zeigte sich für die *Kompaktmitte* der weiter distal entlang des Schaftes gelegenen Fragmente ein erhöhter Anteil resorbierten Knochens, durch die schrumpfungsbedingte Annäherung von *Kompaktmitte* und *Endost*.

Resorptionslakunen- und Osteongeometrie

Sowohl *periostal* als auch *mittig* zeigen **Osteongeometrie** (bestehend aus Osteonumfang, Osteonfläche und Osteondurchmesser) und **Resorptionslakunengeometrie** (bestehend aus der Resorptionslakunenfläche) eine deutliche verbrennungsbedingte Schrumpfung auf, welche sich ab 600 °C erkennbar manifestiert und kontinuierlich bis zur höchsten Verbrennungsstufe steigert. Diese Schrumpfung der Osteone bedingt wiederum einen Anstieg in ihrer Anzahl bzw. generell in der Anzahl histomorphometrischer Parameter pro ausgewerteter Flächeneinheit. Eine solche temperaturinduzierte Reduzierung der osteongeometrischen Parameter wurde auch bei den experimentellen Verbrennungsversuchen von Absolonova et al. (Absolonova et al., 2013, Absolonova et al., 2012) beobachtet. Allerdings wurden diese Parameter von deren Analyse ausgeschlossen, da nicht gesichert festgestellt werden konnte, ob es sich um eine normale Varianz der unverbrannten Proben handelt, oder diese durch die Einwirkung der Verbrennungstemperaturen verursacht wurde. Absolonova et al. (Absolonova et al., 2013, Absolonova et al., 2012) konnten generell bis zu einer Verbrennungstemperatur von einschließlich 800 °C keinerlei verbrennungsbedingte Änderungen in der Osteongeometrie feststellen. Bradtmiller und Buikstra (Bradtmiller und Buikstra, 1984) beschrieben sogar, dass sich die Anzahl der Osteone nicht ändert, deren Größe aber durch die Verbrennung ansteigt. Dies kann durch die Ergebnisse der vorliegenden Studie nicht bestätigt werden, da sich deutliche verbrennungsbedingte Veränderungen bereits ab 600 °C manifestierten und eine Akkumulation der Osteone eintrat. Nelson ((Nelson, 1992) in (Bradtmiller und Buikstra, 1984)) beschrieb eine verbrennungsbedingte Reduzierung des Osteondurchmessers um 16,7%, bemaß dieser Änderung allerdings keinen Einfluss auf die Ergebnisse histologischer Altersbestimmungen zu.

Generell darf das hohe Fehlerpotenzial bei der Berechnung der **Osteongeometrie** nicht außer Acht gelassen werden. Nach Cho et al. (Cho et al., 2006) müssen für die Anwendbarkeit der Formel zur Berechnung der osteongeometrischen Parameter mindestens 25 Osteone pro mm² vorhanden sein. Dies ist zum Einen bei den jüngeren Individuen des Kollektivs (WF45, WF47 und FS01-13) vor allem im unverbrannten Zustand teils nicht der Fall gewesen. Zum anderen ist dies auch für die Anzahl der sekundären Osteone bei einer Verbrennungstemperatur von 300 °C kritisch. Das könnte wiederum das Ergebnis der osteongeometrischen Daten beeinflussen, da sich die Osteonfläche aus der Anzahl der Osteone pro mm² und dem prozentualen Anteil, den diese einnehmen, berechnet. Osteonumfang und Osteondurchmesser werden basierend auf der Annahme berechnet, dass es sich um kreisförmige Strukturen handelt. In der Regel sind Osteone in ihrer Form allerdings eher oval (Martiniaková et al., 2006). Da es sich in diesem Fall aber um ein deutlich überaltertes Kollektiv handelt und Osteone bei älteren Individuen wieder kreisförmiger werden, scheint dies zumindest für die Berechnung der unverbrannten Referenzen unbedenklich (Currey, 1964, Burr et al., 1990, Cho et al., 2006). Jedoch kann es durch die hitzebedingte Schrumpfung auch bei den Osteonen selbst zu Formveränderungen,

vor allem in den höheren Temperaturbereichen, kommen, wodurch sich eine Fehlerquelle für die Annahme der Osteonkreisförmigkeit ergibt. Andererseits könnten Osteone auch durch die Verbrennung kleiner und runder statt elongiert werden, wodurch sie sich auch gegenüber äußeren Einflüssen – wie z.B. der Temperatur – stabilisieren könnten. Generell liefert die Literatur widersprüchliche Aussagen zur Osteongröße und deren Zusammenhang mit physischer Belastung und verbrennungsbedingter Veränderung.

Chan et al. (Chan et al., 2007) fanden beispielsweise viele kleine Osteone an der *Linea aspera*, was sie als erhöhte Stabilität vieler kleiner Osteone deuteten. Da die Osteone bis zu einer Temperatur von 1000 °C schrumpfen und sich dann viele kleine Osteone im Knochenfragment befinden, könnte dies ebenfalls auf eine erhöhte Stabilität vieler kleiner Osteone schließen lassen. Zudem weist das Knochenfragment bei dieser Temperatur eine erhöhte Festigkeit gegenüber niedrigeren Verbrennungsstufen auf. Yeni et al. (Yeni et al., 1997) sprechen von einer erhöhten Frakturgefahr im Falle größerer Osteone, da kleinere Osteone die Energie besser absorbieren und durch mehr Osteone in einer Region eine erhöhte Stabilität entsteht. Wachter et al. (Wachter et al., 2002) sehen dagegen keinen Zusammenhang zwischen Osteongröße und Belastbarkeit bzw. Stabilität. Pfeiffer et al. (Pfeiffer, 2006) sehen zudem keine Verbindung zwischen Osteongröße und physischer Aktivität. Britz et al. (Britz et al., 2009) fanden eine Abhängigkeit von Körpergewicht und Osteongeometrie im menschlichen Knochen.

Überraschend ist dagegen, dass die **Resorptionslakunenfläche** zwar Schwankungen über die Verbrennungstemperaturen aufzeigt, sich diese aber zum Einen auch für den *unverbrannten* Zustand feststellen lassen und sich zum Anderen keine eindeutige verbrennungsbedingte Schrumpfung in höheren Temperaturbereichen einstellt. Zu dem am weitesten distal gelegenen Fragment entlang der *unverbrannten* Femurdiaphyse hin scheint sich sowohl **mittig** als auch **periostal** eine Verringerung in der Resorptionslakunenfläche abzuzeichnen, welche sich auch bei den *verbrannten* Proben findet. Die fehlende verbrennungsbedingte Schrumpfung ließe sich dadurch erklären, dass es sich bei der Resorptionslakunenfläche (wie auch bei den drei Parametern der Osteongeometrie) um berechnete und nicht gemessene Werte handelt. Die Resorptionslakunenfläche errechnet sich daraus, wie viele Resorptionslakunen sich in dem betrachteten histologischen Feld befinden und wie viele der Quadrate im Gitternetz zu mehr als 50% von resorbiertem Knochen eingenommen werden. Wenn sich durch die Verbrennung und die Schrumpfung der histomorphometrischen Parameter mehr Resorptionslakunen finden, diese aber wesentlich kleiner sind als zuvor, kann es nichtsdestotrotz zu einer Fehlkalkulation (Überschätzung) der Resorptionslakunenfläche kommen. Für die verbrannten Proben in dieser Arbeit bewegt sich die Resorptionslakunenfläche zwischen 0,05 und 0,06 mm², für die unverbrannten Proben zwischen 0,04 und 0,05 mm². Größere Resorptionszentren sind nach Jaworski et al. (Jaworski et al., 1972) in der Regel 225 – 650 µm lang und 155 – 245 µm im Durchmesser, was sich auch mit den Ergebnissen aus der vorliegenden Arbeit deckt. Goliath et al. (Goliath et al., 2016) beschrieben Variationen in der Osteonhistomorphometrie und damit verbundene Einflüsse auf die histologische Altersbestimmung. Sie stellten keine Geschlechtsunterschiede fest, allerdings fanden sie

Veränderungen in der Osteonform, der Osteongröße und der OPD (siehe nächster Unterpunkt) mit steigendem Individualalter.

Da dies für unverbrannte Proben an Femur und Rippe erfolgte, können die Veränderungen in der Osteongeometrie der verbrannten Proben einen noch gravierenderen Einfluss auf die Ergebnisse histologischer Altersbestimmungsmethoden haben.

OPD (Osteonenpopulationsdichte)

Die OPD, welche sich aus der Addition der Anzahlen intakter und fragmentierter Osteone berechnet, weist dementsprechend denselben *verbrennungsbedingten* Verlauf über die Temperaturstufen hinweg auf wie die Anzahlen intakter und fragmentierter Osteone. Ebenso zeigt sich derselben Verlauf zwischen OPD, intakten und fragmentierten Osteonen bei den *unverbrannten* Proben entlang des Schaftes. Die OPD hat grundlegend einen altersbedingt asymptotischen Verlauf, da mit steigendem Individualalter die Zahl der sekundären Osteone respektive der Osteonfragmente durch kontinuierliches Remodelling zunimmt. Dadurch akkumuliert sich die Anzahl fehlender Osteone. Dieser Begriff bezieht sich auf die Osteone, die durch das Remodelling von neuen Osteonengenerationen überlagert werden und damit zu Osteonfragmenten werden. Durch kontinuierliches Remodelling werden sie dann immer weiter überlagert. Die damit einhergehende Interferenz der Strukturen führt dazu, dass diese nicht mehr sichtbar sind und für die Berechnung der OPD fehlen (Turban-Just and Grupe, 1995, Frost, 1987b). Leider ist die $OPD_{Asymptote}$ nur für Rippen eindeutig bemessen und tritt dort mit einem Individualalter von 60 Jahren ein, verbunden mit einem Absinken der Remodelingraten im Knochen (Wu et al., 1970, Cho et al., 2002, Andronowski und Crowder, 2019). Nach Walker et al. (Walker et al., 1994) wird diese Asymptote allerdings generell schon bereits mit 50 Jahren in der Rippe erreicht. Andronowski und Crowder (Andronowski und Crowder, 2019) beschreiben das Eintreten der $OPD_{Asymptote}$ für Femora mit einem Individualalter von 70 Jahren. Für das Probenkollektiv aus dem *periostalen Rand* der Kompakta findet sich im *unverbrannten* Zustand eine $OPD_{Asymptote}$ von $52/\text{mm}^2$, im *mittigen Bereich* der Kompakta von $48/\text{mm}^2$. Für die *verbrannten* Proben liegt die $OPD_{Asymptote}$ *periostal* bei $73/\text{mm}^2$ bei der höchsten Verbrennungsstufe von $1000\text{ }^\circ\text{C}$, *mittig* bei $48/\text{mm}^2$, berechnet mit der Formel:

$OPD_{Asymptote} = \frac{k}{(OstFl)^2}$ mit $k = 1,38$ für Femora (Turban-Just und Grupe, 1995). In der Literatur liegt die $OPD_{Asymptote}$ bei $50/\text{mm}^2$ für Femora (Stout und Crowder, 2012). Somit liegt sie im *periostalen Bereich* bei den *unverbrannten* Referenzproben knapp über diesem Wert, im *mittigen Bereich* deckt sie sich nahezu mit dem Literaturwert. Auch bei den *verbrannten* Proben übersteigt die $OPD_{Asymptote}$ im *mittigen Bereich* der Kompakta nicht den Literaturwert oder den Wert der *unverbrannten* Probe, im *periostalen Bereich* durch die temperaturbedingte Schrumpfung jedoch deutlich. Dies ist entgegen der eigentlichen Erwartungen, da im *periostalen Bereich* der Kompakta durch appositionelles Dickenwachstum noch mehr der ursprünglichen Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur vorhanden sein müsste, wohingegen im *mittigen Bereich* der Kompakta vor allem Remodelling stattfindet (Bell et al., 2001). Allerdings kann diese Beobachtung dadurch erklärt werden, dass im *periostalen Bereich* aufgrund neuer Strukturen durch periostales Dickenwachstum und weniger

Umbau wiederum mehr Schrumpfung und damit Akkumulation der histomorphometrischen Parameter möglich ist. Dagegen ist die *Kompaktmitte* bereits so dicht gepackt, dass auch durch verschiedene Verbrennungstemperaturen keine größeren Veränderungen mehr eintreten. Diese These wird von der Feststellung durch Iwaniec et al. (Iwaniec et al., 1998) gestützt, da sie erkannten, dass periostal weniger Remodelling stattfindet als endostal und es somit bereits innerhalb eines Schnittes Variationen gibt.

Simmons et al. (Simmons et al., 1991) beschreiben in ihren Untersuchungen an der Knochenstruktur männlicher Individuen verschiedener Altersgruppen eine solche periostale Knochenneubildung, einhergehend mit endokortikaler Resorption und dadurch auch eine erhöhte intrakortikale Porosität durch mehr Havers'sche Systeme mit steigendem Individualalter. Solche Knochenneubildungen finden sich bis zu einem Individualalter von 60 bis 65 Jahren (Simmons et al., 1991).

Die verbrennungsbedingte Akkumulation von Osteonen und Osteonfragmenten ist im *mittigen Bereich* demzufolge deutlich geringer als im *periostalen Bereich* der Kompakta. Daraus geschlussfolgert würde sich die *Kompaktmitte* eher für die Erstellung linearer Regressionsmodelle anbieten als der *periostale Rand*, da periostal die verbrennungsbedingte Schrumpfung einen größeren Einfluss zu nehmen scheint. Walker et al. (Walker et al., 1994) beschreiben sogar, dass sich für Individuen älter als 50 Jahre keine Korrelation zwischen der OPD und dem Individualalter feststellen lässt. Dies erklären sie dadurch, dass nach Goldsmith et al. (Goldsmith et al., 1973) die kortikale Fläche bei Frauen und Männern ab dem 35. Lebensjahr abnimmt, wodurch im Alter keine signifikante Korrelation zwischen OPD und Individualalter mehr vorhanden ist. Cannet et al. (Cannet et al., 2011) sehen die OPD allein bereits ausreichend für eine Altersklassifizierung in die drei Altersklassen *Adultas*, *Maturitas* und *Senilis*. Durch unterschiedliche *Modelling Drifts*, welche die Makroarchitektur des Knochens beeinflussen und sich somit auf das histologische Alter des Knochens auswirken, kann die OPD sich zwischen verschiedenen Positionen innerhalb des Knochens deutlich unterscheiden (Frost, 1987b). Iwaniec et al. (Iwaniec et al., 1998) stellten sogar fest, dass die OPD von verschiedenen Positionen entlang des mittleren anterioren Femurschaftes insgesamt 95% der Varianz der OPD über den gesamten Femurschaft ausmachen kann.

AOC

Bei der AOC (Accumulated Osteon Creations) handelt es sich um einen Parameter, der auf ebendiese bei der OPD unsichtbaren bzw. fehlenden Osteone zurückzurechnen bzw. in die Gesamtkalkulation einzubeziehen sucht. Die AOC beschreibt die Gesamtzahl der sichtbaren und unsichtbaren Osteonbildungen, welche einer gegebenen OPD (OPD/mm^2) zugeordnet sind, und berechnet sich dementsprechend basierend auf den OPD-Werten. Folglich zeigen sich *periostal* und *mittig* sowohl *unverbrannt* als auch *verbrannt* dieselben Verläufe wie bereits für die OPD. Daher wird an dieser Stelle nicht näher auf verbrennungsbedingte Veränderungen der AOC eingegangen, da sie auf dieselben Veränderungen zurückzuführen sind wie die der OPD. Allerdings kann die AOC-Rate nach Frost (Frost, 1987b) grundsätzlich auch höher ausfallen als die OPD selbst, wenn die neu gebildeten Osteone alle Überreste alter Osteone entfernt haben. Für das Kollektiv wäre dies durchaus möglich, da es stark

überallert war und eine temperaturbedingte Schrumpfung und damit verbundene Akkumulierung der Parameter stattfand. Negativ zu beurteilen ist, dass bei der Berechnung der AOC nur die zeitliche Komponente (das Individualalter) miteinbezogen wird, nicht aber andere Einfluss nehmende Faktoren wie beispielsweise genetischer Hintergrund, Gesundheit bzw. Krankheit, Ernährung und Aktivität (Frost, 1987b, Frost, 1987a, Livshits et al., 1998, Burr et al., 1990, Babayigit et al., 2006).

Aktivierungsfrequenz

Die Aktivierungsfrequenz ist ein Maß für die Intensität des Knochenumbaus oder auch das Ausmaß des Knochenmetabolismus und damit auch für die Stoffwechselaktivität (Parfitt, 2002, Smit et al., 2002). Nach Parfitt (Parfitt, 2002) ist die Aktivierungsfrequenz das beste Maß für Remodelling im Knochen. In sich bildenden Osteonen wird beim Menschen pro Tag etwa 1 µm an Knochenmasse abgeschieden (Martin et al., 1998).

Durch die verbrennungsbedingte Anreicherung der histomorphometrischen Parameter kommt es ab einer Verbrennungstemperatur von 400 °C zu einer gesteigerten Aktivierungsfrequenz sowohl für den **periostalen** als auch den **mittigen** Bereich der Kompakta. Im unverbrannten Zustand zeigen sich dagegen Unterschiede. Während am *periostalen* Rand des Knochenfragments die Aktivierungsfrequenz über die Positionen von proximal nach distal gehend leichte Schwankungen und geringfügige Verringerungen aufweist, tritt in der *Kompaktamitte* eine nahezu kontinuierliche Zunahme zwischen proximal und distal auf. Martin et al. (Martin et al., 1998) beschreiben, dass sich die Aktivierungsfrequenz in verschiedenen Skelettelementen unterscheiden kann und auch Doppler et al. (Doppler et al., 2006) finden signifikante Unterschiede in der Aktivierungsfrequenz zwischen dem *Periost* und der *Kompaktamitte*. Dies dient dem Erhalt der Integrität des Knochens trotz Abbau- und Umbauvorgängen (Martin et al., 1998). Da bereits im unverbrannten Zustand die Werte der Aktivierungsfrequenz mittig gegenüber periostal erhöht sind, findet sich dieser Unterschied ebenfalls in den verbrannten Proben wieder. Hier könnte also durch eine bereits dicht gepackte Knochenmikrostruktur und eine zusätzliche Vermehrung der Struktureinheiten durch die Verbrennung eine erhöhte Aktivierungsfrequenz zustande kommen. Im unverbrannten Zustand würde dies der Theorie entsprechen, dass im *mittigen* Bereich der Kompakta eine höhere Remodelingrate besteht, während im *periostalen* Bereich durch appositionelles Dickenwachstum Knochenmaterial noch angebaut wird bzw. damit eine niedrigere Remodelingrate vorliegt (Bell et al., 2001, Iwaniec et al., 1998). Chan et al. (Chan et al., 2007) beschreiben, dass signifikante Unterschiede im Remodelling innerhalb und zwischen verschiedenen Regionen der Femurdiaphyse bestehen. Diese können verursacht sein durch regionale Unterschiede in mechanischem Stress, mechanischer Belastung oder als Antwort auf Ermüdung bzw. Beschädigung (Ruff und Hayes, 1982, Frost, 1997, Cho et al., 2002). Auch klimatische Faktoren, nehmen Einfluss auf metabolische Raten (Belkin et al., 1998, Livshits et al., 1998). Problematisch bei der Aktivierungsfrequenz bzw. deren Einbeziehung in Regressionen für die histologische Individualaltersschätzung ist zum einen die laterale Drift bei jüngeren Individuen, wodurch die davon betroffenen Abschnitte des Knochens nicht mehr in die Aktivierungsfrequenz einfließen und das Ergebnis dadurch beeinflusst wird. Durch diese Modellierung Drifts besteht die adulte

Knochenmikrostruktur aus einem Sammelsurium von Abschnitten verschiedenen Alters (Katzenberg and Grauer, 2018). Heikel ist zum Anderen die bereits erwähnte $OPD_{Asymptote}$, welche in einem bestimmten Lebensalter erreicht wird und wodurch nicht alle gebildeten Osteone einbezogen werden können. Bei der Verwendung der AOC für die Berechnung der Aktivierungsfrequenz, welche selbst wiederum auf der OPD basiert, wird dieses Problem ebenfalls wiedergespiegelt und die Verwendung der AOC ist nur dann möglich, wenn das chronologische Alter einschätzbar ist. Andernfalls empfiehlt sich die Berechnung der Aktivierungsfrequenz nach Cho et al. (Cho et al., 2006) und Frost (Frost, 1987b) über eine statistische Schätzung der fehlenden Osteone.

Eine weitere mögliche Fehlerquelle für die Berechnung der Aktivierungsfrequenz ist, dass das mittlere Gewebealter von 12,5 Jahren zur Berechnung der Aktivierungsfrequenz von Rippenmaterial stammt und nicht eigens für Femora vorliegt. Durch unterschiedliche Umbauraten zwischen verschiedenen anatomischen Positionen, wie zwischen Femur und Rippe, könnte die Berechnung der Aktivierungsfrequenz demzufolge ungenauer werden (Crowder et al., 2016). Die Stoffwechselaktivität kann aber überdies durch äußere Umwelteinflüsse oder das Geschlecht des Individuums beeinflusst sein (Crowder et al., 2016, Bell et al., 2001, Frost, 1987b, Frost, 1987a). Allein schon die Körpergröße kann einen Einfluss auf das Remodelling nehmen (Maat et al., 2006). Des Weiteren kann sich das Remodelling auch zwischen Populationen unterscheiden, was eine weitere Fehlerquelle für die universale Annahme eines Gewebealters von 12,5 Jahren bildet (Crowder et al., 2016). Aber auch Geschlechtsunterschiede und physische Aktivität nehmen Einfluss auf das Remodelling (Crowder et al., 2016). Da die Aktivierungsfrequenz durch die vielen einwirkenden Kovariablen ein schwer einzuschätzender Faktor ist, sollte von einer Einbeziehung als Parameter in histologische Altersbestimmungsformeln abgesehen werden.

Knochenbildungsrate (BFR)

Die BFR ist ein Maß für die jährliche Knochenbildungsrate. Im unverbrannten Zustand ist die Knochenbildungsrate im **mittigen** Bereich der Kompakta erhöht im Vergleich zum **periostalen** Rand, was dadurch erklärt werden kann, dass im **periostalen** Bereich vor allem appositionelles Dickenwachstum in Form von Anbau von Knochenmaterial bis zu einem bestimmten Grad (bzw. Alter) stattfindet, wohingegen in der Kompaktamitte bereits vorwiegend Remodelingvorgänge stattfinden (Bell et al., 2001). Auch Doppler et al. (Doppler et al., 2006) beschreiben, dass die BFR **periostal** signifikant geringer ist als im **mittigen** Bereich. In anderen Fällen dagegen wird von einer Abnahme der BFR in Rippen mit steigendem Individualalter gesprochen (Stout and Teitelbaum, 1976, Stout and Lueck, 1995).

Im **verbrannten** Zustand dagegen verhält sich die BFR beider Probenkollektive im Mittel wieder nahezu gleich. Dies lässt erneut darauf schließen, dass sich der **periostale** Bereich in seiner Zusammensetzung der Mikrostruktur durch verbrennungsbedingte Schrumpfung und damit einhergehende Anreicherung histomorphometrischer Parameter der **Kompaktamitte** annähert. Die **Kompaktamitte** hingegen unterliegt durch die dichte Packung von Osteonen und Osteonfragmenten keiner deutlichen temperaturbedingten Schrumpfung und Akkumulation der Parameter mehr.

Eine mögliche Fehlerquelle für die Berechnung der BFR ist allerdings, dass deren Berechnung auf der Quantifizierung der Osteonfläche nach Cho et al. (Cho et al., 2006) basiert und nicht am Mikroskop gemessen wurde. Die BFR kann nach Frost (Frost, 1987b) über die Aktivierungsfrequenz und damit über das chronologische Alter und das mittlere Gewebealter (Wu et al., 1970) berechnet werden. Eine andere Möglichkeit zur Bemessung der BFR ist die histomorphometrische Berechnung über die OPD und die Osteonfläche (Cho et al., 2006, Frost, 1987b).

Durch die Überrepräsentation an Individuen der Altersklasse *Senilis* liegen viele kleine Osteone im Kollektiv vor, wodurch es zu einer Erhöhung der Werte der Aktivierungsfrequenz und damit auch der Knochenbildungsrate kommt.

Fazit

Bei Absolonova et al. (Absolonova et al., 2012) zeigten sich wie in der vorliegenden Arbeit nach experimenteller Verbrennung bei 600, 700, 800 und 1000 °C mehr mikrostrukturelle Einheiten pro mm², aber prozentual gesehen lag durch die Schrumpfung weniger Fläche vor. Für die vorliegende Arbeit konnte die von Absolonova et al. beschriebene Abhängigkeit von der angewendeten Verbrennungstemperatur bestätigt werden. Absolonova et al. beschrieben ein Verschmelzen von Osteonfragmenten und den konzentrischen Lamellen, was die relativ niedrige verbrennungsbedingte Anzahl an Osteonfragmenten für den *periostalen* Bereich der Kompakta erklären würde. Durch die von ihnen dargestellte hitzebedingte Zerstörung von Resorptionslakunen wäre auch erklärbar, wieso sich keine gesteigerte Anzahl an Resorptionslakunen für die verbrannten Proben finden ließ. Die von Absolonova et al. (Absolonova et al., 2012) beschriebene große Varianz für Osteonfläche und Osteonumfang konnte in dieser Arbeit nicht bestätigt werden. Dies könnte aber auch dadurch bedingt sein, dass diese beiden Parameter nicht wie bei Absolonova et al. (Absolonova et al., 2012) gemessen, sondern berechnet wurden.

Generell führen methodische Probleme zu einer erschwerten Vergleichbarkeit der Parameterzahlen oder der Metabolismus-abhängigen Parameter, da die Bewertungstechnik meist subjektiv erfolgt und mehr theoretische Parameterdefinitionen für die histomorphometrische Auswertung nötig wären, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten (Crowder et al., 2016). Dies wird auch von Iwaniec et al. (Iwaniec et al., 1998) bemängelt, da kein einheitlicher Standard sowohl zur Beprobung von Knochenmaterial für histologische Auswertungen als auch für die Interpretation der histomorphometrischen Parameter vorhanden ist. Dies limitiert die Vergleichbarkeit von Studien und ist vor allem für verbranntes Knochenmaterial problematisch zu sehen, da einheitliche Standards zur Beprobung des Leichenbrandmaterials für die Bearbeitung der histologischen Schnitte und die Auswertung histomorphometrischer Parameter von immenssem Vorteil für den Informationsgewinn aus verbranntem Knochenmaterial wären. Oftmals ist auch heute leider nicht bekannt, dass eine histologische Auswertung verbrannten Knochenmaterials möglich ist und die Altersdiagnose unterstützen kann, was für die Bearbeitung von Urnengräberfeldern von immenser Bedeutung wäre. Anhand dieser Erkenntnisse eignen sich gezählte histomorphometrische Parameter (z.B. sekundäre Osteone, Osteonfragmente, Resorptionslakunen) besser als Parameter einer histologischen

Altersbestimmungsformel. Berechnete Parameter (z.B. Osteonfläche, Osteonumfang) oder auch Stoffwechsel-abhängige Parameter (z.B. Aktivierungsfrequenz und Knochenbildungsrate) sind von vielen Kovariablen abhängig. Diese können zu einer erhöhten Fehlinterpretation oder fehlerhaften Berechnung führen.

4.3.3) Schrumpfungskoeffizient

Durch das Applizieren des berechneten **Schrumpfungskoeffizienten** – separat für jedes Individuum bei jeder Temperaturstufe der Verbrennungsreihe – konnten entgegen der Erwartungen im Mittel keine besseren Ergebnisse sowohl im **periostalen** als auch im **mittigen** Bereich der Kompakta erzielt werden. Dies kann dadurch bedingt sein, dass sich die Schrumpfung in Höhe, Breite und Dicke des Knochenfragmentes nicht einheitlich verhält und sich dadurch nicht eindeutig quantifizieren lässt. Breiten- und Dickenschrumpfung können sich aufgrund der unterschiedlichen Mineraldichte innerhalb bzw. entlang des Knochens stark unterschiedlich und teilweise sogar gegenläufig verhalten. Die Mineraldichte des Knochens nimmt entsprechend der (nicht) einwirkenden Biegebelastung ab.

Wie bereits in Kapitel 4.1.2 erwähnt macht nach Thompson (Thompson, 2005) die Einbeziehung eines Korrekturfaktors nur dann Sinn, wenn die Schrumpfung des gesamten Knochens bekannt ist. Dies war in der vorliegenden Arbeit zwar nicht gegeben, allerdings war die Schrumpfung in Höhe, Breite und Dicke des verbrannten Knochenfragments bekannt, weshalb dies als ausreichend für die Erhebung und Anwendung eines solchen Korrekturfaktors angesehen wurde.

In solchen Fällen, in denen sich durch das Einbeziehen des Schrumpfungskoeffizienten bessere Ergebnisse bzw. Ergebnisse genähert an die Werte der unverbrannten Referenzen ergeben haben, war dies meist nicht nur auf einzelne Proben eines Individuums beschränkt, sondern brachte über die Temperaturstufen hinweg für das Individuum genauere Resultate. Die positiven Resultate waren verteilt über die Individuen des Datensatzes, beide Geschlechter und Altersstufen, wobei sich allerdings Individuum WF45 sehr häufig unter den positiven Ergebnissen fand. Dies könnte daran liegen, dass es sich um ein junges Individuum (*Juvenis*) mit wenig osteonalem Knochen handelt, wodurch die hitzebedingte Schrumpfung einen größeren Einfluss auf die Knochenmikrostruktur ausüben kann. WF38 fand sich ebenfalls häufig unter den positiven Resultaten für den Schrumpfungskoeffizienten, was aber eher zufällig scheint da keine direkten Unterschiede zum Rest des Kollektivs erkennbar sind.

Im **mittigen** Bereich der Kompakta konnte vor allem für den prozentualen Anteil resorbierten Knochens durch den Schrumpfungskoeffizienten häufig ein besserer Wert erzielt werden als zuvor. Dies lässt darauf schließen, dass die verbrennungsbedingte Akkumulierung der Resorptionslakunen durch den Koeffizienten wieder nivelliert wird, da im unverbrannten Zustand vor allem periostal aber auch mittig weniger Resorptionslakunen zu finden sind. Aufgrund der Schrumpfung nähern sich periostaler, mittiger und endostaler Bereich des Knochenfragmentes einander an. Dadurch kann sich die Zahl der Resorptionslakunen für den **periostalen** und vor allem für den **mittigen** Bereich erhöhen. Dies lässt darauf schließen, dass der Schrumpfungskoeffizient die Zahl der Resorptionslakunen in diesem Fall nach unten anpasst. Ebenso verhält es sich mit der Anzahl intakter Osteone und dem Anteil an

Generallamellen. Durch die verbrennungsbedingte Zerstörung der Knochenmikrostruktur steigt der Anteil an Generallamellen, da Struktureinheiten nichtmehr erkannt werden und diese Bereiche somit als nicht-umgebauter Knochen identifiziert werden. Die Anzahl an Osteonen und Osteonfragmenten vermehrt sich verbrennungsbedingt durch die Schrumpfung und Akkumulierung der Struktureinheiten pro Fläche und wird somit durch den Schrumpfungskoeffizienten im Falle eines positiven Ergebnisses ebenfalls nach unten korrigiert. Genäherte Werte für die Zahl der Volkmann'schen Kanäle und der Typ-II-Osteone liegen unter anderem am generellen Problem der Sichtbarkeit (Schnittwinkel) bzw. der Erkennbarkeit (Growth-Arrest-Osteone/sekundäre Osteone) dieser Parameter durch die Verbrennung. Diese genäherten Ergebnisse sind eher auf den Zufall, da diese Parameter auch im unverbrannten Zustand starken Schwankungen zwischen den Positionen bzw. innerhalb eines Fragmentes unterliegen und deren Gesamtzahl in der Regel zu gering ist um eine stabile, verlässliche Aussage über das verbrennungsbedingte Verhalten treffen zu können.

Die **Korrelation** zwischen histomorphometrischen Parametern und Breiten- und Dickenschumpfung am *Periost* fiel zwischen sekundären Osteonen, Temperatur und Breitenschumpfung stark negativ aus. Dies bedeutet, je höher die Verbrennungstemperatur, desto mehr sekundäre Osteone sind im betrachteten histologischen Feld vorhanden und desto kleiner ist das Fragment in der Breite. Demnach verhalten sich diese Parameter gegensätzlich zueinander. Für die Dickenschumpfung zeigte sich nur eine leicht negative Korrelation mit den histomorphometrischen Parametern, was darauf schließen lässt, dass die Dickenschumpfung einen geringeren Einfluss auf diese ausübt als die Breitenschumpfung. In der *Kompaktmitte* zeigte sich ebenfalls eine leicht negative Korrelation zwischen Fragmentdicke und histomorphometrischen Parametern. Die Fragmentbreite dagegen korrelierte mit mehreren Parametern inklusive der Temperatur negativ. Dies bedeutet, dass mit steigender Verbrennungstemperatur eine geringere Fragmentbreite aber höhere Anzahl der histomorphometrischen Parameter vorliegt.

Generell ist die Anwendbarkeit eines Schrumpfungskoeffizienten oder auch Korrekturfaktors in Frage zu stellen, da einerseits bei prähistorischem oder auch rezentem verbranntem Knochenmaterial die genaue Verbrennungstemperatur nicht bekannt ist. Andererseits existieren auch keinerlei Informationen über die Gesamtlänge des Knochens vor der Verbrennung und auch die erschwerte Geschlechtsdiagnose am Leichenbrandmaterial ist bekannt. Novacek (Novacek, 2012) postuliert sogar, dass die Histologie am Leichenbrand keine Aussage zur Bestimmung der Schrumpfungsquote des Knochens zulässt. Die universale Übertragung der in dieser Arbeit gewonnenen mittleren Schrumpfung pro Temperaturstufe ist ebenfalls kritisch zu sehen, da es sich zum Einen um ein stark überaltertes Kollektiv handelt und zum Anderen Knochen nicht einheitlich schrumpfen. Daher wurde der Schrumpfungskoeffizient für jedes Individuum bei jeder Temperaturstufe einzeln berechnet.

4.4) Statistische Auswertung

4.4.1) Statistische Tests

4.4.1.1) Verteilung der histomorphometrischen Parameter (Boxplots)

Generell gelten für die verbrennungsbedingte Änderung der histomorphometrischen Parameter dieselben Annahmen wie in Kapitel 4.3.2, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen werden soll. Für die Verteilung der histomorphometrischen Parameter über die Temperaturstufen (inklusive RT) hinweg ließ sich am **Periost** die höchste Streuung der Werte für die unverbrannten Proben (RT) feststellen, da hier am meisten Proben inkludiert sind. Die Werte der elf Positionen entlang des anterioren periostalen Femurschaftes wurden, basierend auf den Ergebnissen von Müller (Müller, 2017) und Mussauer (Mussauer, 2017), gemittelt. In der **Kompaktmitte** zeigte sich, dass die temperaturbedingte Veränderung von AOC, Aktivierungsfrequenz und BFR durch die sehr große Streuung der Werte für die se Parameter nicht abgelesen werden kann und Ausreißer einen großen Einfluss auf die Veränderung der Spannweite dieser Parameter nehmen.

4.4.1.2) Shapiro-Wilk-Test

Generell können viele diskrete Verteilungen unter bestimmten Bedingungen durch die Normalverteilung angenähert werden. Abweichungen von der Normalverteilung – bei den unverbrannten Proben der Referenzen – bedeuten, dass der gewählte Stichprobenumfang zu klein oder aber zu divers ist. Dies könnte einerseits durch die verschiedenen Altersgruppen in den Kollektiven bedingt sein, andererseits durch die verschiedenen Positionen entlang des Femurschaftes. Die Nullhypothese, dass die Parameter der unverbrannten Proben normalverteilt sind musste in jedem Fall verworfen werden. Entgegen der Erwartungen, war bei keinem der betrachteten Parameter am **periostalen Rand** des Knochenfragments im *unverbrannten* Zustand eine Normalverteilung nachweisbar. Die Verteilung mancher Parameter entwickelte sich durch *verbrennungsbedingte* Umwandlungen innerhalb der Knochenmikrostruktur zu einer Normalverteilung. Dies erfolgte allerdings zufällig und nicht einheitlich.

Nichtsdestotrotz wurde bei weiteren statistischen Tests davon ausgegangen, dass es sich um nicht-normalverteilte Daten handelt, da im unverbrannten, nativen Zustand keine Normalverteilung festgestellt werden konnte. Für den Vergleich zwischen normal und nicht-normalverteilten Werten mussten daher Tests für nicht-normalverteilte Werte verwendet werden.

Im Falle der unverbrannten Referenzen in der **Kompaktmitte** konnte nur für die OPD eine Normalverteilung festgestellt werden. Dies scheint sich allerdings ebenfalls eher zufällig ergeben zu haben, da weder sekundäre noch intakte Osteone, Havers'sche Kanäle oder Osteonfragmente normalverteilt sind und die Berechnung der OPD auf intakten und fragmentierten Osteonen basiert. Verbrennungsbedingt über die Temperaturstufen der Verbrennungsreihe ergab sich ein gehäuftes Auftreten einer Normalverteilung, allerdings nicht einheitlich und bei unterschiedlichen Parametern. Auch konnte, im Gegensatz zum periostalen Bereich der Kompakta, für keinen Parameter eine einheitliche Normalverteilung über alle Verbrennungsstufen erkannt werden. Demzufolge war es eher zufallsbedingt, dass sich durch die Verbrennung für einzelne Parameter eine Normalverteilung ergab.

Daher war die Entwicklung der Normalverteilung nicht vorhersagbar und sehr variabel. Dies kann auf die verschiedenen, sich im Knochen ereignenden, verbrennungsbedingten Prozesse wie differentielle Schrumpfung, Gewichtsverlust und mineralogische Veränderungen (bspw. Umstrukturierung der Knochenmikrostruktur), den Verlust der organische Substanzen und andere Vorgänge zurückzuführen sein (Greiner et al., 2019, Greiner et al., 2018, Schmahl et al., 2017, Harbeck et al., 2011). Da im unverbrannten Zustand, abgesehen von der OPD, keiner der Parameter eine Normalverteilung aufwies, wurde auch hier davon ausgegangen, dass es sich um nicht-normalverteilte Daten handelt.

4.4.1.3) Wilcoxon-Test

Die Ergebnisse der einzelnen **Wilcoxon-Tests** wurden für den *mittigen* und *periostalen* Datensatz zusammengefasst, um Wiederholungen in den Erklärungen zu vermeiden.

Trotz der Annahme, dass nach Müller (Müller, 2017), Mussauer (Mussauer, 2017) und Chan et al. (Chan et al., 2007) keine Änderungen in der Parameterzahl entlang des anterioren Femurschaftes bestehen, wurde auf **signifikante Unterschiede in den Parameterzählungen zwischen Positionen entlang des Femurschaftes** getestet. Dabei wurde festgestellt, dass entgegen der ursprünglichen Annahme tatsächlich signifikante Divergenzen vorliegen. Diese traten am **Periost** für alle Positionen zu den am weitesteten distal gelegenen Positionen 10 und 11 auf, wohingegen diese beiden nicht signifikant voneinander abweichen.

Generell fanden sich entlang der Positionen des unverbrannten Femurschaftes **mittig** nur wenige, vereinzelte Unterschiede zwischen den Positionen – anders als am Periost – und die meisten Unterschiede traten ebenfalls zwischen proximal und distal gelegenen Positionen zu Tage.

Die Kompakta wird, je weiter distal entlang der Diaphyse man sich befindet, dünnwandiger, da sich einwirkende Kräfte bzw. Belastungen auf das Diaphysenende verteilen können (Chan et al., 2007). Der Femurschaft ist dagegen runder und kräftiger, um widerstandsfähig gegen solche einwirkenden Belastungen zu sein, aber auch aufgrund der ansetzenden Muskeln an der *Linea aspera*. Dadurch können diese Bereiche signifikant voneinander abweichen. Nach Frost (Frost, 1987b) kann sich das mittlere Gewebealter durch Einwirken der *Modelling Drifts* an verschiedenen Stellen des Knochens unterscheiden, beispielsweise zwischen Periost und Endost. Aber auch physische Aktivität, bedingt durch biomechanische Belastungsunterschiede, kann zu Unterschieden in der Zusammensetzung der Mikrostruktur führen, wodurch die Menge des Knochenumsatzes zwischen verschiedenen anatomischen Positionen im Skelett variiert (Crowder et al., 2016).

Entlang der Positionen des Diaphysenschaftes scheinen sich für das *Periost* demnach mehr signifikante Änderungen zu ergeben als für die *Kompaktamitte*.

Bei den **signifikanten Unterschieden in den Parameterzählungen zwischen den Proben aufeinanderfolgender Temperaturstufen** tritt eine Anhäufung signifikanter Änderungen vor allem um die Verbrennungstemperatur von 300 °C (200 auf 300 °C und 300 auf 400 °C) herum auf, sowohl für den **periostalen Rand** der Femurkompakta als auch den **mittigen Bereich**.

Generell kommt es ab einer Verbrennungstemperatur von 500 °C zu einer schrittweisen Anhäufung der signifikanten Unterschiede, da bei dieser Temperatur die Zerstörung der Organik weiter voranschreitet. Im histologischen Bild sind die Strukturen daher auch oft eher diffus als eindeutig erkennbar, z.T. sogar verschwommen oder nicht sichtbar durch Rußverfärbungen. Daher konnten bei manchen Proben die Parameter der Knochenmikrostruktur auch nicht vollständig erfasst werden. Ab 600 °C traten signifikante Unterschiede in der Osteogeometrie *periostal* und *mittig innerhalb der Temperaturstufen* hervor. Dies kann auf differentielle Schrumpfung der Osteone zurückgeführt werden. Diese kann zum Einen dadurch entstehen, dass sich im Kollektiv Individuen unterschiedlicher Altersklassen befinden. Da Osteone mit steigendem Individualalter kleiner werden (Goliath et al. 2016), sich aber Individuen der Altersklassen *Juvenis*, *Adultas* und *Maturitas* im Probenmaterial befinden, kann sich die Schrumpfung unterschiedlich zwischen diesen Individuen verhalten, da beispielsweise kleine Osteone durch die Verbrennung nichtmehr so stark schrumpfen können wie größere Osteone. Zum anderen kann die differentielle Schrumpfung der Osteogeometrie auf unterschiedliche Mineraldichten der verwendeten Knochen und auf unterschiedliche Positionen der Proben innerhalb des Verbrennungsofens bedingt sein, da der Muffelofen nicht an allen Positionen dieselben Hitzeeinwirkungen aufbringen kann. Dadurch entstehen an manchen Positionen im Ofen größere Veränderungen, an anderen eher kleinere. Diese signifikanten Unterschiede beeinflussen wiederum beeinflussen die Veränderung der Aktivierungsfrequenz, bei welcher sich dann auch solche signifikanten Unterschiede innerhalb einer Temperaturstufe erkennen lassen.

Zwischen 700 und 1000 °C traten sowohl für die **signifikanten Unterschiede in den Parameterzahlen zwischen verbrannter Probe und unverbrannter Referenzprobe** als auch für die **signifikanten Unterschiede in den Parameterzahlen innerhalb einer Temperaturstufe** vermehrt signifikante Änderungen der Parameter auf, die mit steigenden Verbrennungstemperaturen zunehmen. Durch die temperaturinduzierte differentielle Schrumpfung und Umstrukturierung innerhalb der Knochenmikrostruktur zusätzlich zu den mineralogischen Veränderungen können sich diese signifikanten Unterschiede innerhalb der jeweiligen Temperaturstufen unter den Proben ergeben. Diese können zudem ebenfalls durch unterschiedliche Positionen – und damit Temperatureinwirkungen – innerhalb des Muffelofens hervorgerufen werden. Darüber hinaus kann auch das unterschiedliche Alter der Individuen, das Geschlecht, oder auch Krankheiten wie Osteoporose einen Einfluss auf unterschiedliche Veränderungen haben, da sich beispielsweise fragiler Knochen durch die Verbrennung anders verhält als gesunder Knochen. Auch der Mineralgehalt des Knochens spielt bei der verbrennungsbedingten Änderung eine Rolle. Nach Absolonova et al. (Absolonova et al., 2013) wird allerdings der Einfluss des Individualalters auf verbrannte Knochen durch die temperaturinduzierten Modifikationen überlagert. Demnach hätte das Alter keinen maßgeblichen Einfluss, da sich die Strukturen unabhängig vom Alter durch die Temperatureinwirkung verändern.

Im **mittigen Bereich** der Femurkompakta traten bis zu einer Temperatur von 600 °C bei den **signifikanten Unterschiede in den Parameterzahlen innerhalb einer Temperaturstufe**, bei den **signifikanten Unterschiede in den Parameterzahlen zwischen verbrannter Probe und unverbrannter**

Referenzprobe und auch bei den **signifikanten Unterschieden in den Parameterzählungen zwischen den Proben aufeinanderfolgender Temperaturstufen** nur vereinzelt signifikante Änderungen auf, ab 600-700 °C bis hin zu 1000 °C vermehrten sich die signifikanten Divergenzen. Dies ist dem Einfluss der Verbrennungstemperatur geschuldet, welcher sich offenbar im *mittigen* Bereich der Femurkompakta erst ab Temperaturen von 600 bis 700 °C sichtbar manifestiert und nicht wie im *periostalen* Bereich bereits ab 300 °C. Die vermehrten Veränderungen in beiden Bereichen der Kompakta ab Verbrennungstemperaturen von 600-700 °C und aufwärts verlaufen übereinstimmend mit den ab diesen Temperaturen verstärkt einsetzenden mineralogischen Veränderungen, wie Schrumpfung, CO₂-Verlust, Veränderungen in der Kristallstruktur durch Neuordnung von OH⁻ und PO₄³⁻ (Harbeck et al., 2011, Herrmann, 1976a, Marques et al., 2018, Holden et al., 1995a, Greiner et al., 2019, Greiner et al., 2018). Die kongruent verlaufenden signifikanten Unterschiede sekundärer und intakter Osteone sowie Havers'scher Kanäle von 600 bis 1000 °C sind vorwiegend bedingt durch signifikante Änderungen der sekundären Osteone, was sich wiederum auf die Havers'schen Kanäle und intakten Osteone auswirkt, da deren Anzahl maßgeblich auf der Zahl der sekundären Osteone beruht. Die Zahl der Typ-II-Osteone ist bei der Berechnung der intakten Osteone weniger einflussnehmend und auch die Zahl der Havers'schen Kanäle weist nur geringfügig und sehr selten von der Anzahl der sekundären Osteone ab. Ab 700 °C treten noch osteonaler Knochen und OPD dazu, welche ebenfalls von der verbrennungsbedingten Variabilität der sekundären Osteone beeinflusst sind.

Allerdings haben höhere Verbrennungstemperaturen auch eine längere Brenndauer durch das Aufhitzen des Ofens zur Folge, wodurch die Knochenfragmente einer längeren Hitzeexposition ausgesetzt sind. Für den Anteil der Generallamellen treten bei den **signifikanten Divergenzen innerhalb einer Temperaturstufen periostal** und *mittig* Unterschiede zwischen 700 und 1000 °C auf – jeweils innerhalb der Verbrennungsstufe – bedingt durch die unterschiedlichen Verfärbungen bzw. verbrennungsbedingten Änderungen in der Sichtbarkeit der übrigen histologischen Strukturen. Bei manchen Proben ergab sich durch das Abschleifen bzw. Polieren eine erheblich bessere Sichtbarkeit, bei anderen lag eine temperaturbedingte Zerstörung der Mikrostruktur vor, was abermals die Auswertbarkeit der Parameter beeinflusst. Diese verbrennungsbedingten Veränderungen sind generell aber ebenso auf das Individualalter, das Geschlecht, vorherrschende Krankheiten, etc. zurückzuführen. Generell würden signifikante Unterschiede innerhalb von Temperaturstufen – vor allem in den höheren Temperaturbereichen – auch für eine differentielle Schrumpfung sprechen.

Im Falle der **signifikanten Unterschiede in den Parameterzählungen zwischen den Proben aufeinanderfolgender Temperaturstufen** können vermehrte Unterschiede zwischen 900 und 1000 °C auf der Erhöhung der Verbrennungstemperatur auf die höchste Temperaturstufe basieren. Dadurch entstehen weitere relevante Veränderungen in der histologischen Struktur und mineralogischen Zusammensetzung des Knochenfragments. Besonders der Schritt auf 1000 °C bewirkt, dass sich die osteonalen Strukturen durch die Schrumpfung einander annähern, wodurch eine Erhöhung der sekundären und intakten Osteone, Typ-II-Osteone und Havers'schen Kanäle entsteht. Castillo et al. (Fernandez Castillo et al., 2013) beschreiben beispielsweise ab einer Temperatur von 900 °C ein zerbersten Havers'scher Kanäle. Dadurch kann eine Zerstörung der Mikrostruktur durch vermehrtes

Auftreten von Hitzerissen bedingt werden, was Einfluss auf die Erkennbarkeit histologischer Strukturen nimmt. In der mineralogischen Betrachtung zeigt sich ab 800 °C die Bildung von CaO bzw. Buchwaldit durch die Dekomposition des Bioapatits. Hierdurch wird eine weitere Veränderung der Mikrostruktur hervorgerufen, die ebenfalls Einfluss nehmen kann auf die histomorphometrischen Parameter (Schmahl et al., 2017, Greiner et al., 2019).

Fazit

Grundsätzlich sind signifikante Änderungen zwischen bzw. innerhalb von Temperaturstufen und zur unverbrannten Referenz und entlang der unverbrannten Positionen bei der Zahl der Resorptionslakunen, Volkmann'schen Kanäle, nicht-Havers'schen Kanäle und Typ-II-Osteone nicht aussagekräftig. Diese Parameter sind sehr variabel in ihrer Anzahl und finden sich in zu geringem Maße, um eine statistische signifikante Aussage darüber treffen zu können. Signifikante Änderungen dieser Parameter bedeuten demnach nicht gleichzeitig auch einen temperaturbedingten Einfluss, da die Anzahl teils auch allein von der Positionierung des Gitternetzes auf dem histologischen Bild oder auch beispielsweise von Individualalter, Ernährung, Mineralstoffbedarf im Körper beeinflusst werden kann (Jaworski et al., 1972, Pankovich et al., 1974, Ericksen, 1991, Yoshino et al., 1994, Watanabe et al., 1998, Richman et al., 1979, Cohen und Harris, 1958, Beddoe, 1977). Allerdings wurde dies von dem Programm Gimp2 automatisch im auszuwertenden Bild positioniert, um einen persönlichen Voreingenommenheit durch unbewusste oder bewusste Vorauswahl des betrachteten bzw. zu bewertenden histologischen Feldes mit möglichst vielen oder möglichst wenigen bewertbaren Strukturen zu vermeiden. Da allerdings das Gitternetz durch das Programm stets mittig positioniert wurde, lässt sich eine unterbewusste Vorauswahl nicht gänzlich ausschließen.

Frost (Frost, 1969) beschreibt bereits, dass sich unterschiedliche Positionen entlang der Femurdiaphyse deutlich in ihrer mikrostrukturellen Zusammensetzung unterscheiden können. Dies konnte auch in dieser Studie festgestellt werden, da sich, entgegen der ursprünglichen Annahme, die Anzahl der histomorphometrischen Parameter teils signifikant unterschieden zwischen den Positionen des Femurschaftes. Diese Divergenzen fanden sich mehr im *periostalen* aber auch im *mittigen* Bereich der Kompakta. Solche Unterschiede konnten bei unverbranntem Knochenmaterial vor allem zwischen Periost und Endost festgestellt werden, finden sich allerdings teilweise bereits innerhalb eines Knochenfragmentes oder histologischen Schnitts (Iwaniec et al., 1998, Frost, 1969). Durch die Verbrennung und die damit verbundene Schrumpfung kann dieser Effekt noch zusätzlich verstärkt werden.

Die dichter gepackte Knochenmikrostruktur der *Kompaktmitte* im Vergleich zum *periostalen* Rand könnte sich als vorteilhaft für die Auswertung kremierter Knochenfragmente erweisen, da osteonaler Knochen die Ausbreitung von Mikrofissuren verhindern bzw. reduzieren kann (Gocha und Agnew, 2016). Dies könnte dazu führen, dass die Knochenmikrostruktur verbrannten Knochenmaterials auch bei hohen Verbrennungstemperaturen noch intakter bzw. stabiler ist als periostal. Dadurch wäre die Auswertung der histomorphometrischen Parameter und damit die histologische Altersbestimmung erleichtert.

4.4.1.4) Korrelation

Die Ergebnisse der Parameterkorrelationen wurden für den *mittigen* und *periostalen* Datensatz zusammengefasst, um Wiederholungen in den Erklärungen zu vermeiden. Auf die Geschlechtsunterschiede in den Korrelationen und deren mögliche Erklärungen wird in Kapitel 4.4.3 näher eingegangen.

Korrelation der unabhängigen (gezählten) Parameter miteinander und mit Position, Alter und Geschlecht

Im *mittigen* und *periostalen* Bereich der Kompakta zeigt sich für die Parameter sekundäre und intakte Osteone, Havers'sche Kanäle und die OPD eine stark positive Korrelation miteinander. Diese kann dadurch erklärt werden, dass die Zahl der Havers'schen Kanäle zumeist der Zahl der sekundären Osteone entspricht und diese wiederum zusammen mit der Zahl der Typ-II-Osteone die Zahl der intakten Osteone bilden (Intakte Osteone= Sekundäre Osteone + TypII-Osteone). Die OPD dagegen basiert auf der Anzahl der intakten Osteone und der Osteonfragmente. Sie beinhaltet dementsprechend auch die Anzahl der sekundären Osteone. Da die Zahl der Typ-II-Osteone generell so gering ist, machen sekundäre Osteone den Hauptanteil der intakten Osteone und auch der Havers'schen Kanäle aus. Allerdings kann die Zahl der Havers'schen Kanäle geringfügig von der Zahl der intakten Osteone abweichen, da bei der Auswertung auch Havers'sche Kanäle mitgezählt wurden, welche zu 50% noch innerhalb des Gitternetzes lagen. Solche nur zur Hälfte innerhalb des Gitternetzes gelegenen Strukturen wurden für die intakten Osteone nicht mitgezählt, sofern mehr als 50% des gesamten Osteons außerhalb des Gitternetzes lagen. In den meisten Fällen ist die Anzahl der Havers'schen Kanäle und intakten Osteone aber gleich, wodurch wiederum die Zahl der sekundären Osteone den Hauptanteil dieser beiden Parameter bildet. Somit entsteht eine Abhängigkeit der Parameter voneinander, die sich in der Korrelation wiederfindet. Dieselben Parameter korrelieren dementsprechend natürlich auch stark positiv mit dem prozentualen Anteil osteonalen Knochens, da dessen Quantifizierung auf der Zahl der Osteone bzw. intakten Osteone im Gitternetz beruht. Auch die Korrelation der osteonalen Parameter bzw. von OPD und Osteonfragmenten lässt sich dadurch erklären, dass die OPD zum einen Teil aus der Zahl der intakten Osteone und zum anderen Teil aus der Zahl der Osteonfragmente besteht. Die Korrelation von Osteonfragmenten und intakten Osteonen kann dadurch bedingt sein, dass es sich bei Osteonfragmenten um frühere Osteonengenerationen handelt. Daher können diese mit dem generellen Verhältnis bzw. der Verteilung der Osteone korrelieren. Zudem bedingen sich beide Parameter gegenseitig, denn wenn beispielsweise mehr Osteonfragmente vorhanden sind, liegen weniger sekundäre Osteone vor und umgekehrt, da diesen zu den Grundeinheiten des adulten Knochens gehören. Wie bei Keough (Keough, 2007) zeigte sich eine Korrelation der osteonalen Parameter mit dem Individualalter, jedoch keine Korrelation des Individualalters mit dem Anteil an Generallamellen. Ursächlich dafür könnte sein, dass sich insgesamt nur wenige jüngere Individuen im verwendeten Datensatz befanden.

Die Korrelation der Positionen mit Osteonen und Resorptionslakunen könnte dadurch bedingt sein, dass sich die Position gleichsam wie die Temperatur bei den verbrannten Proben verhält – je weiter distal man sich entlang der Diaphyse befindet, desto höher wird die entsprechende

Verbrennungstemperatur, desto höher ist durch die hitzebedingte Schrumpfung die Anzahl an osteonalen Parametern und Resorptionslakunen. Zudem haben sich auch im unverbrannten Zustand Unterschiede in den Parameterzahlen von proximal nach distal gehend ergeben.

Ebenso ergibt sich eine Korrelation zwischen Resorptionslakunen, dem Anteil resorbierten Knochens und der Position, da sich die Zahl der Resorptionslakunen vor allem am *Periost* mit steigender Verbrennungstemperatur verringert, wodurch der Anteil resorbierten Knochens sich entsprechend ebenso verringert. Auch Generallamellen korrelieren mit der Position, da sich mit höherer Temperatur bzw. Position mehr sich im histologischen Schnitt finden lassen.

Die Korrelation der gezählten Parameter miteinander lässt sich demnach vorwiegend durch eine gegenseitige Abhängigkeit dieser Strukturen voneinander erklären.

Korrelation der abhängigen (errechneten) Parameter miteinander und mit Position, Alter und Geschlecht

Die leicht negative Korrelation zwischen Osteongeometrie und Temperatur bzw. Position lässt sich darauf zurückführen, dass die Osteongeometrie mit steigender Verbrennungstemperatur sinkt und die Verbrennungstemperatur mit der Position entlang der Diaphyse für die verbrannten Proben übereinstimmt. Die negative Korrelation zwischen AOC, OPD und Osteongeometrie entsteht dadurch, dass mit steigender Verbrennungstemperatur die Zahl der Osteone (Basis von OPD und AOC) steigt, die Osteongeometrie aber schrumpft. Zwischen Aktivierungsfrequenz, BFR und Osteongeometrie besteht eine positive Korrelation, da die Berechnungen dieser beiden Parameter von der Osteonfläche abhängen. Allerdings korreliert die Aktivierungsfrequenz auch positiv mit der AOC, da diese auch in der Formel zur Berechnung der Aktivierungsfrequenz enthalten ist. Der Korrelation von Resorptionslakunenfläche und Osteongeometrie liegt wahrscheinlich die verbrennungsbedingte Schrumpfung beider Parameter zugrunde. Osteongeometrie, Aktivierungsfrequenz und BFR korrelieren negativ mit dem Individualalter, da sich die beiden Raten – basierend auf der Osteongeometrie – durch die Verbrennung negativ zum Individualalter verhalten und rückläufig sind, obwohl es sich bei dem Datensatz um ein überaltertes Kollektiv handelt. Das Verhalten der Aktivierungsfrequenz mit steigendem Individualalter ist auch in der Literatur nicht vollständig geklärt. So schreibt Frost (Frost, 1964) von einem Absinken der Aktivierungsfrequenz bei älteren Individuen. Dies würde mit dem Erreichen der $OPD_{Asymptote}$ übereinstimmen. Heaney (Heaney, 2003) spricht dagegen von einem Anstieg der Aktivierungsfrequenz mit dem Individualalter. Dies könnte wiederum durch den postmenopausalen Anstieg der Knochenresorption bei weiblichen Individuen und einem damit einhergehenden Anstieg der Aktivierungsfrequenz bzw. der Remodelingvorgänge, zum Erhalt der Integrität des Knochens hervorgerufen sein (Martin et al., 1998).

Die positive Korrelation zwischen OPD und Individualalter in beiden Bereichen der Femurkompakta erklärt sich dadurch, dass mit steigendem Individualalter die OPD bis zur Asymptote ansteigt und dadurch positiv mit dem Alter korreliert. Dies konnte auch bei Bednarek et al. (Bednarek et al., 2009), Botha et al. (Botha et al., 2018) und Lagacé et al. (Lagacé et al., 2019) festgestellt werden. Die negative Korrelation zwischen Individualalter und Osteonfläche (bzw. Osteongeometrie) liegt zum einen daran, dass sich mit steigendem Individualalter mehr Osteone pro Flächeneinheit finden als bei jüngeren

Individuen. Zum Anderen scheint auch eine Verkleinerung der Osteone mit steigendem Individualalter aufzutreten (Lagacé et al., 2019). Auch Botha et al. (Botha et al., 2018) stellten eine geringe Korrelation zwischen der Osteonfläche und dem Alter fest. Walker et al. (Walker et al., 1994) beschrieben dagegen, dass sich für die OPD keine Korrelation mit dem Alter feststellen lässt. Dies konnte in der vorliegenden Studie nicht bestätigt werden.

Die Korrelation der errechneten histomorphometrischen Parameter lässt sich dementsprechend einerseits auf die verbrennungsbedingte Schrumpfung der Osteone und andererseits auf die verbrennungsbedingte Akkumulierung der histomorphometrischen Parameter zurückführen.

4.4.2) Ausreißer

Die mittels des R-Packages MVO outlier detektierten Ausreißer erstreckten sich grundsätzlich über Individuen aller Altersklassen, wobei vermehrt *juvenile*, *adulte* und *spätsenile* Individuen darunterfielen. Diese Individuen fallen aus dem Gesamtdatensatz raus, da sie an den oberen Grenzen der Daten liegen (sehr jung und sehr alt) und dadurch extreme Werte darstellen. Dazu gehört beispielsweise Individuum WF45 mit einem Individualalter von 16 Jahren zum Todeszeitpunkt. Alle anderen Individuen des Kollektivs waren älter, weshalb sie eine geringere Anzahl nicht-Havers'scher Kanäle hatten. Da durch den Ausreißertest alle Datenzeilen von Individuum WF45 aus dem Datensatz entfernt wurden, war der Anteil an männlichen Individuen die als Ausreißer deklariert wurden höher als der der weiblichen Individuen.

Die Verwendung der PCOut-Methode erwies sich als vorteilhaft, da diese explizit geeignet ist für Daten, deren Änderungen auf sekundären Prozessen beruhen (Filzmoser et al., 2008, Filzmoser et al., 2005{Filzmoser, 2017, Filzmoser und Gschwandtner, 2017}). Bei dem vorliegenden Kollektiv nehmen beispielsweise Umwelt, Hormone, Ernährung, aber vor allem Individualalter und Verbrennungstemperatur einen äußeren Einfluss auf die Daten. Es wird die Form der Daten miteinbezogen und die oberen und unteren 2% der Werte am Extremwert werden untersucht. Es ist festzustellen, dass nach der Bereinigung des Datensatzes im *mittigen* und *periostalen* Datensatz noch weit vom Median bzw. den Quartilen entfernte Punkte in der graphischen Darstellung (Abbildung 66 und Abbildung 67) erkennbar sind. Dies liegt daran, dass auch in dem verkleinerten Datensatz noch extreme Werte von dessen Mittelpunkt vorhanden sind. Würde also an diesen Outlier-bereinigten Datensätzen nochmals die PCOut-Methode angewendet werden, würden wiederum Outlier detektiert werden, welche wiederum Extremwerte für den bereinigten Datensatz darstellen und entfernt werden können. Dies wäre so lange durchführbar, bis der Datensatz so eingeeengt ist, dass sich keine Maximal- oder Minimalwerte ergeben und der Datensatz nur noch nahezu identische Daten beinhaltet. Allerdings ist dies nicht sinnvoll für einen Datensatz, welcher sich aus echten biologischen Daten zusammensetzt und daher recht dynamisch in den Extremwerten ist, welche sich durch die Verbrennung teils extremer darstellen.

Im ***periostalen Bereich*** der Kompakta wurden am häufigsten unverbrannte Referenzproben entfernt, da alle vorhandenen Datenzeilen von Individuum WF45 (über alle Positionen) aus dem Datensatz eliminiert werden mussten, was insgesamt 33 von 56 zu entfernenden Datenzeilen darstellte. Von den

übrigen Ausreißern stammten 27 Datenzeilen aus der Temperaturstufe 1000°C, bei welcher die größten finalen Abweichungen zur korrespondierenden Referenz entstehen. Im Hinblick auf die Änderung der Parameterverteilung bzw. der Entwicklung der Parameter über die Verbrennungsstufen war nach dem Entfernen der Ausreißer eine reduzierte Spannweite von AOC, Aktivierungsfrequenz und BFR feststellbar. Ansonsten hat sich die Dynamik des Datensatzes durch das Entfernen der Ausreißer nicht maßgeblich verändert.

Aus der **mittigen Femurkompakta** wurden überwiegend Proben von Individuen der Altersklasse *Senilis* entfernt, wodurch der Ausreißer-Datensatz nicht wie im periostalen Bereich der Kompakta hauptsächlich aus Daten des Individuums WF45 bestand. Individuen der Altersklasse *Senilis* bilden schließlich auch den Hauptbestandteil des Gesamtdatensatzes. Es wurden vorwiegend Datenpunkte der unverbrannten Referenzproben entfernt (n=47), die restlichen Ausreißer verteilten sich über die Verbrennungstemperaturen. Bei der Betrachtung der Änderung der Parameter über die Verbrennungsstufen nach Outlier-Bereinigung wurde auch hier deutlich, dass sich die histomorphometrischen Parameter nicht maßgeblich verändern. Auch konnte durch die Ausreißer-Entfernung die Spannweite von Aktivierungsfrequenz und BFR nicht reduziert werden.

Bei beiden Datensatz hat sich demzufolge trotz vollständiger Entfernung der Daten von Individuum WF45 die Verteilung der Parameter nicht maßgeblich verändert.

4.4.3) Geschlechtsunterschiede

Nachfolgend werden die Geschlechtsunterschiede im *periostalen* und *mittigen* Bereich der Femurkompakta und deren temperaturinduzierte Veränderungen erläutert.

Da bei Leichenbrandmaterial eine Geschlechtsbestimmung meist genauso erschwert ist wie die morphologische Individualaltersbestimmung ist es vorteilhafter, geschlechtsunabhängige Regressionen zu erstellen bzw. lineare Modelle an einem Datensatz zu erheben, der sich aus beiden Geschlechtern zusammensetzt, damit diese Regressionen auch auf Leichenbrandmaterial besser angewendet werden können. Da es sich vor allem bei dem Kollektiv des Münchner Westfriedhofs um ein überaltertes Kollektiv handelt, können diese Geschlechtsunterschiede dadurch nivelliert worden sein. Dies kann auch dadurch bedingt sein, dass nach Ruff (Ruff, 2008) die Abnahme mechanischer Belastung auf das Skelett durch technische Neuerungen, sesshaften Lebensstil, etc. eine Grazilisierung des Skeletts männlicher Individuen stattgefunden hat.

Im Vergleich der **Verteilung der histomorphometrischen Parameter** und deren temperaturbedingter Entwicklung war augenscheinlich, dass die männlichen Individuen des Datensatzes am *periostalen* Rand der Kompakta generell mehr Generallamellen und resorbierten Knochen besitzen, sowie eine höhere Aktivierungsfrequenz als die weiblichen Individuen. Dadurch, dass im Datensatz der männlichen Individuen auch Individuen der Altersklasse *Juvenis* bzw. *Adultas* enthalten sind, zeigt dieser Datensatz einen höheren Anteil nicht-umgebauten Knochens (Generallamellen). Da jedoch bei einem der Individuen (WF45) darüber hinaus möglicherweise noch eine Stoffwechselstörung oder Knochenumbau Störung vorliegt und der restliche Datensatz ältere Individuen beinhaltet, kann auch

die erhöhte Zahl an Resorptionslakunen erklärt werden. Davon abgesehen verhalten sich beide Kollektive verbrennungsbedingt gleich, wodurch eine weitere zusammengefasste Auswertung beider Datensätze in Betracht gezogen wurde.

Männliche Individuen zeigen bereits im periostalen Bereich der Kompakta mehr resorbierten Knochen als weibliche Individuen. Dies war entgegen der Erwartungen, da weibliche Individuen durch die Umstellung des Hormonstatus und dem Einsetzen der Menopause häufiger an Osteoporose leiden. Eine Erklärung für den erhöhten Anteil resorbierten Knochens wäre die in der Literatur (Ruff, 2008) beschriebene Anpassung des Skeletts männlicher Individuen an das weiblicher Individuen in der Neuzeit, basierend auf ähnlichen Bewegungsmustern.

Eine weitere Interpretationsmöglichkeit wäre, dass der erhöhte Anteil resorbierten Knochens schlicht auf Knochenumbau oder Knochenreparaturmechanismen zurückzuführen ist. Da es sich um Knochen mit einer Liegezeit von bis zu 60 Jahren handelt und die betreffenden Gräber in den 2010er Jahren aufgelöst wurden, fallen die Individuen zum Teil in einen Sterbezeitraum um die 1950er Jahre und früher (z.B.(männliches) Individuum WF2 mit einer Liegezeit von 60 Jahren und einem Sterbealter von 80 Jahren). Daher könnten Knochenumbau bzw. Knochenreparaturmechanismen in Zusammenhang mit dem ersten oder zweiten Weltkrieg gesetzt werden, beispielsweise durch verletzungsbedingte Umbauprozesse. Der Sterbezeitraum um die 1950er Jahre datiert sich etwa 5 Jahre nach Ende des zweiten Weltkriegs. Da Knochenumbauprozesse im Alter langsamer erfolgen, könnte dies auf eine erhöhte Belastung oder beispielsweise auch auf eine Hungerkrise in der Kriegs- bzw. Nachkriegszeit und damit verbundene Knochenresorption hinweisen, welche Einfluss auf die Knochenmikrostruktur ausgeübt hat.

Im *mittigen* Bereich der Femurkompakta zeigte sich für männliche und weibliche Individuen bei den histomorphometrischen Parametern die gleiche Verteilung. Allerdings wiesen AOC, Aktivierungsfrequenz und BFR bei männlichen Individuen eine sehr hohe Spannweite über alle Verbrennungstemperaturen und bei den unverbrannten Referenzproben auf, bei weiblichen Individuen ist die Spannweite wesentlich geringer und nur bei 1000 °C etwas erhöht, was wiederum durch die Tatsache bedingt sein könnte, dass im Datensatz der männlichen Individuen die beiden jüngeren Individuen inkludiert sind.

Zudem ist für die Zahl der sekundären Osteone bei männlichen Individuen eine wesentlich höhere verbrennungsbedingte Zunahme erkennbar als bei den weiblichen Individuen. Möglicherweise ist dies dadurch bedingt, dass der Datensatz der weiblichen Individuen, welcher nur Individuen höheren Alters beinhaltet, *mittig* keine so stark ausgeprägte Schrumpfung und damit verbrennungsbedingte Akkumulierung der histologischen Strukturen mehr aufzeigen kann als der Datensatz der männlichen Individuen, welcher auch zwei jüngere Individuen umfasst. Da bei den jüngeren Individuen – vor allem da es sich um die Altersklassen *Juvenis* und *Adultas* handelt – die Knochenmikrostruktur im unverbrannten Zustand längst nicht so dicht gepackt ist wie bei den älteren Individuen der Altersklasse *Senilis*, ist hier eine verbrennungs- und schrumpfungsbedingte Anhäufung in höherem Maße möglich.

Ein **Shapiro-Wilk-Test** auf die beiden Datensätze getrennt voneinander hat sowohl für das *Periost* als auch die *Kompaktmitte* ergeben, dass beide Datensätze normalverteilt sind – demnach wird durch die Vermischung der Daten der beiden Geschlechter der Gesamtdatensatz zu einem nicht-normalverteilten Datensatz. Folglich scheinen die Werte der Parameter bei der Vermischung so starke Streuungen aufzuweisen, dass die Daten keiner Normalverteilung mehr zugeordnet werden können.

Der **Wilcoxon-Rangsummentest** brachte *periostal* und *mittig* nur wenige Unterschiede zwischen den Parameterzahlen bei den verschiedenen Verbrennungstemperaturen hervor, wobei sich die meisten Divergenzen bei 1000 °C manifestierten. Damit könnte diese Temperaturstufe auch ausschlaggebend für die Änderung der Normalverteilung bei der Vermischung der beiden Datensätze bei dem *Shapiro-Wilk-Test* sein.

Signifikante Unterschiede zwischen beiden Geschlechtern entlang der Diaphyse fanden sich *periostal* wie *mittig* vor allem im *Anteil der Generallamellen*. Dies kann dadurch bedingt sein, dass die männlichen Individuen einen höheren Anteil an Generallamellen aufweisen als die weiblichen Individuen. Ursächlich dafür ist, dass unter den männlichen Individuen zweimal die Altersklasse *Juvenis* vertreten ist, bei den weiblichen Individuen finden sich dagegen nur die Altersklassen *Maturitas* und *Senilis*.

Durch die jüngeren Individuen (16 und 20 Jahre) aus dem Datensatz der männlichen Individuen entstehen die signifikanten Unterschiede in der Zahl sekundärer Osteone über die Verbrennungstemperaturen. Dies bewirkt wiederum signifikante Unterschiede auch in der Zahl der Havers'schen Kanäle, intakten Osteone, der OPD und der AOC. Burr et al. (Burr et al., 1990) fanden eine höhere OPD bei männlichen Individuen, welche sie auf höhere Energie verbrauchende Qualitäten des männlichen Skeletts zurückführten. Richman et al. (Richman et al., 1979) erkannten keine Unterschiede in der Zahl sekundärer Osteone zwischen den Geschlechtern. Bei Mulhern und van Gerven (Mulhern und Van Gerven, 1997) dagegen zeigten sich bei Männern mehr intakte Osteone als bei Frauen. Nach Ericksen (Ericksen, 1991) und Doppler (Doppler et al., 2006) finden sich keine geschlechtsbedingten Unterschiede in der Zahl nicht-Havers'scher Kanäle. Allerdings muss der mögliche Einfluss von WF45 auf diesen Parameter in Betracht gezogen werden. Durch die Schrumpfung treten bei den älteren Individuen noch mehr Struktureinheiten pro Fläche (1mm²) auf, was aber im Falle von Individuum WF45 nicht im selben Maße möglich ist, da keine bis kaum sekundäre Osteone vorhanden sind. Dies bedingte das Aufkommen signifikanter Unterschiede zwischen den Datensätzen. Auch Unterschiede im Anteil fragmentalen Knochens könnten daher rühren, dass bei Individuum WF45 keine bis kaum Osteonfragmente vorhanden sind, bei den überwiegend senilen Individuen des weiblichen Datensatzes jedoch schon. Britz et al. (Britz et al., 2009) fanden signifikante Unterschiede in Osteonfläche und Osteondurchmesser zwischen beiden Geschlechtern, welche sich für den untersuchten Datensatz in der *Kompaktmitte* für die Osteongeometrie auch bestätigen ließen. Diese fanden sich für die am weitesten distal gelegene Position am Diaphysenschaft und könnten bedingt sein durch die unterschiedliche Kompaktadicke an dieser Position.

Die Unterschiede in der Kompaktadicke ebenfalls an der unterschiedlichen Altersverteilung der beiden Kollektive liegen, welche wiederum durch unterschiedliche Bewegungsmuster oder Krankheiten wie Osteoporose entstehen können.

Die geringe Anzahl signifikanter Unterschiede zwischen den Geschlechtern kann allerdings nach Crowder (Crowder et al., 2016) dadurch bedingt sein, dass zu kleine Stichprobengrößen Geschlechtsunterschiede nicht aufzeigen können. Ursächlich können allerdings auch die Anwendung falscher statistischer Modelle oder externe Faktoren wie physische Aktivität, Knochenbildungsraten und Sterbealter sein (Crowder et al., 2016).

Die **Korrelation der Parameter** innerhalb des weiblichen und männlichen Geschlechts zeigte in beiden Bereichen der Kompakta vor allem auf, dass zwar bei beiden Geschlechtern dieselben Parameter korrelieren, allerdings unterschiedlich stark. Bei *Männern* und *Frauen* zeigt sich eine stark positive Korrelation zwischen den osteonalen Parametern (sekundären Osteonen, intakten Osteonen, Havers'schen Kanälen, AOC und OPD). Zwar beruhen die Berechnungen dieser Parameter größtenteils aufeinander, bei männlichen Individuen korrelieren jedoch noch zusätzlich Typ-II-Osteone, Osteonfragmente, Aktivierungsfrequenz, BFR, osteonaler Knochen und Individualalter. Auch dafür könnte die Ursache körperliches Arbeiten in der Nachkriegs- bzw. Kriegszeit bedingt sein, welche zu höheren Knochenbildungsraten und Aktivierungsfrequenzen führen, die durch den Temperatureinfluss noch weiter verstärkt werden. Die Knochenumbaurate ist nach Goldman et al. (Goldman et al., 2003) bei männlichen Individuen schneller als bei weiblichen Individuen, was die beobachteten zusätzlichen Korrelationen erklären könnte. Bei weiblichen Individuen dagegen korrelieren diese Parameter zudem leicht positiv mit den nicht-Havers'schen Kanälen und der Temperatur. BFR und Aktivierungsfrequenz korrelieren in der *Kompaktamitte* der weiblichen Individuen stark negativ mit den osteonalen Parametern. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass diese Frauen weniger körperliche Arbeit verrichteten und die Knochenstruktur dadurch weniger dicht gepackt ist. Diese Parameter korrelieren dafür stark positiv mit Osteongeometrie, was durch die Temperatureinwirkung bedingt ist.

Bei *männlichen* Individuen hat demnach das Individualalter einen höheren Zusammenhang mit den osteonalen Parametern. Dies kann möglicherweise daher rühren, dass in diesem Datensatz auch die jüngeren Individuen noch inkludiert sind, bei den *weiblichen* Individuen gibt es dagegen keine jüngeren Individuen. Bei weiblichen Individuen hat dagegen die Temperatur einen höheren Einfluss als das Alter, da diese *am Periost* und *in der Kompaktamitte* auch leicht positiv mit den osteonalen Parametern korreliert. Dies liegt möglicherweise daran, dass die Temperatur die Schrumpfung bewirkt, welche zu den verbrennungsbedingten Akkumulationen der osteonalen Parameter führt. Da der Datensatz der weiblichen Individuen größer ist könnte vermutet werden, dass dieser Datensatz die reale Korrelation der Parameter eher abbildet als der der männlichen Individuen. Allerdings ist bei den weiblichen Individuen die Überalterung des Kollektivs nicht außer acht zu lassen, was die Korrelation dahingehend beeinflussen könnte. Die Altersklassen der männlichen Individuen hingegen sind noch weiter verteilt.

Beide Geschlechter zeigen *periostal* wie *mittig* eine stark negative Korrelation der osteonalen Parameter mit der Osteongeometrie und den beiden Parametern der Resorptionslakunen. Die Abnahme der Osteongröße mit steigendem Individualalter wird von vielen Autoren beschrieben (Currey, 1964, Watanabe et al., 1998, Thompson und Galvin, 1983, Burr et al., 1990, Cho et al., 2006). Ebenfalls bei beiden Geschlechtern zeigen diese Parameter eine stark negative Korrelation mit der Temperatur. Dies ist vermutlich zurückführbar auf die hitzebedingte Schrumpfung, wodurch sich mit steigender Verbrennungstemperatur Osteongeometrie und Resorptionslakunen verringern.

Die positive Korrelation der Temperatur mit sekundären Osteonen, intakten Osteonen und Havers'schen Kanälen bedeutet, je höher die Verbrennungstemperatur – desto mehr Parameter sind pro Flächeneinheit vorhanden, weshalb diese positiv miteinander korrelieren. Für die OPD ergibt sich derselbe ebenfalls eine temperaturbedingte Akkumulation. Botha et al. (Botha et al., 2018) stellten dagegen keinerlei Unterschiede in der Korrelation von OPD und Osteonfläche mit dem Geschlecht fest. Grundlegend scheint die unterschiedliche Altersverteilung zwischen beiden Datensätzen einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der statistischen Untersuchung zu nehmen.

Fazit

Generell stellt die postmenopausale Verdünnung der weiblichen Knochenkompakta einen limitierenden Faktor für den Vergleich der Knochenmikrostruktur weiblicher und männlicher Individuen im Hinblick auf geschlechtsbedingte Unterschiede dar (Doppler et al. 2006). Da bei der Untersuchung des Probenmaterials allerdings zuvor darauf geachtet wurde, Individuen mit einer offensichtlich osteoporotisch veränderten Knochenmikrostruktur (WF48) von der Untersuchung auszuschließen, konnte die Untersuchung auf Geschlechtsunterschiede der Knochenstruktur durchgeführt werden. Geschlechtsunterschiede bzw. Geschlechtsdimorphismen haben sich über Generationen hinweg vermindert (Ruff und Hayes, 1983a, Ruff und Hayes, 1983b, Ruff, 2008). Dies zeigt beispielsweise der Vergleich von „Jäger und Sammler“-Populationen mit landwirtschaftlich lebenden Populationen und Industriepopulationen. Dabei scheinen sich vor allem die Femora männlicher Individuen denen weiblicher Individuen immer mehr anzupassen scheinen (Ruff, 2008). Die Unterschiede in der Osteongeometrie zwischen den Geschlechtern wurden auch bei Britz et al. (Britz et al., 2009) erkannt, wobei diese auch einen Zusammenhang zwischen Körpergewicht und Osteongeometrie feststellten.

Generell erweist sich allerdings der Rückgang der Geschlechtsunterschiede für die histologische Altersbestimmung an verbranntem Knochenmaterial als vorteilhaft, da oftmals eine morphologisch eindeutig Geschlechtsbestimmung nicht möglich ist.

4.4.4) Vergleich periostal und mittig

Bei der vergleichenden Betrachtung des *periostalen Randes* und der *Kompaktamitte* des Femurs fiel auf, dass sich im unverbrannten Zustand über den Schaft die meisten Parameter signifikant unterschieden. Dies liegt zum Einen daran, dass im periostalen Bereich der Kompakta appositionelles Dickenwachstum erfolgt, womit neuer Knochen angebaut wird (Bell et al., 2001). Lazenby (Lazenby,

1990a, Lazenby, 1990b) sowie Burr (Burr, 1992) beschreiben einen kontinuierlichen Anbau am periostalen Rand der Kompakta älterer Individuen, um dem endostalen Abbau an Knochenmasse entgegenzuwirken und die Beständigkeit des Knochens zu erhalten. Daher ist die Knochenmikrostruktur weniger dicht gepackt als im mittigen Bereich der Kompakta, in welchem sich Umbau statt Anbau findet. Das reale Sterbealter eines Individuums für die histologische Altersbestimmung wird eher im *mittigen Bereich* der Kompakta widerspiegelt, da hier bereits mehr Umbau passiert ist. Dies führt zu Divergenzen zwischen den Bereichen. Die Annäherung von Kompaktamitte und Endost, je weiter distal man sich entlang des Diaphysenschaftes befindet, kann zu einem gehäuftem Vorkommen von Resorptionslakunen führen. Ursächlich dafür ist, dass auch im unverbrannten Zustand die Femurkompakta zur distalen Epiphyse hingehend dünnwandiger wird und mittiger und endostaler Bereich ineinander übergehen. Dadurch kommen vor allem in den distalen Bereichen signifikante Unterschiede zwischen den Positionen zustande. Auch im verbrannten Zustand bleiben die signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Bereichen der Kompakta bestehen, da diese sich bereits im unverbrannten Zustand manifestierten und durch den Temperatureinfluss verstärkt als werden. Wie bereits erwähnt könnten sich auch periostaler und mittiger Bereich durch die verbrennungsbedingte Schrumpfung einander annähern. Allerdings steigt beispielsweise im periostalen Bereich die Anzahl der Generallamellen wesentlich stärker an als im mittigen Bereich. Für die Zahl der Osteonfragmente ist ebenso eine zahlreiche Anhäufung im periostalen Bereich zu vermerken, was auf eine Annäherung beider Abschnitte hindeuten würde. Der prozentuale Anteil der Strukturen ist für den mittigen Bereich gegenüber dem Periost erhöht, jedoch sind OPD und AOC wiederum am Periost stärker. Dies könnte darauf schließen lassen, dass die Osteonfläche bzw. Osteongeometrie mittig geringfügig höher ist als periostal, was auch auf mittig höhere Aktivierungsfrequenzen und BFRs hindeuten würde.

Trotz verbrennungsbedingter Umstrukturierung der Mikrostruktur und verbrennungsbedingter Annäherung beider Bereiche scheinen die signifikanten Unterschiede bestehen zu bleiben.

4.5) Multiple lineare Regressionsmodelle

Das Erheben multivariater linearer Modelle für den Datensatz am periostalen Rand und aus der Mitte der Femurkompakta gestaltete sich zunächst schwierig. Nach anfänglichem Fokus auf die nicht-gemittelten Datensätze der je drei Einzelzählungen pro Individuum und Position bzw. Verbrennungstemperatur wurden die linearen Modelle schließlich am gemittelten Datensatz erhoben, obwohl in der Regel lineare Modelle aus den Messwerten zu Einzelbeobachtungen generiert werden. Der gemittelte Datensatz bzw. die erhobenen linearen Regressionsmodelle lieferte stabilere Werte, da der Mittelwert aus den drei Einzelzählungen an drei verschiedenen Positionen innerhalb des jeweiligen Probenstücks den Mittelwert des gesamten Probenstücks abbilden sollte. Dadurch haben sich stabilere Ergebnisse für die Erstellung der Regressionen ergeben, da Schwankungen innerhalb eines Probenstücks einerseits integriert, andererseits aber auch leichter kompensiert werden konnten. Somit konnten Einzelwerte einen weniger starken Einfluss haben. Auf diesem Weg entstanden *mehr*

Ausreißer aus dem Datensatz als für den Ausreißer-Test auf die Tabelle der Einzelzählungen. Dadurch erschienen die Daten schlussendlich stabiler für die Erstellung der Regressionen.

Im folgenden Kapitel werden zunächst die Modelle aus den beiden Datensätzen des Femurs nochmals kurz vorgestellt, diskutiert und in einem Fazit zusammengefasst. Danach wird die Anwendbarkeit der erstellten Modelle auf echte Leichenbrände und Streufunde erörtert. Im Anschluss daran folgt ein Gesamtfazit zum Erheben multivariater linearer Regressionsmodelle – speziell in Bezug auf verbranntes Knochenmaterial.

Modell 1

Die Erstellung dieses linearen Modells erfolgte unter Einbeziehung **aller gezählten histomorphometrischer Parameter**, sowie der Temperatur und der prozentualen Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur. Dieses lineare Modell ist demzufolge sehr ähnlich den Modellen von Ericksen (Ericksen, 1991).

Periost

Dieses Modell scheint leider weniger zielführend zu sein, da zwar die prozentualen Anteile der Knochenmikrostruktur, die Resorptionslakunen und nicht-Havers'schen Kanäle als statistisch signifikante Parameter für das Modell ermittelt werden konnten, allerdings hatten alle anderen Parameter keinen signifikanten Einfluss. Damit war die Hälfte der einbezogenen Parameter für das Modell relevant, die andere Hälfte nicht. Die prozentuale Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur bildet die verbrennungsbedingten Veränderungen der gezählten Parameter an sich gut ab, zeigt aber grundlegend keine starke verbrennungsbedingte Umstrukturierung. Es zeigte sich lediglich ein leichter Anstieg der Anteile osteonalen und resorbierten Knochens und ein Absinken der beiden anderen prozentualen Anteile (vgl. Kapitel 3.5.1). Zu dem verbrennungsbedingten Anstieg resorbierten Knochens gehört die Zunahme der Zahl der Resorptionslakunen, sowie zum Anstieg osteonalen Knochens der Anstieg der nicht-Havers'schen Kanäle gehört, weswegen der signifikante Einfluss dieser Parameter logisch erscheint (vgl. Kapitel 3.5.1). Allerdings erklärt sich dadurch nicht, weshalb die Zahl der sekundären Osteone, der Havers'schen Kanäle und der Osteonfragmente keinen signifikanten Einfluss auf das Modell hat. Für die Havers'schen Kanäle und die sekundären Osteone könnte eine Kollinearität vorliegen, da die Werte dieser beiden Parameter in der Zählung oftmals gleich sind. Lediglich in solchen Fällen, in denen zwar der Havers'sche Kanal noch innerhalb des Gitternetzes, mehr als 50% des sekundären Osteons allerdings außerhalb des Gitternetzes lagen übersteigt die Zahl der Havers'schen Kanäle die der sekundären Osteone.

Eine Kollinearität liegt vor, wenn es sich bei einer unabhängigen Variablen beispielsweise um lineare Funktionen einer anderen unabhängigen Variablen handelt. Gibt es lineare Abhängigkeiten zwischen zwei oder mehr Variablen liegt eine Multikollinearität vor und je höher diese ist, desto instabiler wird das multivariate lineare Regressionsmodell. Da die osteonalen Parameter stark positiv miteinander korrelieren, kann eine Multikollinearität vermutet werden. Um das Modell zu verbessern, müssten diese osteonalen Parameter zusammengefasst werden und über einen aus ihnen gebildeten Faktor bzw. Parameter in das lineare Modell eingebaut werden. Dies wäre beispielsweise möglich, indem der

Parameter „intakte Osteone“ oder die OPD statt Havers'scher Kanäle, Osteonfragmente, sekundärer Osteone und Typ-II-Osteone ins Modell eingefügt wird. Statt eines linearen Modells könnte auch eine Poisson-Regression verwendet werden, da es sich bei den meisten Parametern um „Zählvariablen“ handelt und diese Regression dafür vorteilhafter wäre.

Die Eignung der Havers'schen Kanäle für ein Regressionsmodell wird von Bertelsen et al. (Bertelsen et al., 1995) generell in Frage gestellt, da sich diese zwar mit steigendem Individualalter akkumulieren, allerdings die hohe Streuung der Werte in jeder Altersklasse deren Eignung für histologische Altersbestimmungsmethoden limitiert.

Es fanden sich für das Modell relativ hohe Werte in den oberen und unteren Quartilen, was auch im Q-Q-Plot ersichtlich war. Im Scale-Location-Plot zeigte sich eine größere Verteilung der Residuen der vorhergesagten Werte. Nach der F-Statistik und dem p-Wert, sowie dem korrigierten R^2 schien das Modell allerdings gut auf die Daten zu passen. Das Problem bei der Anwendung ist allerdings, dass dies nur dann möglich ist, wenn alle Parameter in der Knochenmikrostruktur quantifizierbar sind. Dies ist nur möglich, solange Reste primären Kohlenstoffs oder hitzebedingte Zerstörung der Knochenmikrostruktur nicht die Identifizierbarkeit der Parameter verhindert. Ein Nachverbrennungsversuch wie bei Fetzer (Fetzer, 2018) könnte zwar eine Verbesserung der Auswertung bringen, aber möglicherweise gehen dadurch auch relevante Struktureinheiten verloren. Der Modelltest zu Modell 1 zeigte allerdings, dass im Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Test der bestehenden histologischen Altersformeln noch mehr Individuen eingeschlossen werden können, vor allem wenn der RSE von $\pm 9,18$ Jahren miteinbezogen wird.

Kompaktamitte

Bei den Koeffizienten konnte nur der Temperatur, den Osteonfragmenten und den prozentualen Anteilen ein signifikanter Einfluss auf das lineare Modell zugesprochen werden. Daher wurden im nachfolgend erstellten *Modell 3* für die Kompaktamitte nur die prozentualen Anteile als Koeffizienten einbezogen. Im Gegensatz zu *Modell 3* im *periostalen Bereich* der Kompakta hat die Temperatur in diesem Modell einen signifikanten Einfluss als Koeffizient. Für die histologische Altersbestimmung würde dies bedeuten, dass vor der Auswertung zuerst die Verbrennungstemperatur möglichst exakt bestimmt werden müsste, was sich als schwierig erweisen könnte. Mithilfe der Einteilung in Verbrennungsstufen nach Wahl (Wahl, 2001, Wahl, 1981) und im Vergleich der farblichen Veränderungen der Knochenmikrostruktur (vgl. Kapitel 3.3.1 und (Harbeck et al., 2011, Hanson und Cain, 2007, Walker et al., 2008, Holden et al., 1995a, Shipman et al., 1984)) wurde allerdings eine etwaige Einordnung der Verbrennungstemperaturen vorgenommen werden. Nach Greiner et al. ist dies allerdings nicht möglich, sondern bedarf einer mineralogischen Untersuchung zur Beurteilung der Verbrennungstemperatur (Greiner et al., 2019).

Der signifikante Einfluss von Osteonfragmenten in diesem Modell könnte daher rühren, dass diese sich ebenfalls durch eine verbrennungsbedingte Zunahme verändern. Die prozentualen Anteile stellen die generelle Änderung der Mikrostruktur dar, weshalb deren Signifikanz logisch erscheint. Allerdings könnte zwischen osteonalen Parametern und dem prozentualen Anteil fragmentalen und osteonalen

Knochens eine Multikollinearität vorliegen, wie bereits für die am *periostalen Rand* erhobenen Modelle festgestellt. Diese könnte auch den hohen RSE und den niedrigen F-Wert erklären. Für eine Verbesserung des Modells müssten mittels der Hauptkomponentenanalyse die aussagekräftigsten Linearkombinationen herausgearbeitet werden.

In der Cook's Distance zeigten sich einflussreiche Datenpunkte auf das Modell, trotz der vorab erfolgten Outlier-Bereinigung durch MVO outlier. Alle drei einflussreichen Datenzeilen stammten von Individuum WF45 – das jüngste Individuum des Datensatzes mit Knochenumbau- oder Stoffwechselstörung. Die Abweichung von der Normalverteilung im Q-Q-Plot zeigte sich vor allem in den unteren Quartilen.

Im Modelltest lag die maximale Abweichung zwischen tatsächlichem und errechnetem Alter bei mehr als 30 Jahren, im Median maximal bei knapp über 20 Jahren. Für die meisten Individuen lag sie allerdings im Median zwischen unter 10 und bis zu 15 Jahren. Der RSE war mit $\pm 13,42$ Jahren für dieses Modell sehr hoch und spannt sich insgesamt über die Grenzen einer Altersklasse hinaus.

Modell 2

Modell 2 wurde mit Ausnahme der Anzahl der Resorptionslakunen anhand von **berechneten Parametern** aufgestellt, wobei Osteonumfang, Knochenbildungsrate und Aktivierungsfrequenz einen signifikanten Einfluss auf das Modell hatten.

Periost

Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Osteongeometrie und dem Individualalter, weshalb diese Parameter für die Erstellung eines linearen Modells verwendet wurden (Goliath et al., 2016, Currey, 1964, Watanabe et al., 1998, Burr et al., 1990, Cho et al., 2006). Um auch die übrige Fläche der Knochenmikrostruktur nicht außer acht zu lassen, wurde der Vollständigkeit halber auch die Resorptionslakunenfläche in das Modell integriert.

Der signifikante Einfluss des Osteonumfangs im Gegensatz zu den beiden anderen Parametern der Osteongeometrie erschließt sich nicht direkt. Allerdings sind sich die Berechnungen von Osteonumfang und Osteondurchmesser derart ähnlich, dass deshalb eine Kollinearität dieser beiden Parameter vorliegt. Da sich auch die Osteonflächenberechnung ähnlich aufstellt wie die der beiden anderen Parameter, bzw. diese Berechnungen aufeinander basieren, würde in diesem Fall eine Multikollinearität vorliegen. Daher kann nur einem der drei osteongeometrischen Parameter ein signifikanter Einfluss zugestanden werden. Um diese Multikollinearität zu vermeiden wäre es empfehlenswert, die drei Parameter der Osteongeometrie durch eine Faktoren- oder Hauptkomponentenanalyse (PCA) zusammenzufassen und als ein Parameter in das Modell mitaufzunehmen. Ebenso sollte nur die Resorptionslakunenfläche und nicht zeitgleich deren prozentualer Anteil und die Zahl der Resorptionslakunen mit aufgenommen werden.

Die Aktivierungsfrequenz hat einen signifikanten Einfluss auf das Modell, da diese mit steigender Verbrennungstemperatur ebenfalls ansteigt, wohingegen sich die Knochenbildungsrate beispielsweise nicht maßgeblich ändert. Der hohe Wert der F-Statistik, der kleine p-Wert und der RSE von nur $\pm 7,6$ Jahren sprechen für das Modell. Allerdings waren die Abweichungen der Quartile verhältnismäßig

hoch, was die Güte des Modells limitiert. Demzufolge ist das Modell für die mittleren Alterswerte des Kollektivs gut passend, nicht aber für die Extremwerte.

Für dieses Modell spielen demnach sowohl berechnete Werte als auch Metabolismus-abhängige Raten eine entscheidende Rolle. Das Problem ist dabei zum Einen, dass bei den berechneten Werten der Osteongeometrie davon ausgegangen wird, dass es sich bei den Osteonen um kreisförmige Strukturen handelt (Cho et al., 2006). Dies kann aber unter dem Einfluss der Verbrennung verändert sein. Zum anderen ist der Wert für das mittlere Gewebeatler von 12,5 Jahren, welches für die Berechnung der Osteongeometrie verwendet wird, fraglich, da es ursprünglich für Rippen erstellt wurde (Crowder et al., 2016). Allerdings konnten insgesamt für den vorliegenden Datensatz gute Ergebnisse erzielt werden, was auch in Modelltest 2 gezeigt wurde.

Kompaktamitte

Die maximale und minimale Abweichung war bei ca. ± 20 Jahren, die Quartile sind symmetrisch, aber der Median liegt nicht am Nullpunkt. Bei den Parametern waren nur Knochenbildungsrate und Geschlecht signifikant. Der relativ große F-Wert und der kleine p-Wert sprechen für dieses Modell. Die Plots zur Beschreibung der Güte des Modells zeigen allerdings, dass das Modell den Datensatz nicht gut beschreiben kann. Der signifikante Einfluss der Knochenbildungsrate (BFR) könnte daher rühren, dass diese im mittigen Bereich der Kompakta für die verbrannten und unverbrannten Proben deutlichen Schwankungen unterworfen ist. Diese Schwankungen verlaufen zwischen verbrannter Probe und unverbrannter Referenz nahezu gegenläufig. Die Knochenbildungsrate korreliert außerdem mit dem männlichen Geschlecht leicht positiv, mit dem weiblichen Geschlecht leicht negativ, was deren signifikante Einflüsse erklären könnte. Entgegen der Erwartungen zeigte sich aber für den Rückwärtstest auf den Gesamtdatensatz, dass nur eine maximale Abweichung von ca. 15 Jahren besteht und generell die Abweichung der Mediane für die Individuen bei unter 5 Jahren liegt.

Modell 3

Dieses Modell basiert auf **Temperatur**, allen **Metabolismus-abhängigen Parametern und dem Geschlecht**.

Periost

Dieses Modell zeigte die geringste minimale und maximale Abweichung der Quartile, wobei vor allem die negative Abweichung wesentlich geringer ausfiel als bei anderen Modellen. Allerdings waren die Quartile weniger symmetrisch gelegen als bei den beiden vorherigen Modellen. In Anbetracht der Koeffizienten hatten bei diesem Modell alle Parameter abgesehen von der Temperatur einen signifikanten Einfluss auf das Modell. Sollte die Verbrennungstemperatur tatsächlich keinen signifikanten Einfluss auf das lineare Modell ausüben, wäre dies besonders für verbrannte Proben vorteilhaft. Die Formel wäre damit universal auf alle Verbrennungstemperaturen anwendbar. Dies wäre vor allem für solche Fälle von Vorteil, bei die Verbrennungstemperatur auf herkömmlichem Weg (Beurteilung nach dem Schema von (Wahl, 2001)) nicht exakt bestimmt werden kann.

Durch die Wahl der Metabolismus-Parametern für das Erheben eines multivariaten linearen Modells werden im Grunde genommen auch die gezählten histomorphometrischen Parameter integriert, da die Berechnungen der Metabolismus-Parameter auf diesen beruhen. Beispielsweise basieren Aktivierungsfrequenz und Knochenbildungsrate auf der Osteonfläche und diese wiederum auf dem Anteil osteonalen Knochens und der Anzahl intakter Osteone.

Eine vorherige Quantifizierung der gezählten Parameter ist demnach nichtsdestotrotz, auch für einen allgemeinen subjektiven Eindruck der Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur vor einer histomorphometrischen Auswertung, wichtig. Dieser subjektive Eindruck spielt beispielsweise auch eine Rolle bei der Beurteilung des Einflusses der Verbrennungstemperaturen und dadurch hervorgerufener Veränderungen.

Problematisch ist, dass die oberen Quartile in diesem Modell im Q-Q-Plot stark von der Normalverteilung abweichen und auch im Scale-Location-Plot ersichtlich ist, dass die Residuen der vorhergesagten Werte stärker verteilt sind. Es konnten darüber hinaus im Cook's-Distance-Plot zwei stark einflussnehmende Datenzeilen identifiziert werden.

Modelltest 3 zeigte die im Mittel geringste Abweichung zwischen tatsächlichem und errechnetem Sterbealter der Individuen. Allerdings zeigen WF4, WF28 und WF38 im Median höhere Abweichungen. Individuum WF38 zeigte die höchste Abweichung mit Maximalwerten in der Abweichung von über 60 Jahren. Möglicherweise liegt dies daran, dass Individuum WF38 mit einem Individualalter von 54 Jahren im Vergleich mit dem Gesamtdatensatz etwas jünger ist, was dafür sprechen würde, dass das lineare Modell besser auf ältere Individuen anwendbar ist. Abgesehen von diesen drei Individuen schien das Modell gut auf den Datensatz zu passen. Nichtsdestotrotz wäre es in der alltäglichen Praxis mit prähistorischem Leichenbrandmaterial schwer möglich alle diese Parameter vorab bestmöglich zu quantifizieren, auch wenn dieses Modell das Individualalter am besten abbilden kann.

Kompaktmitte

Das lineare Modell hatte im Vergleich zu *Modell 3* eine wesentlich geringere negative und positive Abweichung. Der Median war allerdings weniger nah am Nullpunkt und die Quartile nicht symmetrisch. Für die prozentualen Anteile lamellären und fragmentalen Knochens, die Osteonfläche und die Knochenbildungsrate konnte ein signifikanter Einfluss dieser Parameter auf das Modell gezeigt werden. Der signifikante Einfluss der Knochenbildungsrate könnte aus denselben Gründen vorliegen wie bereits in *Modell 2*, nämlich dass die Knochenbildungsrate im mittigen Bereich der Kompakta bei verbrannten und unverbrannten Proben deutlichen Schwankungen unterworfen ist und diese zueinander fast entgegengesetzt verlaufen. Die Signifikanz der Osteonfläche kann durch deren deutliche verbrennungsbedingte Schrumpfung erklärt werden, die nicht vorhandene Signifikanz der beiden anderen Parameter der Osteongeometrie durch eine Multikollinearität dieser drei Parameter. Der Anteil fragmentalen Knochens könnte durch die verbrennungsbedingte Zunahme dieses Anteils (vgl. Kapitel 3.5.2) erklärt werden, wie auch schon die Signifikanz der Osteonfragmente in *Modell 1*. Der Anteil lamellären Knochens zeigt ebenfalls einen verbrennungsbedingten Anstieg.

Im Vergleich zum vorherigen Modell konnte für die F-Statistik wieder ein größerer Wert bei kleinem p-Wert erzielt werden. Die Standardabweichung (RSE) war mit ± 10 zwar kleiner als zuvor, allerdings umfasst sie insgesamt immer noch eine gesamte Altersklasse (20 Jahre). Das bedeutet, dass bei dieser Formel zwar nicht unbedingt eine morphologische Altersschätzung und subjektive Einschätzung hinzugezogen werden muss, dies allerdings trotzdem sinnvoll wäre. Die Plots zur Beurteilung der Güte des Regressionsmodells zeigen allesamt an, dass das Modell die Daten gut erklären kann. Der Modelltest ergab eine maximale Abweichung von knapp 30 Jahren, aber nur für ein Individuum (WF4 – 95 Jahre alt, weiblich). Mit einem Individualalter von 95 Jahren liegt das Individuum an der oberen Grenze des Datensatzes und die $OPD_{Asymptote}$ ist schon längst erreicht, wodurch es sich nichtmehr gut eignet für eine histologische Altersbestimmung.

Modell 4

Dieses multivariate lineare Modell setzt sich zusammen aus **Verbrennungstemperatur und prozentualen Anteilen** der Knochenmikrostruktur.

Periost

Es zeigte sich eine hohe maximale und minimale Abweichung in den Quartilen, allerdings waren diese symmetrischer als in *Modell 3* am *Periost*. Negativ fällt auf, dass keiner der Parameter einen signifikanten Einfluss auf das Modell hatte und der Wert der F-Statistik kleiner war im Vergleich mit den anderen Modellen. Der Verlust bzw. die nicht vorhandene Signifikanz kann sich in diesem Fall auch nicht ausschließlich durch Multikollinearität erklären lassen, da die vier prozentualen Anteile zwar aufeinander aufbauen und voneinander abhängen (bspw. je mehr Generallamellen desto weniger osteonaler Knochen), allerdings beruhen die Berechnungen der Parameter nicht aufeinander. Dagegen korrelieren fragmentaler und osteonaler Knochen positiv mit dem weiblichen, Generallamellen und resorbierter Knochen positiv mit dem männlichen Geschlecht. Demnach liegen durchaus Zusammenhänge zwischen den Variablen vor. Um diese Multikollinearität zu vermeiden könnte ebenfalls eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt werden. Auch Thompson (Thompson, 1979) und Ericksen (Ericksen, 1991) haben die prozentualen Anteile der Knochenmikrostruktur in ihre multivariaten linearen Regressionsmodelle einbezogen.

Der Q-Q-Plot zeigte geringfügigere Abweichungen in oberen und unteren Quartilen von der Normalverteilung und keiner der Werte war außerhalb der Cook's Distance. In Modelltest 4 zeigte sich eine geringere Spanne in der Abweichung zwischen tatsächlichem und errechnetem Alter der Individuen, mit einer maximalen Abweichung von knapp 40 Jahren. Die Abweichung im Median war hier allerdings sehr unterschiedlich zwischen den Individuen. Auch in diesem Modell schienen die jüngeren Individuen im Datensatz die größte Abweichung aufzuzeigen. Der RSE von ± 10 Jahren bedeutet auch eine Gesamtspannbreite der Abweichung von 20 Jahren, was eine Altersklasse umfasst und die Möglichkeiten der histologischen Altersbestimmung stark begrenzt, da die Grenzen so weit gefasst sind.

Kompaktamitte

Das Modell mit den **prozentualen Anteilen der Knochenmikrostruktur** zeigte eine sehr große negative Abweichung von bis zu -55 Jahren. Die Quartile waren nicht symmetrisch, der Median dafür aber am Nullpunkt gelegen. Die F-Statistik war im Vergleich allerdings kleiner als bei den vorherigen Modellen und keiner der Parameter hatte einen statistisch signifikanten Wert für das lineare Modell. Dies entspricht den Ergebnissen für das Modell am periostalen Rand, obwohl sich in *Modell 1* in der *Kompaktamitte* mit allen gezählten Parametern signifikante Zusammenhänge bzw. Einflüsse ergeben hatten. Dieser Verlust der Signifikanz könnte an der Multikollinearität der Parameter liegen.

Auch der Q-Q-Plot zeigte große Abweichungen von der Normalverteilung in den unteren Quartilen. In *Modell 1* in der *Kompaktamitte* hatte sich abgezeichnet, dass dieses Modell sehr gute Resultate für die Erstellung der Regressionsmodelle bringen müsste. Allerdings könnten die schlechten Ergebnisse dieses Modells wiederum auf eine Multikollinearität der Parameter zurückgeführt werden, da die prozentualen Anteile der Knochenmikrostruktur sich gegenseitig bedingen. Da der Datensatz aus der *Kompaktamitte* kleiner ist als der am Periost erhobene Datensatz, fällt dies hier möglicherweise stärker ins Gewicht.

Fazit

Die Regressionsmodelle für das Femur im **periostalen** Bereich der Kompakta sind allesamt nicht gut geeignet für Individuen jünger als 60 Jahre. Die Modelle eignen sich sogar noch besser für Individuen von über 70 Jahren. Dies liegt daran, dass die linearen Modelle anhand eines deutlich überalterten Gesamtdatensatzes erstellt wurden. Das ist einerseits natürlich problematisch für die histologische Altersbestimmung kremierter Individuen, da letztlich nur eine Alterskategorie damit abgedeckt werden kann, andererseits sind speziell für *senile* Individuen die morphologische und mikromorphologische Altersbestimmung zumeist erschwert (Walker et al., 1994, Khan et al., 2017, Dokládal, 1969). Aus dieser Problematik heraus hat sich auch die Idee für die vorliegende Dissertation entwickelt.

Die Ergebnisse der Rückwärtstests der Modelle zeigen, dass auch *senile* Individuen histologisch altersbestimmt werden können. Vorteilhaft ist, dass die Temperatur nicht in jedem Modell zwangsläufig eine ausschlaggebende Rolle spielt bzw. einen signifikanten Einfluss auf das Modell hat. Absolonova et al. (Absolonova et al., 2013) stellten für jede von ihnen verwendete Verbrennungstemperatur eine eigene Regression auf. Dies scheint allerdings im Fall von Leichenbrand weniger vorteilhaft. Besonders in den höheren Temperaturbereichen können die Verbrennungstemperaturen mittels deskriptiver Analyse häufig nicht exakt bestimmt werden, sondern bedürfen einer mineralogischen Untersuchung (Greiner et al., 2019). Sollte die Temperatur tatsächlich nicht für jedes lineare Modell eine signifikante Rolle spielen, wäre das für diese Problematik vorteilhaft.

Die vorgenommenen Positionstests bewiesen auch, dass keine Position vorliegt, welche einen ausnehmend großen Einfluss auf die Regressionen bzw. die Ergebnisse histologischer Altersbestimmungen hat. Demzufolge ist die Wahl des Femurfragmentes unabhängig für die

histologische Untersuchung, solange das Fragment nicht von der posterioren Seite des Femurschaftes mit der *Linea aspera* stammt. Dies wäre vielversprechend für die histologische Altersbestimmung verbrannter Individuen, da vor allem an kremiertem Knochenmaterial die exakte Position des Knochenfragmentes entlang des Schaftes oft nicht mehr nachvollziehbar ist. Diese Ergebnisse entsprechen auch wiederum den Erkenntnissen von Müller (Müller, 2017) und Mussauer (Mussauer, 2017) und lassen darauf schließen, dass durch die multivariaten linearen Regressionsmodelle über alle Positionen des Schaftes solche Unterschiede, wie sie für die verschiedenen **Wilcoxon-Rangsummentests** ermittelt werden konnten, integriert bzw. nivelliert werden.

Das Modell mit dem kleinsten RSE ist das Modell mit den Metabolismus-Parametern. Diese können allerdings vor allem bei verbranntem Knochenmaterial schwer zu bestimmen sein, da zuvor intakte und fragmentierte Osteone (für OPD und AOC), die prozentuale Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur (für Osteongeometrie und Resorptionslakunengeometrie) quantifiziert werden müssen. Dafür muss die Knochenmikrostruktur gut sichtbar sein, was vor allem bei Leichenbrandmaterial oft schwierig ist. Das Modell mit dem zweitkleinsten RSE ist das Modell mit den geometrischen Parametern von Resorptionslakunen und Osteonen, Aktivierungsfrequenz und BFR. Auch für dieses Modell müssen die Struktureinheiten der Knochenmikrostruktur gut sichtbar und auswertbar sein. Allerdings sind diese beiden Modelle ohne vorherige morphologische Altersbestimmung möglich, was wiederum vorteilhaft für die Anwendung bei verbranntem Knochenmaterial ist. Dagegen könnte für die Parameter der Osteongeometrie wieder das Problem der Multikollinearität bzw. einem „Over-Fitting“ der Parameter innerhalb des Modells vorliegen, weshalb eine PCA vorgenommen werden sollte. Zudem wäre es vorteilhafter, die Parameter der Osteon- und Resorptionslakunengeometrie im histologischen Feld (Gitternetz) automatisiert durch einen Bilderkennungsalgorithmus messen zu können, anstatt diese zu berechnen.

Die beiden übrigen Modelle liegen in ihrem RSE von ± 9 bis 10 Jahren zu hoch, da sie damit eine gesamte Altersstufe abdecken und die Methoden somit nicht ohne morphologische Altersbestimmung und subjektive Einschätzung des Individualalters erfolgen kann. Auch bei diesen Modellen liegt wiederum das Problem der Multikollinearität der Parameter vor. Zudem wäre ein größerer und heterogenerer Datensatz zur Erhebung linearer Modelle vorteilhaft.

Für den **mittleren Bereich** der Femurkompakta zeigte sich bei jedem der linearen Modelle eine größere Abweichung bzw. ein höherer RSE als bei denselben Modellen im *periostalen Bereich*. Möglicherweise liegt dies daran, dass im mittigen Bereich eine geringere Korrelation zwischen den osteonalen Parametern vorliegt als im *periostalen* Bereich. Allerdings zeigte die *Kompaktmitte*, aufgrund der dicht gepackten Knochenmikrostruktur, weniger verbrennungsbedingte Veränderungen auf als am *Periost*. Daher wurde erwartet, dass die linearen Modelle in der Kompaktmitte geringere Abweichungen und kleinere RSEs liefern würden. *Mittig* war auch die Zahl der Osteonfragmente stabiler, trotz Verbrennung und einem geringeren Anteil an Generallamellen. Allerdings tritt eine verbrennungsbedingte Änderung von Osteon- und Resorptionslakunengeometrie auch im mittigen Bereich der Kompakta auf, wodurch das Modell mit diesen Parametern, neben dem Modell mit den

Stoffwechselraten, die beste Beschreibung der Daten für den mittigen Bereich der Femurkompakta liefert. Leider hat der mittlere Bereich der Femurkompakta kein Modell ergeben, bei welchem die der RSE kleiner als 9,7 Jahre war. Möglicherweise war der Stichprobenumfang der mittigen Femurkompakta zu klein, um wirksame Regressionen aufzustellen und lineare Zusammenhänge zu erkennen. Nach Hennig und Cooper (Hennig und Cooper, 2011) wäre ein Stichprobenumfang von 100 Individuen das Minimum für die Aufstellung von Regressionsmodellen. Besser noch wäre ein Probenumfang von mehreren 100 Individuen, um stabile Ergebnisse zu erhalten. Falls möglich sollte ein größerer Datensatz sich außerdem durch ein diverseres Kollektiv mit einer besseren Altersverteilung und durch eine höhere Heterogenität (z.B. vorhandene ethnische Bandbreite) auszeichnen. Dieses ist allerdings nahezu unmöglich zu bekommen, da sowohl auf das Probenmaterial aus Grabaufösungen als auch auf das rechtsmedizinische Probenmaterial von Körperspendern kein Einfluss genommen werden kann.

Test der erhobenen Regressionen auf archäologische Leichenbrände und Streufunde

Durch den Test von insgesamt vier der erhobenen Regressionsmodelle auf die echten Leichenbrände und Streufunde aus dem archäologischen Fundgut der Arbeitsgruppe konnte zum Einen primär gezeigt werden, dass nicht alle der erhobenen multivariaten Regressionsmodelle auf die Leichenbrände anwendbar waren. Dies lag maßgeblich am schlechten Erhaltungszustand der Knochenmikrostruktur der Leichenbrände selbst, da aufgrund dessen nicht alle histomorphometrischen Parameter beurteilt und quantifiziert werden konnten. Zudem hatte der schlechte Erhaltungszustand Einfluss auf die morphologische Auswertung, wodurch beispielsweise Alter und Geschlecht der Individuen nicht besser eingegrenzt werden konnten. Dies wirkt sich wiederum auf die Quantifizierung der Metabolismus-Parameter aus, weshalb Modell 2 und 3 aus dem *Periost* und der *Kompaktamitte* nicht angewendet werden konnten. Dadurch wird bereits eine deutliche Limitierung der Anwendbarkeit der erhobenen Modelle aufgezeigt. Andererseits ist es erfreulich, dass die beiden anderen Modelle jeweils aus Periost und Mitte an den Proben getestet werden konnten. Bei der Untersuchung zeigte sich, dass sich die Ergebnisse der histologischen Altersbestimmungen für die *Streufunde* jeweils für die beiden Modelle bzw. Formeln aus dem *Periost* und ebenso für die beiden Formeln aus der *Kompaktamitte* nahezu gleichen. Für die *archäologischen* Leichenbrände glichen sich dagegen die Ergebnisse der Modelle aus *Periost* und *Mitte* mit den jeweils gleichen histomorphometrischen Parametern. Dies spricht zum Einen dafür, dass die Knochenmikrostruktur der Streufunde schlecht auswertbar war und die histomorphometrischen Parameter nicht ausreichend quantifiziert werden konnten. Daher decken sich die Ergebnisse aus Periost und Mitte nicht. Die schlechte Auswertbarkeit liegt daran, dass bei der Beprobung der Streufunde explizit darauf geachtet wurde, unvollständig verbrannte Proben zu wählen, welche die sogenannte „Sandwich-Struktur“ aufwiesen. Bei der Sandwich-Struktur zeigen sich der periostale und endostale Rand des Fragments weiß gefärbt. Direkt unterhalb ist der Knochen jeweils blau gefärbt und in der Mitte sind noch Reste der Schwarzfärbung durch die Kohlenstoffeinlagerungen vorhanden. Dies kommt dadurch zustande, dass Knochen von außen nach

innen verbrennen, wodurch außen kalzinierter Knochen vorliegt und innen verkohlter Knochen mit Resten primären Kohlenstoffs (Symes et al., 2008, Grupe et al., 2015).

Die ähnlichen Ergebnisse der *archäologischen Leichenbrände* traten dagegen für die histologischen Altersbestimmungsformeln auf, welche auf denselben histomorphometrischen Parametern beruhen. Die starke überalterten Ergebnisse der histologischen Altersbestimmung der *archäologischen Leichenbrände* mit den erstellten Formeln ergibt sich dadurch, dass die Formeln an einem überalterten Kollektiv erhoben wurden. Dies zeigt, dass sich in jedem Fall ein Abgleich mit den Ergebnissen der morphologischen Altersbestimmung empfiehlt.

Dass sich solch ähnliche Ergebnisse mithilfe der Formeln für Periost und Kompaktamitte ergeben scheint sehr vorteilhaft für die Untersuchung von kremierten Knochenproben, da dadurch beide Bereiche der Kompakta gleichermaßen zur histologischen Altersbestimmung herangezogen werden können. Bei den echten Leichenbrandproben handelte es sich um Knochenfragmente der Verbrennungsstufe V (nach Wahl (Wahl, 2001)), was einer Verbrennungstemperatur von 800 bis 1000 °C und somit einer vollständigen Verbrennung entspricht. Dies zeigt, dass sich zum Einen eine histologische Altersbestimmung an solchen, vollständig verbrannten, Knochenfragmenten empfiehlt. Zum Anderen spricht dies für die von Fetzer (Fetzer, 2018) durchgeführten Nachverbrennungen solcher unvollständig verbrannter Knochenproben. Fetzer (Fetzer, 2018) und Otto et al. (*in prep*) konnten dabei feststellen, dass eine Nachverbrennung solcher Proben zu verbesserten Resultaten in der histologischen Altersbestimmung führen kann.

Gesamtfazit

Die Erhebung linearer Modelle an experimentell verbranntem Knochenmaterial über alle Verbrennungstemperaturen sowie Positionen der unverbrannten Proben hinweg steht stark unter dem Einfluss verbrennungsbedingter Akkumulation der Parameter durch die einwirkenden Temperaturen. Zudem handelte es sich bei dem Westfriedhofprobenmaterial um ein stark überaltertes Kollektiv mit dicht von osteonalen Parametern bepackter Mikrostruktur, was die Erstellung von Regressionen, welche für alle Altersklassen anwendbar sein sollten, erschwert. Da zudem laut verschiedener Autoren Osteone mit steigendem Individualalter kleiner werden, wird dieses bereits überalterte Kollektiv durch die Verbrennung und die damit einhergehende Schrumpfung und Akkumulation histomorphometrischer Parameter weiter überaltert (Currey, 1964, Watanabe et al., 1998, Thompson und Galvin, 1983, Burr et al., 1990, Cho et al., 2006). Daher sind die erstellten Regressionen auch nur begrenzt für jüngere Individuen anwendbar, wobei diese verbrennungsbedingt entsprechend auch etwas überaltert werden. Absolonova et al. (Absolonova et al., 2013) messen den temperaturinduzierten Modifikationen der Knochenmikrostruktur allerdings ein höheres Gewicht bei als dem Alter der Individuen selbst bei, wodurch die Überalterung des Kollektivs obsolet würde. Jedoch ist bei einem stark überalterten Kollektiv das Individualalter ein durchaus stark einflussnehmender Faktor. Ihnen zufolge wird der Einfluss des Individualalters sogar von diesen verbrennungsbedingten Veränderungen überlagert.

Die linearen Modelle bzw. linearen Regressionen der in dieser Arbeit erhobenen Modelle wurden durch den Ursprung des Koordinatensystems gezwungen bzw. geleitet, da andernfalls bei histologischer Altersschätzung beispielsweise ein neugeborenes Individuum bei einem durch die Formel gegebenen y-Achsenschnittpunkt von 16 mit 0 sekundären Osteonen nach der Formel bereits ein histologisches Alter von 16 Jahren hätte. Wenn der y-Achsenschnittpunkt allerdings bei der Erstellung der Modelle von vornherein auf 0 gesetzt wird, ist das histologische Alter einer Neugeborenen auch tatsächlich „0“ (da dies nicht bis auf Monate genau umfasst werden kann). Auch Pfeiffer et al. (Pfeiffer et al., 2016) bemängelten, dass bei den von ihnen aufgestellten Regressionsformeln beruhend auf Osteonfläche, relativer kortikaler Fläche und OPD mit einem y-Achsenschnittpunkt von 16,093 Jahren ein Individuum ohne sekundäre Osteone nichtsdestotrotz mit dieser Formel ein histologisches Alter von 16 Jahren hätte. Sie befanden, dass mehr histomorphometrische Parameter nötig seien, um das Remodelling als Variable stärker miteinzubeziehen als nur durch die OPD und die Zahl der sekundären Osteone (Pfeiffer et al., 2016). Durch das Einbeziehen vieler histomorphometrischer Parameter in ein lineares Modell ergibt sich allerdings automatisch wieder das Problem der Multikollinearität, wie bereits für die Regressionsmodelle erwähnt. Deshalb würden sich lineare Modelle mit den Stoffwechselraten gut eignen, da dafür zuvor mehrere histomorphometrische Parameter ausgewertet werden müssen. Diese würden durch die Berechnung der Stoffwechsel-Parameter dann mit in das lineare Modell einfließen, sodass das Remodelling beispielsweise durch Aktivierungsfrequenz und OPD wiedergespiegelt werden könnte.

Um eine Multikollinearität zu vermeiden hatten Botha et al. (Botha et al., 2018) beispielsweise bei zwei stark korrelierenden vorhersagenden Variablen eine der beiden Variablen entfernt. Dafür empfiehlt sich, wie bereits erwähnt, die Anwendung einer Faktoren- oder Hauptkomponentenanalyse. Weiterhin bemängelten sie in ihrer Studie, dass eine OPD von 40/mm² vorliegen müsste, um das Alter eines 80-jährigen histologisch wiedergeben zu können (Pfeiffer et al., 2016). In der vorliegenden Studie war dies allerdings sowohl mittig als auch periostal der Fall, weshalb diese Regressionen sich gut für die Individualaltersbestimmung *seniler* Individuen eignen könnten. Nach Lagacé et al. (Lagacé et al., 2019) wäre es günstiger, solche Formeln anzuwenden, welche auf die Altersklasse des jeweilig untersuchten Individuums passen. Allerdings ist dies im Leichenbrand nur schwer praktikabel, da eine Altersbestimmung ohne die Histologie oftmals nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich ist (z.B. „mindestens Adult“ oder „eher Matur“). Lagacé et al. (Lagacé et al., 2019) beschrieben auch selbst diese Problematik, da histologische Altersbestimmungsmethoden zumeist in solchen Fällen angewendet werden, in denen die Morphologie keine Ergebnisse liefern kann, weshalb Altersbestimmungsmethoden auf alle Altersklassen angepasst sein sollten. Dafür sind wiederum ausreichend große Datensätze nötig.

Die Erstellung von Regressionsformeln nicht nur auf den periostalen Rand zu begrenzen, sondern auch in der Kompaktmitte und am Endost durchzuführen, wird von Doppler et al. (Doppler et al., 2006) empfohlen. Allerdings erwies sich die Auswertung vor allem der verbrannten Knochenfragmente aus dem Endost als nicht praktikabel, weshalb nur zwei unterschiedliche Lokalisationen innerhalb der

Kompakta – periostal und mittig – untersucht wurden. Nach anfänglichen Versuchen musste von der Auswertung am Endost abgesehen werden, da dieser Bereich durch die Verbrennung häufig so stark geschrumpft oder zerstört war, dass für die verbrannten Proben keine Auswertung der histomorphometrischen Parameter mehr vorgenommen werden konnte und diese ebenfalls für Leichenbrandmaterial nicht durchführbar ist.

Zwar wurden heterogene Kollektive zur Erstellung der Regressionsformeln verwendet, aber es wären mehr Informationen bezüglich Herkunft, Krankheitsgeschichte, sowie über die Lebensumstände der Individuen hilfreich gewesen. Dies ist allerdings bei rezentem Friedhofsmaterial nur schwer zu realisieren. Daher sind als rezentes Material eher die rechtmedizinischen Proben der Körperspender bzw. Knochenmaterial von Friedhöfen mit Friedhofsbüchern zu bevorzugen wie beispielsweise bei Doppler (Doppler, 2008). Allerdings umfasste dabei beispielsweise das Kollektiv des Basler Spitalfriedhofs auch nicht genügend Individuen, um eine ganze Population abzubilden, da auf diesen Friedhöfen vor allem kranke und alte Menschen bestattet wurden. Anatomiekollektive wie bei Ericksen (Ericksen, 1991) würden sich am besten eignen für eine erneute Erstellung von Verbrennungsreihen, vor allem da dieses Kollektiv heterogen war. Entgegen der ursprünglichen Annahme waren allerdings auch hier nicht alle Altersklassen gleichmäßig vertreten. Immerhin lag eine gleichmäßige Verteilung weiblicher und männlicher Individuen vor. Jedoch ist es unmöglich, einen solchen heterogenen Datensatz zu erhalten, da es sich bei Anatomiekollektiven oder Proben von Körperspendern auch häufig um ältere Individuen handelt und sich bei Grabaufösungen eher selten Kooperationsprojekte ergeben. Die Anzahl der Proben, welche aus Körperspendern verfügbar sind, ist zudem nicht vorhersagbar, geschweige denn beeinflussbar und erfordert unter Umständen lange Laufzeiten der Studien. Dadurch müssten solche Studien mehrere Abschlussarbeiten umfassen, damit über die Zeit genügend Probenmaterial zusammengetragen werden kann.

Zudem stellt sich die Frage, weshalb die Analyse der Positionsunterschiede sowohl periostal als auch mittig keine Position ergeben haben, welche einen spezifischen Einfluss auf die linearen Modelle hat, obwohl sich einige histomorphometrische Parameter zwischen den Positionen teils signifikant unterscheiden. Im periostalen Bereich der Kompakta fanden sich wesentlich häufiger signifikante Unterschiede zwischen Positionen entlang der Diaphyse, wohingegen diese in der Kompaktamitte kaum noch vorhanden waren. Durch das Einfügen aller Positionen zusammen in das lineare Regressionsmodell statt dem Hinzufügen aller Positionen als einzelne Parameter wird durch das Regressionsmodell auch über die vorhandenen Positionsunterschiede integriert und diese werden durch die Regression nivelliert. Dies ist wiederum vorteilhaft für die Anwendung an Leichenbrandmaterial. Pfeiffer (Pfeiffer et al., 1995) dagegen beschreibt, dass die Entnahmestelle des kortikalen Knochens einen starken Einfluss auf das Ergebnis einer histologischen Altersbestimmung hat. Wie bei Wells (Wells, 1960) wurden Femurfragmente zur Untersuchung verwendet, da sich diese häufig im Leichenbrandmaterial finden und identifizieren lassen. Auch Novacek (Novacek, 2012) beschreibt die Probenahme bei Brandknochen als besonders schwierig. Die Verwendung von Rippen zur Erstellung von Regressionsformeln für Brandknochen als Alternative zu Femora würde sich anbieten, da sich auch diese häufig im Leichenbrand finden. Allerdings bemängelten Absolonova et al.

(Absolonova et al., 2013) nach den von ihnen durchgeführten experimentellen Verbrennungsversuchen zur Erstellung linearer Modelle, dass Rippen durch die Verbrennung oft stark fragmentiert sind, die Kompakta in viele kleine Stücke zerbricht und der Torsionsgrad mit der Verbrennungstemperatur ansteigt. Dadurch waren auch die mikrostrukturellen Parameter nur noch schwer identifizierbar, weswegen sie sich in der Auswertung auf intakte Osteone und Havers'sche Kanäle beschränken mussten (Absolonova et al., 2013). In der vorliegenden Studie konnten bei den Verbrennungstemperaturen (abgesehen von 300°C) die meisten histomorphometrischen Parameter gut ausgewertet werden, wodurch sich nicht nur auf zwei Parameter beschränkt werden musste. Dies erweitert die Kombinationsmöglichkeiten für die Aufstellung der Regressionsmodelle. Die Einbeziehung des Geschlechts in die Regression sollte nicht problematisch für die Anwendung auf verbranntes Knochenmaterial sein, da zum Einen auch geschlechtsunabhängige Formeln erstellt wurden und zum Anderen das Geschlecht nur als Faktor in die Regression einbezogen wurde, nicht aber eigene Regressionen für beide Geschlechter getrennt erhoben wurden.

Zuletzt stellt sich die Frage, ob die erstellten Regressionsformeln auch auf prähistorisches Knochenmaterial anwendbar sind, oder ob sie sich nur für rezentes kremiertes Knochenmaterial im rechtsmedizinischen Kontext eignen. Ruff (Ruff, 2008) sprechen von einem statistisch signifikanten Rückgang der Robustizität von Langknochen um 15% im Vergleich zu Knochenmaterial mit einem Alter von 2 Millionen Jahren und einem Alter von 8000 Jahren. Seither hat die Robustizität der Knochen weiter abgenommen, sodass bis zu 1/3 der relativen Knochenstärke durch die Abnahme der mechanischen Belastung, sesshaften Lebensstil und eine Änderung der Subsistenzstrategien verloren gegangen ist (Ruff und Hayes, 1988, Ruff, 2008). Daher sind Regressionsformeln, erhoben an rezentem Probenmaterial nur mit Vorsicht auf prähistorische Proben anwendbar. Streeter et al. (Streeter et al., 2010) beschreiben dagegen die Remodelingraten pleistozäner Populationen als ähnlich derer heutiger Populationen, allerdings aus dem 15. und 16. Jahrhundert. Absolonova et al. (Absolonova et al., 2013) beschrieben den Einfluss der temperaturinduzierten Modifikation des Knochens größer als den des Individualalters, welches den meisten Einfluss auf die Knochenmikrostruktur hat. Dadurch wird dieser Einfluss des Robustizitätsverlusts möglicherweise auch durch die Verbrennung überlagert, wodurch die Formeln auch für prähistorisches Knochenmaterial anwendbar wären.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass im Falle eines ausreichend großen Datensatzes, Regressionsmodelle an den Femora besser in der Kompaktamitte aufgestellt werden sollten, da dieser Bereich stabiler gegenüber verbrennungsbedingten äußeren Einflüssen ist.

Allerdings erscheinen die in dieser Arbeit erhobenen Regressionsmodelle vielversprechend für künftige histologische Altersbestimmungen *seniler Individuen* zu sein – vor allem an kremierten Knochenproben.

4.6) Tibia

Zu Anfang ist für das Kollektiv der Tibiae festzuhalten, dass dieses trotz des wesentlich geringeren Stichprobenumfangs (sechs Verbrennungsreihen, davon vier weibliche und zwei männliche Individuen und fünf Vergleiche von RT und 1000°C, darunter vier weibliche und ein männliches Individuum) im

Vergleich zum Kollektiv der Femora besser altersmäßig verteilt sind. Hier liegen zumindest zwei Individuen vor, die der Altersklasse *Adultas* angehören und an denen Verbrennungsreihen durchgeführt wurden. Die restlichen (vier) Individuen sind der Altersklasse *Senilis* zugehörig. Somit sind die beiden Grenzaltersklassen der histologischen Altersbestimmung inkludiert und die Altersklasse der *Adultas* ist besser repräsentiert als es für die Femora der Fall war.

4.6.1) Veränderungen der histomorphometrischen Parameter

Im nachfolgenden Kapitel werden die temperaturinduzierten Veränderungen der histomorphometrischen Parameter für das Periost und die Kompaktmitte erläutert und abschließend mit einem Fazit zusammengefasst. Es werden im Weiteren nur Unterschiede zu den Ergebnissen der Untersuchungen an den Femora eingehend diskutiert um Wiederholungen zu vermeiden. Daher wird auf die verbrennungsbedingte Entwicklung der Typ-II-Osteone, der Volkmann'schen Kanäle, der Osteon- und Resorptionslakunengeometrie, der Stoffwechselfparameter (OPD, AOC, Aktivierungsfrequenz und BFR) und der prozentualen Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur nicht weiter eingegangen.

Osteone und Osteonfragmente

Für intakte und sekundäre Osteone ließ sich am **periostalen Rand** der Tibiakompakta bis zu einer Verbrennungstemperatur von 600°C keine Veränderung feststellen. Bei den Proben aus der **Kompaktmitte** zeigten sich erste Veränderungen bereits bei 400°C, signifikante Veränderungen ab 600°C. Dies würde darauf schließen lassen, dass die Tibiakompakta insgesamt (periostal und mittig) dichter gepackt ist, als dies für die Femora der Fall war. Für den **unverbrannten** Tibiaschaft zeigten intakte und sekundäre Osteone im Gegensatz zu den Femora **mittig** und **periostal** Schwankungen über die elf Positionen des Schaftes, was auf unterschiedliche Belastungseinwirkungen an unterschiedlichen Positionen und dadurch bedingt unterschiedlich starkes Remodeling schließen lassen könnte. Pfeiffer (Pfeiffer et al., 2006) beschreibt beispielsweise, dass Knochen, der verschiedene Arten von Belastung erfährt, mehr Variabilität in der Osteongröße zeigt. Robling & Stout (Robling und Stout, 1999) stellten fest, dass die Richtung der einwirkenden Belastung die Richtung der BMUs für Typ-I-Osteone bestimmt. Und auch Ruff & Hayes (Ruff und Hayes, 1982) sprechen von einem Einfluss der Belastung auf das Remodelling.

Osteonfragmente waren **periostal** und **mittig** bei den verbrannten Proben überwiegend geringer als für die unverbrannten Referenzen, wobei dies im mittigen Bereich der Kompakta erst ab 300°C der Fall war. Möglicherweise sind in der Tibiakompakta die Osteonfragmente durch den Temperatureinfluss bzw. dadurch bedingte Änderungen in der Mikrostruktur nicht bzw. eingeschränkt sichtbar, wodurch diese im Vergleich zu den unverbrannten Referenzen in ihrer Anzahl unterschätzt werden.

Nicht-Havers'sche Kanäle und Resorptionslakunen

Im Gegensatz zu der temperaturbedingten Entwicklung bei den Femora weist die Anzahl der Resorptionslakunen mit steigender Verbrennungstemperatur bzw. entlang des Diaphysenschaftes ab

einer Temperatur von 800°C bzw. Position 10 in beiden Bereichen der Kompakta kein Absinken sondern eine Anhäufung auf.

Dies lässt darauf schließen, dass sich in der Kompakta auch verbrennungs- und schrumpfungsbedingt eher Resorptionslakunen finden als unverbrannt. Dagegen könnte die gesteigerte Anzahl an Resorptionslakunen auch altersbedingt sein. Allerdings liegt nach Ortner (Ortner, 1975) keine Akkumulierung der Resorptionslakunen mit steigendem Individualalter in Tibiae vor.

Die Zahl der nicht-Havers'schen Kanäle zeigt im Wesentlichen den gleichen Verlauf zwischen Femora und Tibiae auf, weshalb hier nicht weiter darauf eingegangen werden soll. Allerdings fällt die maximale Anzahl der nicht-Havers'schen Kanäle sowohl unverbrannt als auch unverbrannt bei den Tibiae geringer aus. Da keine verbrennungsbedingten Änderungen auftreten bietet sich der Schluss an, dass die Tibiae der untersuchten Individuen proximal generell eine geringe Anzahl an nicht-Havers'schen Kanälen aufwiesen. Eine weitere Erklärung wäre eine ausgeglichene Kräfteverteilung um den Tibiaschaft, was zu wenig nicht-umgebautem Knochen führt. Zu den Gelenken (nach distal) hin gehend richtet sich die Kräfteverteilung auf die Gelenke, wodurch sich der Anteil nicht-umgebauten Knochens erhöht. Dafür spricht die von Ruff und Hayes (Ruff und Hayes, 1983a, Ruff und Hayes, 1983b) nachgewiesene erhöhte Biegebelastung im anterior-posterioren Bereich der Tibia nahe dem Kniegelenk während des Gehens. Nachdem sich unter den Individuen nur die Altersklasse *Adultas* und höher fand, ist dies auch durchaus möglich.

Fazit

In Ermangelung eines eigens für Tibiae errechneten Osteonfragmentdichtewerts (=k) für die Berechnung der $OPD_{Asymptote}$ als Grundlage der AOC-Rate wurde wie bei Streeter et al. (Streeter et al., 2010) auf den Osteonfragmentdichtewert für **Femora** zurückgegriffen. Dies birgt möglicherweise ein hohes Fehlerpotenzial für die Berechnung der AOC der **Tibiaprobien** im vorliegenden Kollektiv, da sich die $OPD_{Asymptote}$ -Werte zwischen Femur und Tibia durch unterschiedliche Umbauraten unterscheiden könnten. Verschiedene Umbauraten können durch unterschiedliche anatomische Positionen im Skelett, Geschlechtsunterschiede, genetische Faktoren und unterschiedliche Belastungen verursacht sein (Frost, 1997, Ruff und Hayes, 1983a, Ruff und Hayes, 1983b, Livshits et al., 1998, Chan et al., 2007, Frost, 1987b). Da es sich aber bei beiden Knochen um untere Extremitäten des postkranialen Skeletts handelt, welche für die Lokomotion zuständig sind, wurde der Osteonfragmentdichtewert der Femora als Annäherung in Ermangelung exakterer Werte auch für die Tibiae verwendet. Im Vergleich findet im Femur während des Gehens eine anterior-posteriore und medio-laterale Biegung des Femurs statt, wobei die anterior-posteriore Biegebelastung dabei von proximal nach distal ansteigt und ihr Maximum nahe dem Kniegelenk erreicht. In der Tibia finden ebenfalls anterior-posteriore Biegebelastungen während des Gehens, verbunden mit einer Torsionsbelastung während der Standphase des Gehens, statt (Ruff und Hayes, 1983a, Ruff und Hayes, 1983b). Die Bildung von Tibia und Femur beginnt bei beiden Knochen in der siebten bis achten Fetalwoche und die Fusion der Epiphysen ist für das Femur mit 20 Jahren (bei Männern) und für die Tibia mit 19 Jahren (bei Männern)

abgeschlossen (Scheuer und Black, 2000, Schaefer et al., 2009). Der Abschluss des Epiphysenverschlusses wurde für männliche Individuen angegeben, um dessen weiteste Altersspanne zu erfassen, da der Epiphysenverschluss bei weiblichen Individuen in der Regel bereits früher beendet ist.

Da in beiden Langknochen während des Gehens demnach Biegebelastungen stattfinden und einwirkende Belastungen ein Faktor für den Knochenumbau sind, beide Knochen in derselben Fetalwoche entstehen und der Epiphysenverschluss in der gleichen Altersklasse (*Juvenis*) vollzogen wird, wurde die Verwendung des Osteonfragmentdichtewerts für Femora auch für die Tibia als legitim angesehen.

Im periostalen Bereich der Tibiakompakta schrumpft die Osteonfläche früher als in der Kompaktamitte, wobei sich die Zahl der Osteone erhöht. Mittlerer Osteonumfang und Osteondurchmesser dagegen schrumpfen in beiden Bereichen der **Tibiakompakta** gleichsam. Diese Divergenzen können nur deshalb verdeutlicht werden, da das Tibiakollektiv so einen geringen Probenumfang hat. Im Vergleich dazu hat sich bei den **Femora** mittig erst später eine Schrumpfung gezeigt als im periostalen Bereich. Andererseits war der subjektive Eindruck, dass die **Tibiakompakta** generell auch dichter gepackt war als die der **Femora**, sowohl im mittigen als auch im periostalen Bereich. Dadurch würden Schrumpfung bzw. Akkumulierung von Parametern erst in höheren Temperaturbereichen zum Vorschein kommen.

Durch die wenigen verfügbaren Tibiaproben (n=6 Verbrennungsreihen) kann das Verhalten der Parameter nicht über mehrere Proben integriert und Ausreißer nicht wieder ausgeglichen werden. Zudem waren periostal mehr histologische Felder auswertbar als in der Kompaktamitte, da dieser Bereich häufig einer Zerstörung der Mikrostruktur unterworfen ist (vgl. Kapitel 4.2.1). Aufgrund dessen sind in der mittigen Tibiakompakta weniger Bilder auswertbar, wodurch sich Veränderungen in der Mikrostruktur, wie etwa die Schrumpfung der Osteongeometrie, bereits in den niedrigen Temperaturstufen manifestieren können. Zudem lagen auch Proben vor, welche eine dünnwandigere Kompakta aufwiesen, wodurch sich derartige Veränderungen ebenfalls früher als bei dickwandigerer Kompakta ausprägen können und Einfluss auf die mittleren Gesamtveränderungen des Kollektivs nehmen können.

Resorptionslakunen finden sich zwar auch weniger häufig als die anderen Parameter, v.a. am Periost, allerdings nehmen diese wesentlich mehr Fläche ein. Für diesen Parameter wäre es daher sinnvoller die Zahl der Resorptionslakunen und deren Fläche zu quantifizieren und nur als Anteil resorbierten in eine Regression einfließen zu lassen. Allerdings bedingt dies wiederum das Problem einer „Multikollinearität“ bzw. einer „Übersignifikanz“ der verwendeten Parameter, wofür sich abermals eine PCA anbietet. Mittels der Faktoren- oder Hauptkomponentenanalyse (PCA) könnte aus diesen Parametern ein Parameter zusammengefasst und in ein lineares Modell mitaufgenommen werden.

4.6.2) Schrumpfungskoeffizient

Die Applizierung des Schrumpfungskoeffizienten – einzeln berechnet aus Breiten- und Dickenschumpfung für jedes Knochenfragment der Verbrennungsreihen und die Vergleiche zwischen

RT und 1000°C– erbrachte im Gegensatz zu den Ergebnissen für die **Femurproben** bei den **Tibiae** vor allem für die Resorptionslakunen im periostalen Bereich der Kompakta bessere Ergebnisse bzw. an den Wert der unverbrannten Probe genäherte Ergebnisse. Die Zahl der Resorptionslakunen erhöhte sich durch die Verbrennung im Vergleich zu den unverbrannten Referenzen. Durch den Schrumpfungskoeffizienten wurden die Werte einander wieder angeglichen, was bedeutet, dass die Zahl der Resorptionslakunen durch den Schrumpfungskoeffizienten nach unten korrigiert wurde. Theoretisch liegen im periostalen Bereich der Kompakta im unverbrannten Zustand meist wenige Resorptionslakunen vor – generell nimmt deren Zahl von periostal nach endostal gehend zu. Durch die Verbrennung nähern sich aber mittiger und endostaler sowie periostaler und mittiger Bereich der Kompakta einander an, wodurch jeweils die Zahl der Resorptionslakunen verbrennungsbedingt in den höheren Temperaturbereichen ansteigt. Durch den Schrumpfungskoeffizienten wird dieser Wert reduziert. Ebenso verhält es sich mit der Anzahl intakter Osteone, welche sich durch temperaturinduzierte Schrumpfungsvorgänge im histologischen Feld akkumulieren und die Zahlenwerte in der unverbrannten Referenz übersteigen. Durch den Schrumpfungskoeffizienten wird auch diese Entwicklung wieder nivelliert und die Werte einander angenähert. Für das Kollektiv der Tibiae konnte die Applizierung des Schrumpfungskoeffizienten somit **positive** Ergebnisse liefern.

4.6.3) Statistische Auswertung

Der **Shapiro-Wilk-Test** zeigte an, dass sowohl im periostalen als auch im mittigen Bereich der **Tibiakompakta** wie bei den untersuchten **Femora** keine Normalverteilung der Daten vorlag. Wie bereits für die Femurkompakta erwähnt, können Abweichungen von der Normalverteilung bedeuten, dass der Stichprobenumfang zu klein oder zu divers ist. Anders als die Annahme, dass das Kollektiv der Femora aufgrund der verschiedenen Verbrennungstemperaturen zu divers ist, Altersgruppen und Positionen, wird in diesem Fall vermutet, dass das Kollektiv der Tibiae zu klein bemessen ist. Dadurch kann mit der statistischen Auswertung der Tibiadaten nur ein erster Ausblick auf mögliche Tendenzen gegeben werden. Diese Daten sollen als Basis für nachfolgende Untersuchungen der verbrennungsbedingten Veränderungen der Tibiakompakta dienen.

Im Vergleich zwischen **Positionen** entlang der Tibiaphyse mithilfe des **Wilcoxon-Tests** am **Periost** und in der **Kompaktamitte** zeigten sich die gleichen Trends auf wie bereits für die Femora. Auch die Untersuchung der **signifikanten Unterschiede in den Parameterzahlen zwischen verbrannter Probe und Referenzprobe** ließ für die Tibiae keine Unterschiede zu den Femurproben erkennen. Ebenso verhielten sich die **signifikante Unterschiede in den Parameterzählungen in aufeinanderfolgender Temperaturstufen** bei den Tibiae gleichsam denen der Femora.

Die **Korrelationen** der einzelnen histomorphometrischen Parameter in den untersuchten **Tibiae** miteinander ließen ebenfalls keine Unterschiede zu denen der **Femurproben** erkennen.

Der Vergleich von periostalem Rand und Kompaktamitte lieferte für den Wilcoxon-Rangsummentest wie schon bei den **Femora** für die **Tibiae** nur wenige signifikante Unterschiede.

Im Falle der experimentell verbrannten Proben unterscheidet sich in den unteren Bereichen vor allem die Osteongeometrie. Wie bereits zuvor sichtbar wurde, setzt die Schrumpfung in der Tibia im *mittigen* Bereich früher ein als im *periostalen* Bereich – bzw. ist für den mittigen Bereich früher bemerkbar da hier der ausgewertete Probenumfang geringer ausfällt. Dadurch können auch verbrennungsbedingte Schrumpfungen der Osteone früher zur Geltung kommen bzw. mehr Einfluss einnehmen.

Die Divergenzen der osteonalen Parameter bei 400°C könnten beispielsweise dadurch erklärt werden, dass bei dieser Temperatur im periostalen Bereich der Kompakta keinerlei Rückstände primären Kohlenstoffs mehr vorhanden sind, im mittigen Bereich jedoch schon. Zusätzlich setzt in der Kompaktamitte die Schrumpfung bereits ab 400°C ein und zieht damit verbundene Änderungen mit sich. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Chan et al (Chan et al., 2007), welche Unterschiede in den Ergebnissen histologischer Altersbestimmungen zwischen dem mittleren und periostalen Bereich der Kompakta fanden.

4.6.4) Regressionsmodelle

Grundlegend muss angemerkt werden, dass für die Erhebung stabiler multivariater linearer Regressionsmodelle zur Erstellung von Regressionsgleichungen zur histologischen Individualaltersschätzung anhand der Knochenmikrostruktur der Tibia ein größeres Kollektiv benötigt wird, als es in der vorliegenden Arbeit möglich war. Die linearen Regressionsmodelle wurden anhand der beiden (periostal und mittig) Datensätze aus den Mittelwerten der jeweils drei Einzelzählungen pro Individuum und Position bzw. Verbrennungstemperatur erstellt. Diese Datensätze lieferten stabilere Werte, da der Mittelwert aus den drei Einzelzählungen an drei verschiedenen Bereichen Kompakta gebildet wird und damit den Mittelwert des jeweiligen Probenstücks abbildet. Dadurch ergeben sich auch stabilere Werte für die Erstellung der Modelle, da Schwankungen innerhalb einer Probe somit leichter nivelliert werden können. Die Regressionsmodelle für die Tibia wurden ebenfalls an einem überalterten Kollektiv erstellt, was die Übertragung auf andere Datensätze bzw. die Anwendbarkeit für jüngere Individuen stark einschränkt. Die linearen Regressionsmodelle für die periostale und mittige Tibiakompakta können daher nur als Vorstudien angesehen werden, welche eine Tendenz für das Erstellen solcher Regressionsmodelle geben.

Periostaler Rand

Das Modell für den *periostalen* Rand der Tibiakompakta bezieht **Temperatur, Geschlecht und Stoffwechselraten (OPD, AOC, BFR und AktFr)** mit ein. Die Quartile waren symmetrisch verteilt, allerdings mit hoher minimaler und maximaler Abweichung. OPD und Aktivierungsfrequenz hatten einen signifikanten Einfluss auf das Regressionsmodell. Dies gilt nicht für die BFR, da diese sich nicht maßgeblich verbrennungsbedingt ändert. Die AOC zeigt grundsätzlich die gleiche Änderung wie die OPD auf, weshalb nur einer der beiden Parameter einen signifikanten Einfluss nimmt (Kollinearität). Die OPD dagegen nimmt stark zu mit steigender Verbrennungstemperatur, da die Zahl intakter Osteone verbrennungsbedingt deutlich ansteigt. Auch das Geschlecht hat einen signifikanten Einfluss, da die OPD-Änderung mit dem weiblichen und die Aktivierungsfrequenz-Änderung positiv mit dem

männlichen Geschlecht korreliert. Die Aktivierungsfrequenz verdeutlicht dagegen große verbrennungsbedingte Änderungen, da sie sich wie die Osteogeometrie bei steigender Verbrennungstemperatur rückläufig verhält.

Im Vergleich zum Kollektiv der Femora ist der F-Wert natürlich verhältnismäßig klein. In Anbetracht des geringen Gesamtdatensatzes ist der F-Wert für das lineare Modell *per se* dagegen hoch und zeigt, dass die Regression den Datensatz gut beschreibt. Der RSE von ± 9 Jahren überschreitet nicht die Grenzen einer Altersklasse, sondern befindet sich mit einer Gesamtabweichung von ± 18 Jahren noch innerhalb dieser Grenzen.

Die beschreibenden Plots zum Regressionsmodell weisen darauf hin, dass der Datensatz zu gering für die Erstellung eines solchen linearen Modells ist. Es liegen Werte vor, die von der Grundgesamtheit abweichen. Ansonsten sind die Daten jedoch symmetrisch an der Nulllinie verteilt. Es gibt Abweichungen von der Normalverteilung in den oberen Quartilen, aber auch im mittigen Bereich der Datenverteilung. Der Scale-Location-Plot zeigt zudem, dass die Verteilung der Residuen insgesamt zu groß ist und zu stark voneinander abweicht. Dies könnte daran liegen, dass im Kollektiv zwei jüngere und zwei ältere Individuen für die Verbrennungsreihen verwendet wurden und diese möglicherweise in ihren Werten zu weit voneinander abweichen, wodurch diese im Scale-Location-Plots als zu divers verteilt aufgezeigt werden. Diese Annahme bestätigt sich dadurch, dass auch im *Shapiro-Wilk-Test* keine Normalverteilung ermittelt werden konnte. Im Cook's Distance-Plot konnten sogar stark einflussnehmende Datenzeilen identifiziert werden. Aufgrund des kleinen Datensatzes konnte keine Entfernung der Ausreißer mit MVOutlier durchgeführt werden, da ansonsten der Datensatz noch kleiner und unglaubwürdiger für die Erstellung linearer Modelle geworden wäre. Daher liegen auch Ausreißer im Datensatz vor. Beispielsweise Individuum WF24 stellt einen solchen Ausreißer dar, da es sich um ein *adultes* Individuum handelt, der Rest der Verbrennungsreihen allerdings (bis auf *ein* weiteres Individuum der Altersklasse *Adultas*) aus der Altersklasse *Senilis* stammt. Bei einem weiteren Ausreißer, WF17, handelt es sich zwar um ein seniles Individuum, allerdings fällt dieses Individuum dadurch auf, dass es sehr hohe OPD-Werte aufweist. Dadurch nehmen die Werte dieser beiden Individuen Einfluss auf den restlichen Datensatz.

Im Falle der Tibiae war kein Modelltest in Form eines Rückwärtstests möglich, da der Test- und Trainingsdatensatz nach dem Ausschluss von WF17 und WF24 zu klein werden würden.

Mittiger Bereich

In der *Kompaktmitte* wurden zur Erhebung des linearen Modells dieselben Parameter verwendet wie bereits am *Periost* (**Temperatur, Geschlecht, OPD, AOC, Aktivierungsfrequenz und Knochenbildungsrate**). Die minimale Abweichung war etwas höher, dafür die maximale Abweichung kleiner als in dem Modell am periostalen Rand. Die Quartile waren nicht symmetrisch verteilt, wodurch auch der Median nicht exakt am Nullpunkt lag. In diesem Fall hatte nur die Aktivierungsfrequenz einen signifikanten Einfluss auf das lineare Modell. Dies könnte daran liegen, dass bei der Einbeziehung von AOC und OPD eine Multikollinearität mit der Aktivierungsfrequenz vorliegt. Die Knochenbildungsrate

zeigt vor allem in den höheren Verbrennungsstufen in der mittigen Tibiakompakta keine deutlichen verbrennungsbedingten Änderungen auf.

Der RSE liegt mit $\pm 10,7$ Jahren und damit einer Gesamtabweichung von über 20 Jahren über den Grenzen einer Altersklasse, was problematisch für eine eindeutige Individualaltersschätzung, beispielsweise von Brandopfern, ist. Die F-Statistik war im Vergleich noch kleiner als für das Modell am periostalen Rand. Allerdings war auch der zugrunde liegende Datensatz nochmals kleiner und das Modell dadurch instabiler.

Die Plots zur Güte des linearen Modells konnten aufzeigen, dass Datenpunkte vorliegen, welche einen gravierenden Einfluss auf den Datensatz haben. Es zeigten sich Abweichungen von der Normalverteilung in den Quartilen und auch der Scale-Location-Plot offenbarte eine zu große Verteilung der Residuen. Es lagen zwar keine Datenzeilen außerhalb der Cook's Distance, es wurden jedoch stark einflussnehmende Datenzeilen angezeigt. Dabei handelte es sich wie im periostalen Bereich um die Individuen WF17 und WF24, zusätzlich zu Individuum WF33. WF17 stellte auch in der Kompaktmitte den höchsten OPD-Wert, WF33 hingegen den niedrigsten, weshalb diese Individuen einen starken Einfluss auf die Daten nehmen.

Auch in der Kompaktmitte konnte aufgrund des kleinen Datensatzes kein Modelltest durchgeführt werden.

Fazit

Es stellt sich die Frage, ob sich Veränderungen im Falle eines größeren Datensatzes im mittigen Bereich der Tibiakompakta ebenfalls früher manifestieren würden als am periostalen Rand, da dies eher zu erwarten wäre. Zudem könnten an einem größeren Datensatz die verbrennungsbedingt beeinflussten und auch unverbrannten Parameterzahlen in den Tibiae auf Geschlechtsdimorphismen hin untersucht werden und Ausreißer-Tests entfernt werden.

Die Regressionsmodelle, generiert für den Datensatz der Tibiae, aus Kompaktmitte und periostalem Rand, liefern erste, vorläufige Resultate, welche vielversprechend zu sein scheinen, wenn sie an einem größeren Datensatz erhoben würden.

5.) Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, neue Methoden zur histologischen Individualaltersschätzung kremierter Individuen zu entwickeln, welche sowohl für den prähistorischen als auch forensischen Kontext als von Bedeutung wären. Im Zuge dessen wurden auch signifikante Zusammenhänge und Änderungen der bewerteten Parameter der Knochenmikrostruktur analysiert und diskutiert.

Mithilfe dieser Dissertation konnte festgestellt werden, dass sich vor allem osteonale Parameter der Knochenmikrostruktur und darauf basierende Stoffwechselfparameter verbrennungsbedingt signifikant ändern.

- Anhand des vorliegenden Probenmaterials könnten auch nachfolgend noch neue Methoden zur histologischen Individualaltersbestimmung seniler Individuen entwickelt werden, da diesbezüglich in der Literatur häufig ein Mangel diskutiert wird und der Probenumfang dafür

ausreichend groß wäre. Im Anhang auf CD zu dieser Doktorarbeit werden die erhobenen Rohdaten mit zur Verfügung gestellt. Zusammen mit detaillierten Beschreibungen zur Auswertung der Parameter könnte der Rohdatensatz in einer größeren Studie verwendet werden, um die Datenmenge zu erweitern.

- Zudem könnten automatisierte Algorithmen für die Auszählung der Parameter anhand der im Rahmen dieser Doktorarbeit erstellten histologischen Bilder und der zugehörigen Auszählungen getestet werden. Es stehen darüber hinaus noch weitere bislang unausgewertete und unbearbeitete Bilder bereits zur Verfügung.
- Ein Vorteil für die Auswertung solcher histologischen Schnitte für die Erhebung der Regressionsmodelle wäre die Anwendung von sogenannten „Deep Learning“-Algorithmen und automatischer Bildbearbeitungsprogramme, um mehr Proben auszuwerten als es im Rahmen dieser Arbeit möglich war. Dadurch könnte auch ein breiter aufgestelltes Kollektiv problemlos ausgewertet werden. Dabei ist allerdings auch nicht die Zeit zu vernachlässigen, die bis zur Auswertung der histologischen Bilder benötigt wird (Waschen, Schneiden, Entfetten, Verbrennen, Einbetten, Sägemikrotom, etc.).
- Die Verwendung der von Malhan et al. (Malhan et al., 2018) entwickelten halbautomatischen Software zur Bestimmung der histomorphometrischen Parameter wäre zum Einen von Vorteil, um das Auswertungsverfahren zu beschleunigen, zum Anderen wäre dadurch eine Vergleichbarkeit mit anderen Studien erleichtert. Problematisch bei der Anwendung solcher halbautomatischen Softwares oder Deep-Learning-Algorithmen ist die Übertragung auf verbranntes Knochenmaterial, da sich die Knochenmikrostruktur nicht einheitlich verhält. Vorab wäre für die histologische Altersbestimmung die Problematik der nicht-vorhandenen Standards zur histologischen Altersbestimmung zu lösen (Khan et al., 2017, García-Donas et al., 2016). Dies entspricht auch den Angaben von Ritz-Timme et al. (Ritz-Timme et al., 2000), dass Altersbestimmungsmethoden so konzipiert sein sollten, dass klare Informationen über die Methode und deren Genauigkeit vorliegen.
- In nachfolgenden Studien zu verbrennungsbedingten Veränderungen der histomorphometrischen Parameter könnte beispielsweise der Fokus darauf gelegt werden, ob ein Parameter ermittelt werden kann, welcher die Veränderung der diskreten Verteilung der Parameter durch den Temperatureinfluss zu einer Normalverteilung werden lässt (Shapiro-Wilk-Test). Die Fragestellung könnte dabei sein, ob sich dies über den Schrumpfungskoeffizienten oder ähnliches nachvollziehen und ausgleichen lässt. Möglicherweise müsste auch das Probenkollektiv erweitert bzw. vergrößert werden, sodass einheitlich über die Temperaturstufen genauso viele Proben vorliegen wie für RT und 100°C.
- Allein eine bessere Altersverteilung des Kollektivs könnte eine Normalverteilung der Parameter bewirken. Da in diesem Fall nur überalterte Individuen vorliegen ergibt sich durch den Einfluss weniger jüngerer Individuen möglicherweise eine Abweichung von der Normalverteilung. Durch die Verwendung von Tibiae und Femora derselben Individuen könnten die verbrennungsbedingten Veränderungen der beiden Langknochen miteinander

verglichen und die in den Regressionsmodellen erstellten Formeln getestet werden (Formeln für Femora an den Tibiae und *vice versa*). Im Falle eines erfolgreichen Tests wäre dies noch vorteilhafter für die histologische Altersbestimmung am Leichenbrand, da es die Probenahme erheblich erleichtern würde – vor allem auch für den ungeübteren Bearbeiter.

- Ein grundlegend neuer Ansatz für die Entwicklung histologischer Altersbestimmungsmethoden stammt von Gocha und Agnew (in (Katzenberg und Grauer, 2018)) und bezieht sich auf *Maximum Likelihood*- oder *Wahrscheinlichkeitstests*. Für diesen Datensatz war dieser Ansatz durch das überalterte Kollektiv und die geringe Stichprobengröße leider nicht möglich. Die von Simmons et al. (Simmons et al., 2016) entwickelte Entscheidungsbaum-Analyse zur Unterscheidung von menschlichem und nicht-menschlichem verbranntem und unverbranntem Knochen könnte bei Übertragung auf die histomorphometrischen Parameter die Auswertung ebenfalls erheblich erleichtern.

Da die Individualaltersbestimmung zum Todeszeitpunkt bei Leichenbrandmaterial häufig erschwert ist aufgrund des hohen Fragmentierungs- und Torsionsgrades, dem häufigen Vorkommen von *pars pro toto* Bestattungen und der ungenauen Einschätzbarkeit der Verbrennungstemperaturen konnte mit dieser Arbeit ein weiterer Grundstein für eine genauere histologische Altersbestimmung kremierter Individuen gelegt werden. Zwar waren die im Rahmen der Dissertation verwendeten Individuen überaltert, nichtsdestotrotz mangelte es bislang an Altersbestimmungsmethoden für *senile* Individuen. Für die histologische Altersbestimmung seniler Individuen an Leichenbrandmaterial wird daher empfohlen, die Formel aus *Modell 3* aus dem Periost und der Kompaktmitte für Femora zu verwenden.

6.) Literaturverzeichnis

- ABBOTT, S., TRINKAUS, E. & BURR, D. B. 1996. Dynamic bone remodeling in later Pleistocene fossil hominids. *American Journal of Physical Anthropology*, 99, 585-601.
- ABSOLONOVA, K., DOBISIKOVA, M., BERAN, M., ZOCOVA, J. & VELEMINSKÝ, P. 2012. The temperature of cremation and its effect on the microstructure of the human rib compact bone. *Anthropologischer Anzeiger*, 69, 439-460.
- ABSOLONOVA, K., VELEMINSKY, P., DOBISIKOVA, M., BERAN, M. & ZOCOVA, J. 2013. Histological estimation of age at death from the compact bone of burned and unburned human ribs. *Journal of forensic sciences*, 58.
- AHLBORG, H. G., JOHNNELL, O., TURNER, C. H., RANNEVIK, G. & KARLSSON, M. K. 2003. Bone loss and bone size after menopause. *New England Journal of Medicine*, 349, 327-334.
- AHLQVIST, J. & DAMSTEN, O. 1969. A modification of Kerley's method for the microscopic determination of age in human bone. *Journal of Forensic Sciences*, 14, 205.
- AIELLO, L. C. & MOLLESON, T. 1993. Are microscopic ageing techniques more accurate than macroscopic ageing techniques? *Journal of Archaeological Science*, 20, 689-704.
- ALLAN, J. C. 1982. *Learning about statistics: a primer in simple statistical methods for students of the medical, biological, paramedical, social and behavioural sciences*, MacMillan.
- ALUNNI, V., GREVIN, G., BUCHET, L. & QUATREHOMME, G. 2014. Forensic aspect of cremations on wooden pyre. *Forensic science international*, 241, 167-172.
- AMTMANN, E. & DODEN, E. 1981. Anpassung der Knochenstruktur an mechanische Beanspruchung: Adaptation of bone structure to mechanical stress. *Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie*, 1-21.
- ANDRONOWSKI, J. M. & CROWDER, C. 2019. Bone Area Histomorphometry. *Journal of forensic sciences*, 64, 486-493.
- ANDRONOWSKI, J. M., PRATT, I. V. & COOPER, D. M. 2017. Occurrence of osteon banding in adult human cortical bone. *American journal of physical anthropology*, 164, 635-642.
- BABAYIGIT, A., DIRIK, E., BOBER, E. & ÇAKMAKCI, H. 2006. Adverse effects of antiepileptic drugs on bone mineral density. *Pediatric neurology*, 35, 177-181.
- BALTHAZARD, L. & LEBRUN, F. 1911. Les canaux de Havers de l'os humain aux différents âges. *Les Annales d'hygiène publique et de médecine légale*, 15, 144-152.
- BEDDOE, A. 1977. Measurements of the microscopic structure of cortical bone (model for dosimetry). *Physics in Medicine & Biology*, 22, 298.
- BEDNAREK, J., BLOCH-BOGUSŁAWSKA, E., ENGELGARDT, P., WOLSKA, E. & ŚLIWKA, K. 2009. Validity of histomorphometric rib assessment for age at death prediction. *Problems of Forensic Sciences*, 80, 403-10.
- BELKIN, V., LIVSHITS, G., OTREMSKI, I. & KOBLYANSKY, E. 1998. Aging bone score and climatic factors. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 106, 349-359.
- BELL, K. L., LOVERIDGE, N., REEVE, J., THOMAS, C. D., FEIK, S. A. & CLEMENT, J. G. 2001. Super-osteons (remodeling clusters) in the cortex of the femoral shaft: Influence of age and gender. *The anatomical record*, 264, 378-386.
- BENNINGHOFF, A., DRENCKHAHN, D. & WASCHKE, J. 2008. *Taschenbuch anatomie*, Elsevier, Urban & Fischer München.
- BERTELSEN, P., CLEMENT, J. & THOMAS, C. D. L. 1995. A morphometric study of the cortex of the human femur from early childhood to advanced old age. *Forensic science international*, 74, 63-77.
- BOSKEY, A. L. 2007. Mineralization of bones and teeth. *Elements*, 3, 385-391.
- BOTHA, D., BHAGWANDIN, A., LYNNERUP, N. & STEYN, M. 2018. The use of stereological methods in the histomorphometric assessment of bone for age-at-death estimation. *Forensic science international*, 290, 353. e1-353. e7.
- BOUVIER, M. & UBELAKER, D. H. 1977. A comparison of two methods for the microscopic determination of age at death. *American journal of physical anthropology*, 46, 391-394.

- BRADTMILLER, B. & BUIKSTRA, J. E. 1984. Effects of burning on human bone microstructure: a preliminary study. *Journal of Forensic Science*, 29, 535-540.
- BRITZ, H. M., THOMAS, C. D. L., CLEMENT, J. G. & COOPER, D. M. 2009. The relation of femoral osteon geometry to age, sex, height and weight. *Bone*, 45, 77-83.
- BROMAGE, T. G., GOLDMAN, H. M., MCFARLIN, S. C., WARSHAW, J., BOYDE, A. & RIGGS, C. M. 2003. Circularly polarized light standards for investigations of collagen fiber orientation in bone. *The Anatomical Record*, 274, 157-168.
- BROOKS, T. R., BODKIN, T. E., POTTS, G. E. & SMULLEN, S. A. 2006. Elemental Analysis of Human Cremains Using ICP-OES to Classify Legitimate and Contaminated Cremains*. *Journal of Forensic Sciences*, 51, 967-973.
- BURR, D. B. 1992. Estimated intracortical bone turnover in the femur of growing macaques: implications for their use as models in skeletal pathology. *The Anatomical Record*, 232, 180-189.
- BURR, D. B. 2002. Targeted and nontargeted remodeling. *Bone*, 30, 2-4.
- BURR, D. B., PIOTROWSKI, G. & MILLER, G. J. 1981. Structural strength of the macaque femur. *American Journal of Physical Anthropology*, 54, 305-319.
- BURR, D. B., RUFF, C. B. & THOMPSON, D. D. 1990. Patterns of skeletal histologic change through time: comparison of an archaic Native American population with modern populations. *The Anatomical Record*, 226, 307-313.
- CACCIA, G., MAGLI, F., TAGI, V. M., PORTA, D. G. A., CUMMAUDO, M., MÁRQUEZ-GRANT, N. & CATTANEO, C. 2016. Histological determination of the human origin from dry bone: a cautionary note for subadults. *International journal of legal medicine*, 130, 299-307.
- CAMBRA-MOO, O., BERMEJO, R. B., GIL, O. G., RAMÍREZ, P. B., PÉREZ, J. R., MARTÍN, A. G. & DE BALBÍN BEHRMANN, R. 2018. Can histomorphology enhance the analysis of cremated human bones in an archaeological context? A case from the Lagunita I archaeological site, Santiago de Alcántara (Cáceres), Spain. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 20, 675-682.
- CANNET, C., BARAYBAR, J. P., KOLOPP, M., MEYER, P. & LUDES, B. 2011. Histomorphometric estimation of age in paraffin-embedded ribs: a feasibility study. *International journal of legal medicine*, 125, 493-502.
- CARUSO, V., CUMMAUDO, M., MADERNA, E., CAPPELLA, A., CAUDULLO, G., SCARPULLA, V. & CATTANEO, C. 2018. A comparative analysis of microscopic alterations in modern and ancient undecalcified and decalcified dry bones. *American journal of physical anthropology*, 165, 363-369.
- CATTANEO, C., DIMARTINO, S., SCALI, S., CRAIG, O. E., GRANDI, M. & SOKOL, R. J. 1999. Determining the human origin of fragments of burnt bone: a comparative study of histological, immunological and DNA techniques. *Forensic Science International*, 102, 181-191.
- CATTANEO, C., PORTA, D., GIBELLI, D. & GAMBA, C. 2009. Histological determination of the human origin of bone fragments. *Journal of forensic sciences*, 54, 531-533.
- CHAN, A. H., CROWDER, C. M. & ROGERS, T. L. 2007. Variation in cortical bone histology within the human femur and its impact on estimating age at death. *American journal of physical anthropology*, 132, 80-88.
- CHO, H., STOUT, S. D. & BISHOP, T. A. 2006. Cortical bone remodeling rates in a sample of African American and European American descent groups from the American Midwest: comparisons of age and sex in ribs. *American Journal of Physical Anthropology: The Official Publication of the American Association of Physical Anthropologists*, 130, 214-226.
- CHO, H., STOUT, S. D., MADSEN, R. W. & STREETER, M. A. 2002. Population-specific histological age-estimating method: a model for known African-American and European-American skeletal remains. *Journal of Forensic Science*, 47, 12-18.
- COHEN, J. & HARRIS, W. H. 1958. The three-dimensional anatomy of Haversian systems. *JBS*, 40, 419-434.
- CORREIA, P. M. 1997. Fire modification of bone: a review of the literature. *Forensic taphonomy: the postmortem fate of human remains*, 275-293.

- COSGRIFF-HERNÁNDEZ, M.-T. J. 2012. *Histomorphometric estimation of age at death using the femoral cortex: A modification of established methods*. The Ohio State University.
- CRESCIMANNO, A. & STOUT, S. D. 2012. Differentiating fragmented human and nonhuman long bone using osteon circularity. *Journal of forensic sciences*, 57, 287-294.
- CROWDER, C. M., HEINRICH, J. T. & DOMINGUEZ, V. M. 2016. Histological age estimation. *Handbook of Forensic Anthropology and Archaeology*, 294, 294.
- CROWDER, C. M., PINTO, D. C., ANDRONOWSKI, J. M. & DOMINGUEZ, V. M. 2018. Theory and histological methods. *Forensic Anthropology: Theoretical Framework and Scientific Basis*, 113-126.
- CUMMAUDO, M., CAPPELLA, A., GIACOMINI, F., RAFFONE, C., MÀRQUEZ-GRANT, N. & CATTANEO, C. 2019. Histomorphometric analysis of osteocyte lacunae in human and pig: exploring its potential for species discrimination. *International journal of legal medicine*, 133, 711-718.
- CURREY, J. D. 1964. Some effects of ageing in human Haversian systems. *Journal of anatomy*, 98, 69.
- CURREY, J. D. 2012. The structure and mechanics of bone. *Journal of Materials Science*, 47, 41-54.
- DEHAAN, J. 2015. *Fire and bodies. The Analysis of Burned Human Remains*. Elsevier, Amsterdam.
- DENT, B. B., FORBES, S. L. & STUART, B. H. 2004. Review of human decomposition processes in soil. *Environmental Geology*, 45, 576-585.
- DITTMANN, K., GRUPE, G., MANHART, H., PETERS, J. & STROTT, N. 2006. Histomorphometry of mammalian and avian compact bone. *Microscopic examinations of bioarchaeological remains: keeping a close eye on ancient tissues*. *Leidorf: Verlag Marie Leidorf*, 48-101.
- DOKLÁDAL, M. 1969. Über die heutigen Möglichkeiten der Personenidentifikation auf Grund von verbrannten Knochen. *Aktuelle Kriminologie*, 223-246.
- DOMINGUEZ, V. M. & CROWDER, C. M. 2012. The utility of osteon shape and circularity for differentiating human and non-human Haversian bone. *American journal of physical anthropology*, 149, 84-91.
- DOPPLER, S. 2008. *Alters-, Aktivitäts- und Krankheitsmerkmale in der menschlichen Knochenmikrostruktur: Eine vergleichende Studie einer individualaltersbekannteren historischen Population mit rezenten Menschen*. Dr.rer.nat., Ludwig-Maximilians-University Munich.
- DOPPLER, S., HOTZ, G., NEUBERGER, F. & GRUPE, G. 2006. Bone microstructure and its hidden information. *Anthropologischer Anzeiger; Bericht über die biologisch-anthropologische Literatur*, 64, 257-271.
- DOWLE, M., SRINIVASAN, A., GORECKI, J., CHIRICO, M., STETSENKO, P., SHORT, T., LIANOGLU, S., ANTONYAN, E., BONDSCH, M. & PARSONAGE, H. 2019. Package 'data.table'. *Extension of 'data.frame'*.
- DOWNEY, P. A. & SIEGEL, M. I. 2006. Bone biology and the clinical implications for osteoporosis. *Physical therapy*, 86, 77-91.
- DRUSINI, A. 1987. Refinements of two methods for the histomorphometric determination of age in human bone. *Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie*, 167-176.
- DUNCAN, W. N., BALKANSKY, A. K., CRAWFORD, K., LAPHAM, H. A. & MEISSNER, N. J. 2008. Human cremation in Mexico 3,000 years ago. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 5315-5320.
- ECKERT, W. G., JAMES, S. & KATCHIS, S. 1988. Investigation of cremations and severely burned bodies. *The American journal of forensic medicine and pathology*, 9, 188-200.
- ERICKSEN, M. F. 1991. Histologic estimation of age at death using the anterior cortex of the femur. *American Journal of Physical Anthropology*, 84, 171-179.
- FAIRGRIEVE, S. I. 2007. *Forensic cremation recovery and analysis*, CRC press.
- FEREIRA, J. L., DE FERREIRA, A. E. & ORTEGA, A. I. 2008. Methods for the analysis of hard dental tissues exposed to high temperatures. *Forensic Science International*, 178, 119-124.
- FERNANDEZ CASTILLO, R., UBELAKER, D. H., ACOSTA, J. A. L., ROSA, R. J. E. & GARCIA, I. G. 2013. Effect of temperature on bone tissue: histological changes. *Journal of forensic sciences*, 58, 578-582.
- FERNÁNDEZ-JALVO, Y., ANDREWS, P., PESQUERO, D., SMITH, C., MARÍN-MONFORT, D., SÁNCHEZ, B., GEIGL, E.-M. & ALONSO, A. 2010. Early bone diagenesis in temperate environments: Part I:

- Surface features and histology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 288, 62-81.
- FETZER, L., B.Sc. 2018. *The applicaiton of histology for the analysis of experimentally cremated bones*. Bachelor of Science Ludwig-Maximilians-Universität München.
- FILZMOSER, P., GARRETT, R. G. & REIMANN, C. 2005. Multivariate outlier detection in exploration geochemistry. *Computers & geosciences*, 31, 579-587.
- FILZMOSER, P. & GSCHWANDTNER, M. 2017. mvoutlier: Multivariate outlier detection based on robust methods [Computer software]. URL <http://CRAN.R-project.org/package=mvoutlier> (R package version 2.0. 8).
- FILZMOSER, P., MARONNA, R. & WERNER, M. 2008. Outlier identification in high dimensions. *Computational Statistics & Data Analysis*, 52, 1694-1711.
- FLOHR SØRENSEN, T. & BILLE, M. 2008. Flames of transformation: the role of fire in cremation practices. *World Archaeology*, 40, 253-267.
- FROST, H. 1969. Tetracycline-based histological analysis of bone remodeling. *Calcified Tissue Research*, 3, 211-237.
- FROST, H. 1982. Review article mechanical determinants of bone modeling. *Bone*, 4, 217-229.
- FROST, H. 1987a. Bone "mass" and the "mechanostat": a proposal. *The anatomical record*, 219, 1-9.
- FROST, H. 1987b. Secondary osteon populations: an algorithm for determining mean bone tissue age. *American Journal of Physical Anthropology*, 30, 221-238.
- FROST, H. 1997. Why do marathon runners have less bone than weight lifters? A vital-biomechanical view and explanation. *Bone*, 20, 183-189.
- FROST, H. M. 1964. *The Laws of Bone Structure*. Springfield IL. *Charles C. Thomas*.
- GARCÍA-DONAS, J. G., DYKE, J., PAINE, R. R., NATHENA, D. & KRANIOTI, E. F. 2016. Accuracy and sampling error of two age estimation techniques using rib histomorphometry on a modern sample. *Journal of forensic and legal medicine*, 38, 28-35.
- GATTO, E. 2002. Cremation Fires in Late Neolithic France. *BAR INTERNATIONAL SERIES*, 1089, 27-34.
- GEJVALL, N.-G. 1963. *Cremations. Science in Archaeology: A Comprehensive Survey of Progress and Research*, D Brothwell, E Higgs. Thames and Hudson: London.
- GOCHA, T. P. & AGNEW, A. M. 2016. Spatial variation in osteon population density at the human femoral midshaft: histomorphometric adaptations to habitual load environment. *Journal of anatomy*, 228, 733-745.
- GOCHA, T. P. & SCHUTKOWSKI, H. 2013. Tooth cementum annulation for estimation of age-at-death in thermally altered remains. *Journal of forensic sciences*, 58.
- GOLDMAN, H. M., BROMAGE, T. G., THOMAS, C. D. L. & CLEMENT, J. G. 2003. Preferred collagen fiber orientation in the human mid-shaft femur. *The Anatomical Record*, 272, 434-445.
- GOLDSMITH, N. F., JOHNSTON, J. O., PICETTI, G. & GARCIA, C. 1973. Bone Mineral in the Radius and Vertebral Osteoporosis in an Insured Population: A CORRELATIVE STUDY USING: 125: I PHOTON ABSORPTION AND MINIATURE ROENTGENOGRAPHY. *JBJS*, 55, 1276-1293.
- GOLIATH, J. R., STEWART, M. C. & STOUT, S. D. 2016. Variation in osteon histomorphometrics and their impact on age-at-death estimation in older individuals. *Forensic science international*, 262, 282. e1-282. e6.
- GONÇALVES, D., THOMPSON, T. J. & CUNHA, E. 2011. Implications of heat-induced changes in bone on the interpretation of funerary behaviour and practice. *Journal of Archaeological Science*, 38, 1308-1313.
- GREINER, M., KOCSIS, B., HEINIG, M. F., MAYER, K., TONCALA, A., GRUPE, G. & SCHMAHL, W. W. 2018. Experimental Cremation of Bone: Crystallite Size and Lattice Parameter Evolution. *Biom mineralization*. Springer.
- GREINER, M., RODRÍGUEZ-NAVARRO, A., HEINIG, M., MAYER, K., KOCSIS, B., GÖHRING, A., TONCALA, A., GRUPE, G. & SCHMAHL, W. 2019. Bone incineration: An experimental study on mineral structure, colour and crystalline state. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 25, 507-518.
- GRÉVIN, G., BAILET, P., QUATREHOMME, G. & OLLIER, A. 1998. Anatomical reconstruction of fragments of burned human bones: a necessary means for forensic identification. *Forensic Science International*, 96, 129-134.

- GROSSKOPF, B. 1990. Individualaltersbestimmung mit Hilfe von Zuwachsringen im Zement bodengelagerter menschlicher Zähne. *Zeitschrift für Rechtsmedizin*, 103, 351-359.
- GROSSKOPF, B. 2004. *Leichenbrand Biologisches und kulturhistorisches Quellenmaterial zur Rekonstruktion vor- und frühgeschichtlicher Populationen und ihrer Funeralpraktiken*. Dr.phil. Dissertation, Universität Leipzig.
- GRUPE, G., DRESES-WERRINGLOER, U. & PARSCHE, F. 1993. Initial stages of bone decomposition: causes and consequences. *Prehistoric Human Bone*. Springer.
- GRUPE, G., HARBECK, M. & MCGLYNN, G. C. 2015. *Prähistorische Anthropologie*, Springer.
- GRUPE, G. & HERRMANN, B. 1983. Über das Schrumpfungsverhalten experimentell verbrannter spongioser Knochen am Beispiel des Caput femoris. *Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie*, 74, 121-127.
- GRUPE, G. & HUMMEL, S. 1991. Trace element studies on experimentally cremated bone. I. Alteration of the chemical composition at high temperatures. *Journal of Archaeological Science*, 18, 177-186.
- HANSON, M. & CAIN, C. R. 2007. Examining histology to identify burned bone. *Journal of Archaeological Science*, 34, 1902-1913.
- HARBECK, M., SCHLEUDER, R., SCHNEIDER, J., WIECHMANN, I., SCHMAHL, W. W. & GRUPE, G. 2011. Research potential and limitations of trace analyses of cremated remains. *Forensic Science International*, 204, 191-200.
- HARVIG, L. & LYNNERUP, N. 2013. On the volume of cremated remains—a comparative study of archaeologically recovered cremated bone volume as measured manually and assessed by Computed Tomography and by Stereology. *Journal of Archaeological Science*, 40, 2713-2722.
- HEANEY, R. P. 2003. Is the paradigm shifting? *Bone*, 33, 457-465.
- HENNIG, C. & COOPER, D. 2011. Brief communication: the relation between standard error of the estimate and sample size of histomorphometric aging methods. *American journal of physical anthropology*, 145, 658-664.
- HERRMANN, B. 1972a. Zur Beurteilung von Kohlenstoffverfärbungen bei Leichenbränden. *Ausgrabungen und Funde*, 17, 275-277.
- HERRMANN, B. 1972b. Zur Lage des Leichnams auf dem Scheiterhaufen. *Zeitschrift für Morphologie und anthropologie*, 80-89.
- HERRMANN, B. 1973. *Das Combe Capelle-Skelett: eine Untersuchung der Brandreste unter Berücksichtigung thermoinduzierter Veränderungen am Knochen*, na.
- HERRMANN, B. 1976a. Experimentelle und theoretische Beiträge zur Leichenbranduntersuchung. *Homo Gottingen*, 27, 114-118.
- HERRMANN, B. 1976b. Neuere Ergebnisse zur Beurteilung menschlicher Brandknochen. *Zeitschrift für Rechtsmedizin*, 77, 191-200.
- HERRMANN, B. 1977. Über die Abhängigkeit der Schrumpfung vom Mineralgehalt bei experimentell verbrannten Knochen. *Anthropologischer Anzeiger*, 7-12.
- HERRMANN, B. 1980. Kleine Geschichte der Leichenbranduntersuchung. (Aperçu historique des études sur la crémation). *Fornvännen. Tidskrift for Svensk Antikvarisk Forskning Stockholm*, 20-29.
- HERRMANN, B., GRUPE, G., HUMMEL, S., PIEPENBRINK, H. & SCHUTKOWSKI, H. 1991. *Prähistorische Anthropologie: Leitfaden der Feld-und Labormethoden*, Springer-Verlag.
- HEŘT, J., FIALA, P. & PETRTÝL, M. 1994. Osteon orientation of the diaphysis of the long bones in man. *Bone*, 15, 269-277.
- HILLER, J. C., THOMPSON, T., EVISON, M., CHAMBERLAIN, A. & WESS, T. 2003. Bone mineral change during experimental heating: an X-ray scattering investigation. *Biomaterials*, 24, 5091-5097.
- HOKE, N. 2017. *Evaluierung frühdiagenetischer Veränderungen an Knochenmaterial zur Validierung der Daten gewonnen aus der Analyse stabiler Isotope leichter Elemente*. Imu.
- HOLDEN, J., PHAKEY, P. & CLEMENT, J. 1995a. Scanning electron microscope observations of heat-treated human bone. *Forensic Science International*, 74, 29-45.
- HOLDEN, J., PHAKEY, P. & CLEMENT, J. 1995b. Scanning electron microscope observations of incinerated human femoral bone: a case study. *Forensic Science International*, 74, 17-28.

- HUMMEL, S. & SCHUTKOWSKI, H. 1993. Approaches to the histological age determination of cremated human remains. *Histology of Ancient Human Bone: Methods and Diagnosis*. Springer.
- IWANIEC, U. T., CRENSHAW, T. D., SCHOENINGER, M. J., STOUT, S. D. & ERICKSEN, M. F. 1998. Methods for improving the efficiency of estimating total osteon density in the human anterior mid-diaphyseal femur. *American journal of physical anthropology*, 107, 13-24.
- JANS, M., NIELSEN-MARSH, C. M., SMITH, C. I., COLLINS, M. J. & KARS, H. 2004. Characterisation of microbial attack on archaeological bone. *Journal of Archaeological Science*, 31, 87-95.
- JAWORSKI, Z., MEUNIER, P. & FROST, H. M. 1972. Observations on two types of resorption cavities in human lamellar cortical bone. *Clinical orthopaedics and related research*, 83, 279-285.
- JINDAL, M., LAKHWANI, O., KAPOOR, S., CHANDOK, R., KAUR, O., ARORA, B. & GARG, K. 2017. Correlation between bone histomorphometry and bone strength. *Tropical Journal of Medical Research*, 20, 25.
- JOWSEY, J. 1960. Age changes in human bone. *Clinical Orthopaedics and Related Research*®, 17, 210-218.
- JOWSEY, J. 1966. Studies of Haversian systems in man and some animals. *Journal of Anatomy*, 100, 857.
- KATZENBERG, M. A. & GRAUER, A. L. 2018. *Biological anthropology of the human skeleton*, John Wiley & Sons.
- KEOUGH, N. 2007. *Estimation of age at death from the microscopic structure of the femur*. University of Pretoria.
- KEOUGH, N., L'ABBÉ, E. & STEYN, M. 2009. The evaluation of age-related histomorphometric variables in a cadaver sample of lower socioeconomic status: implications for estimating age at death. *Forensic science international*, 191, 114. e1-114. e6.
- KEOUGH, N., L'ABBÉ, E. N., STEYN, M. & PRETORIUS, S. 2015. Assessment of skeletal changes after post-mortem exposure to fire as an indicator of decomposition stage. *Forensic science international*, 246, 17-24.
- KERLEY, E. R. 1965. The microscopic determination of age in human bone. *American journal of physical anthropology*, 23, 149-163.
- KERLEY, E. R. & UBELAKER, D. H. 1978. Revisions in the microscopic method of estimating age at death in human cortical bone. *American Journal of Physical Anthropology*, 49, 545-546.
- KHAN, I., JAMIL, M. & NOR, F. 2017. Evaluation and reliability of bone histological age estimation methods. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 9, 663-680.
- KIM, S. 2015. ppcor: an R package for a fast calculation to semi-partial correlation coefficients. *Communications for statistical applications and methods*, 22, 665.
- KIM, Y. S., KIM, D. I., PARK, D. K., LEE, J. H., CHUNG, N. E., LEE, W. T. & HAN, S. H. 2007. Assessment of histomorphological features of the sternal end of the fourth rib for age estimation in Koreans. *Journal of forensic sciences*, 52, 1237-1242.
- KOLDE, R. 2019. Pheatmap: Pretty Heatmaps (version 1.0. 12).
- LAGACÉ, F., VERNA, E., ADALIAN, P., BACCINO, E. & MARTRILLE, L. 2019. Testing the accuracy of a new histomorphometric method for age-at-death estimation. *Forensic science international*, 296, 48-52.
- LANYON, L. E., GOODSHIP, A. E., PYE, C. & MACFIE, J. 1982. Mechanically adaptive bone remodelling. *Journal of biomechanics*, 15, 141-154.
- LAZENBY, R. A. 1990a. Continuing periosteal apposition I: Documentation, hypotheses, and interpretation. *American Journal of Physical Anthropology*, 82, 451-472.
- LAZENBY, R. A. 1990b. Continuing periosteal apposition II: The significance of peak bone mass, strain equilibrium, and age-related activity differentials for mechanical compensation in human tubular bones. *American Journal of Physical Anthropology*, 82, 473-484.
- LIVSHITS, G., KARASIK, D., OTREMSKI, I. & KOBLYANSKY, E. 1998. Genes play an important role in bone aging. *American Journal of Human Biology: The Official Journal of the Human Biology Association*, 10, 421-438.

- LYNNERUP, N., FROHLICH, B. & THOMSEN, J. L. 2006. Assessment of age at death by microscopy: unbiased quantification of secondary osteons in femoral cross sections. *Forensic science international*, 159, S100-S103.
- MAAT, G. J., MAES, A., AARENTS, M. & NAGELKERKE, N. J. 2006. Histological age prediction from the femur in a contemporary Dutch sample. *Journal of forensic sciences*, 51, 230-237.
- MALHAN, D., MUELKE, M., ROSCH, S., SCHAEFER, A. B., MERBOTH, F., WEISWEILER, D., HEISS, C., ARGANDA-CARRERAS, I. & EL KHASSAWNA, T. 2018. An optimized approach to perform bone histomorphometry. *Frontiers in endocrinology*, 9.
- MANOLAGAS, S. C. 2000. Birth and death of bone cells: basic regulatory mechanisms and implications for the pathogenesis and treatment of osteoporosis. *Endocrine reviews*, 21, 115-137.
- MANOLAGAS, S. C. & JILKA, R. L. 1995. Bone marrow, cytokines, and bone remodeling—emerging insights into the pathophysiology of osteoporosis. *New England journal of medicine*, 332, 305-311.
- MARQUES, M., MAMEDE, A., VASSALO, A., MAKHOUL, C., CUNHA, E., GONÇALVES, D., PARKER, S. & DE CARVALHO, L. B. 2018. Heat-induced Bone Diagenesis Probed by Vibrational Spectroscopy. *Scientific reports*, 8, 15935.
- MARTIN, R. 2000. Toward a unifying theory of bone remodeling. *Bone*, 26, 1-6.
- MARTIN, R. B., BURR, D. B., SHARKEY, N. A. & FYHRIE, D. P. 1998. *Skeletal tissue mechanics*, Springer.
- MARTINIÁKOVÁ, M., GROSSKOPF, B., OMELKA, R., DAMMERS, K., VONDRÁKOVÁ, M. & BAUEROVÁ, M. 2007. Histological study of compact bone tissue in some mammals: a method for species determination. *International Journal of Osteoarchaeology*, 17, 82-90.
- MARTINIÁKOVÁ, M., GROSSKOPF, B., VONDRÁKOVÁ, M., OMELKA, R. & FABIŠ, M. 2006. Differences in femoral compact bone tissue microscopic structure between adult cows (*Bos taurus*) and pigs (*Sus scrofa domestica*). *Anatomia, histologia, embryologia*, 35, 167-170.
- MAY, S. E. 2011. The effects of body mass on cremation weight. *Journal of forensic sciences*, 56, 3-9.
- MCKINLEY, J. 1992. The cremated human bone from burial and pyre-related contexts. *Archaeological excavations on the route of the A27 Westhampnett bypass, west Sussex*, 2, 244-245.
- MCKINLEY, J. 2000. The analysis of cremated bone. *Human osteology in archaeology and forensic science*, 403-421.
- MCKINLEY, J. I. 1989. Cremations: expectations, methodologies and realities. *Burial Archaeology: Current Research, Methods and Developments*. London: BAR British Series, 65-76.
- MCKINLEY, J. I. 1994. Bone fragment size in British cremation burials and its implications for pyre technology and ritual. *Journal of Archaeological Science*, 21, 339-342.
- MCKINLEY, J. I. & TECH, B. 2008. In the heat of the pyre: efficiency of oxidation in Romano-British cremations—did it really matter? *The analysis of burned human remains*. Elsevier.
- METZ, L. N., MARTIN, R. B. & TURNER, A. S. 2003. Histomorphometric analysis of the effects of osteocyte density on osteonal morphology and remodeling. *Bone*, 33, 753-759.
- MILLARD, S. 2013. *EnvStats: An R Package for Environmental Statistics*. Springer, New York.
- MNICH, B., SKRZAT, J. & SZOSTEK, K. 2017. Estimating age at death from an archaeological bone sample—a preliminary study based on comparison of histomorphometric methods. *Anthropological Review*, 80, 37-55.
- MOSKAL-DEL HOYO, M. 2012. The use of wood in funerary pyres: random gathering or special selection of species? Case study of three necropolises from Poland. *Journal of Archaeological Science*, 39, 3386-3395.
- MULHERN, D. M. & VAN GERVEN, D. P. 1997. Patterns of femoral bone remodeling dynamics in a medieval Nubian population. *American Journal of Physical Anthropology*, 104, 133-146.
- MÜLLER, H., B.Sc. 2017. *Intraindividuelle Variabilität der Knochenmikrostruktur am Beispiel der Oberschenkelkompakta*. Ludwig-Maximilians-Universität.
- MUSSAUER, A., B.Sc. 2017. *Belastungsabhängige Variabilität der Knochenmikrostruktur des Femur*. Ludwig-Maximilians-Universität.
- NESON, R. 1992. A microscopic comparison of fresh and burned bone. *Journal of Forensic Science*, 37, 1055-1060.

- NIGGEMEYER, J. 2013. *Katalog der mikrostrukturellen Variabilität menschlicher Kompakta*. Bachelorarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität.
- NOVACEK, J. 2012. *Möglichkeiten und Grenzen der mikroskopischen Leichenbranduntersuchung*.
- OFFELE, D., HARBECK, M., DOBBERSTEIN, R. C., VON WURMB-SCHWARK, N. & RITZ-TIMME, S. 2007. Soft tissue removal by maceration and feeding of *Dermestes* sp.: impact on morphological and biomolecular analyses of dental tissues in forensic medicine. *International journal of legal medicine*, 121, 341-348.
- ORTNER, D. J. 1975. Aging effects on osteon remodeling. *Calcified tissue research*, 18, 27-36.
- OTTO, L. & GRUPE, G. in prep. Age-related microstructure of burned bones has a hand in identifying cremations. *Münchner Archäologische Forschungen*.
- PANKOVICH, A. M., SIMMONS, D. J. & KULKARNI, V. V. 1974. Zonal osteons in cortical bone. *Clinical orthopaedics and related research*, 100, 356-363.
- PARFITT, A. 1979. Quantum concept of bone remodeling and turnover: implications for the pathogenesis of osteoporosis. Springer.
- PARFITT, A. 2002. Targeted and nontargeted bone remodeling: relationship to basic multicellular unit origination and progression. *Bone*, 30, 5-7.
- PARFITT, A. M. 1983. The physiologic and clinical significance of bone histomorphometric data. *Bone Histomorphometry : Techniques and Interpretation*, 143-223.
- PFEIFFER, S. 1998. Variability in osteon size in recent human populations. *American Journal of Physical Anthropology*, 106, 219-227.
- PFEIFFER, S. 2006. Cortical bone histology in juveniles. *Documenta archaeobiologiae*, 4, 15-28.
- PFEIFFER, S., CROWDER, C., HARRINGTON, L. & BROWN, M. 2006. Secondary osteon and Haversian canal dimensions as behavioral indicators. *American Journal of Physical Anthropology*, 131, 460-468.
- PFEIFFER, S., HEINRICH, J., BERESHEIM, A. & ALBLAS, M. 2016. Cortical bone histomorphology of known-age skeletons from the Kirsten collection, Stellenbosch university, South Africa. *American journal of physical anthropology*, 160, 137-147.
- PFEIFFER, S., LAZENBY, R. & CHIANG, J. 1995. Cortical remodeling data are affected by sampling location. *American Journal of Physical Anthropology*, 96, 89-92.
- PIEPENBRINK, H. 1989. Examples of chemical changes during fossilisation. *Applied Geochemistry*, 4, 273-280.
- PIGA, G., AMARANTE, A., MAKHOUL, C., CUNHA, E., MALGOSA, A., ENZO, S. & GONÇALVES, D. 2018. β -Tricalcium Phosphate Interferes with the Assessment of Crystallinity in Burned Skeletal Remains. *Journal of Spectroscopy*, 2018.
- QIU, S., FYHRIE, D. P., PALNITKAR, S. & RAO, D. S. 2003. Histomorphometric assessment of Haversian canal and osteocyte lacunae in different-sized osteons in human rib. *The Anatomical Record*, 272, 520-525.
- RAGUIN, E. & STREETER, M. A. 2018. Brief communication: Test of a method to identify double-zonal osteon in polarized light microscopy. *American journal of physical anthropology*, 167, 407-415.
- REBAY-SALISBURY, K. 2010. Cremations: fragmented bodies in the Bronze and Iron Ages. *Body Parts and Bodies Whole: Changing Relations and Meanings*, 64-71.
- REBAY-SALISBURY, K. 2012. Inhumation and cremation: how burial practices are linked to beliefs. *Embodied knowledge: Historical perspectives on technology and belief*, 15-26.
- RECKER, R. R., LAPPE, J. M., DAVIES, M. & KIMMEL, D. 2018. Perimenopausal bone histomorphometry before and after menopause. *Bone*, 108, 55-61.
- REIDSMA, F. H., VAN HOESEL, A., VAN OS, B. J., MEGENS, L. & BRAADBAART, F. 2016. Charred bone: Physical and chemical changes during laboratory simulated heating under reducing conditions and its relevance for the study of fire use in archaeology. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 10, 282-292.
- RICHMAN, E., ORTNER, D. & SCHULTER-ELLIS, F. 1979. Differences in intracortical bone remodeling in three aboriginal American populations: possible dietary factors. *Calcified tissue international*, 28, 209-214.

- RITZ-TIMME, S., CATTANEO, C., COLLINS, M., WAITE, E., SCHÜTZ, H., KAATSCH, H.-J. & BORRMAN, H. 2000. Age estimation: the state of the art in relation to the specific demands of forensic practise. *International journal of legal medicine*, 113, 129-136.
- ROBLING, A. G. & STOUT, S. D. 1999. Morphology of the drifting osteon. *Cells Tissues Organs*, 164, 192-204.
- ROBLING, A. G. & STOUT, S. D. 2008. Histomorphometry of human cortical bone: applications to age estimation. *Biological anthropology of the human skeleton*, 149-182.
- ROGERS, K. & DANIELS, P. 2002. An X-ray diffraction study of the effects of heat treatment on bone mineral microstructure. *Biomaterials*, 23, 2577-2585.
- RUFF, C., HOLT, B. & TRINKAUS, E. 2006. Who's afraid of the big bad Wolff?: "Wolff's law" and bone functional adaptation. *American journal of physical anthropology*, 129, 484-498.
- RUFF, C. B. 2008. Biomechanical analyses of archaeological human skeletons. *Biological anthropology of the human skeleton*, 2, 183-206.
- RUFF, C. B. & HAYES, W. C. 1982. Subperiosteal expansion and cortical remodeling of the human femur and tibia with aging. *Science*, 217, 945-948.
- RUFF, C. B. & HAYES, W. C. 1983a. Cross-sectional geometry of Pecos Pueblo femora and tibiae—A biomechanical investigation: I. Method and general patterns of variation. *American journal of physical anthropology*, 60, 359-381.
- RUFF, C. B. & HAYES, W. C. 1983b. Cross-sectional geometry of Pecos Pueblo femora and tibiae—A biomechanical investigation: II. Sex, age, and side differences. *American journal of physical anthropology*, 60, 383-400.
- RUFF, C. B. & HAYES, W. C. 1988. Sex differences in age-related remodeling of the femur and tibia. *Journal of Orthopaedic Research*, 6, 886-896.
- RUFF, C. B., SCOTT, W. W. & LIU, A. Y. C. 1991. Articular and diaphyseal remodeling of the proximal femur with changes in body mass in adults. *American Journal of Physical Anthropology*, 86, 397-413.
- SAFADI, F. F., BARBE, M. F., ABDELMAGID, S. M., RICO, M. C., ASWAD, R. A., LITVIN, J. & POPOFF, S. N. 2009. Bone structure, development and bone biology. *Bone pathology*. Springer.
- SAMSON, C. & BRANIGAN, K. 1987. A new method of estimating age at death from fragmentary and weathered bone. *Death, decay and reconstruction: approaches to archaeology and forensic science*. Manchester University Press, Manchester, 101-108.
- SCHAEFER, M., BLACK, S. M. & SCHEUER, L. 2009. *Juvenile osteology: a laboratory and field manual*, Elsevier, Academic Press.
- SCHEUER, L. & BLACK, S. 2000. *Developmental juvenile osteology*, Academic Press.
- SCHMAHL, W. W., KOCSIS, B., TONCALA, A., WYCISK, D. & GRUPE, G. 2017. The crystalline state of archaeological bone material. *Across the Alps in Prehistory*. Springer.
- SCHULTZ, J. J., WARREN, M. W. & KRIGBAUM, J. S. 2008. Analysis of human cremains: gross and chemical methods. *The analysis of burned human remains*. Elsevier.
- SCHULTZ, M. 1997. Microscopic structure of bone. *Forensic taphonomy: the postmortem fate of human remains*, 187-199.
- SCHULTZ, M. 1999. Microscopic investigation in fossil hominoidea: a clue to taxonomy, functional anatomy, and the history of diseases. *The Anatomical Record*, 257, 225-232.
- SCHULTZE, E. 1992. Zu den Grab- und Bestattungssitten in Mitteleuropa während der ersten Jahrhunderte n. Chr. *Praehistorische Zeitschrift*, 67, 201-219.
- SHIPMAN, P., FOSTER, G. & SCHOENINGER, M. 1984. Burnt bones and teeth: an experimental study of color, morphology, crystal structure and shrinkage. *Journal of archaeological science*, 11, 307-325.
- SIMMONS, E. D., PRITZKER, K. & GRYNPAS, M. D. 1991. Age-related changes in the human femoral cortex. *Journal of Orthopaedic Research*, 9, 155-167.
- SIMMONS, T., GOODBURN, B. & SINGHRAO, S. K. 2016. Decision tree analysis as a supplementary tool to enhance histomorphological differentiation when distinguishing human from non-human cranial bone in both burnt and unburnt states: A feasibility study. *Medicine, Science and the Law*, 56, 36-45.

- SINGH, I. & GUNBERG, D. 1970. Estimation of age at death in human males from quantitative histology of bone fragments. *American Journal of Physical Anthropology*, 33, 373-381.
- SKEDROS, J. G., HOLMES, J. L., VAJDA, E. G. & BLOEBAUM, R. D. 2005. Cement lines of secondary osteons in human bone are not mineral-deficient: New data in a historical perspective. *The Anatomical Record Part A: Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology: An Official Publication of the American Association of Anatomists*, 286, 781-803.
- SKEDROS, J. G., KEENAN, K. E., WILLIAMS, T. J. & KISER, C. J. 2013. Secondary osteon size and collagen/lamellar organization (“osteon morphotypes”) are not coupled, but potentially adapt independently for local strain mode or magnitude. *Journal of structural biology*, 181, 95-107.
- SMIT, T. H., BURGER, E. H. & HUYGHE, J. M. 2002. A case for strain-induced fluid flow as a regulator of BMU-coupling and osteonal alignment. *Journal of bone and mineral research*, 17, 2021-2029.
- SNOECK, C., LEE-THORP, J., SCHULTING, R., JONG, J., DEBOUGE, W. & MATTIELLI, N. 2015. Calcined bone provides a reliable substrate for strontium isotope ratios as shown by an enrichment experiment. *Rapid communications in mass spectrometry*, 29, 107-114.
- SNOECK, C., POUNCETT, J., CLAEYS, P., GODERIS, S., MATTIELLI, N., PEARSON, M. P., WILLIS, C., ZAZZO, A., LEE-THORP, J. A. & SCHULTING, R. J. 2018. Strontium isotope analysis on cremated human remains from Stonehenge support links with west Wales. *Scientific reports*, 8, 10790.
- SNOECK, C., POUNCETT, J., RAMSEY, G., MEIGHAN, I. G., MATTIELLI, N., GODERIS, S., LEE-THORP, J. A. & SCHULTING, R. J. 2016. Mobility during the Neolithic and Bronze Age in Northern Ireland explored using strontium isotope analysis of cremated human bone. *American journal of physical anthropology*, 160, 397-413.
- STINER, M. C., KUHN, S. L., WEINER, S. & BAR-YOSEF, O. 1995. Differential burning, recrystallization, and fragmentation of archaeological bone. *Journal of Archaeological Science*, 22, 223-237.
- STOUT, S. D. & CROWDER, C. 2012. Bone remodeling, histomorphology, and histomorphometry. *Bone Histology—An Anthropological Perspective*, 1-21.
- STOUT, S. D. & LUECK, R. 1995. Bone remodeling rates and skeletal maturation in three archaeological skeletal populations. *American Journal of Physical Anthropology*, 98, 161-171.
- STOUT, S. D. & PAINE, R. R. 1994. Bone remodeling rates: a test of an algorithm for estimating missing osteons. *American journal of physical anthropology*, 93, 123-129.
- STOUT, S. D. & TEITELBAUM, S. 1976. Histomorphometric determination of formation rates of archaeological bone. *Calcified tissue research*, 21, 163-169.
- STREETER, M., STOUT, S., TRINKAUS, E. & BURR, D. 2010. Brief communication: Bone remodeling rates in Pleistocene humans are not slower than the rates observed in modern populations: A reexamination of Abbott et al.(1996). *American journal of physical anthropology*, 141, 315-318.
- SUTHERLAND, A., MYBURGH, J., STEYN, M. & BECKER, P. J. 2013. The effect of body size on the rate of decomposition in a temperate region of South Africa. *Forensic Science International*, 231, 257-262.
- SYMES, S. A., RAINWATER, C. W., CHAPMAN, E. N., GIPSON, D. R. & PIPER, A. L. 2008. Patterned thermal destruction of human remains in a forensic setting. *The analysis of burned human remains*. Elsevier.
- TAPPEN, N. 1977. Three-dimensional studies of resorption spaces and developing osteons. *American Journal of Anatomy*, 149, 301-331.
- TEITELBAUM, S. L. 2000. Bone resorption by osteoclasts. *Science*, 289, 1504-1508.
- THOMPSON, D. 1979. The core technique in the determination of age at death in skeletons. *Journal of Forensic Science*, 24, 902-915.
- THOMPSON, D. & GALVIN, C. 1983. Estimation of age at death by tibial osteon remodeling in an autopsy series. *Forensic science international*, 22, 203-211.
- THOMPSON, D. D. 1978. Age-related changes in osteon remodeling and bone mineralization. *Doctoral dissertation, University of Connecticut*.
- THOMPSON, T. J. U. 2005. Heat-induced dimensional changes in bone and their consequences for forensic anthropology. *Journal of Forensic Science*, 50, JFS2004297-8.

- TURBAN-JUST, S. & GRUPE, G. 1995. Post-mortem-Rekonstruktion von Stoffwechselraten mittels Histomorphometrie bodengelagerter menschlicher Knochenkompakta. *Anthropologischer Anzeiger*, 1-25.
- TURNER, C. 1999. Toward a mathematical description of bone biology: the principle of cellular accommodation. *Calcified Tissue International*, 65, 466-471.
- TURNER-WALKER, G. 2008. The chemical and microbial degradation of bones and teeth. *Advances in human palaeopathology*, 592.
- UYTTERSCHAUT, H. 1985. Determination of skeletal age by histological methods. *Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie*, 331-340.
- VAN VARK, G. 1970. Some statistical procedures for the investigation of prehistoric skeletal material. *Unpublished Thesis. Groningen*.
- VASS, A. A. 2001. Beyond the grave-understanding human decomposition. *Microbiology today*, 28, 190-193.
- WACHTER, N., KRISCHAK, G., MENTZEL, M., SARKAR, M., EBINGER, T., KINZL, L., CLAES, L. & AUGAT, P. 2002. Correlation of bone mineral density with strength and microstructural parameters of cortical bone in vitro. *Bone*, 31, 90-95.
- WAHL, J. 1981. Beobachtungen zur Verbrennung menschlicher Leichname. Über die Vergleichbarkeit moderner Kremationen mit prähistorischen Leichenbränden. (Considérations sur l'incinération de cadavres humains. Etude comparative de crémations modernes aux incinérations préhistoriques). *Archäologisches Korrespondenzblatt Mainz*, 11, 271-279.
- WAHL, J. 1982. Leichenbranduntersuchungen. Ein Überblick über die Bearbeitungs- und Aussagemöglichkeiten von Brandgräbern. *Prähistorische Zeitschrift*, 57, 1-125.
- WAHL, J. 2001. Bemerkungen zur kritischen Beurteilung von Brandknochen. *Beiträge zur Archäozoologie und Prähistorischen Anthropologie*, 3, 157-167.
- WAHL, J. 2008. Investigations on pre-Roman and Roman cremation remains from southwestern Germany: results, potentialities and limits. *The Analysis of Burned Human Remains*. Elsevier.
- WALKER, P. L., MILLER, K. W. & RICHMAN, R. 2008. Time, temperature, and oxygen availability: an experimental study of the effects of environmental conditions on the color and organic content of cremated bone. *The analysis of burned human remains*. Elsevier.
- WALKER, R. A., LOVEJOY, C. O. & MEINDL, R. S. 1994. Histomorphological and geometric properties of human femoral cortex in individuals over 50: implications for histomorphological determination of age-at-death. *American journal of human biology*, 6, 659-667.
- WATANABE, Y., KONISHI, M., SHIMADA, M., OHARA, H. & IWAMOTO, S. 1998. Estimation of age from the femur of Japanese cadavers. *Forensic science international*, 98, 55-65.
- WEI, T. & SIMKO, V. 2017. R package "corrplot": Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.84). URL <https://github.com/taiyun/corrplot>.
- WEI, T., SIMKO, V., LEVY, M., XIE, Y., JIN, Y. & ZEMLA, J. 2017. Package 'corrplot'. *Statistician*, 56, 316-324.
- WEINER, S. 2010. *Microarchaeology: beyond the visible archaeological record*, Cambridge University Press.
- WEINER, S., TRAUB, W. & WAGNER, H. D. 1999. Lamellar bone: structure–function relations. *Journal of structural biology*, 126, 241-255.
- WELLS, C. 1960. A study of cremation. *Antiquity*, 34, 29-37.
- WHITE, T. D. & FOLKENS, P. A. 2005. *The human bone manual*, Elsevier.
- WICKHAM, H. 2007. Reshaping data with the reshape package. *Journal of statistical software*, 21, 1-20.
- WICKHAM, H. 2016. *ggplot2: elegant graphics for data analysis*, Springer, New York.
- WICKHAM, H., FRANCOIS, R. & HENRY, L. 2018. Müller, K. dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 0.7. 6.
- WICKHAM, H. & WICKHAM, M. H. 2017. Package tidyverse. *Easily Install and Load the 'Tidyverse*.
- WMA 2008. World Medical Association - Declaration of Helsinki: ethical principles for medical research involving human subjects. <http://www.wma.net/e/policy/b3.htm>.

- WOLF, M. 1999. *Ergebnisse makro-und mikroskopischer Untersuchungen an den römischen Brandgräbern von Rheinzabern (Rheinland-Pfalz)*, Cuvillier.
- WOLF, M., STREIT, B. & SCHULTZ, M. 2017. Determining Human Age at Death Using Cremated Bone Microstructure. *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research*, 1, 785-791.
- WOLFF, J. 1892. Das gesetz der transformation der knochen. *A Hirshwald*, 1, 1-152.
- WU, K., SCHUBECK, K., FROST, H. & VILLANUEVA, A. 1970. Haversian bone formation rates determined by a new method in a mastodon, and in human diabetes mellitus and osteoporosis. *Calcified Tissue Research*, 6, 204-219.
- YENI, Y., BROWN, C., WANG, Z. & NORMAN, T. 1997. The influence of bone morphology on fracture toughness of the human femur and tibia. *Bone*, 21, 453-459.
- YOSHINO, M., IMAIZUMI, K., MIYASAKA, S. & SETA, S. 1994. Histological estimation of age at death using microradiographs of humeral compact bone. *Forensic science international*, 64, 191-198.

7.) Anhang

7.1) Abbildungen

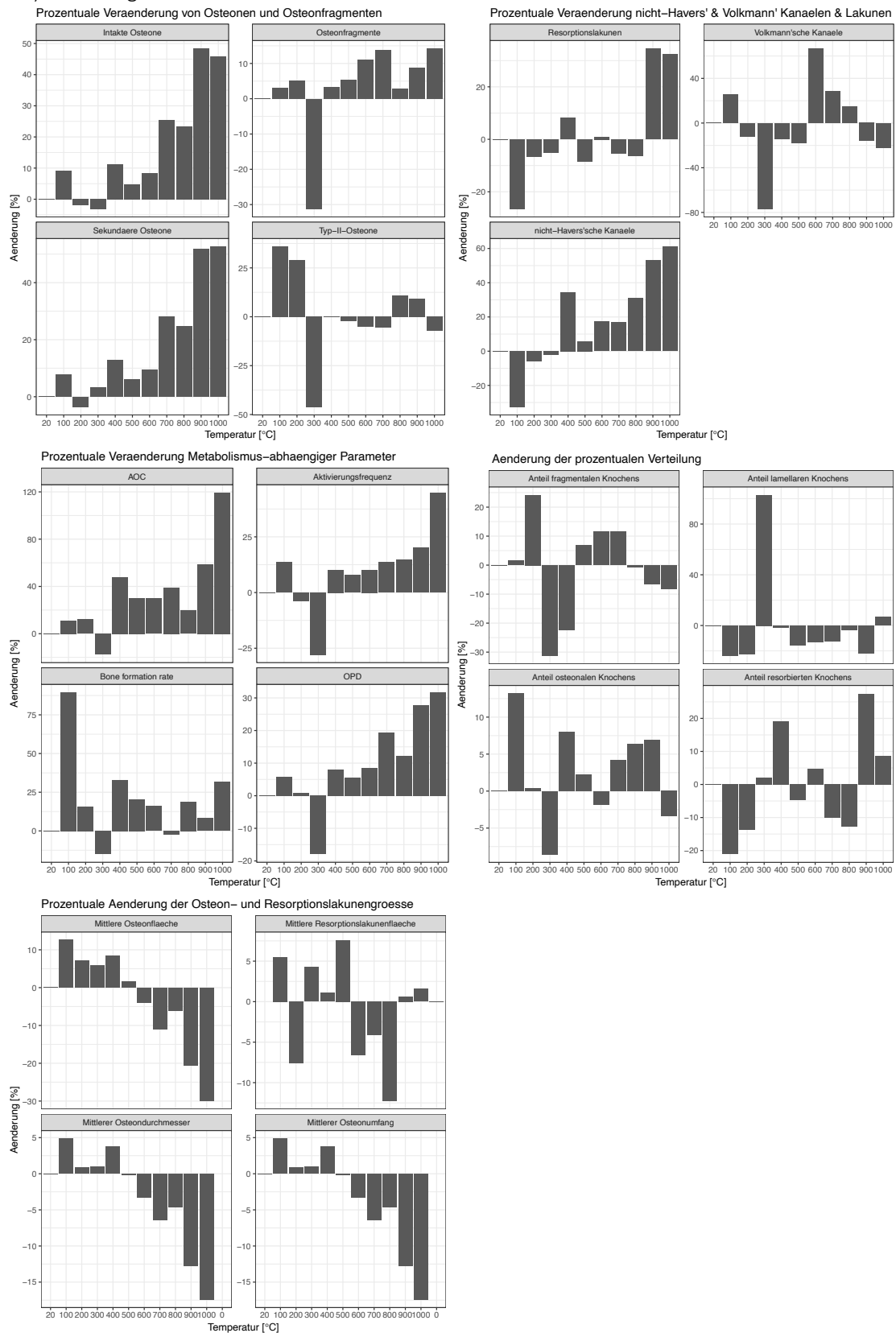


Abbildung 1: prozentuale Abweichung zwischen den verbrannten und unverbrannten Proben des Femurprobenkollektivs am periostalen Rand der Knochenkompakta über die Verbrennungstemperaturen (20-1000°C) hinweg;

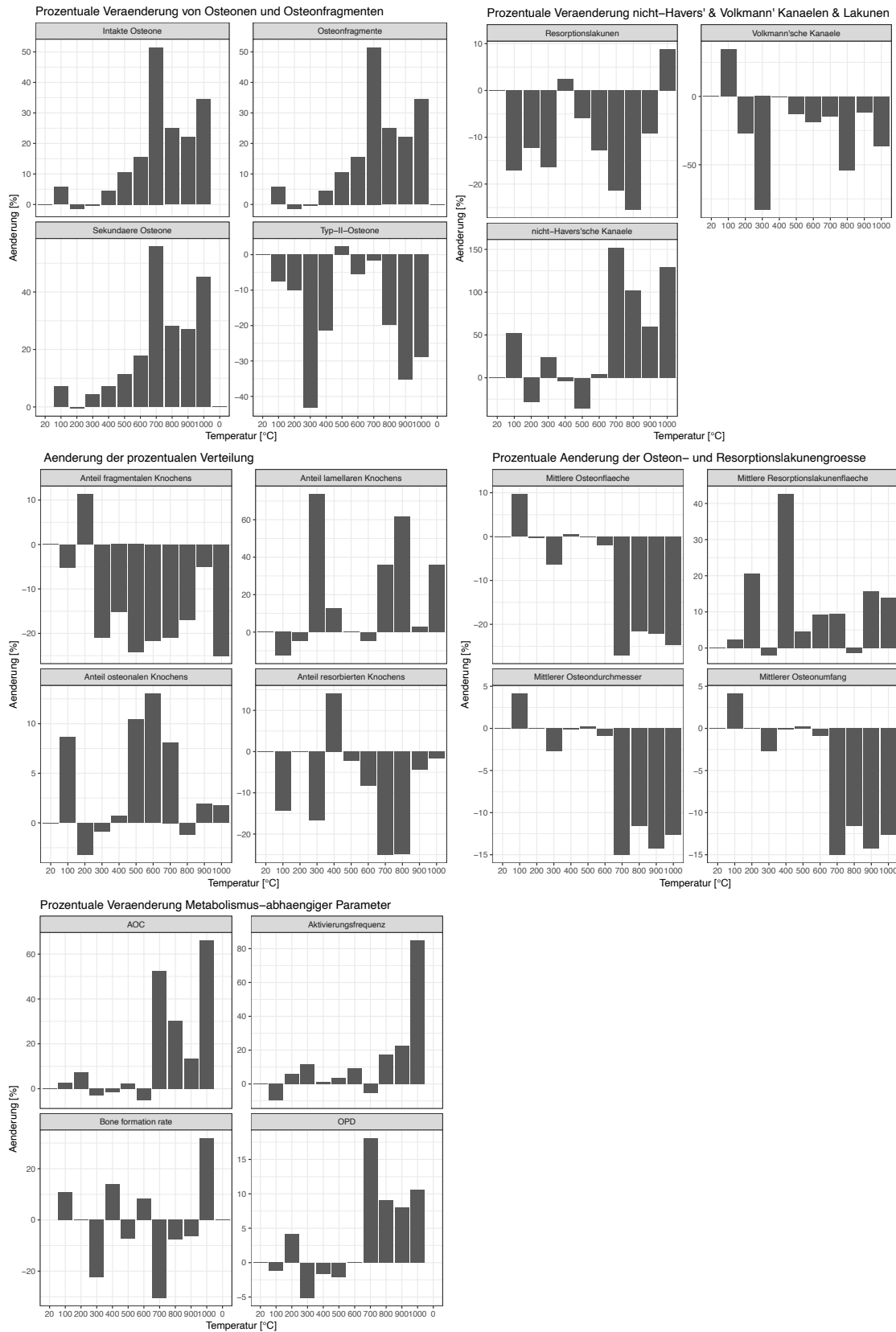


Abbildung 2: prozentuale Abweichung zwischen den verbrannten und unverbrannten Proben des Femurprobenkollektivs am periostalen Rand der Knochenkompakta über die Verbrennungstemperaturen (20-1000°C) hinweg;

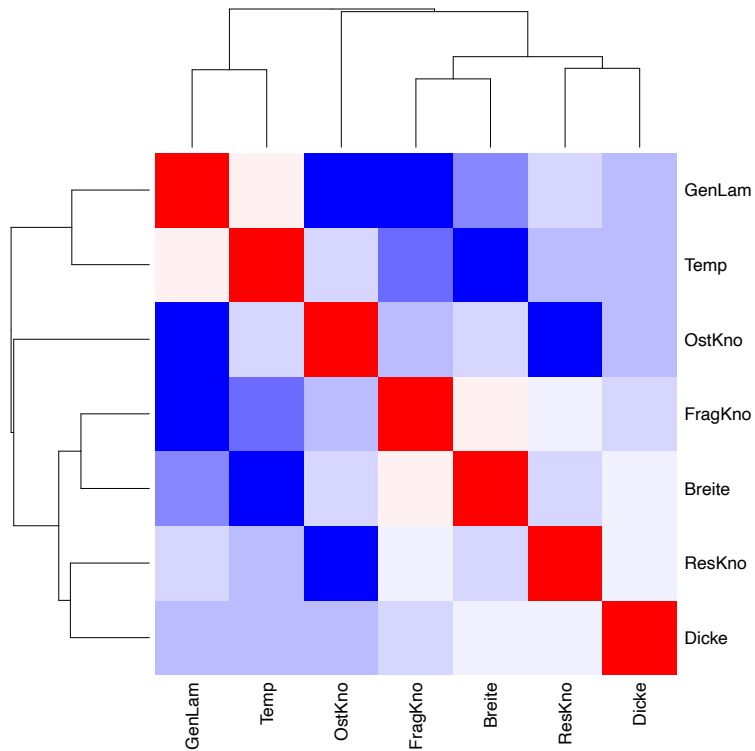


Abbildung 3: Korrelation der Schrumpfung in Breite und Dicke mit den prozentualen Anteilen der Knochenmikrostruktur (Generallamellen, osteonaler Knochen, fragmentaler Knochen und resorbierter Knochen) und der Temperatur im periostalen Bereich der Femurkompakta; die Farbgebung der Quadrate reflektiert den Wert des Korrelationskoeffizienten (r); dunkelblau: stark negative Korrelation ($r=-1$), rot: stark positive Korrelation ($r=+1$), weiß: keine Korrelation ($r=0$);

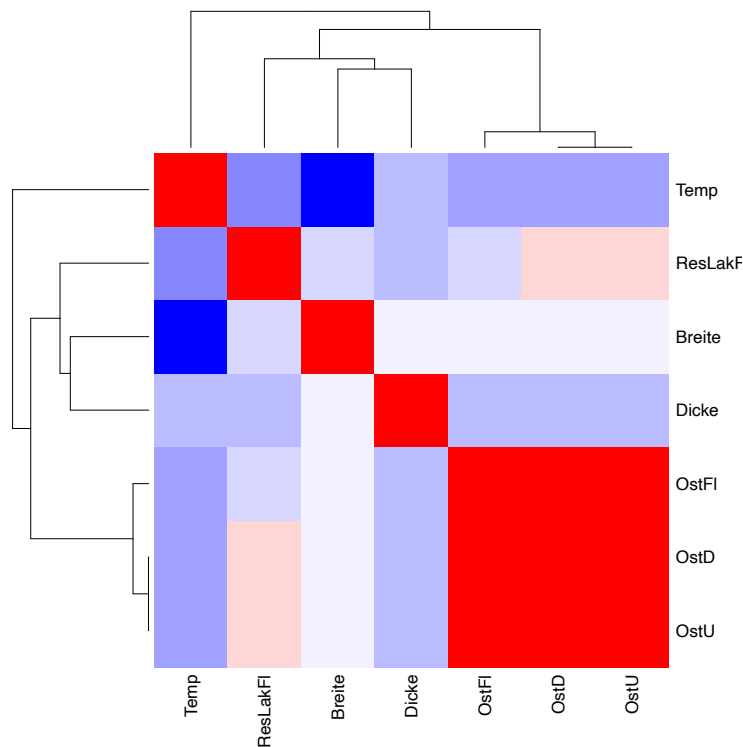


Abbildung 4: Korrelation der Schrumpfung in Breite und Dicke mit der Osteogeometrie (Osteonfläche (OstFI), Osteondurchmesser (OstD) und Osteonumfang (OstU)), der Resorptionslakunenfläche (ResLakF) und der Temperatur im periostalen Bereich der Femurkompakta; die Farbgebung der Quadrate reflektiert den Wert des Korrelationskoeffizienten (r), dunkelblau: stark negative Korrelation ($r=-1$), rot: stark positive Korrelation ($r=+1$), weiß: keine Korrelation ($r=0$);

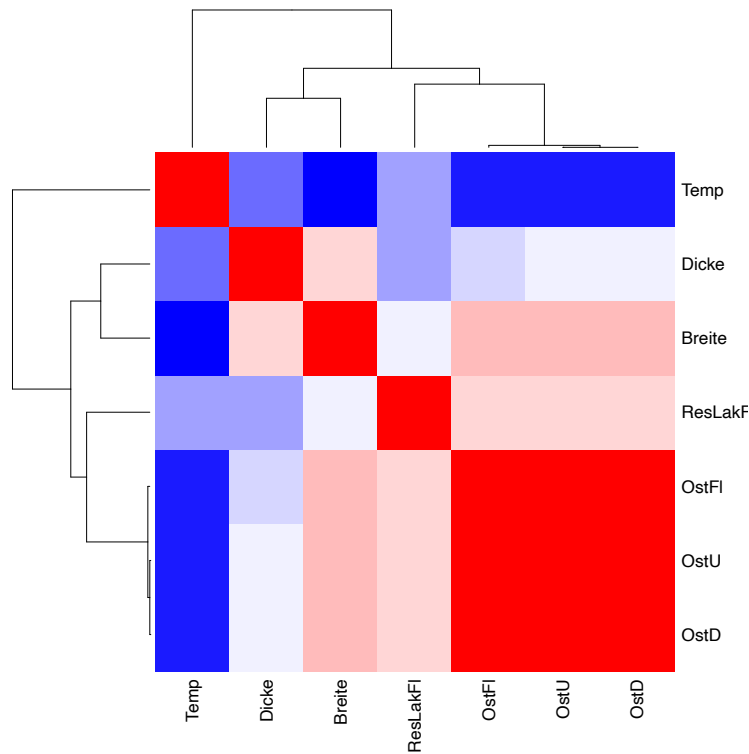


Abbildung 5: Korrelation der Osteogeometrie (Osteonfläche (OstFI), Osteonumfang (OstU), Osteondurchmesser (OstD), der Resorptionslakunenfläche (ResLakFI) und der Temperatur mit der Schrumpfung in Breite und Dicke im mittigen Bereich der Femurkompakta; die Farbgebung der Quadrate reflektiert den Wert des Korrelationskoeffizienten (r), dunkelblau: stark negative Korrelation ($\rho=-1$), rot: stark positive Korrelation ($\rho=+1$), weiß: keine Korrelation ($\rho=0$);

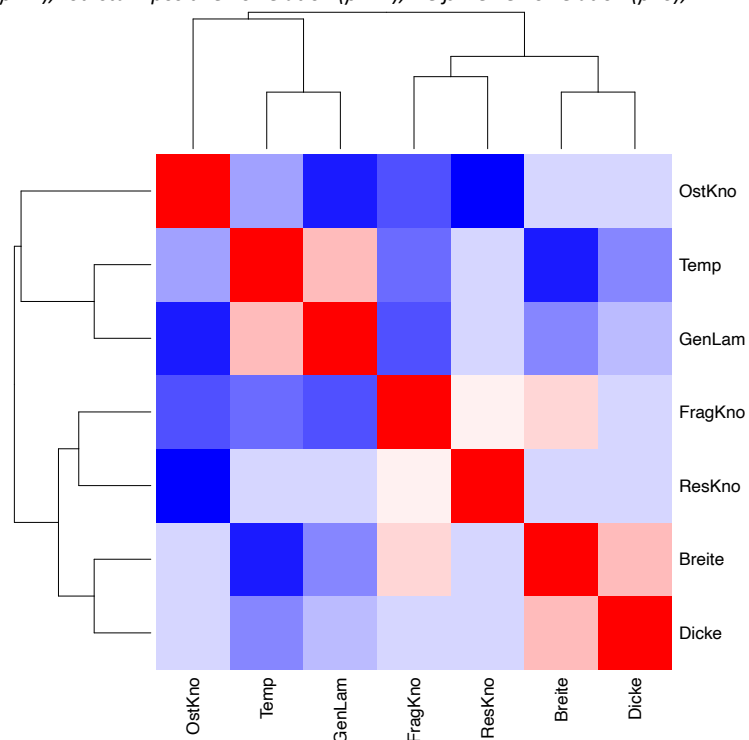


Abbildung 6: Korrelation der Schrumpfung in Breite und Dicke mit den prozentualen Anteilen der Knochenmikrostruktur (Generallamellen, osteonaler Knochen, fragmentaler Knochen und resorbierter Knochen) und der Temperatur im mittigen Bereich der Femurkompakta; die Farbgebung der Quadrate reflektiert den Wert des Korrelationskoeffizienten (r), dunkelblau: stark negative Korrelation ($\rho=-1$), rot: stark positive Korrelation ($\rho=+1$), weiß: keine Korrelation ($\rho=0$);

7.2) Tabellen

Tabelle 1: Auflistung der Proben, an denen keine histologische Untersuchung durchgeführt werden konnte;

Femur	Temperatur [°C]	Begründung	Tibia	Temperatur [°C]	Begründung
WF4(11)unv_periostal_1	RT	Kompakta zu dünn	WF12_950°C_periostal_1	950	Kompakta zu dünn
WF4(11)unv_periostal_2	RT	Kompakta zu dünn	WF12_950°C_periostal_2	950	Kompakta zu dünn
WF4(11)unv_periostal_3	RT	Kompakta zu dünn	WF12_950°C_periostal_3	950	Kompakta zu dünn
WF37(4)300°C_periostal_3	300	Sichtbarkeit	WF21a_950°C_periostal_3	950	Kompakta zu dünn
WF4(4)300°C_periostal_2	300	Sichtbarkeit	WF22(2)100°C_mittig_3	100	Sichtbarkeit
WF4(4)300°C_periostal_3	300	Sichtbarkeit	WF22(3)200°C_mittig_3	200	Sichtbarkeit
FS03-16 950°C periostal 1	950	Kompakta zu dünn	WF22(4)300°C_mittig_1	300	Sichtbarkeit
FS03-16 950°C periostal 2	950	Kompakta zu dünn	WF22(4)300°C_mittig_2	300	Sichtbarkeit
FS03-16 950°C periostal 3	950	Kompakta zu dünn	WF22(4)300°C_mittig_3	300	Sichtbarkeit
WF19(11)1000°C_periostal_3	1000	Kompakta zu dünn	WF22(9)800°C_mittig_2	800	Kompakta zu dünn
WF20b_950°C_periostal_3	950	Kompakta zu dünn	WF22(9)800°C_mittig_3	800	Kompakta zu dünn
WF4(11)1000°C_periostal_1	1000	Kompakta zu dünn	WF18(10)900°C_mittig_1	900	Kompakta zu dünn
WF4(11)1000°C_periostal_2	1000	Kompakta zu dünn	WF18(10)900°C_mittig_2	900	Kompakta zu dünn
WF4(11)1000°C_periostal_3	1000	Kompakta zu dünn	WF18(10)900°C_mittig_3	900	Kompakta zu dünn
WF40a_950°C_periostal_3	950	Kompakta zu dünn	WF22(10)900°C_mittig_2	900	Kompakta zu dünn
WF37(2)100°C_mittig_1	100	Sichtbarkeit	WF22(10)900°C_mittig_3	900	Kompakta zu dünn
WF37(2)100°C_mittig_2	100	Sichtbarkeit	WF1_950°C_mittig_1	950	Kompakta zu dünn
WF37(2)100°C_mittig_3	100	Sichtbarkeit	WF1_950°C_mittig_2	950	Kompakta zu dünn
WF2(2)100°C_mittig_1	100	Sichtbarkeit	WF1_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn
WF2(2)100°C_mittig_2	100	Sichtbarkeit	WF39b_950°C_mittig_1	950	Kompakta zu dünn
WF2(2)100°C_mittig_3	100	Sichtbarkeit	WF39b_950°C_mittig_2	950	Kompakta zu dünn
WF4(4)300°C_periostal_2	300	Sichtbarkeit	WF39b_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn
WF4(4)300°C_periostal_3	300	Sichtbarkeit	WF18(11)1000°C_mittig_1	1000	Kompakta zu dünn
WF38(4)300°C_mittig_3	300	Sichtbarkeit	WF18(11)1000°C_mittig_2	1000	Kompakta zu dünn
WF19(4)300°C_mittig_1	300	Sichtbarkeit	WF18(11)1000°C_mittig_3	1000	Kompakta zu dünn
WF19(4)300°C_mittig_2	300	Sichtbarkeit	WF22(11)1000°C_mittig_1	1000	Kompakta zu dünn
WF19(4)300°C_mittig_3	300	Sichtbarkeit	WF22(11)1000°C_mittig_2	1000	Kompakta zu dünn
WF26(4)300°C_mittig_1	300	Sichtbarkeit	WF22(11)1000°C_mittig_3	1000	Kompakta zu dünn
WF26(4)300°C_mittig_2	300	Sichtbarkeit	WF33(11)1000°C_mittig_3	1000	Kompakta zu dünn
WF26(4)300°C_mittig_3	300	Sichtbarkeit	WF18(11)unv_mittig_1	RT	Kompakta zu dünn
WF2(4)300°C_mittig_3	300	Sichtbarkeit	WF18(11)unv_mittig_2	RT	Kompakta zu dünn
WF2(5)400°C_mittig_2	400	Sichtbarkeit	WF18(11)unv_mittig_3	RT	Kompakta zu dünn
WF2(5)400°C_mittig_3	400	Sichtbarkeit	WF22(11)unv_mittig_1	RT	Kompakta zu dünn

Femur	Temperatur [°C]	Begründung	Tibia	Temperatur [°C]	Begründung
WF26(7)600°C_mittig_1	600	Sichtbarkeit	WF22(11)unv_mittig_2	RT	Kompakta zu dünn
WF26(7)600°C_mittig_2	600	Sichtbarkeit	WF22(11)unv_mittig_3	RT	Kompakta zu dünn
WF26(7)600°C_mittig_3	600	Sichtbarkeit	WF33(11)unv_mittig_3	RT	Kompakta zu dünn
WF37(8)700°C_mittig_1	700	Kompakta zu dünn			
WF37(8)700°C_mittig_2	700	Kompakta zu dünn			
WF37(8)700°C_mittig_3	700	Kompakta zu dünn			
WF29b(8)700°C_mittig_1	700	Kompakta zu dünn			
WF29b(8)700°C_mittig_2	700	Kompakta zu dünn			
WF29b(8)700°C_mittig_3	700	Kompakta zu dünn			
WF37(9)800°C_mittig_1	800	Kompakta zu dünn			
WF37(9)800°C_mittig_2	800	Kompakta zu dünn			
WF37(9)800°C_mittig_3	800	Kompakta zu dünn			
WF26(9)800°C_mittig_3	800	Kompakta zu dünn			
WF2(9)800°C_mittig_1	800	Kompakta zu dünn			
WF2(9)800°C_mittig_2	800	Kompakta zu dünn			
WF2(9)800°C_mittig_3	800	Kompakta zu dünn			
WF29a(9)800°C_mittig_1	800	Kompakta zu dünn			
WF29a(9)800°C_mittig_2	800	Kompakta zu dünn			
WF29a(9)800°C_mittig_3	800	Kompakta zu dünn			
WF29b(9)800°C_mittig_1	800	Kompakta zu dünn			
WF29b(9)800°C_mittig_2	800	Kompakta zu dünn			
WF29b(9)800°C_mittig_3	800	Kompakta zu dünn			
WF37(10)900°C_mittig_1	900	Kompakta zu dünn			
WF37(10)900°C_mittig_2	900	Kompakta zu dünn			
WF37(10)900°C_mittig_3	900	Kompakta zu dünn			
WF19(10)900°C_mittig_1	900	Kompakta zu dünn			
WF19(10)900°C_mittig_2	900	Kompakta zu dünn			
WF19(10)900°C_mittig_3	900	Kompakta zu dünn			
WF28(10)900°C_mittig_3	900	Kompakta zu dünn			
WF26(10)900°C_mittig_1	900	Kompakta zu dünn			
WF26(10)900°C_mittig_2	900	Kompakta zu dünn			
WF26(10)900°C_mittig_3	900	Kompakta zu dünn			
WF9(10)900°C_mittig_1	900	Kompakta zu dünn			
WF9(10)900°C_mittig_2	900	Kompakta zu dünn			

Femur	Temperatur [°C]	Begründung	Tibia	Temperatur [°C]	Begründung
WF9(10)900°C_mittig_3	900	Kompakta zu dünn			
WF2(10)900°C_mittig_2	900	Kompakta zu dünn			
WF2(10)900°C_mittig_3	900	Kompakta zu dünn			
WF15(10)900°C_mittig_3	900	Kompakta zu dünn			
WF29a(10)900°C_mittig_1	900	Kompakta zu dünn			
WF29a(10)900°C_mittig_2	900	Kompakta zu dünn			
WF29a(10)900°C_mittig_3	900	Kompakta zu dünn			
WF29b(10)900°C_mittig_1	900	Kompakta zu dünn			
WF29b(10)900°C_mittig_2	900	Kompakta zu dünn			
WF29b(10)900°C_mittig_3	900	Kompakta zu dünn			
WF4(10)900°C_mittig_1	900	Kompakta zu dünn			
WF4(10)900°C_mittig_2	900	Kompakta zu dünn			
WF4(10)900°C_mittig_3	900	Kompakta zu dünn			
WF5_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn			
WF47_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn			
WF3_950°C_mittig_1	950	Kompakta zu dünn			
WF3_950°C_mittig_2	950	Kompakta zu dünn			
WF3_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn			
WF21b_950°C_mittig_1	950	Kompakta zu dünn			
WF21b_950°C_mittig_2	950	Kompakta zu dünn			
WF21b_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn			
WF30_950°C_mittig_1	950	Kompakta zu dünn			
WF30_950°C_mittig_2	950	Kompakta zu dünn			
WF30_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn			
WF32_950°C_mittig_1	950	Kompakta zu dünn			
WF32_950°C_mittig_2	950	Kompakta zu dünn			
WF32_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn			
WF35_950°C_mittig_1	950	Kompakta zu dünn			
WF35_950°C_mittig_2	950	Kompakta zu dünn			
WF35_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn			
WF36_950°C_mittig_1	950	Kompakta zu dünn			
WF36_950°C_mittig_2	950	Kompakta zu dünn			
WF36_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn			
WF40a_950°C_mittig_1	950	Kompakta zu dünn			

Femur	Temperatur [°C]	Begründung	Tibia	Temperatur [°C]	Begründung
WF40a_950°C_mittig_2	950	Kompakta zu dünn			
WF40a_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn			
WF40b_950°C_mittig_1	950	Kompakta zu dünn			
WF40b_950°C_mittig_2	950	Kompakta zu dünn			
WF40b_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn			
WF41_950°C_mittig_1	950	Kompakta zu dünn			
WF41_950°C_mittig_2	950	Kompakta zu dünn			
WF41_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn			
WF42b_950°C_mittig_1	950	Kompakta zu dünn			
WF42b_950°C_mittig_2	950	Kompakta zu dünn			
WF42b_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn			
WF46_950°C_mittig_1	950	Kompakta zu dünn			
WF46_950°C_mittig_2	950	Kompakta zu dünn			
WF46_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn			
WF49b_950°C_mittig_1	950	Kompakta zu dünn			
WF49b_950°C_mittig_2	950	Kompakta zu dünn			
WF49b_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn			
WF20a_950°C_mittig_1	950	Kompakta zu dünn			
WF20a_950°C_mittig_2	950	Kompakta zu dünn			
WF20a_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn			
WF20b_950°C_mittig_1	950	Kompakta zu dünn			
WF20b_950°C_mittig_2	950	Kompakta zu dünn			
WF20b_950°C_mittig_3	950	Kompakta zu dünn			
FS03-16 950°C mittig 1	950	Kompakta zu dünn			
FS03-16 950°C mittig 2	950	Kompakta zu dünn			
FS03-16 950°C mittig 3	950	Kompakta zu dünn			
WF37(11)1000°C_mittig_1	1000	Kompakta zu dünn			
WF37(11)1000°C_mittig_2	1000	Kompakta zu dünn			
WF37(11)1000°C_mittig_3	1000	Kompakta zu dünn			
WF19(11)1000°C_mittig_1	1000	Kompakta zu dünn			
WF19(11)1000°C_mittig_2	1000	Kompakta zu dünn			
WF19(11)1000°C_mittig_3	1000	Kompakta zu dünn			
WF28(11)1000°C_mittig_1	1000	Kompakta zu dünn			
WF28(11)1000°C_mittig_2	1000	Kompakta zu dünn			

Femur	Temperatur [°C]	Begründung	Tibia	Temperatur [°C]	Begründung
WF28(11)1000°C_mittig_3	1000	Kompakta zu dünn			
WF26(11)1000°C_mittig_1	1000	Kompakta zu dünn			
WF26(11)1000°C_mittig_2	1000	Kompakta zu dünn			
WF26(11)1000°C_mittig_3	1000	Kompakta zu dünn			
WF9(11)1000°C_mittig_1	1000	schlechte Qualität			
WF9(11)1000°C_mittig_2	1000	schlechte Qualität			
WF9(11)1000°C_mittig_3	1000	schlechte Qualität			
WF2(11)1000°C_mittig_1	1000	Kompakta zu dünn			
WF2(11)1000°C_mittig_2	1000	Kompakta zu dünn			
WF2(11)1000°C_mittig_3	1000	Kompakta zu dünn			
WF15(11)1000°C_mittig_3	1000	Kompakta zu dünn			
WF29a(11)1000°C_mittig_1	1000	Kompakta zu dünn			
WF29a(11)1000°C_mittig_2	1000	Kompakta zu dünn			
WF29a(11)1000°C_mittig_3	1000	Kompakta zu dünn			
WF29b(11)1000°C_mittig_1	1000	Kompakta zu dünn			
WF29b(11)1000°C_mittig_2	1000	Kompakta zu dünn			
WF29b(11)1000°C_mittig_3	1000	Kompakta zu dünn			
WF4(11)1000°C_mittig_1	1000	Kompakta zu dünn			
WF4(11)1000°C_mittig_2	1000	Kompakta zu dünn			
WF4(11)1000°C_mittig_3	1000	Kompakta zu dünn			
WF26(5)unv_mittig_3	RT	Schlechte Qualität			
WF37(9)unv_mittig_1	RT	Kompakta zu dünn			
WF37(9)unv_mittig_2	RT	Kompakta zu dünn			
WF37(9)unv_mittig_3	RT	Kompakta zu dünn			
WF2(9)unv_mittig_1	RT	Kompakta zu dünn			
WF2(9)unv_mittig_2	RT	Kompakta zu dünn			
WF2(9)unv_mittig_3	RT	Kompakta zu dünn			
WF37(10)unv_mittig_1	RT	Kompakta zu dünn			
WF37(10)unv_mittig_2	RT	Kompakta zu dünn			
WF37(10)unv_mittig_3	RT	Kompakta zu dünn			
WF19(10)unv_mittig_1	RT	Kompakta zu dünn			
WF19(10)unv_mittig_2	RT	Kompakta zu dünn			
WF19(10)unv_mittig_3	RT	Kompakta zu dünn			
WF28(10)unv_mittig_1	RT	Kompakta zu dünn			

Femur	Temperatur [°C]	Begründung	Tibia	Temperatur [°C]	Begründung
WF28(10)unv_mittig_2	RT	Kompakta zu dünn			
WF28(10)unv_mittig_3	RT	Kompakta zu dünn			
WF29b(10)unv_mittig_1	RT	Kompakta zu dünn			
WF29b(10)unv_mittig_2	RT	Kompakta zu dünn			
WF29b(10)unv_mittig_3	RT	Kompakta zu dünn			
WF37(11)unv_mittig_1	RT	Kompakta zu dünn			
WF37(11)unv_mittig_2	RT	Kompakta zu dünn			
WF37(11)unv_mittig_3	RT	Kompakta zu dünn			
WF19(11)unv_mittig_1	RT	Kompakta zu dünn			
WF19(11)unv_mittig_2	RT	Kompakta zu dünn			
WF19(11)unv_mittig_3	RT	Kompakta zu dünn			
WF28(11)unv_mittig_1	RT	Kompakta zu dünn			
WF28(11)unv_mittig_2	RT	Kompakta zu dünn			
WF28(11)unv_mittig_3	RT	Kompakta zu dünn			
WF29a(11)unv_mittig_1	RT	Kompakta zu dünn			
WF29a(11)unv_mittig_2	RT	Kompakta zu dünn			
WF29a(11)unv_mittig_3	RT	Kompakta zu dünn			
WF39a(11)unv_mittig_1	RT	Kompakta zu dünn			
WF39a(11)unv_mittig_2	RT	Kompakta zu dünn			
WF39a(11)unv_mittig_3	RT	Kompakta zu dünn			
WF29b(11)unv_mittig_1	RT	Kompakta zu dünn			
WF29b(11)unv_mittig_2	RT	Kompakta zu dünn			
WF29b(11)unv_mittig_3	RT	Kompakta zu dünn			
WF4(11)unv_mittig_1	RT	Kompakta zu dünn			
WF4(11)unv_mittig_2	RT	Kompakta zu dünn			
WF4(11)unv_mittig_3	RT	Kompakta zu dünn			
WF32_unv_mittig_3	RT	Kompakta zu dünn			

Tabelle 2: Einzelwerte der prozentualen Höhen-, Breiten- und Dickenschumpfung samt Schumpfungparameter der Femurproben;

Probe	Temperatur	Höhen-schumpfung [%]	Breiten-schumpfung [%]	Dicken-schumpfung [%]	Schumpungs-parameter	Probe	Gewichts-verlust [g]
WF37	100	-5,88	-5,26	-33,33	0,02	WF34	0,13
WF19	100	-6,67	-5,00	-14,29	0,01	WF45	0,21
WF28	100	0,00	0,00	-9,09	0	WF38	0,20
WF26	100	-4,55	-6,25	-14,29	0,01	WF15	0,20
WF9	100	-27,27	-12,50	-50,00	0,06	WF26	0,13

Probe	Temperatur	Höhenschrumpfung [%]	Breitenschrumpfung [%]	Dickenschrumpfung [%]	Schrumpfungsparameter	Probe	Gewichtsverlust [g]
WF2	100	0,00	-2,86	0,00	0	WF19	0,23
WF15	100	0,00	0,00	-22,22	0	WF29a	0,19
WF29a	100	-18,75	-15,79	-30,00	0,05	WF4	0,06
WF34	100	0,00	-7,14	-28,57	0,02	WF9	0,14
WF39a	100	0,00	0,00	-14,29	0	WF29b	0,16
WF29b	100	-25,93	-3,03	-12,50	0	WF28	0,21
WF38	100	-3,45	0,00	-7,69	0	WF37	0,15
WF45	100	0,00	-5,88	-12,50	0,01	WF39a	0,17
WF4	100	-16,67	28,57	50,00	0,14	WF2	0,09
WF37	200	0,00	0,00	75,00	0	WF15	0,28
WF19	200	7,69	0,00	16,67	0	WF2	0,24
WF28	200	7,14	-4,76	22,22	-0,01	WF29b	0,23
WF26	200	0,00	0,00	20,00	0	WF38	0,33
WF9	200	0,00	45,45	0,00	0	WF45	0,19
WF2	200	0,00	0,00	28,57	0	WF4	0,10
WF15	200	-7,69	0,00	28,57	0	WF34	0,28
WF29a	200	-4,55	-6,25	10,00	-0,01	WF26	0,19
WF34	200	9,09	-9,52	16,67	-0,02	WF29a	0,45
WF39a	200	0,00	0,00	28,57	0	WF28	0,39
WF29b	200	0,00	0,00	-12,50	0	WF19	0,25
WF38	200	0,00	-5,88	16,67	-0,01	WF37	0,19
WF45	200	12,50	0,00	0,00	0	WF9	0,16
WF4	200	0,00	6,25	25,00	0,02	WF39a	0,29
WF37	300	0,00	-2,63	-42,86	0,01	WF39a	0,32
WF19	300	0,00	-4,76	-28,57	0,01	WF4	0,44
WF28	300	3,13	-11,11	-30,00	0,03	WF34	0,26
WF26	300	4,17	-3,13	16,67	-0,01	WF26	0,75
WF9	300	0,00	-5,56	-25,00	0,01	WF28	0,33
WF2	300	0,00	0,00	-7,14	0	WF19	0,84
WF15	300	0,00	8,82	14,29	0,01	WF9	0,42
WF29a	300	0,00	0,00	-9,09	0	WF38	0,45
WF34	300	0,00	0,00	16,67	0	WF15	0,21
WF39a	300	0,00	0,00	0,00	0	WF2	0,69
WF29b	300	7,69	-5,56	0,00	0	WF45	0,26
WF38	300	0,00	6,25	-12,50	-0,01	WF37	0,58
WF45	300	0,00	0,00	0,00	0	WF29a	0,52
WF4	300	0,00	-5,88	25,00	-0,01	WF29b	0,28
WF37	400	-6,25	-5,56	0,00	0	WF19	0,89
WF19	400	-7,14	-4,76	-16,67	0,01	WF9	0,63
WF28	400	-3,45	-4,76	-16,67	0,01	WF28	1,21
WF26	400	-7,69	-9,09	-21,43	0,02	WF37	0,57

Probe	Temperatur	Höhenschrumpfung [%]	Breitenschrumpfung [%]	Dickenschrumpfung [%]	Schrumpungsparameter	Probe	Gewichtsverlust [g]
WF9	400	-9,09	-5,88	-12,50	0,01	WF29b	0,71
WF2	400	-8,33	-8,33	-14,29	0,01	WF4	0,30
WF15	400	-7,69	-8,11	-30,00	0,02	WF29a	1,52
WF29a	400	-2,27	-11,76	-18,18	0,02	WF38	0,97
WF34	400	-8,33	-10,00	-30,00	0,03	WF45	0,59
WF39a	400	-6,67	-5,41	-12,50	0,01	WF39a	1,04
WF29b	400	-7,14	-5,56	-14,29	0,01	WF26	0,56
WF38	400	-3,45	-5,88	-12,50	0,01	WF34	0,95
WF45	400	-9,09	-6,25	-20,00	0,01	WF15	0,74
WF4	400	-10,00	-13,33	16,67	-0,02	WF2	0,58
WF37	500	-5,88	-10,53	0,00	0	WF34	1,21
WF19	500	-7,14	-5,00	0,00	0	WF26	0,58
WF28	500	3,57	-4,76	33,33	-0,02	WF45	0,68
WF26	500	0,00	-6,25	0,00	0	WF29b	0,59
WF9	500	-5,00	0,00	-14,29	0	WF15	0,84
WF2	500	-3,85	-5,88	-16,67	0,01	WF4	0,34
WF15	500	-7,69	-5,88	0,00	0	WF39a	1,06
WF29a	500	-2,17	-8,82	0,00	0	WF38	0,99
WF34	500	3,70	-13,95	-12,50	0,02	WF2	0,72
WF39a	500	0,00	0,00	-30,00	0	WF29a	1,70
WF29b	500	-7,14	-5,56	20,00	-0,01	WF28	1,19
WF38	500	0,00	-3,13	0,00	0	WF19	0,91
WF45	500	-7,69	-6,25	-8,33	0,01	WF9	0,61
WF4	500	0,00	-5,26	33,33	-0,02	WF37	0,52
WF37	600	-6,25	-7,32	-20,00	0,01	WF29b	0,76
WF19	600	3,45	-4,76	-28,57	0,01	WF38	0,97
WF28	600	0,00	0,00	-50,00	0	WF15	0,64
WF26	600	-7,14	-6,25	-16,67	0,01	WF4	0,37
WF9	600	-4,76	-6,25	-33,33	0,02	WF26	0,59
WF2	600	0,00	-11,11	-54,55	0,06	WF45	0,50
WF15	600	0,00	-3,03	-14,29	0	WF2	0,63
WF29a	600	0,00	-2,86	-40,00	0,01	WF28	1,18
WF34	600	0,00	-9,52	-5,88	0,01	WF37	0,59
WF39a	600	0,00	-2,86	-6,67	0	WF19	0,91
WF29b	600	-3,45	-5,56	0,00	0	WF9	0,59
WF38	600	0,00	-5,88	-20,00	0,01	WF39a	0,94
WF45	600	-5,26	-5,88	-14,29	0,01	WF34	1,30
WF4	600	-4,76	-10,53	-50,00	0,05	WF29a	1,48
WF37	700	0,00	-8,11	-66,67	0,05	WF45	0,63
WF19	700	-3,45	-23,81	-75,00	0,18	WF34	1,13
WF28	700	-6,25	-10,00	-64,71	0,06	WF29b	0,65

Probe	Temperatur	Höhenschrumpfung [%]	Breitenschrumpfung [%]	Dickenschrumpfung [%]	Schrumpfungparameter	Probe	Gewichtsverlust [g]
WF26	700	-10,34	-29,41	-41,67	0,12	WF15	0,76
WF9	700	-9,09	-16,13	-40,00	0,06	WF26	0,68
WF2	700	-11,54	-23,53	-70,00	0,16	WF4	0,41
WF15	700	-7,69	-20,59	-28,57	0,06	WF38	1,01
WF29a	700	-4,55	-31,58	-33,33	0,11	WF2	0,66
WF34	700	-8,33	-8,11	-29,41	0,02	WF28	1,12
WF39a	700	-7,14	-17,65	-42,86	0,08	WF39a	0,90
WF29b	700	-3,23	-10,00	-40,00	0,04	WF29a	1,54
WF38	700	-18,75	-22,22	-38,46	0,09	WF37	0,54
WF45	700	0,00	-8,82	-28,57	0,03	WF19	0,96
WF4	700	-4,17	-35,00	-81,82	0,29	WF9	0,59
WF37	800	-13,33	-7,89	0,00	0	WF45	0,72
WF19	800	-13,33	-19,05	-20,00	0,04	WF4	0,29
WF28	800	-7,14	-13,16	-30,00	0,04	WF2	0,68
WF26	800	-7,14	-18,75	25,00	-0,05	WF29b	0,55
WF9	800	-10,00	-20,00	-25,00	0,05	WF26	0,66
WF2	800	-16,67	-22,22	-37,50	0,08	WF15	0,74
WF15	800	-15,38	-18,75	20,00	-0,04	WF38	1,06
WF29a	800	-13,64	-30,00	66,67	-0,2	WF34	1,24
WF34	800	-7,69	-21,05	-8,33	0,02	WF19	0,90
WF39a	800	-7,69	-14,71	0,00	0	WF29a	1,53
WF29b	800	-7,69	-10,53	33,33	-0,04	WF28	0,93
WF38	800	-12,50	-18,92	0,00	0	WF9	0,57
WF45	800	0,00	-9,38	20,00	-0,02	WF39a	0,87
WF4	800	0,00	-15,00	50,00	-0,08	WF37	0,39
WF37	900	-10,34	-20,00	150,00	-0,3	WF2	0,61
WF19	900	-16,13	-18,18	133,33	-0,24	WF38	0,94
WF28	900	-6,25	-20,00	37,50	-0,08	WF15	0,77
WF26	900	-10,00	-27,27	-10,00	0,03	WF29b	0,75
WF9	900	-4,55	-16,13	-15,38	0,02	WF34	0,79
WF2	900	-15,38	-23,53	66,67	-0,16	WF26	0,63
WF15	900	-3,57	-23,53	-7,14	0,02	WF4	0,37
WF29a	900	-10,00	-33,33	162,50	-0,54	WF45	0,51
WF34	900	-8,33	-9,38	60,00	-0,06	WF28	1,00
WF39a	900	-10,34	-13,16	12,50	-0,02	WF37	0,48
WF29b	900	-6,67	-10,53	83,33	-0,09	WF29a	1,45
WF38	900	-12,50	-15,79	-11,11	0,02	WF39a	0,97
WF45	900	5,56	-9,38	-8,33	0,01	WF19	0,86
WF4	900	-9,09	-9,52	150,00	-0,14	WF9	0,57
WF37	1000	-20,00	-23,81	-50,00	0,12	WF39a	1,08
WF19	1000	-16,13	-23,91	-50,00	0,12	WF19	0,62

Probe	Temperatur	Höhenschrumpfung [%]	Breitenschrumpfung [%]	Dickenschrumpfung [%]	Schrumpfungparameter	Probe	Gewichtsverlust [g]
WF28	1000	-8,82	-37,50	-20,00	0,08	WF29a	1,63
WF26	1000	-13,33	-34,21	-40,00	0,14	WF9	0,62
WF9	1000	-4,17	-32,35	-33,33	0,11	WF37	0,30
WF2	1000	-17,86	-33,33	-33,33	0,11	WF28	0,96
WF15	1000	-10,71	-34,15	-33,33	0,11	WF45	0,71
WF29a	1000	-13,64	-29,63	-33,33	0,1	WF34	1,07
WF34	1000	-20,00	-18,92	-33,33	0,06	WF26	0,78
WF39a	1000	-10,00	-17,50	-66,67	0,12	WF4	0,34
WF29b	1000	-16,67	-21,74	-50,00	0,11	WF2	0,65
WF38	1000	-14,71	-28,57	-14,29	0,04	WF38	1,03
WF45	1000	-12,00	-23,53	-25,00	0,06	WF15	0,86
WF4	1000	-9,09	0,00	-60,00	0	WF29b	0,55
WF3	1000	-9,09	-6,25	-25,00	0,02	WF36	1,91
WF5	1000	-14,58	-20,00	-31,58	0,06	WF3	1,40
WF21b	1000	-8,70	-11,11	-14,29	0,02	WF21b	1,36
WF30	1000	-8,33	-10,53	-14,29	0,02	WF40a	2,30
WF32	1000	-12,50	-15,79	0,00	0	WF30	1,68
WF35	1000	-13,04	-22,86	-41,18	0,09	WF53	1,47
WF36	1000	-7,69	-10,00	40,00	-0,04	WF40b	1,01
WF40a	1000	-10,34	-11,76	-27,27	0,03	WF46	1,46
WF40b	1000	-13,04	-5,88	-20,00	0,01	WF32	1,43
WF41	1000	-8,70	-20,00	-16,67	0,03	WF41	1,19
WF42b	1000	-11,63	-23,81	-25,00	0,06	WF49b	1,07
WF46	1000	-8,33	-6,25	0,00	0	WF13	1,55
WF47	1000	-22,50	-15,79	-25,00	0,04	WF5	1,90
WF49b	1000	-13,64	-16,67	20,00	-0,03	WF35	1,63
WF53	1000	-9,68	18,75	0,00	0	WF20b	0,80
WF20a	1000	-10,42	-25,00	-46,15	0,12	WF20a	1,59
WF20b	1000	-16,67	-23,53	-42,86	0,1	WF47	1,51
FS01-13	1000	-21,74	-11,63	-17,65	0,02	WF42b	1,44
FS01-14	1000	45,45	-5,88	-27,27	0,02	FS04-16	2,40
FS01-15	1000	-8,33	-21,95	0,00	0	FS02-16	2,45
FS01-16	1000	-4,76	-18,75	-20,00	0,04	FS01-16	1,48
FS02-14	1000	-9,09	-15,79	-28,57	0,05	FS03-16	1,29
FS02-16	1000	-15,00	-20,00	-30,00	0,06	FS01-15	1,83
FS03-16	1000	-12,50	-12,50	-14,29	0,02	FS01-13	2,27
FS04-16	1000	6,25	-21,05	-16,67	0,04	FS01-14	0,58

Tabelle 3: Maximale und minimale prozentuale Höhen-, Breiten- und Dickenschumpfung, Verlust in g und prozentualer Gewichtsverlust des Femurprobenkollektivs;

Temperatur [°C]	Max/Min	Höhe [%]	Breite [%]	Dicke [%]	Verlust [g]	Verlust [%]
100°C	Max	-27,27	28,57	50,00	0,23	9,58%
	Min	0,00	-15,79	-50,00	0,06	4,29%
200°C	Max	1,73	1,81	19,67	0,25	10%
	Min	12,50	45,45	75,00	0,45	12,75%
300°C	Max	1,07	-1,68	-5,90	0,45	23%
	Min	7,69	8,82	25,00	0,84	27,98%
400°C	Max	-6,90	-7,48	-14,45	0,80	33%
	Min	-2,27	-4,76	16,67	1,52	34,53%
500°C	Max	-2,81	-5,81	0,35	0,85	35%
	Min	3,70	0,00	33,33	1,70	36,29%
600°C	Max	-2,01	-5,84	-25,30	0,82	36%
	Min	3,45	0,00	0,00	1,48	37,64%
700°C	Max	-6,75	-18,93	-48,65	0,83	38%
	Min	0,00	-8,11	-28,57	1,54	39,40%
800°C	Max	-9,44	-17,10	6,73	0,80	40%
	Min	0,00	-7,89	66,67	1,53	41,87%
900°C	Max	-8,40	-17,84	57,42	0,76	40%
	Min	5,56	-9,38	162,50	1,45	42,63%
1000°C	Max	-11,90	-18,57	-25,09	1,13	9%
	Min	-4,17	18,75	40,00	2,30	50,29%

Tabelle 4: Einzelwerte der prozentualen Höhen-, Breiten- und Dickenschumpfung der Tibiaproben;

Probe	Temperatur [°C]	Höhen-schumpfung [%]	Breiten-schumpfung [%]	Dicken-schumpfung [%]	Probe	Gewichtsverlust [g]
WF17	100	4,00	3,45	-7,69	WF17	0,13
WF27	100	0,00	-8,33	0,00	WF27	0,08
WF18	100	-4,76	-7,69	-15,79	WF18	0,11
WF33	100	90,00	-16,67	25,00	WF33	0,13
WF22	100	22,22	28,57	-66,67	WF22	0,08
WF24	100	-7,14	-3,03	33,33	WF24	0,06
WF27	200	0,00	0,00	0,00	WF27	0,12
WF17	200	0,00	0,00	-14,29	WF17	0,15
WF22	200	12,50	7,69	0,00	WF22	0,11
WF33	200	0,00	0,00	-14,29	WF33	0,19
WF18	200	0,00	-10,00	-20,00	WF18	0,12
WF24	200	0,00	0,00	0,00	WF24	0,09
WF24	300	-3,13	-3,13	50,00	WF27	0,32
WF22	300	0,00	-14,29	-16,67	WF33	0,44
WF17	300	0,00	-7,14	-14,29	WF17	0,33
WF33	300	-9,09	8,33	-42,86	WF18	0,21
WF27	300	0,00	0,00	-12,50	WF22	0,28
WF18	300	5,00	0,00	0,00	WF24	0,56
WF18	400	-4,35	-11,54	-20,00	WF18	0,41
WF22	400	-10,00	-7,14	-12,50	WF22	0,45

Probe	Temperatur [°C]	Höhenschrumpfung [%]	Breitenschrumpfung [%]	Dickenschrumpfung [%]	Probe	Gewichtsverlust [g]
WF33	400	-8,00	-2,70	-13,33	WF33	0,59
WF17	400	-35,48	36,36	-21,43	WF17	0,37
WF24	400	-6,25	-5,56	-13,33	WF24	0,77
WF27	400	-5,00	-10,71	-12,50	WF27	0,33
WF18	500	-8,33	-7,69	16,67	WF18	0,43
WF33	500	-7,69	-2,94	-7,14	WF33	0,60
WF17	500	-4,55	-3,85	20,00	WF17	0,47
WF22	500	-10,00	-21,43	25,00	WF22	0,49
WF27	500	0,00	-7,14	14,29	WF27	0,44
WF24	500	-3,57	0,00	0,00	WF24	0,89
WF33	600	-4,35	-5,88	0,00	WF33	0,59
WF22	600	-4,76	-3,70	-16,67	WF22	0,44
WF27	600	9,09	0,00	0,00	WF27	0,43
WF18	600	0,00	0,00	-37,50	WF18	0,36
WF24	600	0,00	0,00	-12,50	WF24	0,76
WF17	600	0,00	0,00	-23,08	WF17	0,47
WF33	700	-16,67	-21,43	-42,86	WF33	0,52
WF27	700	-14,29	-23,08	-35,71	WF27	0,41
WF24	700	-9,09	-15,15	-37,50	WF24	0,78
WF22	700	-16,67	-23,08	-20,00	WF22	0,38
WF18	700	-7,69	-16,67	-57,14	WF18	0,44
WF17	700	-12,50	-21,43	-45,45	WF17	0,51
WF33	800	-7,69	-21,43	25,00	WF33	0,57
WF24	800	-14,29	-25,00	-9,09	WF24	1,00
WF17	800	-13,04	-16,67	-33,33	WF17	0,47
WF27	800	-5,56	-23,08	-33,33	WF27	0,37
WF18	800	-5,00	-10,00	-37,50	WF18	0,27
WF22	800	-12,50	-9,09	-20,00	WF22	0,32
WF33	900	-8,00	3,57	14,29	WF33	0,58
WF24	900	-14,29	-21,21	27,27	WF24	0,98
WF22	900	-12,50	-19,23	-40,00	WF22	0,33
WF27	900	-10,00	-19,23	-16,67	WF27	0,33
WF18	900	0,00	-9,09	33,33	WF18	0,22
WF17	900	-12,00	-14,29	-33,33	WF17	0,61
WF18	1000	-43,33	-23,08	0,00	WF18	0,20
WF27	1000	-20,00	-33,33	-40,00	WF27	0,27
WF22	1000	-12,50	-21,43	-50,00	WF22	0,35
WF17	1000	-14,29	-23,33	-58,33	WF17	0,67
WF24	1000	-12,50	-22,86	-40,00	WF24	1,07
WF33	1000	-16,67	-26,67	-40,00	WF33	0,47
WF12	1000	0,30	0,20	0,10	WF12	0,48
WF48	1000	0,20	0,20	0,10	WF48	1,49

Probe	Temperatur [°C]	Höhenschrumpfung [%]	Breitenschrumpfung [%]	Dickenschrumpfung [%]	Probe	Gewichtsverlust [g]
WF1	1000	0,15	0,25	0,10	WF1	1,24
WF39b	1000	0,35	0,10	0,35	WF39b	1,53
WF21a	1000	0,25	0,80	0,10	WF21a	0,32

Tabelle 5: Maximale und minimale prozentuale Höhen-, Breiten- und Dickenschrumpfung, Verlust in g und prozentualer Gewichtsverlust des Tibiaprobenkollektivs;

Temperatur [°C]	Max/Min	Höhe [%]	Breite [%]	Dicke [%]	Verlust [g]	Verlust [%]
100	Max	90	28,57	33,33	0,13	8,35%
	Min	-7,14	-16,67	-66,67	0,063	4,18%
200	Max	12,5	7,69	0	0,19	11,44%
	Min	0	-10	-20	0,086	7,96%
300	Max	5	8,33	50	0,71	27,79%
	Min	-9,09	-14,29	-42,86	0,56	21,08%
400	Max	-4,35	36,36	-12,5	0,77	33,96%
	Min	-35,48	-11,53	-21,42	0,32	27,20%
500	Max	0	0	25	0,89	36,19%
	Min	-10	-21,42	-7,14	0,42	32,85%
600	Max	9,09	0	0	0,76	36,25%
	Min	-4,76	-5,88	-37,5	0,36	33,74%
700	Max	-7,69	-15,15	-20	0,78	41,64%
	Min	-16,67	-23,088	-57,14	0,38	37,17%
800	Max	-5	-9,09	25	1,00	41,39%
	Min	-14,29	-25	-37,5	0,27	37,60%
900	Max	0	3,57	33,33	0,98	42,41%
	Min	-14,29	-21,21	-40	0,21	37,26%
1000	Max	-12,5	-13	0	1,52	44,88%
	Min	-85,75	-152	-58,33	0,2	37,73%

Tabelle 6: Verbrennungsbedingte Veränderung sekundärer Osteone im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im periostalen Bereich der Femurkompakta;

Parameter	Temperatur [°C]	RT	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
SekOst	MW unv.	13,00	13,71	15,21	13,79	13,33	14,55	14,21	13,21	13,29	12,10	13,89
	MW verbr.	13,00	14,76	14,67	14,23	15,05	15,43	15,57	16,93	16,57	18,36	21,21
	STABW unv.	4,81	5,12	5,32	4,65	4,88	5,37	5,51	4,37	4,69	4,64	5,58
	STABW verbr.	4,81	4,74	5,90	5,95	4,65	5,19	5,27	6,57	5,19	6,96	7,43
	Veränderung [%]	0,00	7,64	-3,60	3,23	12,86	6,06	9,55	28,11	24,73	51,77	52,65
OstInt	MW unv.	14,55	14,69	16,37	14,92	14,35	15,73	15,19	14,13	14,00	12,93	15,71
	MW verbr.	14,55	16,02	16,05	14,45	15,98	16,48	16,48	17,74	17,29	19,19	22,90
	STABW unv.	5,16	5,40	5,92	5,23	5,36	5,78	5,75	4,77	4,86	4,96	6,32
	STABW verbr.	5,16	5,21	6,61	6,61	5,01	5,56	5,67	6,78	5,48	7,53	7,88
	Veränderung [%]	0,00	9,06	-1,96	-3,13	11,32	4,75	8,46	25,50	23,47	48,38	45,76
TypII Ost	MW unv.	1,55	0,93	1,07	1,10	0,93	1,07	0,95	0,86	0,64	0,76	1,82
	MW verbr.	1,55	1,26	1,38	0,59	0,93	1,05	0,90	0,81	0,71	0,83	1,69
	STABW unv.	1,19	0,81	0,95	1,21	1,00	0,84	0,88	0,78	0,76	0,82	1,27
	STABW verbr.	1,19	1,29	1,31	0,82	1,11	0,82	0,88	0,71	0,81	1,01	1,31
	Veränderung [%]	0,00	35,90	28,89	-46,15	0,00	-2,22	-5,00	-5,56	11,11	9,38	-7,03
OstFrag	MW unv.	17,26	15,95	15,17	16,26	15,95	16,33	14,64	14,21	14,02	12,76	12,67
	MW verbr.	17,26	16,45	15,95	11,18	16,48	17,21	16,26	16,17	14,43	13,88	14,47
	STABW unv.	6,62	5,36	5,77	5,14	6,30	4,91	5,92	6,73	6,13	5,83	5,44
	STABW verbr.	6,62	6,13	6,72	4,70	8,45	7,54	6,46	7,63	6,11	5,10	6,64
	Veränderung [%]	0,00	3,13	518	-31,25	3,28	5,39	11,06	13,74	2,89	8,77	14,22

Tabelle 7 Verbrennungsbedingte Veränderung der prozentualen Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im periostalen Bereich der Femurkompakta;

Temperatur [°C]	RT	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
ResKno MW unv.	11,69	15,43	14,69	14,40	12,38	13,36	13,71	15,69	15,21	12,98	9,28
ResKno MW verbr.	11,69	12,17	12,67	14,72	14,74	12,74	14,38	14,10	13,29	16,55	10,07
ResKno STABW unv.	9,23	8,43	10,04	9,22	7,28	9,57	9,19	8,32	8,43	8,20	9,62
ResKno STABW verbr.	9,23	7,23	8,06	9,93	8,36	6,39	8,68	6,94	7,12	9,48	7,40
ResKno Veränderung (unv.-verbr.) [%]	0,00	-21,14	-13,78	2,17	19,04	-4,63	4,86	-10,17	-12,68	27,52	8,54
GenLam MW unv.	10,38	13,64	14,33	11,29	13,07	13,14	16,29	20,21	20,71	24,38	18,01
GenLam MW verbr.	10,38	10,38	11,10	22,90	12,83	11,10	14,12	17,74	19,95	19,02	19,21
GenLam STABW unv.	7,16	11,87	13,53	8,31	12,91	8,84	13,63	15,72	16,53	17,07	12,85
GenLam STABW verbr.	7,16	9,61	10,57	13,61	9,03	9,05	12,41	17,49	12,12	12,45	10,67
GenLam Veränderung (unv.-verbr.) [%]	0,00	-23,91	-22,59	102,89	-1,82	-15,58	-13,30	-12,25	-3,68	-21,97	6,68
OstKno MW unv.	51,86	46,57	50,00	49,57	47,86	51,26	49,26	45,45	44,21	43,69	54,00
OstKno MW verbr.	51,86	52,71	50,19	45,33	51,69	52,43	48,36	47,38	47,05	46,71	52,17
OstKno STABW unv.	16,76	13,98	13,75	14,70	14,40	12,81	15,59	12,48	13,26	13,05	15,88
OstKno STABW verbr.	16,76	14,39	14,95	14,05	12,30	11,55	12,34	13,47	10,95	13,07	12,54
OstKno Veränderung (unv.-verbr.) [%]	0,00	13,19	0,38	-8,55	8,01	2,28	-1,84	4,24	6,41	6,92	-3,38
FragKno MW unv.	26,07	24,36	20,98	24,74	26,69	22,24	20,74	18,64	19,86	18,95	18,71
FragKno MW verbr.	26,07	24,74	26,05	17,00	20,74	23,74	23,14	20,79	19,71	17,71	17,20
FragKno STABW unv.	8,50	7,82	8,63	6,86	10,89	6,13	8,13	7,89	8,49	9,13	7,67
FragKno STABW verbr.	8,50	8,87	10,35	7,13	8,48	7,53	8,11	9,89	7,36	6,73	6,32
FragKno Veränderung (unv.-verbr.) [%]	0,00	1,56	24,18	-31,28	-22,30	6,75	11,60	11,49	-0,72	-6,53	-8,06

Tabelle 8: Veränderung der Osteogeometrie (Osteonfläche=OstFI, Osteonumfang=OstU, Osteondurchmesser=OstD) über die Verbrennungstemperaturen im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im periostalen Bereich der Femurkompakta (Verbrennungstemperaturen RT-1000°C entsprechen den Positionen 1-11 entlang des anterioren Femurschaftes);

Temperatur [°C]	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
OstFI MW unv.	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04
OstFI MW verbr.	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
OstFI STABW unv.	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
OstFI STABW verbr.	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01
OstFI Veränderung (unv.-verbr.) [%]	0,00	12,57	7,20	5,92	8,49	1,66	-4,02	-10,96	-6,16	-20,59	-29,97
OstU MW unv.	0,68	0,64	0,64	0,63	0,64	0,67	0,66	0,65	0,64	0,67	0,67
OstU MW verbr.	0,68	0,67	0,65	0,64	0,67	0,66	0,64	0,61	0,61	0,59	0,55
OstU STABW unv.	0,19	0,10	0,10	0,12	0,12	0,11	0,09	0,07	0,08	0,09	0,11
OstU STABW verbr.	0,19	0,15	0,19	0,18	0,14	0,15	0,14	0,11	0,13	0,15	0,13
OstU Veränderung (unv.-verbr.) [%]	0,00	4,86	0,82	0,99	3,75	-0,15	-3,29	-6,42	-4,62	-12,71	-17,41
OstD MW unv.	0,22	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,20	0,21	0,21
OstD MW verbr.	0,22	0,21	0,21	0,20	0,21	0,21	0,20	0,19	0,20	0,19	0,18
OstD STABW unv.	0,06	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03
OstD STABW verbr.	0,06	0,05	0,06	0,06	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,04
OstD Veränderung (unv.-verbr.) [%]	0,00	4,86	0,82	0,99	3,75	-0,15	-3,29	-6,42	-4,62	-12,71	-17,41
ResLakFI MW unv.	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04
ResLakFI MW verbr.	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04
ResLakFI STABW unv.	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,05	0,02	0,02	0,02	0,03
ResLakFI STABW verbr.	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
ResLakFI Veränderung (unv.-verbr.) [%]	0,00	5,52	-7,64	4,25	1,07	7,60	-6,62	-4,13	-12,26	0,60	1,57

Tabelle 9: Verbrennungsbedingte Veränderung der OPD im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im periostalen Bereich der Femurkompakta;

Parameter	Temperatur [°C]	RT	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
OPD	MW unv.	31,81	30,67	31,73	30,89	30,04	31,90	30,19	28,37	28,26	25,89	28,38
	MW verbr.	31,81	32,48	32,00	25,35	32,45	33,69	32,74	33,90	31,71	33,07	37,37
	STABW unv.	10,41	9,45	10,19	8,30	9,97	9,42	9,87	10,34	9,46	9,15	9,36
	STABW verbr.	10,41	9,56	11,66	10,33	11,70	11,65	10,57	11,92	9,83	11,27	12,32
	Veränderung [%]	0,00	5,89	0,87	-17,94	8,02	5,63	8,44	19,50	12,22	27,76	31,68
AOC	MW unv.	40,29	36,48	39,24	36,22	36,13	38,92	36,10	34,43	32,26	28,82	32,85
	MW verbr.	40,29	40,54	43,98	29,83	53,47	50,72	46,87	47,81	38,57	45,79	72,03
	STABW unv.	20,54	14,88	18,42	13,20	17,00	16,55	16,69	20,30	12,96	12,24	15,68
	STABW verbr.	20,54	18,45	31,54	16,33	80,08	44,75	43,27	34,17	16,12	32,12	95,91
	Veränderung [%]	0,00	11,13	12,10	-17,64	47,97	30,31	29,85	38,87	19,58	58,86	119,23
BFR	MW unv.	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	MW verbr.	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03
	STABW unv.	0,06	0,01	0,03	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02
	STABW verbr.	0,07	0,10	0,05	0,02	0,03	0,07	0,03	0,01	0,04	0,04	0,08
	Veränderung [%]	0,00	89,47	15,66	-15,06	32,88	20,53	15,91	-2,54	18,87	8,31	31,66
AktFr	MW unv.	0,76	0,67	0,69	0,73	0,65	0,72	0,63	0,58	0,57	0,58	0,63
	MW verbr.	0,56	0,76	0,67	0,53	0,72	0,77	0,70	0,66	0,65	0,70	0,92
	STABW unv.	0,60	0,45	0,46	0,66	0,45	0,49	0,34	0,34	0,28	0,48	0,35
	STABW verbr.	1,04	0,62	0,41	0,32	0,46	0,56	0,39	0,29	0,43	0,52	0,86
	Veränderung [%]	0,00	13,72	-3,72	-27,83	10,19	7,88	10,19	13,59	14,65	20,08	44,77

Tabelle 10: Verbrennungsbedingte Veränderung sekundärer und intakter Osteone, Typ-II-Osteone und Osteonfragmente im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im mittigen Bereich der Femurkompakta;

Parameter	Temperatur [°C]	RT	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
SekOst	MW unv.	10,88	11,60	12,05	12,95	12,00	11,93	11,50	11,21	11,83	11,87	11,61
	MW verbr.	10,88	12,42	12,00	13,53	12,85	13,29	13,54	17,47	15,17	15,06	16,85
	STABW unv.	4,21	3,99	4,07	4,22	4,04	4,12	3,77	3,95	3,96	4,10	4,18
	STABW verbr.	4,21	5,11	4,29	3,89	4,77	4,88	4,64	6,14	5,41	6,29	5,36
	Veränderung [%]	0,00	7,08	-0,40	4,46	7,08	11,38	17,73	55,80	28,22	26,90	45,21
OstInt	MW unv.	11,93	12,86	13,48	14,40	13,15	12,98	12,67	12,12	12,69	12,87	13,56
	MW verbr.	11,93	13,58	13,29	14,35	13,75	14,36	14,64	18,36	15,86	15,71	18,24
	STABW unv.	4,43	4,57	4,36	4,63	4,30	4,30	4,28	4,28	4,10	4,12	4,74
	STABW verbr.	4,43	5,64	4,73	4,12	5,04	5,16	4,82	6,25	5,42	6,30	5,62
	Veränderung [%]	0,00	5,65	-1,41	-0,36	4,59	10,64	15,59	51,51	24,95	22,07	34,50
TypIIost	MW unv.	1,05	1,26	1,43	1,45	1,15	1,05	1,17	0,90	0,86	1,00	1,96
	MW verbr.	1,05	1,17	1,29	0,82	0,90	1,07	1,10	0,89	0,69	0,65	1,39
	STABW unv.	0,73	1,13	0,94	1,23	0,74	0,70	0,82	1,10	0,80	0,87	1,17
	STABW verbr.	0,73	0,80	0,97	0,80	0,82	0,81	0,72	0,71	0,66	0,86	0,83
	Veränderung [%]	0,00	-7,55	-10,00	-43,30	-21,49	2,27	-5,49	-1,75	-19,91	-35,29	-28,98
OstFrag	MW unv.	11,88	11,74	11,00	11,86	11,90	12,43	12,67	12,69	11,39	10,33	12,31
	MW verbr.	11,88	10,72	12,21	10,56	10,90	10,52	10,72	10,94	10,41	9,35	10,63
	STABW unv.	4,14	3,49	3,41	3,24	4,18	4,19	5,03	3,57	3,47	3,79	4,59
	STABW verbr.	4,14	3,53	3,98	4,40	3,32	3,44	3,10	3,48	3,69	2,18	3,08
	Veränderung [%]	0,00	-8,65	11,04	-10,95	-8,42	-15,33	-15,38	-13,76	-8,56	-9,49	-13,68

Tabelle 11: Verbrennungsbedingte Veränderung der prozentualen Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im mittigen Bereich der Femurkompakta;

Temperatur [°C]	RT	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
ResKno MW unv.	14,86	13,64	10,50	11,19	10,76	11,71	12,71	14,98	15,42	13,73	10,81
ResKno MW verbr.	14,86	11,69	10,50	9,32	12,28	11,45	11,67	11,22	11,59	13,12	10,63
ResKno STABW unv.	12,15	10,78	11,03	11,07	10,27	8,35	11,81	12,03	9,27	9,62	12,33
ResKno STABW verbr.	12,15	8,52	8,45	9,10	7,10	8,04	8,60	5,96	6,91	8,72	8,81
ResKno Veränderung [%]	0,00	-14,28	0,00	-16,68	14,12	-2,24	-8,24	-25,07	-24,85	-4,48	-1,61
GenLam MW unv.	10,10	11,40	10,48	9,50	11,85	13,69	12,74	12,19	12,81	18,00	14,07
GenLam MW verbr.	10,10	9,97	10,00	16,50	13,38	13,71	12,15	16,58	20,72	18,53	19,12
GenLam STABW unv.	5,31	6,12	7,17	5,20	6,79	7,30	7,41	6,22	8,03	8,38	8,33
GenLam STABW verbr.	5,31	7,36	5,08	8,55	9,08	9,57	6,34	9,91	9,75	9,23	7,07
GenLam Veränderung [%]	0,00	-12,46	-4,55	73,68	12,83	0,17	-4,59	36,04	61,84	2,94	35,86
OstKno MW unv.	52,95	52,43	58,24	57,07	54,80	52,90	51,21	50,31	51,17	50,73	53,34
OstKno MW verbr.	52,95	56,97	56,36	56,59	55,20	58,40	57,90	54,39	50,55	51,71	54,27
OstKno STABW unv.	16,31	15,35	14,75	13,05	14,48	11,58	13,92	12,15	11,72	10,88	15,78

OstKno STABW verbr.	16,31	13,84	13,13	14,81	10,99	11,02	12,84	12,66	12,63	17,18	10,27
OstKno Veränderung [%]	0,00	8,67	-3,23	-0,85	0,72	10,40	13,05	8,11	-1,20	1,92	1,74
FragKno MW unv.	22,10	22,52	20,79	22,24	22,59	21,69	23,33	22,52	20,61	17,53	21,30
FragKno MW verbr.	22,10	21,36	23,14	17,59	19,15	16,43	18,28	17,81	17,14	16,65	15,98
FragKno STABW unv.	8,28	7,96	6,89	4,74	9,06	8,94	7,20	6,97	6,61	6,25	7,34
FragKno STABW verbr.	8,28	6,63	7,89	6,64	7,27	5,34	5,36	6,42	5,52	3,90	5,82
FragKno Veränderung [%]	0,00	-5,16	11,34	-20,91	-15,21	-24,26	-21,65	-20,95	-16,85	-5,05	-24,99

Tabelle 12: Veränderung der Osteogeometrie (Osteonfläche=OstFI, Osteonumfang=OstU, Osteondurchmesser=OstD) über die Verbrennungstemperaturen im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im mittigen Bereich der Femurkompakta (Verbrennungstemperaturen RT-1000°C entsprechen den Positionen 1-11 entlang des anterioren Femurschaftes);

Temperatur [°C]	RT	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
OstFI MW unv.	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
OstFI MW verbr.	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
OstFI STABW unv.	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
OstFI STABW verbr.	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
OstFI Veränderung (unv.-verbr.) [%]	0,00	9,68	-0,28	-6,39	0,46	-0,04	-1,84	-27,13	-21,61	-22,07	-24,58
OstU MW unv.	0,77	0,73	0,75	0,73	0,73	0,74	0,73	0,74	0,72	0,72	0,71
OstU MW verbr.	0,77	0,76	0,75	0,71	0,73	0,74	0,72	0,63	0,64	0,62	0,62
OstU STABW unv.	0,12	0,09	0,11	0,13	0,09	0,12	0,10	0,09	0,08	0,10	0,11
OstU STABW verbr.	0,12	0,13	0,10	0,10	0,12	0,11	0,09	0,10	0,08	0,18	0,07
OstU Veränderung (unv.-verbr.) [%]	0,00	4,15	0,07	-2,72	-0,12	0,23	-0,85	-15,02	-11,59	-14,30	-12,68
OstD MW unv.	0,24	0,23	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,23	0,23	0,23
OstD MW verbr.	0,24	0,24	0,24	0,23	0,23	0,24	0,23	0,20	0,20	0,20	0,20
OstD STABW unv.	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
OstD STABW verbr.	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,06	0,02
OstD Veränderung (unv.-verbr.) [%]	0,00	4,15	0,07	-2,72	-0,12	0,23	-0,85	-15,02	-11,59	-14,30	-12,68

Tabelle 13: Verbrennungsbedingte Veränderung der OPD im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im mittigen Bereich der Femurkompakta;

Parameter	Temperatur [°C]	RT	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
OPD	MW unv.	23,81	24,60	24,48	26,26	25,05	25,40	25,33	24,81	24,08	23,20	25,87
	MW verbr.	23,81	24,31	25,50	24,91	24,65	24,88	25,36	29,31	26,28	25,06	28,61
	STABW unv.	6,26	5,81	6,02	6,75	6,54	6,82	7,71	6,00	5,26	6,80	7,03
	STABW verbr.	6,26	8,25	6,73	7,00	6,90	7,57	6,80	7,99	7,58	7,54	6,93
	Veränderung [%]	0,00	-1,18	4,18	-5,14	-1,59	-2,06	0,10	18,12	9,10	8,01	10,58
AOC	MW unv.	28,58	30,30	28,94	32,67	30,97	31,76	34,40	29,61	27,73	27,15	32,84
	MW verbr.	28,58	31,12	31,05	31,67	30,49	32,53	32,60	45,22	36,15	30,76	54,53
	STABW unv.	15,68	18,51	10,96	12,95	16,76	16,77	26,52	11,40	9,12	11,29	16,00
	STABW verbr.	15,68	19,66	19,06	18,11	15,45	21,80	20,67	36,21	25,47	14,67	100,10
	Veränderung [%]	0,00	2,69	7,26	-3,05	-1,52	2,40	-5,25	52,69	30,37	13,29	66,06
BFR	MW unv.	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03
	MW verbr.	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04
	STABW unv.	0,06	0,06	0,09	0,08	0,06	0,07	0,06	0,07	0,06	0,08	0,05
	STABW verbr.	0,06	0,08	0,08	0,05	0,08	0,06	0,07	0,04	0,05	0,06	0,06
	Veränderung [%]	0,00	10,91	0,00	-22,44	14,07	-7,38	8,45	-30,46	-7,59	-6,39	31,98
AktFr	MW unv.	0,61	0,74	0,71	0,72	0,71	0,64	0,68	0,78	0,72	0,86	0,76
	MW verbr.	0,61	0,67	0,76	0,80	0,71	0,66	0,74	0,74	0,84	1,05	1,41
	STABW unv.	0,73	1,13	1,02	0,99	1,01	0,67	0,86	1,32	0,95	1,44	0,86
	STABW verbr.	0,73	0,87	1,07	1,22	1,03	0,79	1,03	0,70	1,07	1,60	1,86
	Veränderung [%]	0,00	-9,77	5,92	11,57	1,15	3,55	9,13	-5,46	17,30	22,45	84,83

Tabelle 14: Histomorphometrische Parameter jedes Individuums über alle Temperaturstufen, für welche sich unter Einbeziehung des jeweiligen Schrumpfungskoeffizienten im periostalen Bereich der Femurkompakta ein an die unverbrannte Probe genäherter Wert ergab;

Probe	Parameter	Temperatur [°C]	Schrumpfungskoeffizient	Verbrannte Probe	Verbrannte Probe nach Korrektur	Unverbrannte Referenzprobe (RT)	Individualalter
WF45	SekOst	100	0,01	2,00	1,47	1	16
WF37	SekOst	300	0,01	10,00	11,28	18	87
WF19	SekOst	300	0,01	10,33	14,06	13	76
WF9	SekOst	300	0,01	12,00	16,67	16	68
WF28	SekOst	400	0,01	16,00	12,70	11	64

Probe	Parameter	Temperatur [°C]	Schrumpfungs-koeffizient	Verbrannte Probe	Verbrannte Probe nach Korrektur	Unverbrannte Referenzprobe (RT)	Individualalter
WF39a	SekOst	400	0,01	17,00	11,49	12	69
WF38	SekOst	400	0,01	16,67	12,25	13	54
WF2	SekOst	500	0,01	15,00	14,71	13	80
WF45	SekOst	600	0,01	3,00	2,52	2	16
WF45	SekOst	900	0,01	3,33	2,60	2	16
WF37	TypIIOst	100	0,02	0,67	1,17	2	87
WF34	TypIIOst	100	0,02	0,67	1,36	2	68
WF37	TypIIOst	300	0,01	0,50	0,56	2	87
WF28	TypIIOst	300	0,03	0,33	1,11	1	64
WF9	TypIIOst	300	0,01	0,67	0,93	1	68
WF15	TypIIOst	300	0,01	0,33	0,42	1	79
WF2	TypIIOst	400	0,01	0,67	0,79	2	80
WF15	TypIIOst	400	0,02	1,00	2,43	2	79
WF2	TypIIOst	500	0,01	1,33	1,31	1	80
WF37	TypIIOst	600	0,01	0,33	0,49	1	87
WF29a	TypIIOst	600	0,01	1,67	1,90	3	89
WF29a	TypIIOst	700	0,11	0,33	3,51	2	89
WF34	TypIIOst	700	0,02	0,33	0,79	1	68
WF9	TypIIOst	900	0,02	0,33	0,83	1	68
FS01-13	TypIIOst	1000	0,02	1,00	2,05	2	20
FS01-14	TypIIOst	1000	0,02	3,00	4,81	4	63
WF45	OstInt	100	0,01	2,67	1,96	2	16
WF37	OstInt	300	0,01	10,50	11,84	20	87
WF19	OstInt	300	0,01	10,67	14,51	13	76
WF9	OstInt	300	0,01	12,67	17,59	17	68
WF28	OstInt	400	0,01	17,33	13,76	13	64
WF39a	OstInt	400	0,01	18,33	12,39	12	69
WF38	OstInt	400	0,01	26,22	19,28	14,53	54
WF2	OstInt	500	0,01	16,33	16,01	14	80
WF29a	ResLak	100	0,05	1,00	4,74	3	89
WF9	ResLak	300	0,01	1,67	2,31	2	68
WF39a	ResLak	400	0,01	2,67	1,80	2	69
WF29b	ResLak	400	0,01	2,67	2,12	1	82
WF26	ResLak	600	0,01	2,67	2,78	3	72
WF29a	ResLak	600	0,01	1,00	1,14	3	89
WF34	ResLak	600	0,01	3,33	1,87	2	68
WF39a	ResLak	600	0,00	2,67	0,51	1	69
WF28	ResLak	800	0,04	2,00	7,89	5	64
WF38	ResLak	900	0,02	1,00	1,75	3	54
WF3	ResLak	1000	0,02	2,00	3,13	6	75
WF40b	ResLak	1000	0,01	3,33	3,92	4	73
WF47	ResLak	1000	0,04	0,67	2,63	4	63
FS01-14	ResLak	1000	0,02	1,00	1,60	2	63
FS01-16	ResLak	1000	0,04	0,67	2,50	2	58
WF45	HavKan	100	0,01	2,00	1,47	1	16
WF37	HavKan	300	0,01	10,50	11,84	20	87
WF19	HavKan	300	0,01	10,67	14,51	13	76

Probe	Parameter	Temperatur [°C]	Schrumpfungs-koeffizient	Verbrannte Probe	Verbrannte Probe nach Korrektur	Unverbrannte Referenzprobe (RT)	Individualalter
WF9	HavKan	300	0,01	12,67	17,59	17	68
WF28	HavKan	400	0,01	17,33	13,76	13	64
WF39a	HavKan	400	0,01	18,33	12,39	12	69
WF38	HavKan	400	0,01	20,67	15,20	13	54
WF2	HavKan	500	0,01	16,33	16,01	14	80
WF45	HavKan	600	0,01	3,00	2,52	2	16
WF45	HavKan	900	0,01	3,33	2,60	2	16
WF45	NichtHavKan	100	0,01	5,33	3,92	3	16
WF4	NichtHavKan	200	0,02	0,33	0,52	1	95
WF9	NichtHavKan	300	0,01	0,67	0,93	1	68
WF19	NichtHavKan	400	0,01	1,67	1,32	1	76
WF28	NichtHavKan	400	0,01	2,67	2,12	1	64
WF26	NichtHavKan	400	0,02	0,67	1,30	1	72
WF2	NichtHavKan	400	0,01	1,33	1,59	3	80
WF38	NichtHavKan	400	0,01	5,00	3,68	2	54
WF2	NichtHavKan	500	0,01	1,33	1,31	1	80
WF26	NichtHavKan	600	0,01	1,00	1,04	3	72
WF29a	NichtHavKan	600	0,01	1,67	1,90	3	89
WF45	NichtHavKan	600	0,01	21,00	17,65	5	16
WF45	NichtHavKan	900	0,01	27,67	21,61	24	16
WF40a	NichtHavKan	1000	0,03	2,00	6,42	6	75
WF40b	NichtHavKan	1000	0,01	2,67	3,14	4	73
WF47	NichtHavKan	1000	0,04	2,00	7,89	22	22
WF19	VolkMann	100	0,01	1,33	0,95	1	76
WF15	VolkMann	300	0,01	1,67	2,10	2	79
WF37	VolkMann	600	0,01	2,00	2,93	3	87
WF28	VolkMann	700	0,06	1,00	6,47	4	64
WF34	VolkMann	700	0,02	1,00	2,38	2	68
WF19	VolkMann	800	0,04	0,33	1,27	1	76
WF28	VolkMann	800	0,04	0,67	2,63	2	64
WF34	VolkMann	800	0,02	0,33	0,58	2	68
WF29b	VolkMann	1000	0,11	0,33	3,62	3	82
WF30	VolkMann	1000	0,02	0,67	1,00	1	91
FS01-13	VolkMann	1000	0,02	0,33	0,68	2	20
FS01-14	VolkMann	1000	0,02	0,33	0,53	3	63
FS04-16	VolkMann	1000	0,04	0,67	2,34	2	64
WF37	GenLam	100	0,02	1,67	2,92	5	87
WF19	GenLam	100	0,01	10,33	7,38	3	76
WF26	GenLam	100	0,01	12,00	10,71	4	72
WF34	GenLam	100	0,02	5,33	10,88	17	68
WF29b	GenLam	100	0,00	3,33	1,26	1	82
WF45	GenLam	100	0,01	32,00	23,53	20	16
WF26	GenLam	300	-0,01	28,00	-14,58	3	72
WF19	GenLam	400	0,01	12,33	9,79	5	76
WF28	GenLam	400	0,01	8,00	6,35	2	64
WF2	GenLam	400	0,01	18,00	21,43	21	80
WF29b	GenLam	400	0,01	8,00	6,35	4	82

Probe	Parameter	Temperatur [°C]	Schrumpfungs-koeffizient	Verbrannte Probe	Verbrannte Probe nach Korrektur	Unverbrannte Referenzprobe (RT)	Individualalter
WF34	GenLam	500	0,02	11,67	20,35	20	68
WF29a	GenLam	600	0,01	10,67	12,19	20	89
WF38	GenLam	600	0,01	2,00	2,35	13	54
WF45	GenLam	600	0,01	46,67	39,22	28	16
WF28	GenLam	700	0,06	6,00	38,82	31	64
WF34	GenLam	700	0,02	9,00	21,46	24	68
WF38	GenLam	900	0,02	9,00	15,79	47	54
WF21b	GenLam	1000	0,02	13,00	20,63	28	NA
WF30	GenLam	1000	0,02	12,67	19,05	19	91
WF40b	GenLam	1000	0,01	11,33	13,33	18	73
FS02-16	GenLam	1000	0,06	8,00	48,00	37	58
WF37	OstKno	300	0,01	31,00	34,96	49	87
WF19	OstKno	400	0,01	35,33	28,04	27	76
WF38	OstKno	400	0,01	65,33	48,04	47	54
WF45	OstKno	500	0,01	27,67	14,41	8	16
WF19	OstKno	600	0,01	35,00	47,62	42	76
WF45	OstKno	600	0,01	21,67	18,21	9	16
WF45	OstKno	900	0,01	26,00	20,31	12	16
WF26	ResKno	100	0,01	14,00	12,50	12	16
WF37	ResKno	300	0,01	13,00	14,66	15	87
WF28	ResKno	300	0,03	11,00	36,67	28	64
WF9	ResKno	300	0,01	10,00	13,89	12	68
WF28	ResKno	400	0,01	17,33	13,76	12	64
WF29b	ResKno	400	0,01	19,67	15,61	5	82
WF45	ResKno	500	0,01	21,33	11,11	7	16
WF29a	ResKno	600	0,01	4,67	5,33	10	89
WF34	ResKno	600	0,01	25,33	14,19	5	68
WF39a	ResKno	600	0,00	13,67	2,60	4	69
WF45	ResKno	700	0,03	9,33	23,53	42	16
WF38	ResKno	900	0,02	4,00	7,02	17	54
WF38	ResKno	1000	0,04	3,00	12,24	8	54
WF3	ResKno	1000	0,02	7,67	11,98	34	75
WF5	ResKno	1000	0,06	8,33	52,63	42	55
WF40b	ResKno	1000	0,01	10,00	11,76	16	73
WF41	ResKno	1000	0,03	5,67	18,89	13	64
WF47	ResKno	1000	0,04	2,67	10,53	18	22
FS01-14	ResKno	1000	0,02	3,00	4,81	4	63
FS01-16	ResKno	1000	0,04	3,00	11,25	9	58
WF4	FragKno	200	0,02	15,00	23,43	22	95
WF37	FragKno	300	0,01	16,50	18,61	34	87
WF19	FragKno	300	0,01	18,00	24,49	28	76
WF9	FragKno	300	0,01	28,67	39,81	36	68
WF15	FragKno	300	0,01	20,67	26,05	24	79
WF2	FragKno	400	0,01	15,67	18,65	19	80
WF45	FragKno	400	0,01	9,33	11,67	27	16
WF34	FragKno	500	0,02	18,00	31,40	26	68
WF26	FragKno	600	0,01	18,33	19,10	26	72

Probe	Parameter	Temperatur [°C]	Schrumpungs-koeffizient	Verbrannte Probe	Verbrannte Probe nach Korrektur	Unverbrannte Referenzprobe (RT)	Individualalter
WF15	FragKno	600	0,00	26,33	11,40	18	79
WF45	FragKno	700	0,03	3,00	7,56	15	16
WF9	FragKno	900	0,02	15,00	37,22	27	68
WF15	FragKno	900	0,02	16,00	26,89	23	79
WF3	FragKno	1000	0,02	18,00	28,12	33	75
FS01-13	FragKno	1000	0,02	10,33	21,20	24	20
FS01-14	FragKno	1000	0,02	13,67	21,92	18	63

Tabelle 15: Histomorphometrische Parameter jedes Individuums über alle Temperaturstufen, für welche sich unter Einbeziehung des jeweiligen Schrumpungskoeffizienten im mittleren Bereich der Femurkompakta ein an die unverbrannte Probe genäherter Wert ergab;

Probe	Temperatur [°C]	Schrumpungs-koeffizient	Verbrannte Probe	Verbrannte Probe nach Korrektur	Unverbrannte Referenzprobe (RT)	Individualalter	Parameter
WF26	100	0,89	12,67	11,31	10,33	72	SekOst
WF37	300	1,12	9,67	10,90	12	87	SekOst
WF19	400	0,79	13	10,31	9	76	SekOst
WF28	400	0,79	18,33	14,55	12	64	SekOst
WF9	400	0,73	11	8,10	8,67	68	SekOst
WF45	400	1,25	6	7,5	8	16	SekOst
WF2	500	0,98	14	13,72	12	80	SekOst
WF45	500	0,52	6	3,12	4,33	16	SekOst
WF37	600	1,463	5,67	8,29	9,33	87	SekOst
WF53	1000	0	13,5	0	5,67	82	SekOst
FS04-16	1000	1,79	11	19,64	15,67	64	SekOst
WF19	100	0,71	0	0	0,33	76	TypIIost
WF26	100	0,89	1,33	1,19	0,33	72	TypIIost
WF45	200	0	0,67	0	0,33	16	TypIIost
WF37	300	1,12	1,67	1,88	4	87	TypIIost
WF28	300	3,33	0,33	1,11	1,67	64	TypIIost
WF9	300	1,39	1,33	1,85	1,67	68	TypIIost
WF15	300	1,26	0,67	0,84	1,33	79	TypIIost
WF38	400	0,73	2	1,47	1,67	54	TypIIost
WF26	400	1,95	0,33	0,65	1,5	72	TypIIost
WF15	400	2,43	0,67	1,62	1,33	79	TypIIost
WF37	600	1,46	1,33	1,95	1,67	87	TypIIost
WF19	600	1,36	0,33	0,45	0,67	76	TypIIost
WF29a	600	1,14	1	1,14	2,33	89	TypIIost
WF34	600	0,56	1,33	0,75	0,67	68	TypIIost
WF39a	600	0,19	1,33	0,25	0,67	69	TypIIost
WF45	600	0,84	0,67	0,56	0,33	16	TypIIost
WF9	800	5	0,33	1,67	1,33	68	TypIIost
WF38	900	1,75	1,33	2,33	2	54	TypIIost
FS04-16	1000	1,79	1,67	2,98	2,67	64	TypIIost

Probe	Temperatur [°C]	Schrumpungs-koeffizient	Verbrannte Probe	Verbrannte Probe nach Korrektur	Unverbrannte Referenzprobe (RT)	Individualalter	Parameter
WF4	200	1,56	8,67	13,54	11,33	95	OstFr
WF37	300	1,12	16,33	18,42	17,67	87	OstFr
WF28	300	3,33	6	20	15,33	64	OstFr
WF38	400	0,73	14,33	10,53	10,67	54	OstFr
WF26	400	1,95	8	15,58	12	72	OstFr
WF34	500	1,74	8,33	14,53	12	68	OstFr
WF37	600	1,46	10,67	15,60	17,67	87	OstFr
WF45	600	0,84	6,33	5,32	5	16	OstFr
WF45	700	2,52	4,67	11,76	9	16	OstFr
WF9	300	1,39	1,33	1,85	3,33	68	ResLak
WF15	300	1,26	2,67	3,36	3,33	79	ResLak
WF38	400	0,73	1	0,73	0,67	54	ResLak
WF9	400	0,73	2	1,47	1,33	68	ResLak
WF2	400	1,19	1	1,19	1,67	80	ResLak
WF39a	400	0,68	2	1,35	1	69	ResLak
WF2	500	0,98	1,67	1,63	0,67	80	ResLak
WF19	600	1,36	2,33	3,17	5,33	76	ResLak
WF15	600	0,43	2,67	1,15	1,67	79	ResLak
WF29a	600	1,14	0,33	0,38	1,33	89	ResLak
WF45	600	0,84	2,67	2,24	0,67	16	ResLak
WF28	800	3,95	1,67	6,58	4,67	64	ResLak
WF15	900	1,68	2,5	4,20	4,33	79	ResLak
WF45	900	0,78	3	2,34	2,33	16	ResLak
WF26	100	0,89	14	12,5	10,67	72	HavKan
WF37	300	1,12	11,33	12,78	16	87	HavKan
WF19	400	0,79	13,33	10,58	10	76	HavKan
WF28	400	0,79	19,33	15,34	13,33	64	HavKan
WF45	400	1,25	6,33	7,91	8	16	HavKan
WF2	500	0,98	15	14,70	13,33	80	HavKan
WF45	500	0,52	6,33	3,30	4,67	16	HavKan
WF37	600	1,46	7	10,24	11	87	HavKan
FS04-16	1000	1,79	12,67	22,61	18,33	64	HavKan
WF19	100	0,71	1	0,71	0,67	76	NichtHavKan
WF29b	100	0,38	1,33	0,50	0,67	82	NichtHavKan
WF4	200	1,56	0,67	1,04	2	95	NichtHavKan
WF38	400	0,73	0	0	0,33	54	NichtHavKan
WF28	400	0,79	1	0,79	0,67	64	NichtHavKan
WF29a	400	2,13	1,33	2,85	3	89	NichtHavKan
WF2	500	0,98	1	0,98	0,67	80	NichtHavKan
WF34	500	1,74	0,33	0,58	1	68	NichtHavKan

Probe	Temperatur [°C]	Schrumpungs-koeffizient	Verbrannte Probe	Verbrannte Probe nach Korrektur	Unverbrannte Referenzprobe (RT)	Individualalter	Parameter
WF2	600	6,06	0	0	1,33	80	NichtHavKan
WF15	600	0,43	1,33	0,58	0,33	79	NichtHavKan
WF29a	600	1,14	1,33	1,52	2,33	89	NichtHavKan
WF45	900	0,78	2,67	2,08	0,67	16	NichtHavKan
WF47	1000	3,95	1	3,95	3	22	NichtHavKan
WF26	100	0,89	2	1,79	0	72	VolkMann
WF4	200	1,56	0,33	0,52	1	95	VolkMann
WF4	300	-1,47	0	0	0,67	95	VolkMann
WF38	400	0,73	2,33	1,71	1,33	54	VolkMann
WF28	400	0,79	1	0,79	0,33	64	VolkMann
WF9	400	0,73	0,33	0,24	0	68	VolkMann
WF34	400	3	1	3	2	68	VolkMann
WF2	500	0,98	0,67	0,65	0,33	80	VolkMann
WF45	500	0,52	1,67	0,87	0,67	16	VolkMann
WF38	600	1,18	0,67	0,78	1	54	VolkMann
WF34	700	2,38	0,67	1,59	1,67	68	VolkMann
WF9	800	5	0,33	1,67	1,33	68	VolkMann
WF34	800	1,75	1	1,75	3,33	68	VolkMann
WF38	1000	4,08	0,33	1,36	1	54	VolkMann
FS01-13	1000	2,05	0,33	0,68	1	20	VolkMann
FS01-16	1000	3,75	0,67	2,5	1,67	58	VolkMann
FS02-14	1000	4,51	0,33	1,50	1,67	60	VolkMann
FS04-16	1000	1,79	0,33	0,60	1	64	VolkMann
WF19	100	0,71	23	16,42	16,33	76	ResKno
WF45	100	0,73	12,67	9,31	8,33	16	ResKno
WF4	200	1,56	1	1,56	7,33	95	ResKno
WF9	300	1,39	10	13,89	20,67	68	ResKno
WF2	300	0	7	0	1,67	80	ResKno
WF15	300	1,26	10,67	13,45	23,33	79	ResKno
WF4	300	-1,47	0	0	7,67	95	ResKno
WF38	400	0,73	6,67	4,90	2,33	54	ResKno
WF9	400	0,73	14,67	10,784	11,33	68	ResKno
WF39a	400	0,68	13,67	9,23	8	69	ResKno
WF29b	400	0,79	19,67	15,60	13	82	ResKno
WF2	500	0,98	10,67	10,46	3,33	80	ResKno
WF19	600	1,36	12,67	17,23	36,33	76	ResKno
WF29a	600	1,14	1,67	1,90	6	89	ResKno
WF34	600	0,56	8,33	4,67	5	68	ResKno
WF45	600	0,84	13,33	11,20	7,33	16	ResKno
WF15	900	1,68	11,5	19,32	24,33	79	ResKno

Probe	Temperatur [°C]	Schrumpfungskoeffizient	Verbrannte Probe	Verbrannte Probe nach Korrektur	Unverbrannte Referenzprobe (RT)	Individualalter	Parameter
WF45	900	0,78	25	19,53	13,33	16	ResKno
WF38	1000	4,08	4	16,32	19,67	54	ResKno
FS01-14	1000	1,60	3,67	5,88	5	63	ResKno
WF19	100	0,71	15	10,71	12	76	GenLam
WF9	300	1,39	6,33	8,80	12,33	68	GenLam
WF28	400	0,79	9,67	7,67	5,33	64	GenLam
WF2	400	1,19	7	8,33	17,67	80	GenLam
WF29b	400	0,79	5,67	4,50	4	82	GenLam
WF45	400	1,25	14,67	18,33	23	16	GenLam
WF2	500	0,98	31,67	31,04	25	80	GenLam
WF34	500	1,74	6,67	11,62	13,67	68	GenLam
WF45	500	0,52	28,67	14,93	18	16	GenLam
WF38	600	1,18	5,33	6,27	17,67	54	GenLam
WF19	600	1,36	10,33	14,06	13	76	GenLam
WF15	600	0,43	14	6,06	5,33	79	GenLam
WF38	900	1,75	21,33	37,42	31	54	GenLam
WF45	900	0,78	30,33	23,70	22	16	GenLam
FS01-14	1000	1,60	17,67	28,34	28	63	GenLam
WF26	100	0,89	57	50,89	40,33	72	OstKno
WF37	300	1,12	40,67	45,86	61	87	OstKno
WF19	400	0,79	52,33	41,53	33,33	76	OstKno
WF37	600	1,46	30	43,90	45	87	OstKno
WF45	700	2,52	26,67	67,22	50,33	16	OstKno
WF45	100	0,73	29,33	21,57	23,67	16	FragKno
WF38	400	0,73	23,67	17,40	18	54	FragKno
WF26	400	1,95	9,67	18,83	17	72	FragKno
WF29b	400	0,79	21,33	16,93	16,33	82	FragKno
WF34	500	1,74	14,33	25	22,33	68	FragKno
WF37	600	1,46	20	29,27	30,67	87	FragKno
WF19	600	1,36	17,67	24,03	25,67	76	FragKno
WF29a	600	1,14	17,33	19,80	20	89	FragKno
WF45	600	0,84	26,33	22,12	21	16	FragKno
WF15	900	1,68	17	28,57	23,67	79	FragKno
WF5	1000	6,31	4	25,26	18,67	55	FragKno

Tabelle 16: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Test für alle untersuchten histomorphometrischen Parameter im periostalen Bereich der Femurkompakta über alle Verbrennungsstufen (RT-1000°C); der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur
SekOst	4,63E+06	0,978316453240612	***	RT
TypIIost	2,22E-07	0,858793308404289	***	RT
OstInt	1,76E+07	0,976573316381417	***	RT
OstFrag	0,00576875035338439	0,991926367862393	**	RT
OPD	1,03E+05	0,965959217285216	***	RT
ResLak	1,39E-04	0,894459489423854	***	RT
Havers	1,28E+07	0,9759789358971	***	RT
NonHavers	7,19E-22	0,504277316136897	***	RT
VolkM	1,16E-10	0,806215648571052	***	RT
ResKno	1,66E+00	0,934109639355679	***	RT
GenLam	3,64E-09	0,831748774058518	***	RT
OstKno	1,27E+00	0,933159506919366	***	RT
FragKno	0,00624779637318692	0,992020142838391	**	RT
OstFl	2,10E-11	0,792466950072714	***	RT
OstU	1,38E-09	0,824823156414473	***	RT
OstD	1,38E-09	0,824823156253012	***	RT
ResLakFl	4,31E-06	0,876178755595063	***	RT
AktFr	2,87E-18	0,626210921808181	***	RT
BFr	1,62E-24	0,395689991848164	***	RT
PctBfr	1,62E-24	0,39568999244778	***	RT
AOC	3,84E+00	0,937032088048386	***	RT
SekOst	0,0010602465769202	0,895522067084704	**	100
TypIIost	1,58E+08	0,778348439436305	***	100
OstInt	0,00125651048479953	0,898018615009268	**	100
OstFrag	0,546979269283478	0,976961388252297	N.S.	100
OPD	0,00608694975905242	0,920088022862023	**	100
ResLak	0,00297361076130045	0,910310956853959	**	100
Havers	0,00125651048479953	0,898018615009268	**	100
NonHavers	4,07E+05	0,625784783344219	***	100
VolkM	4,95E+09	0,845903587549246	***	100
ResKno	0,367763827907776	0,971407804389219	N.S.	100
GenLam	2,01E+09	0,829537598168161	***	100
OstKno	0,00460938830702594	0,916338862451375	**	100
FragKno	0,206975518869613	0,964120515565734	N.S.	100
OstFl	2,37E+03	0,449922192851665	***	100
OstU	2,66E+05	0,612912502855638	***	100
OstD	2,66E+05	0,612912501593819	***	100
ResLakFl	0,0109375345643242	0,927811453309013	*	100
AktFr	2,33E+04	0,533602866627513	***	100
BFr	2,48E+00	0,252450574170532	***	100
PctBfr	2,48E+01	0,252450573791886	***	100
AOC	0,0024591955450578	0,907652406982387	**	100
SekOst	0,02424177090655	0,93795003199921	*	200
TypIIost	4,31E+08	0,843427625312423	***	200
OstInt	0,0227965225498768	0,937179862299324	*	200
OstFrag	0,471208941408317	0,974788061803425	N.S.	200
OPD	0,140748142286664	0,959416815628088	N.S.	200
ResLak	0,0138663566577484	0,930873570628919	*	200
Havers	0,0227965225498768	0,937179862299324	*	200

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur
NonHavers	7,17E+02	0,402177914919124	***	200
VolkM	3,71E+09	0,84077042656418	***	200
ResKno	0,0730261969931779	0,951488067742195	N.S.	200
GenLam	2,21E+08	0,7855235606356	***	200
OstKno	0,039068513418912	0,943866675451081	*	200
FragKno	0,00208830592177367	0,90534112438581	**	200
OstFl	3,14E+05	0,618035361967738	***	200
OstU	3,01E+07	0,740834195563113	***	200
OstD	3,01E+07	0,740834194624602	***	200
ResLakFl	0,043594893485327	0,945211667666524	*	200
AktFr	1,09E+07	0,716065537348934	***	200
BFr	1,60E+02	0,33817964568793	***	200
PctBfr	1,60E+00	0,338179645634881	***	200
AOC	1,99E+08	0,783351595907226	***	200
SekOst	0,448452649978309	0,972563282624437	N.S.	300
TypIIost	3,33E+06	0,725187021897822	***	300
OstInt	0,376920901386416	0,970052280205188	N.S.	300
OstFrag	0,919444788968936	0,986759282261232	N.S.	300
OPD	0,197352701511781	0,961321853666406	N.S.	300
ResLak	0,0185477060385485	0,930428089651818	*	300
Havers	0,371953054135231	0,969864883242221	N.S.	300
NonHavers	5,74E+04	0,532587564522222	***	300
VolkM	6,85E+04	0,538812420469693	***	300
ResKno	0,0490681968420251	0,943323591425497	*	300
GenLam	0,0120760322220567	0,924565772137815	*	300
OstKno	0,0242691507142826	0,934042081838448	*	300
FragKno	0,652622843821847	0,978598453918623	N.S.	300
OstFl	2,43E+05	0,582105747063235	***	300
OstU	2,04E+07	0,71261921960847	***	300
OstD	2,04E+07	0,712619218876323	***	300
ResLakFl	0,447719709081592	0,972539077406578	N.S.	300
AktFr	8,37E+06	0,688842701904395	***	300
BFr	1,14E+05	0,556507607400952	***	300
PctBfr	1,14E+05	0,556507608051807	***	300
AOC	3,35E+09	0,827996721675045	***	300
SekOst	0,000462210842238396	0,882953523634723	***	400
TypIIost	5,29E+07	0,753984049833962	***	400
OstInt	0,000806894996951627	0,891455801016172	***	400
OstFrag	0,497816028388837	0,975573010198192	N.S.	400
OPD	0,140657456397918	0,959409007256652	N.S.	400
ResLak	0,0101584082162292	0,926850354522171	*	400
Havers	0,000806894996951627	0,891455801016172	***	400
NonHavers	3,24E+06	0,684531807358459	***	400
VolkM	8,08E+05	0,645947587468863	***	400
ResKno	0,0770928371877739	0,952143624206274	N.S.	400
GenLam	0,011373716735687	0,92831859884185	*	400
OstKno	0,0004591223837485	0,88284950605105	***	400
FragKno	0,383365482511805	0,971959565823106	N.S.	400
OstFl	1,44E+04	0,516704312059123	***	400
OstU	4,90E+04	0,631302662731326	***	400
OstD	4,90E+05	0,631302663348438	***	400
ResLakFl	0,476447912277794	0,974944779207843	N.S.	400
AktFr	1,18E+07	0,718085457052161	***	400
BFr	2,17E+04	0,531267857323506	***	400
PctBfr	2,17E+04	0,53126785693063	***	400
AOC	4,05E+02	0,378346256071666	***	400

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur
SekOst	0,0574354130156858	0,948575605572044	N.S.	500
TypII Ost	6,65E+09	0,85109308298719	***	500
OstInt	0,0549158641316351	0,948029959271277	N.S.	500
OstFrag	0,452007234382383	0,974203715018999	N.S.	500
OPD	0,541557752540389	0,976811643281431	N.S.	500
ResLak	0,00604428695019417	0,919993877567632	**	500
Havers	0,0549158641316351	0,948029959271277	N.S.	500
NonHavers	2,92E+03	0,457987228956681	***	500
VolkM	5,26E+08	0,803484036535401	***	500
ResKno	0,367223481262119	0,971388367448626	N.S.	500
GenLam	0,000540265204923995	0,885362857126386	***	500
OstKno	0,00769992408803598	0,923214193074944	**	500
FragKno	0,569598855459045	0,977578647016251	N.S.	500
OstFl	2,35E+05	0,609209976775829	***	500
OstU	4,84E+07	0,751896799011281	***	500
OstD	4,84E+07	0,751896797935359	***	500
ResLakFl	9,85E+08	0,857842406633137	***	500
AktFr	1,63E+06	0,665896902357497	***	500
BFr	1,81E+02	0,343734713940616	***	500
PctBfr	1,81E+02	0,34373471523718	***	500
AOC	1,65E+06	0,666191830025217	***	500
SekOst	0,00709671320212977	0,922133660229683	**	600
TypII Ost	2,28E+08	0,831846533911683	***	600
OstInt	0,00329294361014734	0,911726955903385	**	600
OstFrag	0,38331696377667	0,971957877310018	N.S.	600
OPD	0,00152471433056961	0,900832649167886	**	600
ResLak	0,0148988369284123	0,931793523688406	*	600
Havers	0,00927631794566671	0,925664031448978	**	600
NonHavers	3,07E+03	0,459871320676287	***	600
VolkM	0,000201515847316326	0,869754623616489	***	600
ResKno	0,400914844544658	0,972559841052755	N.S.	600
GenLam	5,68E+08	0,80504292522103	***	600
OstKno	0,452764883966566	0,974227082723767	N.S.	600
FragKno	0,168353104032554	0,961592007200616	N.S.	600
OstFl	1,64E+05	0,597978403927034	***	600
OstU	2,02E+07	0,731216757858091	***	600
OstD	2,02E+07	0,731216756976226	***	600
ResLakFl	0,0037828417911813	0,913639320664856	**	600
AktFr	6,58E+06	0,703196908709222	***	600
BFr	1,05E+04	0,505592358712344	***	600
PctBfr	1,05E+04	0,50559235791527	***	600
AOC	3,39E+04	0,546548586178211	***	600
SekOst	0,558352959775056	0,977273207777928	N.S.	700
TypII Ost	3,87E+08	0,797216169714908	***	700
OstInt	0,297724733024906	0,968667421100256	N.S.	700
OstFrag	0,382201580040956	0,971919014851355	N.S.	700
OPD	0,0155506127210706	0,932340502484975	*	700
ResLak	0,0378918323585571	0,943490611378591	*	700
Havers	0,28938428671579	0,968305670335257	N.S.	700
NonHavers	1,31E+04	0,513423415864585	***	700
VolkM	2,40E+07	0,735353099942564	***	700
ResKno	0,322404696002719	0,969689120433936	N.S.	700
GenLam	3,15E+07	0,741897373887777	***	700
OstKno	0,0505159474356709	0,947012513559222	N.S.	700
FragKno	0,662469422012845	0,980025132722406	N.S.	700
OstFl	1,19E+07	0,71816465994758	***	700

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur
OstU	3,25E+09	0,838357141296134	***	700
OstD	3,25E+09	0,83835714099316	***	700
ResLakFl	0,8489376988283	0,985057749195875	N.S.	700
AktFr	5,04E+09	0,846237267526593	***	700
BFr	2,30E+07	0,734384600155006	***	700
PctBfr	2,30E+07	0,73438460069445	***	700
AOC	3,32E+07	0,743130442756801	***	700
SekOst	0,00174420090926747	0,90277032564917	**	800
TypIIost	5,45E+07	0,754670598543305	***	800
OstInt	0,00128240354198371	0,898316795882701	**	800
OstFrag	0,295202045419973	0,968558940745307	N.S.	800
OPD	0,00435384816432458	0,915562767076253	**	800
ResLak	4,66E+09	0,844842741457436	***	800
Havers	0,00128240354198371	0,898316795882701	**	800
NonHavers	4,10E+03	0,470853894011206	***	800
VolkM	2,58E+01	0,2542914076548	***	800
ResKno	0,0433072232700816	0,945130569859733	*	800
GenLam	0,000577975264128786	0,886397794093806	***	800
OstKno	0,00186610256426673	0,903737984845273	**	800
FragKno	0,142116461638297	0,959534039919378	N.S.	800
OstFl	5,65E+03	0,482833633856848	***	800
OstU	1,51E+05	0,595285250949712	***	800
OstD	1,51E+05	0,595285251258842	***	800
ResLakFl	0,0160150905944449	0,93271584739155	*	800
AktFr	2,39E+04	0,534553914920026	***	800
BFr	1,84E+02	0,344381107515697	***	800
PctBfr	1,84E+02	0,344381106425256	***	800
AOC	0,424784228565971	0,973345474936055	N.S.	800
SekOst	0,157313062584091	0,960766769865736	N.S.	900
TypIIost	2,28E+08	0,786248446671594	***	900
OstInt	0,273441353075728	0,967588081332152	N.S.	900
OstFrag	0,079173662056003	0,952465635634942	N.S.	900
OPD	0,171601607234632	0,961824927390055	N.S.	900
ResLak	0,0093807559672129	0,925810542262113	**	900
Havers	0,273441353075728	0,967588081332152	N.S.	900
NonHavers	5,09E+02	0,478950009221633	***	900
VolkM	3,15E+05	0,618131242131286	***	900
ResKno	0,131555415202943	0,958599097500732	N.S.	900
GenLam	1,40E+09	0,822671655029363	***	900
OstKno	0,0599871420306546	0,949103809134516	N.S.	900
FragKno	0,100870375461216	0,955390639395078	N.S.	900
OstFl	2,23E+04	0,53216209448977	***	900
OstU	2,04E+06	0,672012159871773	***	900
OstD	2,04E+06	0,67201215938719	***	900
ResLakFl	0,0869512318335331	0,953597848113588	N.S.	900
AktFr	4,64E+04	0,557126331801655	***	900
BFr	3,59E+02	0,373333312384018	***	900
PctBfr	3,59E+02	0,373333312892048	***	900
AOC	9,74E+07	0,767768675831545	***	900
SekOst	0,0944989489315783	0,979520673784458	N.S.	1000
TypIIost	5,47E+06	0,876821675154697	***	1000
OstInt	0,209255363093973	0,98367119574765	N.S.	1000

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur
OstFrag	5,46E+08	0,918224738463334	***	1000
OPD	0,512242765930969	0,98879909039749	N.S.	1000
ResLak	2,49E+08	0,911832107148497	***	1000
Havers	0,208269824329769	0,983646023594523	N.S.	1000
NonHavers	2,12E+01	0,706069827443252	***	1000
VolkM	2,45E+02	0,747611064432186	***	1000
ResKno	8,19E+09	0,938336973317244	***	1000
GenLam	8,91E+06	0,903068071919527	***	1000
OstKno	0,00567810006270991	0,964619368303163	**	1000
FragKno	0,00808486388280894	0,96657218944853	**	1000
OstFl	1,47E-02	0,554146657215989	***	1000
OstU	4,63E+00	0,719852653804341	***	1000
OstD	4,63E+01	0,719852654793984	***	1000
ResLakFl	1,25E+07	0,905989833991085	***	1000
AktFr	4,04E-02	0,552429961714372	***	1000
BFr	1,96E-06	0,253181212368434	***	1000
PctBfr	1,96E-06	0,253181212429196	***	1000
AOC	9,08E-02	0,567711557534518	***	1000

Tabelle 17: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter über die Verbrennungstemperaturen (RT-1000°C); der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz	Temperatur
SekOst	0,0568778880273405	9136	N.S.	100
TypIIost	0,766078207885171	10795,5	N.S.	100
OstInt	0,0623767253376806	9177	N.S.	100
OstFrag	0,0973440962076002	9387	N.S.	100
OPD	0,0575506761238494	9138	N.S.	100
ResLak	0,334798567631565	12056	N.S.	100
Havers	0,0541488171643917	9113,5	N.S.	100
NonHavers	0,401841125456841	11925,5	N.S.	100
VolkM	0,0366796408026908	9063	*	100
ResKno	0,911549758798899	11202,5	N.S.	100
GenLam	0,000746313415819666	14550	***	100
OstKno	0,0718305044047273	9239	N.S.	100
FragKno	0,0498232949898468	9074	*	100
OstFl	0,946055910660603	11158	N.S.	100
OstU	0,946055910660603	11158	N.S.	100
OstD	0,946055910660603	11158	N.S.	100
ResLakFl	0,175183804255904	9697	N.S.	100
AktFr	0,0978397403898041	9387	N.S.	100
BFr	0,155514291025445	9628,5	N.S.	100
PctBfr	0,155514291025445	9628,5	N.S.	100
AOC	0,0575506761238494	9138	N.S.	100
SekOst	0,194697774260201	9758,5	N.S.	200
TypIIost	0,378649636980938	10222,5	N.S.	200
OstInt	0,237317430473284	9876	N.S.	200
OstFrag	0,32192115462211	10071,5	N.S.	200
OPD	0,24203951379072	9886,5	N.S.	200
ResLak	0,752181783122982	11405,5	N.S.	200
Havers	0,214502514348353	9815	N.S.	200

Parameter	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz	Temperatur
NonHavers	0,0147387159188941	13523	*	200
VolkM	0,455729727348862	10366	N.S.	200
ResKno	0,775632752906676	10795	N.S.	200
GenLam	0,00451632488845602	14003,5	**	200
OstKno	0,756057322834228	10768,5	N.S.	200
FragKno	0,00933313125892238	8419	**	200
OstFl	0,0696457926654091	12952	N.S.	200
OstU	0,0696457926654091	12952	N.S.	200
OstD	0,0696457926654091	12952	N.S.	200
ResLakFl	0,897988932051807	10956	N.S.	200
AktFr	0,7289203402726	10731,5	N.S.	200
BFr	0,589335034677335	11643	N.S.	200
PctBfr	0,589335034677335	11643	N.S.	200
AOC	0,24203951379072	9886,5	N.S.	200
SekOst	0,545444189832386	9700	N.S.	300
TypIIost	0,000974927536389328	13403	***	300
OstInt	0,859823048121788	10470,5	N.S.	300
OstFrag	0,000208812969119328	13952	***	300
OPD	0,00504760165494507	13063	**	300
ResLak	0,917428617715574	10195,5	N.S.	300
Havers	0,908688197165635	10409,5	N.S.	300
NonHavers	0,139302483518061	11715,5	N.S.	300
VolkM	8.10E+09	13934	***	300
ResKno	0,373923018725342	9418,5	N.S.	300
GenLam	0,000403583493775723	6805	***	300
OstKno	0,0775389618892547	12038,5	N.S.	300
FragKno	0,000838108025655117	13591,5	***	300
OstFl	0,141891282731368	11746,5	N.S.	300
OstU	0,141891282731368	11746,5	N.S.	300
OstD	0,141891282731368	11746,5	N.S.	300
ResLakFl	0,0276555230208372	8124,5	*	300
AktFr	0,007923283700539	12918	**	300
BFr	0,00303913910844681	13222,5	**	300
PctBfr	0,00303913910844681	13222,5	**	300
AOC	0,00504760165494507	13063	**	300
SekOst	0,0198155143112736	8700	*	400
TypIIost	0,119787113177806	12614	N.S.	400
OstInt	0,0696165290975565	9227,5	N.S.	400
OstFrag	0,252217266756285	9913	N.S.	400
OPD	0,151737377098132	9616	N.S.	400
ResLak	0,629158609275391	10603,5	N.S.	400
Havers	0,0624263008602646	9177,5	N.S.	400
NonHavers	0,041208070969959	9045,5	*	400
VolkM	0,00996452025422878	13568	**	400
ResKno	0,123909637353083	9508,5	N.S.	400
GenLam	0,238322159798803	12299	N.S.	400
OstKno	0,219432066205304	9826,5	N.S.	400
FragKno	0,459664526914749	11847,5	N.S.	400

Parameter	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz	Temperatur
OstFl	0,533879321018798	11727,5	N.S.	400
OstU	0,533879321018798	11727,5	N.S.	400
OstD	0,533879321018798	11727,5	N.S.	400
ResLakFl	0,0235019253321821	8764	*	400
AktFr	0,317184718884513	10060	N.S.	400
BFr	0,72161808550739	10721,5	N.S.	400
PctBfr	0,72161808550739	10721,5	N.S.	400
AOC	0,151737377098132	9616	N.S.	400
SekOst	0,0111068928296375	8485	*	500
TypIIost	0,865612792035797	11254,5	N.S.	500
OstInt	0,0240102004094701	8773,5	*	500
OstFrag	0,0555344632803896	9123,5	N.S.	500
OPD	0,0263523032613334	8807,5	*	500
ResLak	0,631370026277851	11569,5	N.S.	500
Havers	0,0207406739401318	8716,5	*	500
NonHavers	0,568562536648181	11658	N.S.	500
VolkM	0,732167263063934	11419	N.S.	500
ResKno	0,68844188854321	10676	N.S.	500
GenLam	0,0114417329325483	13684,5	*	500
OstKno	0,135451442593155	9554,5	N.S.	500
FragKno	0,120338641774077	9493	N.S.	500
OstFl	0,357066843592265	12034,5	N.S.	500
OstU	0,357066843592265	12034,5	N.S.	500
OstD	0,357066843592265	12034,5	N.S.	500
ResLakFl	0,0287363433163146	8844	*	500
AktFr	0,0977411083855635	9386,5	N.S.	500
BFr	0,225700989312297	9843	N.S.	500
PctBfr	0,225700989312297	9843	N.S.	500
AOC	0,0263523032613334	8807,5	*	500
SekOst	0,0132956207805357	8550,5	*	600
TypIIost	0,221750147467526	12287	N.S.	600
OstInt	0,0555043075884014	9124,5	N.S.	600
OstFrag	0,106004947137428	9429,5	N.S.	600
OPD	0,0487029695017449	9064	*	600
ResLak	0,551973604384651	10491	N.S.	600
Havers	0,106946186402564	9435	N.S.	600
NonHavers	0,353268369904229	12015,5	N.S.	600
VolkM	0,0577923607492521	9249,5	N.S.	600
ResKno	0,170080777853639	9679,5	N.S.	600
GenLam	0,225946894074932	12331,5	N.S.	600
OstKno	0,411668291418193	11931,5	N.S.	600
FragKno	0,236758803758962	9873	N.S.	600
OstFl	0,00736974717096165	13841	**	600
OstU	0,00736974717096165	13841	**	600
OstD	0,00736974717096165	13841	**	600
ResLakFl	0,260357588915824	9933	N.S.	600
AktFr	0,113779107477956	9463	N.S.	600
BFr	0,384668854741333	11981,5	N.S.	600

Parameter	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz	Temperatur
PctBfr	0,384668854741333	11981,5	N.S.	600
AOC	0,0487029695017449	9064	*	600
SekOst	0,000274310248082485	7358	***	700
TypIIost	0,0978935265724386	12710,5	N.S.	700
OstInt	0,00194497902879866	7910,5	**	700
OstFrag	0,197973465122974	9767	N.S.	700
OPD	0,00325848273486351	8067	**	700
ResLak	0,0491699268521747	9113,5	*	700
Havers	0,00146487618304098	7825,5	**	700
NonHavers	0,0479614346973401	9109	*	700
VolkM	0,372410195350689	11949	N.S.	700
ResKno	0,142398537725934	9582	N.S.	700
GenLam	0,95377911412517	11028	N.S.	700
OstKno	0,33327654450561	12082	N.S.	700
FragKno	0,464414130443612	11839,5	N.S.	700
OstFl	2,33E+09	15434,5	***	700
OstU	2,33E+09	15434,5	***	700
OstD	2,33E+09	15434,5	***	700
ResLakFl	0,696223307106583	10687	N.S.	700
AktFr	0,140912337469308	9575	N.S.	700
BFr	0,137270793912251	12615	N.S.	700
PctBfr	0,137270793912251	12615	N.S.	700
AOC	0,00325848273486351	8067	**	700
SekOst	3,06E+09	6814,5	***	800
TypIIost	0,0148253483556126	13477,5	*	800
OstInt	0,000641411397447441	7588	***	800
OstFrag	0,895293541178436	11223,5	N.S.	800
OPD	0,112658357912537	9459	N.S.	800
ResLak	0,0505807799716856	9128	N.S.	800
Havers	0,000517270642565021	7528,5	***	800
NonHavers	0,00235454738630886	8043,5	**	800
VolkM	0,00155996256488125	14129	**	800
ResKno	0,503542519921103	10401	N.S.	800
GenLam	0,00380287529636075	8116,5	**	800
OstKno	0,133040880194494	12631	N.S.	800
FragKno	0,250118626111707	12269	N.S.	800
OstFl	2,80E+06	16364,5	***	800
OstU	2,80E+06	16364,5	***	800
OstD	2,80E+06	16364,5	***	800
ResLakFl	0,226361269825029	12329,5	N.S.	800
AktFr	0,42218188687578	10263	N.S.	800
BFr	0,00475589284712965	13988,5	**	800
PctBfr	0,00475589284712965	13988,5	**	800
AOC	0,112658357912537	9459	N.S.	800
SekOst	2,81E+08	6286	***	900
TypIIost	0,0472499801779836	13034,5	*	900
OstInt	6,73E+08	7001	***	900
OstFrag	0,575716474550005	11662,5	N.S.	900

Parameter	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz	Temperatur
OPD	0,0254762222672441	8794	*	900
ResLak	0,000155130580693997	7290	***	900
Havers	5,69E+09	6960,5	***	900
NonHavers	5,38E+08	7044,5	***	900
VolkM	0,0029660909149235	13945,5	**	900
ResKno	0,00866653691251085	8393,5	**	900
GenLam	0,0291750509454675	8848,5	*	900
OstKno	0,133809640855607	12628	N.S.	900
FragKno	0,0059467156149701	13912	**	900
OstFl	3,65E+04	17527	***	900
OstU	3,65E+04	17527	***	900
OstD	3,65E+04	17527	***	900
ResLakFl	0,484860362001023	11805	N.S.	900
AktFr	0,324301173861909	10075	N.S.	900
BFr	0,000768515681434877	14544	***	900
PctBfr	0,000768515681434877	14544	***	900
AOC	0,0254762222672441	8794	*	900
SekOst	5,50E-11	9794	***	1000
TypIIost	0,000349068460503255	20913,5	***	1000
OstInt	8,84E-10	9867	***	1000
OstFrag	0,319872343863729	28326,5	N.S.	1000
OPD	2,15E+04	16653	***	1000
ResLak	0,262769318421733	28496,5	N.S.	1000
Havers	1,55E-09	9959,5	***	1000
NonHavers	4,40E+08	19994	***	1000
VolkM	0,211307541543317	28626	N.S.	1000
ResKno	0,00197930157773512	31835,5	**	1000
GenLam	4,91E+08	19024	***	1000
OstKno	0,0606354446820892	23525,5	N.S.	1000
FragKno	2,89E+07	35243	***	1000
OstFl	3,87E-12	44359	***	1000
OstU	3,87E-12	44359	***	1000
OstD	3,87E-12	44359	***	1000
ResLakFl	0,000776036827401243	32280	***	1000
AktFr	3,29E+06	17418	***	1000
BFr	0,00574460892458569	31286	**	1000
PctBfr	0,00574460892458569	31286	**	1000
AOC	1,42E+06	17181	***	1000

Tabelle 18: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter über die Verbrennungstemperaturen mit der unverbrannten Referenzprobe; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und *für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Position	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
ResLak	2	100	0,00415901618852655	1194	**
OstKno	2	100	0,0129785889149648	604	*
FragKno	3	200	0,0463154705299958	659	*
TypII Ost	4	300	0,0474687763485931	1013,5	*
OstFrag	4	300	2,34E+09	1265,5	***
OPD	4	300	0,00230535557876915	1141,5	**
NonHavers	4	300	0,0302938081113744	1042,5	*
VolkM	4	300	0,000420528989886191	1152,5	***
GenLam	4	300	1,16E+09	355	***
FragKno	4	300	9,94E+08	1286,5	***
AktFr	4	300	0,00753390560255828	1100	**
BFr	4	300	0,0109219457514021	1087	*
PctBfr	4	300	0,0109219457514021	1087	*
AOC	4	300	0,00230535557876915	1141,5	**
SekOst	5	400	0,02330854208839	629	*
OstInt	5	400	0,0315599067576861	642	*
Havers	5	400	0,0288145094186118	638	*
NonHavers	5	400	0,041507292576765	659	*
FragKno	5	400	0,0063914971127679	1187	**
ResLakFl	6	500	0,0487651790033448	661,5	*
VolkM	7	600	0,0301596287696944	652	*
SekOst	8	700	0,00199339464559854	536,5	**
OstInt	8	700	0,00318008562244331	552,5	**
OPD	8	700	0,00705006714368011	580,5	**
Havers	8	700	0,00274776343924886	547,5	**
OstFl	8	700	0,0042409989923362	1202	**
OstU	8	700	0,0042409989923362	1202	**
OstD	8	700	0,0042409989923362	1202	**
AktFr	8	700	0,0328717349693403	643	*
AOC	8	700	0,00705006714368011	580,5	**
SekOst	9	800	0,000452683422246419	490,5	***
OstInt	9	800	0,000545239274852792	496	***
Havers	9	800	0,00053634010859893	495,5	***
OstFl	9	800	0,0012779962116538	1242,5	**
OstU	9	800	0,0012779962116538	1242,5	**
OstD	9	800	0,0012779962116538	1242,5	**
ResLakFl	9	800	0,0492731825250281	1102	*
SekOst	10	900	9,10E+08	386,5	***
OstInt	10	900	3,91E+09	422,5	***

Parameter	Position	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
OPD	10	900	0,00101765244880945	514,5	**
ResLak	10	900	0,0282817005904156	642	*
Havers	10	900	3,22E+09	417,5	***
NonHavers	10	900	0,00448108060212484	571	**
OstFl	10	900	2,27E+07	1461	***
OstU	10	900	2,27E+07	1461	***
OstD	10	900	2,27E+07	1461	***
AktFr	10	900	0,00773481173828154	586	**
AOC	10	900	0,00101765244880945	514,5	**
SekOst	11	1000	2,68E+07	226,5	***
OstInt	11	1000	7,48E+07	245,5	***
OPD	11	1000	0,000141229159235667	355	***
Havers	11	1000	2,25E+08	266,5	***
NonHavers	11	1000	0,0276724856131128	513	*
VolkM	11	1000	0,0148857391736848	918	*
OstFl	11	1000	2,54E+07	1218	***
OstU	11	1000	2,54E+07	1218	***
OstD	11	1000	2,54E+07	1218	***
AktFr	11	1000	0,000537013738685106	394	***
AOC	11	1000	0,00067275612035188	394	***

Tabelle 19: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter zwischen aufeinanderfolgenden Temperaturstufen; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Temperatur1	Temperatur2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
SekOst	0	100	0,0568778880273405	9136	N.S.
TypII Ost	0	100	0,766078207885171	10795,5	N.S.
OstInt	0	100	0,0623767253376806	9177	N.S.
OstFrag	0	100	0,0973440962076002	9387	N.S.
OPD	0	100	0,0575506761238494	9138	N.S.
ResLak	0	100	0,334798567631565	12056	N.S.
Havers	0	100	0,0541488171643917	9113,5	N.S.
NonHavers	0	100	0,401841125456841	11925,5	N.S.
VolkM	0	100	0,0366796408026908	9063	*
ResKno	0	100	0,911549758798899	11202,5	N.S.
GenLam	0	100	0,000746313415819666	14550	***
OstKno	0	100	0,0718305044047273	9239	N.S.
FragKno	0	100	0,0498232949898468	9074	*
OstFl	0	100	0,946055910660603	11158	N.S.
OstU	0	100	0,946055910660603	11158	N.S.
OstD	0	100	0,946055910660603	11158	N.S.
ResLakFl	0	100	0,175183804255904	9697	N.S.
AktFr	0	100	0,0978397403898041	9387	N.S.
BFr	0	100	0,155514291025445	9628,5	N.S.
PctBfr	0	100	0,155514291025445	9628,5	N.S.
AOC	0	100	0,0575506761238494	9138	N.S.

Parameter	Temperatur1	Temperatur2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
SekOst	100	200	0,696281411271403	926	N.S.
TypII Ost	100	200	0,700307625606547	840,5	N.S.
OstInt	100	200	0,605929911970213	940	N.S.
OstFrag	100	200	0,666986530744441	930,5	N.S.
OPD	100	200	0,606621615865361	940	N.S.
ResLak	100	200	0,694155920527677	838,5	N.S.
Havers	100	200	0,605929911970213	940	N.S.
NonHavers	100	200	0,169438242150112	1029,5	N.S.
VolkM	100	200	0,299154844168082	993,5	N.S.
ResKno	100	200	0,706738748768984	839,5	N.S.
GenLam	100	200	0,596930478965333	822,5	N.S.
OstKno	100	200	0,276702747311507	1004	N.S.
FragKno	100	200	0,563595399946015	817	N.S.
OstFl	100	200	0,186951589249851	1030	N.S.
OstU	100	200	0,186951589249851	1030	N.S.
OstD	100	200	0,186951589249851	1030	N.S.
ResLakFl	100	200	0,289935314392134	1000,5	N.S.
AktFr	100	200	0,39983537158018	977	N.S.
BFr	100	200	0,108586295337115	1062	N.S.
PctBfr	100	200	0,108586295337115	1062	N.S.
AOC	100	200	0,606621615865361	940	N.S.
SekOst	200	300	0,64229249675372	868,5	N.S.
TypII Ost	200	300	0,00282037854155347	1117	**
OstInt	200	300	0,370390407779382	914	N.S.
OstFrag	200	300	0,00101153293341617	1166,5	**
OPD	200	300	0,00488432794954384	1117	**
ResLak	200	300	0,746745472746519	785	N.S.
Havers	200	300	0,370384973887352	914	N.S.
NonHavers	200	300	0,510817844166762	752,5	N.S.
VolkM	200	300	0,000170601484960323	1178	***
ResKno	200	300	0,498677658319202	747	N.S.
GenLam	200	300	9,13E+08	349,5	***
OstKno	200	300	0,126630100897845	981	N.S.
FragKno	200	300	2,15E+09	1268,5	***
OstFl	200	300	0,684371287591358	775,5	N.S.
OstU	200	300	0,684371287591358	775,5	N.S.
OstD	200	300	0,684371287591358	775,5	N.S.
ResLakFl	200	300	0,150109289687148	666,5	N.S.
AktFr	200	300	0,0263341643739326	1054,5	*
BFr	200	300	0,0599757597494846	1018,5	N.S.
PctBfr	200	300	0,0599757597494846	1018,5	N.S.
AOC	200	300	0,00488432794954384	1117	**
SekOst	300	400	0,220582729932707	689,5	N.S.
TypII Ost	300	400	0,132318531013769	672,5	N.S.
OstInt	300	400	0,120850728017615	655	N.S.
OstFrag	300	400	0,00268912668084722	501,5	**
OPD	300	400	0,00274951442949964	502	**
ResLak	300	400	0,792979894519801	791,5	N.S.

Parameter	Temperatur1	Temperatur2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
Havers	300	400	0,120846500201821	655	N.S.
NonHavers	300	400	0,0184755787760135	575,5	*
VolkM	300	400	0,248193639280875	719,5	N.S.
ResKno	300	400	0,715626556431019	780	N.S.
GenLam	300	400	0,000324450414021889	1199,5	***
OstKno	300	400	0,0275454196003525	585,5	*
FragKno	300	400	0,0783718176855674	632,5	N.S.
OstFl	300	400	0,535774589031183	753	N.S.
OstU	300	400	0,535774589031183	753	N.S.
OstD	300	400	0,535774589031183	753	N.S.
ResLakFl	300	400	0,981115710583242	822	N.S.
AktFr	300	400	0,00631225953405969	532	**
BFr	300	400	0,0118719166320313	554	*
PctBfr	300	400	0,0118719166320313	554	*
AOC	300	400	0,00274951442949964	502	**
SekOst	400	500	0,614940683633119	825,5	N.S.
TypIIost	400	500	0,218553000927351	753	N.S.
OstInt	400	500	0,475283204918014	802	N.S.
OstFrag	400	500	0,670580430232549	834	N.S.
OPD	400	500	0,61599053507242	825,5	N.S.
ResLak	400	500	0,416432262252962	970	N.S.
Havers	400	500	0,475283204918014	802	N.S.
NonHavers	400	500	0,0626724412850973	1085,5	N.S.
VolkM	400	500	0,0784063898379145	704	N.S.
ResKno	400	500	0,344641022763576	988	N.S.
GenLam	400	500	0,302947619971302	997,5	N.S.
OstKno	400	500	0,771089316076927	849	N.S.
FragKno	400	500	0,097525842935144	696,5	N.S.
OstFl	400	500	0,720412400398935	922,5	N.S.
OstU	400	500	0,720412400398935	922,5	N.S.
OstD	400	500	0,720412400398935	922,5	N.S.
ResLakFl	400	500	0,847184238370613	904	N.S.
AktFr	400	500	0,614995153088456	825	N.S.
BFr	400	500	0,565798569682847	817	N.S.
PctBfr	400	500	0,565798569682847	817	N.S.
AOC	400	500	0,61599053507242	825,5	N.S.
SekOst	500	600	0,743171702471245	919	N.S.
TypIIost	500	600	0,382831411679945	974	N.S.
OstInt	500	600	0,574857513147134	945	N.S.
OstFrag	500	600	0,743635201934008	919	N.S.
OPD	500	600	0,743710534954374	919	N.S.
ResLak	500	600	0,377341220842036	786	N.S.
Havers	500	600	0,445593380166956	967,5	N.S.
NonHavers	500	600	0,773264127307918	913,5	N.S.
VolkM	500	600	0,0993648822287436	706	N.S.
ResKno	500	600	0,328858070269154	772,5	N.S.
GenLam	500	600	0,342307899484171	775,5	N.S.
OstKno	500	600	0,0823676363301279	1076,5	N.S.

Parameter	Temperatur1	Temperatur2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
FragKno	500	600	0,847325940393565	904	N.S.
OstFl	500	600	0,191474097297978	1028,5	N.S.
OstU	500	600	0,191474097297978	1028,5	N.S.
OstD	500	600	0,191474097297978	1028,5	N.S.
ResLakFl	500	600	0,527596137197205	953	N.S.
AktFr	500	600	0,946793160985394	890	N.S.
BFr	500	600	0,151747054030901	1043	N.S.
PctBfr	500	600	0,151747054030901	1043	N.S.
AOC	500	600	0,743710534954374	919	N.S.
SekOst	600	700	0,139071883018286	716,5	N.S.
TypIIost	600	700	0,776651629052753	912	N.S.
OstInt	600	700	0,165765471504041	727	N.S.
OstFrag	600	700	0,896513681891773	897	N.S.
OPD	600	700	0,347057152898891	776,5	N.S.
ResLak	600	700	0,274834901510789	762,5	N.S.
Havers	600	700	0,118604693287171	707,5	N.S.
NonHavers	600	700	0,0522314247952918	669,5	N.S.
VolkM	600	700	0,0492851034987986	1091	*
ResKno	600	700	0,960705540580488	888	N.S.
GenLam	600	700	0,39223505807764	786	N.S.
OstKno	600	700	0,907350349091145	895,5	N.S.
FragKno	600	700	0,21317461009624	1021,5	N.S.
OstFl	600	700	0,178146324331956	1033	N.S.
OstU	600	700	0,178146324331956	1033	N.S.
OstD	600	700	0,178146324331956	1033	N.S.
ResLakFl	600	700	0,504535389061073	957	N.S.
AktFr	600	700	0,960968412335874	888	N.S.
BFr	600	700	0,54192231512329	951	N.S.
PctBfr	600	700	0,54192231512329	951	N.S.
AOC	600	700	0,347057152898891	776,5	N.S.
SekOst	700	800	0,676742002697557	929	N.S.
TypIIost	700	800	0,454478075594054	960	N.S.
OstInt	700	800	0,618461823981435	938	N.S.
OstFrag	700	800	0,277648919171419	1003,5	N.S.
OPD	700	800	0,246259023963522	1012	N.S.
ResLak	700	800	0,820905977303964	907	N.S.
Havers	700	800	0,612145829611498	939	N.S.
NonHavers	700	800	0,518952327596413	810,5	N.S.
VolkM	700	800	0,0863509236531828	1050	N.S.
ResKno	700	800	0,420135103426315	972,5	N.S.
GenLam	700	800	0,0349586154400031	646	*
OstKno	700	800	0,64795481963944	933,5	N.S.
FragKno	700	800	0,886008784220319	898,5	N.S.
OstFl	700	800	0,791820326948082	912	N.S.
OstU	700	800	0,791820326948082	912	N.S.
OstD	700	800	0,791820326948082	912	N.S.
ResLakFl	700	800	0,174772902605615	1034	N.S.
AktFr	700	800	0,512793804066008	956	N.S.

Parameter	Temperatur1	Temperatur2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
BFr	700	800	0,462471847258501	965	N.S.
PctBfr	700	800	0,462471847258501	965	N.S.
AOC	700	800	0,246259023963522	1012	N.S.
SekOst	800	900	0,215855535396092	743,5	N.S.
TypIIost	800	900	0,77491467833759	852	N.S.
OstInt	800	900	0,279857109875365	761	N.S.
OstFrag	800	900	0,750169104321721	918	N.S.
OPD	800	900	0,533782195072296	812	N.S.
ResLak	800	900	0,0745312511852899	688,5	N.S.
Havers	800	900	0,279857109875365	761	N.S.
NonHavers	800	900	0,61579583879585	826,5	N.S.
VolkM	800	900	0,844718606077938	863,5	N.S.
ResKno	800	900	0,0760962051898701	683,5	N.S.
GenLam	800	900	0,470832010800844	963	N.S.
OstKno	800	900	0,957161802418507	888,5	N.S.
FragKno	800	900	0,158103396421669	1040	N.S.
OstFl	800	900	0,0149515524581242	1154,5	*
OstU	800	900	0,0149515524581242	1154,5	*
OstD	800	900	0,0149515524581242	1154,5	*
ResLakFl	800	900	0,683231705557317	836	N.S.
AktFr	800	900	0,792921447600045	852	N.S.
BFr	800	900	0,30317094912461	998	N.S.
PctBfr	800	900	0,30317094912461	998	N.S.
AOC	800	900	0,533782195072296	812	N.S.
SekOst	900	1000	0,0407380313484834	1659,5	*
TypIIost	900	1000	0,000617908523503849	1373,5	***
OstInt	900	1000	0,00931487397469825	1534,5	**
OstFrag	900	1000	0,876446319958654	2156,5	N.S.
OPD	900	1000	0,0906529235384226	1739	N.S.
ResLak	900	1000	0,000172602671806347	2953,5	***
Havers	900	1000	0,0103245878496373	1542,5	*
NonHavers	900	1000	0,360599138152276	2324,5	N.S.
VolkM	900	1000	0,0529361826621624	1727	N.S.
ResKno	900	1000	5,59E+09	3029,5	***
GenLam	900	1000	0,328938067240485	1900,5	N.S.
OstKno	900	1000	0,0219957814288444	1604	*
FragKno	900	1000	0,377044423327562	2320,5	N.S.
OstFl	900	1000	0,381345822771641	2319	N.S.
OstU	900	1000	0,381345822771641	2319	N.S.
OstD	900	1000	0,381345822771641	2319	N.S.
ResLakFl	900	1000	0,0987075730713061	2493	N.S.
AktFr	900	1000	0,0113081375555407	1549	*
BFr	900	1000	0,0751500381263876	1719	N.S.
PctBfr	900	1000	0,0751500381263876	1719	N.S.
AOC	900	1000	0,132146172785222	1781	N.S.

Tabelle 20: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter zwischen den Positionen der anterioren Femurdiaphyse ; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und *für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Position1	Position2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
TypIIost	1	2	0,0170784910002888	1136,5	*
ResLak	1	2	0,00444877746161786	571,5	**
ResKno	1	2	0,0173665035766408	616	*
OstKno	1	2	0,0252343749938127	1132,5	*
SekOst	1	3	0,0363720211520613	648,5	*
FragKno	1	3	0,0242985340028957	1134	*
OstFl	1	3	0,0222564998542557	1138	*
OstU	1	3	0,0222564998542557	1138	*
OstD	1	3	0,0222564998542557	1138	*
TypIIost	1	5	0,0137606212317347	1147	*
VolkM	1	5	0,012203995475635	1146	*
FragKno	1	6	0,0285422224237418	1127	*
TypIIost	1	7	0,0219711167717823	1127,5	*
VolkM	1	7	0,0391303851041708	1100,5	*
FragKno	1	7	0,00605419433158318	1189	**
TypIIost	1	8	0,0046581552283191	1181	**
OstFrag	1	8	0,0491568295477341	1102	*
ResLak	1	8	0,00395990782238048	566,5	**
VolkM	1	8	0,0183266532264675	1131	*
ResKno	1	8	0,0104270212699738	595,5	*
GenLam	1	8	0,000431240078487252	488,5	***
OstKno	1	8	0,0107236117813953	1167,5	*
FragKno	1	8	0,000191377671369138	1299	***
AktFr	1	8	0,0328717349693403	1121	*
BFr	1	8	0,0137146239968172	1158	*
PctBfr	1	8	0,0137146239968172	1158	*
TypIIost	1	9	0,000168809204744967	1282	***
ResKno	1	9	0,0308673667997197	640,5	*
GenLam	1	9	0,00364428573235912	557	**
OstKno	1	9	0,00309680997265795	1213	**
FragKno	1	9	0,00286316685741067	1215,5	**
AktFr	1	9	0,0404988140062313	1111	*
BFr	1	9	0,0128451715490267	1159	*
PctBfr	1	9	0,0128451715490267	1159	*
TypIIost	1	10	0,00156161210641265	1220	**
OstFrag	1	10	0,00245900773348503	1220,5	**
OPD	1	10	0,00784388189623439	1179,5	**
VolkM	1	10	0,00455374319589233	1179,5	**
GenLam	1	10	3,47E+08	363,5	***
OstKno	1	10	0,00213986941478082	1225,5	**

Parameter	Position1	Position2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
FragKno	1	10	0,00100124436387924	1250	**
AktFr	1	10	0,00239821523940406	1218	**
BFr	1	10	0,00464792432437411	1196	**
PctBfr	1	10	0,00464792432437411	1196	**
AOC	1	10	0,00784388189623439	1179,5	**
SekOst	1	11	0,01030953680329	1090	*
TypIIost	1	11	5,91E+08	1223	***
OstInt	1	11	0,000550721008754344	1184	***
OstFrag	1	11	0,000956540136691043	1168,5	***
OPD	1	11	0,000491385057090329	1188	***
Havers	1	11	0,000514151304004564	1186	***
VolkM	1	11	0,0107855046873249	1073	*
GenLam	1	11	1,60E+09	362,5	***
OstKno	1	11	0,00592387649688647	1110,5	**
FragKno	1	11	0,00088283732450361	1171	***
AktFr	1	11	0,000588439768181232	1177	***
BFr	1	11	0,00908643223603358	1095,5	**
PctBfr	1	11	0,00908643223603358	1095,5	**
AOC	1	11	0,000491385057090329	1188	***
ResLak	2	6	0,0379526030116367	1105,5	*
OstKno	2	6	0,0224254192615438	626,5	*
FragKno	2	7	0,0298427948355884	1125	*
GenLam	2	8	0,00939261032585743	591,5	**
FragKno	2	8	0,00238829772276063	1221,5	**
GenLam	2	9	0,0345279994507748	645,5	*
FragKno	2	9	0,0245630644976344	1133,5	*
OstFrag	2	10	0,0103588726379733	1168,5	*
OPD	2	10	0,0137919675829512	1157,5	*
VolkM	2	10	0,0443787755925583	1089,5	*
GenLam	2	10	0,000254370443286863	473	***
FragKno	2	10	0,00675653835744021	1185	**
AktFr	2	10	0,0175398571588262	1148	*
AOC	2	10	0,0137919675829512	1157,5	*
SekOst	2	11	0,00310460025696413	1131,5	**
TypIIost	2	11	0,0373563337651868	1023	*
OstInt	2	11	0,00175789782651143	1149	**
OstFrag	2	11	0,003100808354883	1132	**
OPD	2	11	0,000430274119167463	1191,5	***
Havers	2	11	0,00163096711529065	1151,5	**
GenLam	2	11	0,000899265945806096	467,5	***
FragKno	2	11	0,00420656742977498	1122	**
OstFl	2	11	0,0107044457281586	548,5	*

Parameter	Position1	Position2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
OstU	2	11	0,0107044457281586	548,5	*
OstD	2	11	0,0107044457281586	548,5	*
AktFr	2	11	0,00304419668828869	1133	**
AOC	2	11	0,000430274119167463	1191,5	***
SekOst	3	5	0,039010878665346	1112,5	*
Havers	3	5	0,04753657590135	1103,5	*
VolkM	3	5	0,0260775063238342	1115,5	*
FragKno	3	5	0,011543233050784	599,5	*
SekOst	3	8	0,0389361367805616	1112,5	*
OstInt	3	8	0,0431211656548279	1108	*
OPD	3	8	0,0377470687680808	1114,5	*
Havers	3	8	0,0378440964543954	1114	*
VolkM	3	8	0,0417128923012774	1096	*
GenLam	3	8	0,0150598638467759	610	*
OstKno	3	8	0,0361463018795907	1116,5	*
AOC	3	8	0,0377470687680808	1114,5	*
SekOst	3	9	0,0364597965683232	1115,5	*
TypIIost	3	9	0,0283339455031477	1112	*
OstInt	3	9	0,024935324835059	1132,5	*
Havers	3	9	0,024359759138785	1133,5	*
GenLam	3	9	0,0385970459360033	650,5	*
OstKno	3	9	0,0246496494894798	1133,5	*
SekOst	3	10	0,00344520050207595	1208,5	**
OstInt	3	10	0,00412371727128185	1202,5	**
OstFrag	3	10	0,0442372217784074	1107	*
OPD	3	10	0,00286161095400101	1215,5	**
Havers	3	10	0,00346783350818087	1208,5	**
VolkM	3	10	0,0105402566832894	1149	*
GenLam	3	10	0,000725454551251432	504	***
OstKno	3	10	0,0136435576894044	1158	*
OstFl	3	10	0,0324886058910438	642,5	*
OstU	3	10	0,0324886058910438	642,5	*
OstD	3	10	0,0324886058910438	642,5	*
AktFr	3	10	0,00413446391343935	1200	**
AOC	3	10	0,00286161095400101	1215,5	**
SekOst	3	11	4,34E+09	1251	***
TypIIost	3	11	0,0118650335882604	1068	*
OstInt	3	11	2,29E+09	1266,5	***
OstFrag	3	11	0,0216882264115412	1062	*
OPD	3	11	0,000148171103420997	1220,5	***
Havers	3	11	2,11E+09	1268,5	***
VolkM	3	11	0,0236899116467505	1043,5	*

Parameter	Position1	Position2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
GenLam	3	11	0,00183002295760902	489	**
OstKno	3	11	0,0165003533952084	1073	*
OstFl	3	11	0,000906482969723568	467,5	***
OstU	3	11	0,000906482969723568	467,5	***
OstD	3	11	0,000906482969723568	467,5	***
AktFr	3	11	0,000610720327362032	1176	***
AOC	3	11	0,000148171103420997	1220,5	***
VolkM	4	5	0,0427959146469789	1093,5	*
FragKno	4	7	0,0135973818877198	1158	*
VolkM	4	8	0,0413086903337182	1095	*
GenLam	4	8	0,000848721174980944	509	***
OstKno	4	8	0,0129574785554804	1160	*
FragKno	4	8	0,000807169672621361	1256,5	***
GenLam	4	9	0,00420215538710554	562	**
OstKno	4	9	0,0112716893662896	1165,5	*
FragKno	4	9	0,0161837158695899	1151	*
SekOst	4	10	0,0272601555399561	1128,5	*
OstInt	4	10	0,0303342216758074	1124	*
OstFrag	4	10	0,00453969544363085	1199	**
OPD	4	10	0,00901265047502384	1174	**
Havers	4	10	0,0243648344961517	1133,5	*
VolkM	4	10	0,0188645145864551	1125	*
GenLam	4	10	8,93E+08	385,5	***
OstKno	4	10	0,0040497256549118	1203,5	**
FragKno	4	10	0,00274002634853095	1217	**
AktFr	4	10	0,00752460298948525	1179	**
BFr	4	10	0,0451639476923226	1106	*
PctBfr	4	10	0,0451639476923226	1106	*
AOC	4	10	0,00901265047502384	1174	**
SekOst	4	11	0,000492490617031131	1187	***
TypII Ost	4	11	0,0494702235546172	1012,5	*
OstInt	4	11	0,000167441850831213	1216,5	***
OstFrag	4	11	0,00122099484807303	1161	**
OPD	4	11	0,000112812112185838	1227,5	***
Havers	4	11	0,000164210092454046	1217	***
VolkM	4	11	0,0439631361050926	1019	*
GenLam	4	11	7,81E+09	401	***
OstKno	4	11	0,0098137216609417	1092,5	**
FragKno	4	11	0,00111675792716912	1164	**
OstFl	4	11	0,0300303230367377	589	*
OstU	4	11	0,0300303230367377	589	*
OstD	4	11	0,0300303230367377	589	*

Parameter	Position1	Position2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
AktFr	4	11	0,000566908555199334	1178	***
AOC	4	11	0,000112812112185838	1227,5	***
FragKno	5	6	0,0140835037648977	1156,5	*
FragKno	5	7	0,00439920079418342	1200,5	**
ResLak	5	8	0,00604150506079687	583	**
ResKno	5	8	0,0288062229421082	637,5	*
GenLam	5	8	0,0066637130698273	578,5	**
FragKno	5	8	0,000215193087112713	1295,5	***
GenLam	5	9	0,00915826640998937	590,5	**
FragKno	5	9	0,00269669617334279	1217,5	**
OstFrag	5	10	0,0173568303901128	1148	*
GenLam	5	10	0,000146710884683784	457,5	***
FragKno	5	10	0,00066595027718797	1262,5	***
AktFr	5	10	0,0233468431675766	1135	*
SekOst	5	11	0,00752801236643798	1101	**
OstInt	5	11	0,00498242497432601	1115,5	**
OstFrag	5	11	0,0068949239896671	1105	**
OPD	5	11	0,00261724328011175	1137,5	**
Havers	5	11	0,00424242800861639	1121	**
GenLam	5	11	0,000839284322315799	465,5	***
FragKno	5	11	0,00106091165581707	1165,5	**
OstFl	5	11	0,0465999335176903	608	*
OstU	5	11	0,0465999335176903	608	*
OstD	5	11	0,0465999335176903	608	*
AktFr	5	11	0,00667257608609311	1106,5	**
AOC	5	11	0,00261724328011175	1137,5	**
OstFrag	6	8	0,0367521517177233	1115,5	*
OPD	6	8	0,0361699053146364	1116,5	*
ResLak	6	8	0,0302619450779204	647,5	*
GenLam	6	8	0,0191877980498335	620	*
OstKno	6	8	0,00499710287842326	1196	**
AktFr	6	8	0,0175398571588262	1148	*
BFr	6	8	0,0163038462447453	1151	*
PctBfr	6	8	0,0163038462447453	1151	*
AOC	6	8	0,0361699053146364	1116,5	*
TypII Ost	6	9	0,0135861799895404	1139,5	*
OstKno	6	9	0,00220431853605272	1224,5	**
AktFr	6	9	0,0239108631282091	1134	*
BFr	6	9	0,00998085899578548	1170,5	**
PctBfr	6	9	0,00998085899578548	1170,5	**
OstInt	6	10	0,0145541524381143	1155	*
OstFrag	6	10	0,00363672190938723	1207	**

Parameter	Position1	Position2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
OPD	6	10	0,0025493588079678	1219,5	**
Havers	6	10	0,0131499765832407	1159	*
VolkM	6	10	0,0211323383653474	1121,5	*
GenLam	6	10	0,000464049491140025	490,5	***
OstKno	6	10	0,000855043412592129	1255	***
AktFr	6	10	0,000419082977718272	1270	***
BFr	6	10	0,00329489850659418	1211	**
PctBfr	6	10	0,00329489850659418	1211	**
AOC	6	10	0,0025493588079678	1219,5	**
SekOst	6	11	0,000329127613760405	1198,5	***
TypIIost	6	11	0,00504922256697448	1095,5	**
OstInt	6	11	9,23E+09	1232	***
OstFrag	6	11	0,000908257019663735	1170	***
OPD	6	11	0,000130198144507275	1224	***
Havers	6	11	8,56E+09	1234	***
VolkM	6	11	0,0471194242261194	1014,5	*
GenLam	6	11	0,00127454918005978	478	**
OstKno	6	11	0,00468906244081484	1118,5	**
FragKno	6	11	0,0234499974555528	1059	*
AktFr	6	11	6,10E+09	1233	***
BFr	6	11	0,0087168702650608	1097	**
PctBfr	6	11	0,0087168702650608	1097	**
AOC	6	11	0,000130198144507275	1224	***
OstKno	7	9	0,0327797501481726	1121	*
SekOst	7	10	0,032062675035393	1121,5	*
OstInt	7	10	0,0264171137814563	1130	*
OPD	7	10	0,022904781112899	1136,5	*
Havers	7	10	0,0240500689111535	1134	*
GenLam	7	10	0,00723289471855834	581,5	**
OstKno	7	10	0,0194746735468828	1143,5	*
AktFr	7	10	0,0112055923148793	1166	*
AOC	7	10	0,022904781112899	1136,5	*
SekOst	7	11	0,000932499081275555	1169	***
TypIIost	7	11	0,0443288767479669	1016,5	*
OstInt	7	11	0,00042827617941337	1191	***
OstFrag	7	11	0,0360000853565082	1041	*
OPD	7	11	0,000472333855057852	1189	***
Havers	7	11	0,000436359561699865	1190,5	***
GenLam	7	11	0,0167077930652279	565,5	*
OstKno	7	11	0,0333489860547297	1044,5	*
OstFl	7	11	0,0192970112981196	571	*
OstU	7	11	0,0192970112981196	571	*

Parameter	Position1	Position2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
OstD	7	11	0,0192970112981196	571	*
AktFr	7	11	0,00156832783014576	1154	**
AOC	7	11	0,000472333855057852	1189	***
SekOst	8	11	0,00942271938740592	1093,5	**
OstInt	8	11	0,00519208737552509	1114,5	**
OPD	8	11	0,0344872528936648	1043	*
Havers	8	11	0,00627146397210572	1108	**
OstFl	8	11	0,00178006743700323	488	**
OstU	8	11	0,00178006743700323	488	**
OstD	8	11	0,00178006743700323	488	**
AOC	8	11	0,0344872528936648	1043	*
SekOst	9	11	0,00939284372728223	1093,5	**
OstInt	9	11	0,0085902724239306	1096,5	**
OPD	9	11	0,00966237388161696	1093	**
Havers	9	11	0,00922134475454429	1094	**
OstFl	9	11	0,00393752001799585	513,5	**
OstU	9	11	0,00393752001799585	513,5	**
OstD	9	11	0,00393752001799585	513,5	**
AktFr	9	11	0,0472886297166051	1029	*
AOC	9	11	0,00966237388161696	1093	**

Tabelle 21: Tabelle der mittels des R-Packages „MVOutlier“ detektierten Ausreißer aus dem Datensatz vom peristotalen Rand der kompakta anhand der gezählten Parameter (SekOst=sekundäre Osteone, TypIOst=Typ-II-Osteone, IntOst=introkte Osteone, OstFrag=Osteonfragmente, Reslak=Resorptionsläkunen, HawKan=Havers'sche Kanäle, NichtHavers=nicht-Havers'sche Kanäle, VolkM=Volkmann'sche Kanäle, Reskno=resorbierter Knochen, GenLam=Generallamellen, OstKno=osteotraler Knochen, FragKno=fragmentaler Knochen).

Probe	SekOst	TypIOst	IntOst	OstFrag	OPD	Reslak	HawKan	NichtHavers	VolkM	Reskno	GenLam	OstKno	FragKno	Individualalter	Temperatur
WF19(1)unv_peristotal_1	15	3	18	25	43	7	18	0	1	17	3	45	35	76	RT
WF9(1)unv_peristotal_3	9	4	13	11	24	0	13	2	0	1	1	83	15	68	RT
WF45(1)unv_peristotal_1	1	0	1	6	7	3	1	3	1	24	20	14	42	16	RT
WF45(1)unv_peristotal_2	1	0	1	9	10	3	1	1	0	20	24	10	46	16	RT
WF45(1)unv_peristotal_3	0	0	0	11	11	3	0	0	0	36	20	0	44	16	RT
WF45(2)unv_peristotal_1	1	0	1	5	6	6	1	13	0	34	52	5	9	16	RT
WF45(2)unv_peristotal_2	3	0	3	7	10	6	3	15	0	28	49	6	17	16	RT
WF45(2)unv_peristotal_3	2	0	2	4	6	4	2	4	0	43	39	4	14	16	RT
WF45(3)unv_peristotal_1	2	0	2	7	9	4	2	7	0	38	45	10	7	16	RT
WF45(3)unv_peristotal_2	2	0	2	5	7	4	2	10	0	45	27	20	8	16	RT
WF45(3)unv_peristotal_3	4	0	4	3	7	4	4	14	0	26	60	11	3	16	RT
WF9(4)unv_peristotal_3	6	0	6	22	28	6	6	0	0	22	14	24	40	68	RT
WF29a(4)unv_peristotal_2	19	5	24	18	42	3	24	3	0	9	15	56	20	89	RT
WF34(4)unv_peristotal_2	12	0	12	11	23	1	12	1	5	6	13	66	15	68	RT
WF45(4)unv_peristotal_1	0	0	0	6	6	3	0	4	0	34	25	14	27	16	RT
WF45(4)unv_peristotal_2	2	0	2	5	7	3	2	5	0	33	44	5	18	16	RT
WF45(4)unv_peristotal_3	1	0	1	14	15	4	1	0	0	39	22	4	35	16	RT
WF37(5)unv_peristotal_3	14	0	14	25	39	2	14	1	0	4	2	42	52	87	RT
WF45(5)unv_peristotal_1	0	0	0	4	4	4	0	15	0	7	27	8	58	16	RT
WF45(5)unv_peristotal_2	2	0	2	2	4	4	2	20	0	13	73	11	3	16	RT
WF45(5)unv_peristotal_3	3	0	3	8	11	3	3	0	0	27	21	13	39	16	RT
WF34(6)unv_peristotal_1	16	1	17	14	31	2	17	1	6	5	13	65	17	68	RT
WF45(6)unv_peristotal_1	2	0	2	6	8	5	2	5	0	38	28	9	25	16	RT
WF45(6)unv_peristotal_2	2	0	2	6	8	2	2	8	0	28	37	22	13	16	RT
WF45(6)unv_peristotal_3	2	0	2	7	9	3	2	0	0	53	14	8	25	16	RT
WF28(7)unv_peristotal_1	15	0	15	11	26	4	15	2	4	12	31	49	8	64	RT
WF2(7)unv_peristotal_2	7	0	7	7	14	5	7	1	0	17	54	22	7	80	RT
WF2(7)unv_peristotal_3	5	1	6	4	10	2	6	0	0	8	51	35	6	80	RT
WF45(7)unv_peristotal_1	2	0	2	4	6	4	2	9	0	42	34	9	15	16	RT
WF45(7)unv_peristotal_2	2	0	2	4	6	4	2	13	0	26	54	11	9	16	RT
WF45(7)unv_peristotal_3	2	0	2	4	6	1	0	8	0	32	41	11	16	16	RT
WF45(8)unv_peristotal_1	6	0	6	0	6	3	6	32	0	7	72	21	0	16	RT
WF45(8)unv_peristotal_2	3	0	3	0	3	6	3	19	0	16	75	9	0	16	RT
WF45(8)unv_peristotal_3	3	0	3	4	7	2	3	25	0	18	47	20	15	16	RT
WF19(9)unv_peristotal_2	11	0	11	18	29	9	11	0	0	35	17	26	22	76	RT

Probe	SektOst	TypIost	IntOst	OstFrag	OPD	ResLak	Hawkan	NichtHavers	Volkm	Reskno	Genlam	Ostkno	Fragkno	Individualalter	Temperatur
WF29a(9)unv_periostal_3	14	1	15	8	23	15	15	3	1	18	30	39	13	89	RT
WF45(9)unv_periostal_1	2	0	2	3	5	6	2	24	0	21	64	12	3	16	RT
WF45(9)unv_periostal_2	3	0	3	3	6	3	3	17	0	22	56	16	6	16	RT
WF45(9)unv_periostal_3	3	0	3	1	4	4	3	12	1	30	60	8	2	16	RT
WF19(10)unv_periostal_1	10	1	11	21	32	4	11	0	0	41	5	31	23	76	RT
WF2(10)unv_periostal_1	5	0	5	4	9	2	5	1	0	12	56	28	4	80	RT
WF2(10)unv_periostal_2	10	0	10	4	14	0	10	2	0	1	56	38	5	80	RT
WF45(10)unv_periostal_1	5	0	5	4	9	4	5	19	0	14	68	14	4	16	RT
WF45(10)unv_periostal_2	2	0	2	4	6	5	2	23	0	14	63	19	4	16	RT
WF45(10)unv_periostal_3	2	0	2	6	8	5	2	18	0	10	66	10	14	16	RT
WF37(11)unv_periostal_1	6	0	6	30	36	6	6	1	0	34	14	19	33	87	RT
WF19(11)unv_periostal_1	3	0	3	6	9	6	3	0	0	42	32	9	17	76	RT
WF19(11)unv_periostal_2	4	0	4	7	11	5	4	0	0	41	31	10	18	76	RT
WF38(11)unv_periostal_3	9	0	9	4	13	2	9	3	0	10	56	30	4	54	RT
WF45(11)unv_periostal_1	2	0	2	3	5	4	2	22	0	18	58	11	13	16	RT
WF45(11)unv_periostal_2	3	0	3	1	4	3	3	17	0	13	66	16	5	16	RT
WF45(11)unv_periostal_3	0	0	0	4	4	8	0	11	0	41	34	11	14	16	RT
WF36_unv_periostal_2	9	3	12	18	30	2	12	0	5	17	5	55	23	78	RT
WF47_unv_periostal_2	7	2	9	6	15	0	9	1	0	0	49	41	10	22	RT
WF47_unv_periostal_3	9	0	9	5	14	1	8	2	2	2	51	38	9	22	RT
FS01-13 unv_periostal_3	6	0	6	3	9	1	6	8	1	9	68	21	2	20	RT
WF19(2)100Grad_periostal_3	13	2	15	17	32	7	15	1	1	24	7	44	25	76	100
WF2(2)100Grad_periostal_1	17	2	19	18	37	3	19	3	6	15	10	52	23	80	100
WF15(2)100Grad_periostal_1	21	1	22	16	38	4	22	0	4	17	0	57	26	79	100
WF38(2)100Grad_periostal_1	17	5	22	26	48	1	22	2	1	5	3	64	28	54	100
WF38(2)100Grad_periostal_2	13	6	19	24	43	0	19	2	1	0	2	72	26	54	100
WF45(2)100Grad_periostal_1	2	0	2	5	7	3	2	1	0	26	39	10	25	16	100
WF45(2)100Grad_periostal_2	1	0	1	9	10	3	1	4	0	15	16	17	52	16	100
WF45(2)100Grad_periostal_3	3	0	3	4	7	2	3	11	0	26	41	19	14	16	100
WF19(3)200Grad_periostal_2	10	4	14	18	32	6	14	0	1	20	3	36	41	76	200
WF45(3)200Grad_periostal_1	1	0	1	7	8	2	1	2	0	18	30	12	40	16	200
WF45(3)200Grad_periostal_2	1	0	1	5	6	3	1	16	0	17	59	13	11	16	200
WF45(3)200Grad_periostal_3	0	0	0	1	1	3	0	26	0	14	5	15	66	16	200
WF45(4)300Grad_periostal_1	4	0	4	3	7	1	4	19	0	10	58	14	18	16	300
WF45(4)300Grad_periostal_2	1	0	1	1	2	5	1	8	0	38	46	13	3	16	300
WF45(4)300Grad_periostal_3	2	0	2	2	4	4	2	3	0	32	47	19	2	16	300
WF38(5)400Grad_periostal_1	14	5	19	31	50	1	19	5	3	6	0	61	33	54	400
WF38(5)400Grad_periostal_2	19	3	22	37	59	0	22	7	1	0	0	69	31	54	400

Probe	SektOst	TypIOst	IntOst	OstFrag	OPD	Reslak	Hawkan	NichtHavers	Volkm	Reskno	Genlam	Ostkno	Fragkno	Individualalter	Temperatur
WF38(5)400Grad_periostal_3	17	4	21	30	51	2	21	3	1	7	0	66	27	54	400
WF45(5)400Grad_periostal_1	4	0	4	4	8	3	4	9	2	30	34	21	15	16	400
WF45(5)400Grad_periostal_2	2	0	2	3	5	3	2	14	2	35	34	24	7	16	400
WF45(5)400Grad_periostal_3	2	0	2	2	4	3	2	15	4	34	37	23	6	16	400
WF37(6)500Grad_periostal_2	19	1	20	37	57	2	20	1	0	14	4	49	33	87	500
WF45(6)500Grad_periostal_1	5	0	5	2	7	4	5	20	4	25	45	23	7	16	500
WF45(6)500Grad_periostal_2	4	0	4	5	9	3	4	19	1	19	29	32	20	16	500
WF45(6)500Grad_periostal_3	4	0	4	5	9	3	4	19	1	19	29	32	20	16	500
WF28(7)600Grad_periostal_3	17	1	18	23	41	1	18	4	5	4	4	73	19	64	600
WF45(7)600Grad_periostal_1	2	0	2	4	6	3	2	22	1	12	55	20	13	16	600
WF45(7)600Grad_periostal_2	5	0	5	3	8	3	5	23	2	19	49	23	9	16	600
WF45(7)600Grad_periostal_3	2	0	2	2	4	2	2	18	2	32	36	22	10	16	600
WF29a(8)700Grad_periostal_2	30	0	30	17	47	2	30	6	1	5	18	60	17	89	700
WF29a(8)700Grad_periostal_3	27	0	27	13	40	2	27	7	2	7	22	54	17	89	700
WF45(8)700Grad_periostal_1	3	0	3	2	5	4	3	27	2	13	64	14	9	16	700
WF45(8)700Grad_periostal_2	2	0	2	0	2	4	2	23	4	9	73	18	0	16	700
WF45(8)700Grad_periostal_3	4	0	4	0	4	1	4	31	4	6	74	20	0	16	700
WF19(9)800Grad_periostal_3	11	0	11	11	22	8	11	3	0	34	22	26	18	76	800
WF29a(9)800Grad_periostal_1	15	1	16	17	33	4	16	0	23	19	0	54	27	82	800
WF38(9)800Grad_periostal_3	18	0	18	9	27	0	18	6	0	0	46	47	7	54	800
WF45(9)800Grad_periostal_1	3	0	3	3	6	3	3	19	0	32	34	17	17	16	800
WF45(9)800Grad_periostal_2	2	0	2	0	2	3	2	34	3	7	68	25	0	16	800
WF45(9)800Grad_periostal_3	3	0	3	7	10	2	3	4	0	15	22	24	39	16	800
WF37(10)900Grad_periostal_3	15	0	15	13	28	7	15	0	0	46	9	31	14	87	900
WF19(10)900Grad_periostal_3	10	0	10	13	23	9	10	2	0	33	18	26	23	76	900
WF15(10)900Grad_periostal_1	29	1	30	15	45	6	30	1	0	23	17	45	15	79	900
WF29a(10)900Grad_periostal_1	29	0	29	19	48	4	29	7	0	15	15	48	22	89	900
WF45(10)900Grad_periostal_1	4	0	4	0	4	3	4	28	3	9	68	23	0	16	900
WF45(10)900Grad_periostal_2	2	0	2	2	4	4	2	26	2	30	40	26	4	16	900
WF45(10)900Grad_periostal_3	4	0	4	8	12	4	4	29	4	20	46	29	5	16	900
WF37(11)1000Grad_periostal_1	27	0	27	46	73	3	27	0	0	12	11	40	32	87	1000
WF37(11)1000Grad_periostal_2	27	0	27	31	58	2	27	0	0	4	8	40	22	87	1000
WF37(11)1000Grad_periostal_3	30	0	30	31	61	3	30	0	0	9	15	41	20	87	1000
WF19(11)1000Grad_periostal_1	7	0	7	4	11	9	7	2	0	36	37	17	10	76	1000
WF26(11)1000Grad_periostal_1	31	0	31	25	56	3	31	2	0	9	14	60	17	72	1000
WF26(11)1000Grad_periostal_2	31	0	31	28	59	5	31	1	0	10	9	65	16	72	1000
WF2(11)1000Grad_periostal_2	14	0	14	4	18	1	14	3	0	3	62	28	7	80	1000
WF15(11)1000Grad_periostal_1	33	0	33	15	48	3	33	1	0	14	13	55	18	79	1000
WF29a(11)1000Grad_periostal_1	26	0	26	7	33	3	26	0	0	8	43	40	9	89	1000

Probe	SekOst	TypIOst	IntOst	OstFrag	OPD	ResLak	Hawkan	NichtHavers	VolKM	Reskno	Genlam	Ostkno	Fragkno	Individualalter	Temperatur
WF29a(11)1000Grad_periostal_2	24	1	25	17	42	4	25	7	0	13	28	37	22	89	1000
WF29a(11)1000Grad_periostal_3	27	0	27	10	37	0	27	6	0	0	48	43	9	89	1000
WF45(11)1000Grad_periostal_1	3	0	3	4	7	1	3	22	6	16	36	28	20	16	1000
WF45(11)1000Grad_periostal_2	2	0	2	14	16	4	2	4	0	22	14	22	42	16	1000
WF45(11)1000Grad_periostal_3	4	0	4	6	10	3	4	9	3	14	35	36	15	16	1000
WF5_950Grad_periostal_1	39	2	41	16	57	2	41	7	0	3	25	59	13	55	1000
WF5_950Grad_periostal_2	31	1	32	12	44	3	32	5	1	12	21	50	17	55	1000
WF21b_950Grad_periostal_1	21	4	25	16	41	5	25	6	1	21	10	48	21	NA	1000
WF21b_950Grad_periostal_2	31	4	35	14	49	3	35	6	1	11	9	61	19	NA	1000
WF30_950Grad_periostal_1	32	4	36	23	59	3	36	4	0	8	11	57	24	91	1000
WF40a_950Grad_periostal_2	33	3	36	22	58	3	36	0	0	9	9	61	21	75	1000
WF49b_950Grad_periostal_1	39	2	41	17	58	1	41	2	1	3	12	68	17	60	1000
WF49b_950Grad_periostal_2	33	3	36	16	52	2	36	4	2	8	14	62	16	60	1000
WF49b_950Grad_periostal_3	30	4	34	15	49	4	34	3	0	13	20	54	13	60	1000
FS01-14 950Grad_periostal 2	31	3	34	11	45	2	34	0	1	4	25	60	11	63	1000
FS01-14 950Grad_periostal 3	31	3	34	15	49	0	34	5	0	0	20	63	17	63	1000
FS01-15 950Grad_periostal 3	36	2	38	18	56	1	38	3	1	4	19	55	22	63	1000
FS01-16 950Grad_periostal 2	21	1	22	4	26	0	22	0	3	0	40	54	6	58	1000

Tabelle 22: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Test für alle untersuchten histomorphometrischen Parameter im mittigen Bereich der Femurkompakta über alle Verbrennungsstufen (RT-1000°C); der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und *für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur [°C]
SekOst	0,0052129596701403	0,991187988388369	**	RT
TypII Ost	3,58E-06	0,864447592881776	***	RT
OstInt	0,0159205626885925	0,992586422980716	*	RT
OstFrag	1,24E+08	0,978435722104931	***	RT
OPD	0,0698411432665855	0,994389988657154	N.S.	RT
ResLak	1,07E-03	0,896130106143881	***	RT
Havers	0,015518456673426	0,992554868056568	*	RT
NonHavers	1,52E-13	0,726427800622024	***	RT
VolkM	6,90E-09	0,821985806464877	***	RT
ResKno	2,01E-02	0,91013299034959	***	RT
GenLam	9,47E-01	0,926425413596833	***	RT
OstKno	1,86E+07	0,983102631050025	***	RT
FragKno	3,66E+07	0,976144897436841	***	RT
OstFl	5,06E-08	0,836466078216364	***	RT
OstU	7,18E-02	0,915777410631153	***	RT
OstD	7,18E-02	0,915777410458111	***	RT
ResLakFl	6,66E+01	0,941889455253521	***	RT
AktFr	7,22E-23	0,416622550658326	***	RT
BFr	9,64E-24	0,37708305958547	***	RT
PctBfr	9,64E-24	0,37708305941056	***	RT
AOC	3,85E-12	0,758614908488714	***	RT
SekOst	0,520846094806682	0,972675788678356	N.S.	100
TypII Ost	1,54E+09	0,793778329029814	***	100
OstInt	0,611641459059902	0,975542013823673	N.S.	100
OstFrag	0,0789360012865192	0,944887852235939	N.S.	100
OPD	0,377985920521173	0,967485204076527	N.S.	100
ResLak	0,00561943470877441	0,905621791397519	**	100
Havers	0,611641459059902	0,975542013823673	N.S.	100
NonHavers	0,000170995870804195	0,844223726350366	***	100
VolkM	0,000831965759847474	0,873633261080737	***	100
ResKno	0,155464091940036	0,9544763251343	N.S.	100
GenLam	0,00106665713905693	0,878002040493496	**	100
OstKno	0,170648826836137	0,955801616044048	N.S.	100
FragKno	0,018718029360127	0,924076959925266	*	100
OstFl	0,000241959279707606	0,850920021982736	***	100
OstU	0,00632829596031842	0,907497042657334	**	100
OstD	0,00632829587116141	0,907497042435678	**	100
ResLakFl	0,0529803971313189	0,939219645463663	N.S.	100
AktFr	1,75E+04	0,433982553957644	***	100
BFr	3,86E+03	0,367537746556055	***	100
PctBfr	3,86E+03	0,367537746784427	***	100
AOC	2,60E+09	0,80534722002722	***	100
SekOst	0,33051291733299	0,967567906781385	N.S.	200
TypII Ost	0,000393196931267131	0,869607606040743	***	200
OstInt	0,121982610452026	0,954143873518691	N.S.	200

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur [°C]
OstFrag	0,0207015960709265	0,93043421783153	*	200
OPD	0,212269882910002	0,961495240750588	N.S.	200
ResLak	0,00126237198997662	0,888967039504704	**	200
Havers	0,121982610452026	0,954143873518691	N.S.	200
NonHavers	8,21E+08	0,79481963472179	***	200
VolkM	4,11E+08	0,779509090437715	***	200
ResKno	0,0453291909773035	0,941054345492073	*	200
GenLam	0,0537660527559081	0,943328718857163	N.S.	200
OstKno	0,45126312301283	0,972103248226188	N.S.	200
FragKno	0,952166476337407	0,988107578892114	N.S.	200
OstFl	0,00325445221626436	0,903733260961437	**	200
OstU	0,0507115926612359	0,942550648648001	N.S.	200
OstD	0,0507115963845492	0,942550649625524	N.S.	200
ResLakFl	0,0452965682828991	0,941044728274394	*	200
AktFr	3,68E+03	0,41320704936701	***	200
BFr	1,50E+01	0,374641855592534	***	200
PctBfr	1,50E+03	0,374641855606339	***	200
AOC	1,69E+04	0,559324221763765	***	200
SekOst	0,637863264714089	0,975820919775779	N.S.	300
TypIIost	6,00E+09	0,818632677658012	***	300
OstInt	0,674624238184323	0,976953501160305	N.S.	300
OstFrag	0,113488093833184	0,94885872249324	N.S.	300
OPD	0,0887242761309799	0,945292359223579	N.S.	300
ResLak	0,000328441428114465	0,853092494653744	***	300
Havers	0,674624238184323	0,976953501160305	N.S.	300
NonHavers	0,00035191126791495	0,854417871459718	***	300
VolkM	6,26E+03	0,372358505843842	***	300
ResKno	0,000786926469338251	0,869467643885142	***	300
GenLam	0,0637688545368528	0,940492760091601	N.S.	300
OstKno	0,203260708548621	0,957346327244915	N.S.	300
FragKno	0,0460866034320872	0,935738562312867	*	300
OstFl	0,0702223380609583	0,941896600565553	N.S.	300
OstU	0,478391959877596	0,970606240926271	N.S.	300
OstD	0,478391947363781	0,970606240483143	N.S.	300
ResLakFl	0,0140454832675023	0,911396897520365	*	300
AktFr	1,74E+03	0,418004184409879	***	300
BFr	2,14E+04	0,426933894379206	***	300
PctBfr	2,14E+04	0,426933894137325	***	300
AOC	3,42E+08	0,751958986444306	***	300
SekOst	0,483910076349506	0,974211656404096	N.S.	400
TypIIost	3,24E+09	0,83113330053854	***	400
OstInt	0,552613142296458	0,976242429125935	N.S.	400
OstFrag	0,195747883222296	0,961986409741596	N.S.	400
OPD	0,349416669412086	0,969595209094399	N.S.	400
ResLak	0,000145449469653859	0,858473972747317	***	400
Havers	0,552613142296458	0,976242429125935	N.S.	400
NonHavers	4,87E+08	0,793063638844194	***	400

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur [°C]
VolkM	1,82E+08	0,771566179021262	***	400
ResKno	0,476706432620733	0,973989155273721	N.S.	400
GenLam	0,000303902155929734	0,871008843765961	***	400
OstKno	0,52173700382392	0,975348240259585	N.S.	400
FragKno	0,880852057037351	0,985554468526873	N.S.	400
OstFl	1,65E+09	0,818026551971852	***	400
OstU	0,00105188912944112	0,890924997532273	**	400
OstD	0,00105188905355119	0,890924996417047	**	400
ResLakFl	0,0157816987352952	0,929729306966678	*	400
AktFr	4,20E+03	0,446481199392292	***	400
BFr	8,05E+02	0,378355224282034	***	400
PctBfr	8,05E+02	0,378355223261371	***	400
AOC	3,43E+09	0,832245457099167	***	400
SekOst	0,105560707669563	0,955939300354605	N.S.	500
TypIIost	6,01E+09	0,849330767882473	***	500
OstInt	0,164669769370105	0,96132262915044	N.S.	500
OstFrag	0,251545373884773	0,966539567936102	N.S.	500
OPD	0,535819576497115	0,976652325854881	N.S.	500
ResLak	0,000371214658216774	0,879530549793698	***	500
Havers	0,164669769370105	0,96132262915044	N.S.	500
NonHavers	2,27E+07	0,734098886206493	***	500
VolkM	1,13E+08	0,771001133304299	***	500
ResKno	0,0296335801096893	0,940452894545564	*	500
GenLam	0,00171495621140232	0,902527533295806	**	500
OstKno	0,737659444905081	0,98197620573782	N.S.	500
FragKno	0,422832919442035	0,97328247969904	N.S.	500
OstFl	0,00253902657128776	0,908101553887427	**	500
OstU	0,0296585140069966	0,940463334564747	*	500
OstD	0,029658511588532	0,940463333552559	*	500
ResLakFl	0,00238454597158854	0,907218245312467	**	500
AktFr	3,56E+03	0,465491996927983	***	500
BFr	3,80E+02	0,375649633241039	***	500
PctBfr	3,80E+02	0,375649633086003	***	500
AOC	7,15E+06	0,705308483342249	***	500
SekOst	0,167703541370574	0,95920108367587	N.S.	600
TypIIost	1,14E+09	0,806376843767067	***	600
OstInt	0,206515558030072	0,961916290152681	N.S.	600
OstFrag	0,273986849249983	0,965665662928711	N.S.	600
OPD	0,547330964952328	0,975623462177505	N.S.	600
ResLak	0,00190305784113554	0,897750435126504	**	600
Havers	0,206515558030072	0,961916290152681	N.S.	600
NonHavers	1,05E+08	0,804698133878546	***	600
VolkM	3,33E+09	0,827853881446507	***	600
ResKno	0,00437975518158388	0,910186932954277	**	600
GenLam	0,253963437998876	0,96464976103544	N.S.	600
OstKno	0,0292924391070375	0,936546256123026	*	600
FragKno	0,135083156733942	0,956402587470028	N.S.	600

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur [°C]
OstFl	0,000341623106165465	0,870131376762961	***	600
OstU	0,00658354376871749	0,916059223515961	**	600
OstD	0,00658354462609338	0,916059225371468	**	600
ResLakFl	0,00517401435336518	0,912603977333487	**	600
AktFr	4,54E+02	0,436065289779936	***	600
BFr	9,54E+02	0,370460433217648	***	600
PctBfr	9,54E+02	0,37046043329917	***	600
AOC	2,05E+06	0,6488222676233	***	600
SekOst	0,212628091178208	0,95984609263883	N.S.	700
TypII Ost	2,05E+09	0,80494594412542	***	700
OstInt	0,22735923340015	0,960790419102821	N.S.	700
OstFrag	0,664064143783992	0,977604992780166	N.S.	700
OPD	0,0375451159482325	0,93576038456382	*	700
ResLak	0,00133906088164118	0,884729781496397	**	700
Havers	0,2903880661275	0,964287078936758	N.S.	700
NonHavers	2,66E+09	0,810597397422772	***	700
VolkM	2,37E+08	0,755313082207791	***	700
ResKno	0,606742644214074	0,975907901271721	N.S.	700
GenLam	0,00316650409736889	0,898810684532895	**	700
OstKno	0,248102133605354	0,962028614729529	N.S.	700
FragKno	0,191312152600032	0,958365091071593	N.S.	700
OstFl	0,00100404365805138	0,879856828990962	**	700
OstU	0,0200396945324302	0,926800714768875	*	700
OstD	0,0200396969626329	0,926800716522956	*	700
ResLakFl	0,000285989308275488	0,857589905379483	***	700
AktFr	3,29E+04	0,474209978278645	***	700
BFr	6,11E+03	0,404363053230693	***	700
PctBfr	6,11E+03	0,404363054943637	***	700
AOC	2,15E+06	0,623329418815773	***	700
SekOst	0,622352391326741	0,972258223371734	N.S.	800
TypII Ost	3,09E+09	0,775175974361668	***	800
OstInt	0,282775640442545	0,957373677271646	N.S.	800
OstFrag	0,595386184516721	0,971297559975305	N.S.	800
OPD	0,523232060564715	0,96863327107146	N.S.	800
ResLak	0,00365062068005501	0,881585972581465	**	800
Havers	0,282775640442545	0,957373677271646	N.S.	800
NonHavers	3,97E+08	0,718889884046048	***	800
VolkM	5,39E+07	0,657053703622017	***	800
ResKno	0,163445947259509	0,948109760701643	N.S.	800
GenLam	0,014119442151456	0,906563966035534	*	800
OstKno	0,0784114343238546	0,93591775493069	N.S.	800
FragKno	0,233982071055334	0,95413323754314	N.S.	800
OstFl	0,00825862027874562	0,896887566177276	**	800
OstU	0,134869906711071	0,944915285421202	N.S.	800
OstD	0,13486990536897	0,944915285256069	N.S.	800
ResLakFl	0,0151615405165779	0,905182443440483	*	800
AktFr	3,22E+05	0,462288840692849	***	800

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur [°C]
BFr	1,50E+05	0,428382832184878	***	800
PctBfr	1,50E+04	0,428382831848669	***	800
AOC	1,67E+08	0,692875672768043	***	800
SekOst	0,706667812252001	0,963960177567959	N.S.	900
TypII Ost	0,00012347975581363	0,702522474094365	***	900
OstInt	0,489185530796382	0,952016548464499	N.S.	900
OstFrag	0,390068751485786	0,945552302423157	N.S.	900
OPD	0,0508970416604157	0,892469786493644	N.S.	900
ResLak	0,180163712593213	0,925113433255616	N.S.	900
Havers	0,489185530796382	0,952016548464499	N.S.	900
NonHavers	0,000172768383967161	0,715202569991511	***	900
VolkM	1,86E+09	0,625573411616078	***	900
ResKno	0,260791466692294	0,934721976770951	N.S.	900
GenLam	0,142266025099879	0,919042119796255	N.S.	900
OstKno	0,0106093635519524	0,849693194067492	*	900
FragKno	0,994658295558724	0,986841486193836	N.S.	900
OstFl	0,280228379600687	0,936616907593258	N.S.	900
OstU	0,00021200780409318	0,722791688164393	***	900
OstD	0,000212007800295849	0,722791687504766	***	900
ResLakFl	0,0010849398342041	0,77975699224133	**	900
AktFr	9,62E+07	0,484647746188252	***	900
BFr	1,00E+08	0,486658503246509	***	900
PctBfr	1,00E+08	0,486658501973931	***	900
AOC	0,00703728552086547	0,837846556689931	**	900
SekOst	0,0164067048368933	0,931664488960462	*	1000
TypII Ost	0,000226602408492288	0,868931972814613	***	1000
OstInt	0,0100937932348878	0,92527149852296	*	1000
OstFrag	0,562186436357803	0,976514608768591	N.S.	1000
OPD	0,0336051278733036	0,94084606273319	*	1000
ResLak	0,00452898340913093	0,914369219440275	**	1000
Havers	0,0100937932348878	0,92527149852296	*	1000
NonHavers	0,00363808575396342	0,911306055497918	**	1000
VolkM	3,53E+07	0,738856577248148	***	1000
ResKno	0,011502682340838	0,927006092414035	*	1000
GenLam	0,727938373056808	0,98138620179901	N.S.	1000
OstKno	0,545963020042385	0,976501640202505	N.S.	1000
FragKno	0,34518630989982	0,97001410617285	N.S.	1000
OstFl	0,318141395478958	0,968934403116898	N.S.	1000
OstU	0,744209521839354	0,981820772967135	N.S.	1000
OstD	0,744209489220476	0,981820772092339	N.S.	1000
ResLakFl	9,92E+09	0,854923355031604	***	1000
AktFr	1,70E+05	0,589821399405518	***	1000
BFr	8,73E+04	0,56819292358625	***	1000
PctBfr	8,73E+04	0,568192924401588	***	1000
AOC	9,23E+01	0,297415805973762	***	1000

Tabelle 23: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter über die Verbrennungstemperaturen; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz	Temperatur [°C]
SekOst	0,722538557178697	8200	N.S.	100
TypII Ost	0,897739544775676	8610,5	N.S.	100
OstInt	0,83837958270485	8329,5	N.S.	100
OstFrag	0,127962494246631	9810,5	N.S.	100
OPD	0,408891944967191	9215	N.S.	100
ResLak	0,69932824215938	8830	N.S.	100
Havers	0,837013284636794	8328	N.S.	100
NonHavers	0,00433790883022357	6220	**	100
VolkM	0,166051934110679	7376,5	N.S.	100
ResKno	0,765864656009389	8249	N.S.	100
GenLam	0,0228382122941213	10461	*	100
OstKno	0,224294081887574	7459,5	N.S.	100
FragKno	0,919358092532422	8592,5	N.S.	100
OstFl	0,34130311021051	7686	N.S.	100
OstU	0,34130311021051	7686	N.S.	100
OstD	0,34130311021051	7686	N.S.	100
ResLakFl	0,293079408572777	7604	N.S.	100
AktFr	0,828355326747664	8692	N.S.	100
BFr	0,641507192105909	8104	N.S.	100
PctBfr	0,641507192105909	8104	N.S.	100
AOC	0,408891944967191	9215	N.S.	100
SekOst	0,636091060400022	9658,5	N.S.	200
TypII Ost	0,749157329780173	9507,5	N.S.	200
OstInt	0,570586945869172	9743	N.S.	200
OstFrag	0,607681753407532	8773,5	N.S.	200
OPD	0,848930370164155	9405,5	N.S.	200
ResLak	0,361638942346958	10035,5	N.S.	200
Havers	0,572860158182809	9740	N.S.	200
NonHavers	0,667359079142556	8875	N.S.	200
VolkM	0,504512308626926	9801	N.S.	200
ResKno	0,963966752878813	9275	N.S.	200
GenLam	0,0306070516322133	11175,5	*	200
OstKno	0,482218397607564	8602	N.S.	200
FragKno	0,0638037389040638	7569	N.S.	200
OstFl	0,108519275781636	7791	N.S.	200
OstU	0,108519275781636	7791	N.S.	200
OstD	0,108519275781636	7791	N.S.	200
ResLakFl	0,213025526478648	8119	N.S.	200
AktFr	0,942353071392589	9299,5	N.S.	200
BFr	0,170498359309054	8001,5	N.S.	200
PctBfr	0,170498359309054	8001,5	N.S.	200
AOC	0,848930370164155	9405,5	N.S.	200
SekOst	0,0306295402055681	5794,5	*	300
TypII Ost	0,00283838029806623	9819	**	300
OstInt	0,180155925594062	6454,5	N.S.	300

Parameter	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz	Temperatur [°C]
OstFrag	0,167736283342489	8642,5	N.S.	300
OPD	0,759099269923737	7780,5	N.S.	300
ResLak	0,134575395629508	8711,5	N.S.	300
Havers	0,179346684127788	6452,5	N.S.	300
NonHavers	0,0954870910417895	6282	N.S.	300
VolkM	4,04E+06	11030,5	***	300
ResKno	0,325391342945744	8324,5	N.S.	300
GenLam	0,0131408778783815	5535	*	300
OstKno	0,239398404144165	6584	N.S.	300
FragKno	0,0038798055299279	9860	**	300
OstFl	0,255990352770563	8449,5	N.S.	300
OstU	0,255990352770563	8449,5	N.S.	300
OstD	0,255990352770563	8449,5	N.S.	300
ResLakFl	0,917179621949867	7449	N.S.	300
AktFr	0,797902166716974	7326	N.S.	300
BFr	0,979719707920519	7512	N.S.	300
PctBfr	0,979719707920519	7512	N.S.	300
AOC	0,759099269923737	7780,5	N.S.	300
SekOst	0,193210829031046	8521	N.S.	400
TypII Ost	0,0291622855582167	11635,5	*	400
OstInt	0,480271577488804	9069	N.S.	400
OstFrag	0,225212588809627	10837,5	N.S.	400
OPD	0,578277107686764	10233,5	N.S.	400
ResLak	0,694565233231573	10074,5	N.S.	400
Havers	0,477911760528835	9065,5	N.S.	400
NonHavers	0,765966879931303	9975,5	N.S.	400
VolkM	0,50534723803509	10302	N.S.	400
ResKno	0,49740249189074	9094	N.S.	400
GenLam	0,81956925841471	9509	N.S.	400
OstKno	0,496935094206568	9092	N.S.	400
FragKno	0,0576986380163004	11472,5	N.S.	400
OstFl	0,79379624703399	9962	N.S.	400
OstU	0,79379624703399	9962	N.S.	400
OstD	0,79379624703399	9962	N.S.	400
ResLakFl	0,00700920267851684	7238	**	400
AktFr	0,536589511986691	10291,5	N.S.	400
BFr	0,694019037718929	10084	N.S.	400
PctBfr	0,694019037718929	10084	N.S.	400
AOC	0,578277107686764	10233,5	N.S.	400
SekOst	0,0890477220813859	8597,5	N.S.	500
TypII Ost	0,330669643668803	11082,5	N.S.	500
OstInt	0,170231036703059	8908	N.S.	500
OstFrag	0,0398404799584889	12150	*	500
OPD	0,768795491308676	10485	N.S.	500
ResLak	0,195464163587788	11404,5	N.S.	500
Havers	0,169080541774097	8904,5	N.S.	500
NonHavers	0,301220650103592	11114,5	N.S.	500

Parameter	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz	Temperatur [°C]
Volkm	0,268737463000638	11197	N.S.	500
ResKno	0,964596118689127	10248,5	N.S.	500
GenLam	0,793099463424087	9957	N.S.	500
OstKno	0,0372353158238237	8230	*	500
FragKno	3,26E+08	14616,5	***	500
OstFl	0,848249883429103	10024	N.S.	500
OstU	0,848249883429103	10024	N.S.	500
OstD	0,848249883429103	10024	N.S.	500
ResLakFl	0,00508541149727637	7559	**	500
AktFr	0,391121131009222	11020	N.S.	500
BFr	0,874355129528736	10356,5	N.S.	500
PctBfr	0,874355129528736	10356,5	N.S.	500
AOC	0,768795491308676	10485	N.S.	500
SekOst	0,00906277523881095	7105	**	600
TypIIost	0,517869527607687	10036,5	N.S.	600
OstInt	0,0284884852011118	7485	*	600
OstFrag	0,0820760569876385	11057	N.S.	600
OPD	0,659976348245815	9076	N.S.	600
ResLak	0,83794734407117	9659,5	N.S.	600
Havers	0,0279734888576443	7478,5	*	600
NonHavers	0,821899785450971	9286	N.S.	600
Volkm	0,771184095288213	9728	N.S.	600
ResKno	0,925949983435176	9562	N.S.	600
GenLam	0,928227719336186	9394,5	N.S.	600
OstKno	0,0273203011763912	7465,5	*	600
FragKno	0,00251810109259907	12228,5	**	600
OstFl	0,378300926829097	10280,5	N.S.	600
OstU	0,378300926829097	10280,5	N.S.	600
OstD	0,378300926829097	10280,5	N.S.	600
ResLakFl	0,398370842137514	8710	N.S.	600
AktFr	0,978993751051315	9452,5	N.S.	600
BFr	0,633581844070562	9912	N.S.	600
PctBfr	0,633581844070562	9912	N.S.	600
AOC	0,659976348245815	9076	N.S.	600
SekOst	3,00E+05	3582,5	***	700
TypIIost	0,0362053461454566	10483,5	*	700
OstInt	2,85E+06	3912,5	***	700
OstFrag	0,236672632008759	9778,5	N.S.	700
OPD	4,92E+09	5207	***	700
ResLak	0,489980513911418	8159	N.S.	700
Havers	2,81E+06	3910,5	***	700
NonHavers	8,73E+07	4731	***	700
Volkm	0,0602615189084511	10296	N.S.	700
ResKno	0,882285895528164	8618,5	N.S.	700
GenLam	0,00799011406639238	6434	**	700
OstKno	0,612633269253313	8305,5	N.S.	700
FragKno	0,00150328047895048	11517,5	**	700

Parameter	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz	Temperatur [°C]
OstFl	2,81E+05	13937	***	700
OstU	2,81E+05	13937	***	700
OstD	2,81E+05	13937	***	700
ResLakFl	0,795449738290305	8522	N.S.	700
AktFr	0,000987425416765123	5871	***	700
BFr	0,0635707528007528	10368,5	N.S.	700
PctBfr	0,0635707528007528	10368,5	N.S.	700
AOC	4,92E+09	5207	***	700
SekOst	0,000820898357907196	4254,5	***	800
TypII Ost	0,00169340380688836	9082	**	800
OstInt	0,00573858718995764	4698	**	800
OstFrag	0,0980843084057124	8064,5	N.S.	800
OPD	0,382511430243518	6137	N.S.	800
ResLak	0,553586643232534	6361,5	N.S.	800
Havers	0,00565805362369858	4694,5	**	800
NonHavers	9,32E+09	4018,5	***	800
VolkM	0,00572317963222786	8795,5	**	800
ResKno	0,642882852817296	6450	N.S.	800
GenLam	1,54E+08	3135	***	800
OstKno	0,206549657857102	7769,5	N.S.	800
FragKno	0,00227853428147361	9134	**	800
OstFl	5,82E+07	10623	***	800
OstU	5,82E+07	10623	***	800
OstD	5,82E+07	10623	***	800
ResLakFl	0,403043469504579	6167	N.S.	800
AktFr	0,0238703553725717	5077	*	800
BFr	0,107646621181129	8034	N.S.	800
PctBfr	0,107646621181129	8034	N.S.	800
AOC	0,382511430243518	6137	N.S.	800
SekOst	0,0047168622261874	2471	**	900
TypII Ost	0,00971050059974175	5580,5	**	900
OstInt	0,0147315851366387	2697,5	*	900
OstFrag	0,00541139664832134	5764,5	**	900
OPD	0,553602935160504	3782	N.S.	900
ResLak	0,453443047150308	3699	N.S.	900
Havers	0,0146276132937596	2696	*	900
NonHavers	0,000122215070023266	2022,5	***	900
VolkM	0,0159373355931598	5471,5	*	900
ResKno	0,542331777194675	3772,5	N.S.	900
GenLam	0,00259018277518768	2358	**	900
OstKno	1	4131	N.S.	900
FragKno	0,00241318660525114	5917	**	900
OstFl	0,000951218518268343	6078	***	900
OstU	0,000951218518268343	6078	***	900
OstD	0,000951218518268343	6078	***	900
ResLakFl	0,545621049588136	3776	N.S.	900
AktFr	0,0228687922965716	2790	*	900

Parameter	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz	Temperatur [°C]
BFr	0,915503458933831	4194	N.S.	900
PctBfr	0,915503458933831	4194	N.S.	900
AOC	0,553602935160504	3782	N.S.	900
SekOst	4,99E+05	4332,5	***	1000
TypII Ost	0,286967532173899	8785	N.S.	1000
OstInt	1,74E+06	4525	***	1000
OstFrag	0,0442496717311938	11573	*	1000
OPD	0,00148425070490168	6787	**	1000
ResLak	0,750597331683116	10007,5	N.S.	1000
Havers	1,71E+06	4522,5	***	1000
NonHavers	6,86E+08	5834	***	1000
VolkM	0,0963512164016829	11170	N.S.	1000
ResKno	0,369457345892401	10547,5	N.S.	1000
GenLam	5,47E+06	4703	***	1000
OstKno	0,901778655143607	9605,5	N.S.	1000
FragKno	6,04E+07	13897,5	***	1000
OstFl	1,06E+03	16002	***	1000
OstU	1,06E+03	16002	***	1000
OstD	1,06E+03	16002	***	1000
ResLakFl	0,219104157704758	10851	N.S.	1000
AktFr	7,11E+07	5138	***	1000
BFr	0,208144014422431	8556,5	N.S.	1000
PctBfr	0,208144014422431	8556,5	N.S.	1000
AOC	0,00148425070490168	6787	**	1000

Tabelle 24: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter über die Verbrennungstemperaturen mit der unverbrannten Referenzprobe; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Position	Temperatur [°C]	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
NonHavers	2	100	0,045221158581598	537	*
TypII Ost	4	300	0,00940281465005977	853,5	**
VolkM	4	300	4,22E+08	1004	***
GenLam	4	300	0,000583744092362232	333,5	***
FragKno	4	300	0,00103328518058211	924	**
OstFrag	6	500	0,0302062642866611	1124	*
FragKno	6	500	0,00181789638398789	1230,5	**
SekOst	7	600	0,0390836535146835	601	*
OstKno	7	600	0,023221073819237	578,5	*
FragKno	7	600	0,000700375569113345	1177,5	***
SekOst	8	700	1,80E+06	280	***
OstInt	8	700	1,63E+08	278	***
OPD	8	700	0,00154525662858285	440	**
Havers	8	700	1,63E+08	278	***
NonHavers	8	700	4,75E+09	366,5	***
GenLam	8	700	0,0358937076964842	546,5	*
FragKno	8	700	0,00278407991520448	1054,5	**
OstFl	8	700	8,80E+07	1247	***

Parameter	Position	Temperatur [°C]	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
OstU	8	700	8,80E+07	1247	***
OstD	8	700	8,80E+07	1247	***
AktFr	8	700	0,00110610472635516	435	**
AOC	8	700	0,00154525662858285	440	**
SekOst	9	800	0,0109500577283638	316	*
OstInt	9	800	0,00950585715525727	312,5	**
Havers	9	800	0,00825038295554147	309	**
NonHavers	9	800	0,00683706870388261	313,5	**
VolkM	9	800	0,00704241385294776	688,5	**
GenLam	9	800	0,000472579989700468	245,5	***
OstFl	9	800	0,000117840252571731	789	***
OstU	9	800	0,000117840252571731	789	***
OstD	9	800	0,000117840252571731	789	***
AktFr	9	800	0,0358968847645588	349	*
SekOst	10	900	0,0320831955380643	158	*
OstInt	10	900	0,033949758707015	159	*
Havers	10	900	0,033949758707015	159	*
OstFl	10	900	0,0252978250379057	356,5	*
OstU	10	900	0,0252978250379057	356,5	*
OstD	10	900	0,0252978250379057	356,5	*
AktFr	10	900	0,0161868673654597	147	*
SekOst	11	1000	0,000159444265736915	35	***
OstInt	11	1000	0,000216902770657971	37	***
OPD	11	1000	0,00125805910490121	51	**
Havers	11	1000	0,000216902770657971	37	***
NonHavers	11	1000	0,0268510955809809	84	*
OstFl	11	1000	0,000258032577567498	256	***
OstU	11	1000	0,000258032577567498	256	***
OstD	11	1000	0,000258032577567498	256	***
AktFr	11	1000	0,0284906141029882	82	*
AOC	11	1000	0,00125805910490121	51	**

Tabelle 25: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter zwischen aufeinanderfolgenden Temperaturstufen; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Temperatur1	Temperatur2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
SekOst	100	200	0,57209849737837	716,5	N.S.
TypII Ost	100	200	0,892880937970395	677	N.S.
OstInt	100	200	0,602729726457161	712,5	N.S.
OstFrag	100	200	0,129950605884541	528	N.S.
OPD	100	200	0,557664532730714	611,5	N.S.
ResLak	100	200	0,6482176883105	705,5	N.S.
Havers	100	200	0,602729726457161	712,5	N.S.
NonHavers	100	200	0,0414195506709689	835	*
VolkM	100	200	0,10948343574864	802	N.S.
ResKno	100	200	0,898756874891458	677	N.S.
GenLam	100	200	0,748131350756017	635,5	N.S.
OstKno	100	200	0,658485428713505	705,5	N.S.

Parameter	Temperatur1	Temperatur2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
FragKno	100	200	0,153605413449012	535,5	N.S.
OstFl	100	200	0,67071467028913	626	N.S.
OstU	100	200	0,67071467028913	626	N.S.
OstD	100	200	0,67071467028913	626	N.S.
ResLakFl	100	200	0,881069878195679	651	N.S.
AktFr	100	200	0,977976963108404	662	N.S.
BFr	100	200	0,525479515208312	607	N.S.
PctBfr	100	200	0,525479515208312	607	N.S.
AOC	100	200	0,557664532730714	611,5	N.S.
SekOst	200	300	0,0542227352496167	429,5	N.S.
TypIIost	200	300	0,0331848918560029	755	*
OstInt	200	300	0,184685966394429	479	N.S.
OstFrag	200	300	0,197292547779917	696	N.S.
OPD	200	300	0,894115114113296	600,5	N.S.
ResLak	200	300	0,603110469023662	631	N.S.
Havers	200	300	0,184685966394429	479	N.S.
NonHavers	200	300	0,248541510675981	499	N.S.
VolkM	200	300	0,00019012623572349	858	***
ResKno	200	300	0,387178198362846	661	N.S.
GenLam	200	300	0,000725844625150339	309	***
OstKno	200	300	0,694812736110259	556	N.S.
FragKno	200	300	0,00142368505492637	853,5	**
OstFl	200	300	0,0558569181576928	748	N.S.
OstU	200	300	0,0558569181576928	748	N.S.
OstD	200	300	0,0558569181576928	748	N.S.
ResLakFl	200	300	0,632460019754633	629	N.S.
AktFr	200	300	0,889663415131391	577	N.S.
BFr	200	300	0,38178998932533	662	N.S.
PctBfr	200	300	0,38178998932533	662	N.S.
AOC	200	300	0,894115114113296	600,5	N.S.
SekOst	300	400	0,541481138978859	673	N.S.
TypIIost	300	400	0,425221764838811	555,5	N.S.
OstInt	300	400	0,646133025607998	660	N.S.
OstFrag	300	400	0,861473694975272	604,5	N.S.
OPD	300	400	0,953664685096979	625,5	N.S.
ResLak	300	400	0,247205615232456	525,5	N.S.
Havers	300	400	0,646133025607998	660	N.S.
NonHavers	300	400	0,117470238634313	747	N.S.
VolkM	300	400	0,00086395774095414	375,5	***
ResKno	300	400	0,107810873757904	481	N.S.
GenLam	300	400	0,0864424525231816	768	N.S.
OstKno	300	400	0,650951040715295	659,5	N.S.
FragKno	300	400	0,4030720843389	547,5	N.S.
OstFl	300	400	0,50870490372979	562,5	N.S.
OstU	300	400	0,50870490372979	562,5	N.S.
OstD	300	400	0,50870490372979	562,5	N.S.
ResLakFl	300	400	0,0824362426892768	470	N.S.
AktFr	300	400	0,47110811469898	683	N.S.

Parameter	Temperatur1	Temperatur2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
BFr	300	400	0,795488841773715	643	N.S.
PctBfr	300	400	0,795488841773715	643	N.S.
AOC	300	400	0,953664685096979	625,5	N.S.
SekOst	400	500	0,780071751125234	809,5	N.S.
TypIIost	400	500	0,32201169452854	739	N.S.
OstInt	400	500	0,635227485844286	788,5	N.S.
OstFrag	400	500	0,554115449227829	904	N.S.
OPD	400	500	0,911196840120929	827,5	N.S.
ResLak	400	500	0,447643326409935	917,5	N.S.
Havers	400	500	0,635227485844286	788,5	N.S.
NonHavers	400	500	0,564299669828699	897	N.S.
VolkM	400	500	0,791176523003024	867	N.S.
ResKno	400	500	0,462963184102933	919,5	N.S.
GenLam	400	500	0,937059587768078	849	N.S.
OstKno	400	500	0,285647618341927	724,5	N.S.
FragKno	400	500	0,0592700963648922	1043,5	N.S.
OstFl	400	500	0,77717321102654	809	N.S.
OstU	400	500	0,77717321102654	809	N.S.
OstD	400	500	0,77717321102654	809	N.S.
ResLakFl	400	500	0,944380001444782	832	N.S.
AktFr	400	500	0,996319567009001	841	N.S.
BFr	400	500	0,764269801712588	807	N.S.
PctBfr	400	500	0,764269801712588	807	N.S.
AOC	400	500	0,911196840120929	827,5	N.S.
SekOst	500	600	0,559804335066814	757	N.S.
TypIIost	500	600	0,803467233237433	794	N.S.
OstInt	500	600	0,631990316911196	768	N.S.
OstFrag	500	600	0,753755958124117	785,5	N.S.
OPD	500	600	0,835017961803731	796,5	N.S.
ResLak	500	600	0,288291662732429	712	N.S.
Havers	500	600	0,631990316911196	768	N.S.
NonHavers	500	600	0,365596930648824	730,5	N.S.
VolkM	500	600	0,519925538299952	755	N.S.
ResKno	500	600	0,988666823104079	821	N.S.
GenLam	500	600	0,913331203565513	831	N.S.
OstKno	500	600	0,67374653521805	774	N.S.
FragKno	500	600	0,103247406734122	646,5	N.S.
OstFl	500	600	0,501943989530188	890,5	N.S.
OstU	500	600	0,501943989530188	890,5	N.S.
OstD	500	600	0,501943989530188	890,5	N.S.
ResLakFl	500	600	0,139064915226163	975,5	N.S.
AktFr	500	600	0,661955433617765	772	N.S.
BFr	500	600	0,854566949106337	839	N.S.
PctBfr	500	600	0,854566949106337	839	N.S.
AOC	500	600	0,835017961803731	796,5	N.S.
SekOst	600	700	0,00121409058973054	397	**
TypIIost	600	700	0,199014776775929	814	N.S.
OstInt	600	700	0,0023614063692313	415,5	**

Parameter	Temperatur1	Temperatur2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
OstFrag	600	700	0,689219719272199	664	N.S.
OPD	600	700	0,00655343076218837	445,5	**
ResLak	600	700	0,464282037889439	636	N.S.
Havers	600	700	0,0023614063692313	415,5	**
NonHavers	600	700	0,000770773263415662	397	***
VolkM	600	700	0,184789768736344	818	N.S.
ResKno	600	700	0,885969540182517	688	N.S.
GenLam	600	700	0,0470522641459649	514,5	*
OstKno	600	700	0,175864609156089	830	N.S.
FragKno	600	700	0,506546393610559	765	N.S.
OstFl	600	700	1,34E+09	1113	***
OstU	600	700	1,34E+09	1113	***
OstD	600	700	1,34E+09	1113	***
ResLakFl	600	700	0,440800401814715	775	N.S.
AktFr	600	700	0,0320452430483446	500	*
BFr	600	700	0,318239311513995	797	N.S.
PctBfr	600	700	0,318239311513995	797	N.S.
AOC	600	700	0,00655343076218837	445,5	**
SekOst	700	800	0,0641165225255421	641	N.S.
TypIIost	700	800	0,236464327971798	584,5	N.S.
OstInt	700	800	0,043219536101536	653,5	*
OstFrag	700	800	0,643704035577128	538,5	N.S.
OPD	700	800	0,0374855832719134	658	*
ResLak	700	800	0,988550665923957	505,5	N.S.
Havers	700	800	0,043219536101536	653,5	*
NonHavers	700	800	0,57896637857381	544	N.S.
VolkM	700	800	0,23987180669134	581	N.S.
ResKno	700	800	0,81239412281912	486	N.S.
GenLam	700	800	0,089067454649476	378	N.S.
OstKno	700	800	0,150816701596638	610,5	N.S.
FragKno	700	800	1	504	N.S.
OstFl	700	800	0,223161559733155	413,5	N.S.
OstU	700	800	0,223161559733155	413,5	N.S.
OstD	700	800	0,223161559733155	413,5	N.S.
ResLakFl	700	800	0,496963769452601	453,5	N.S.
AktFr	700	800	0,662219975471799	537	N.S.
BFr	700	800	0,983921237740939	506	N.S.
PctBfr	700	800	0,983921237740939	506	N.S.
AOC	700	800	0,0374855832719134	658	*
SekOst	800	900	0,777918937938088	225,5	N.S.
TypIIost	800	900	0,681847133212058	254,5	N.S.
OstInt	800	900	0,681045003542968	220	N.S.
OstFrag	800	900	0,243103867006708	288	N.S.
OPD	800	900	0,869537266093737	245,5	N.S.
ResLak	800	900	0,684573687765175	221	N.S.
Havers	800	900	0,681045003542968	220	N.S.
NonHavers	800	900	0,5892983134755	215,5	N.S.
VolkM	800	900	0,851976735494882	245	N.S.

Parameter	Temperatur1	Temperatur2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
ResKno	800	900	0,707292636859077	221,5	N.S.
GenLam	800	900	0,432379073978058	272	N.S.
OstKno	800	900	0,392012156315909	201	N.S.
FragKno	800	900	0,638828614052082	258,5	N.S.
OstFl	800	900	0,743039037707617	223,5	N.S.
OstU	800	900	0,743039037707617	223,5	N.S.
OstD	800	900	0,743039037707617	223,5	N.S.
ResLakFl	800	900	0,934533659479657	242	N.S.
AktFr	800	900	0,734253665469125	223	N.S.
BFr	800	900	0,504619209074937	209	N.S.
PctBfr	800	900	0,504619209074937	209	N.S.
AOC	800	900	0,869537266093737	245,5	N.S.
SekOst	900	1000	0,473538081029716	298,5	N.S.
TypIIost	900	1000	0,00609187057143529	190	**
OstInt	900	1000	0,266987000823501	276	N.S.
OstFrag	900	1000	0,208456472438212	268	N.S.
OPD	900	1000	0,204785134752461	267	N.S.
ResLak	900	1000	0,405285990338956	387	N.S.
Havers	900	1000	0,266987000823501	276	N.S.
NonHavers	900	1000	0,781220930318847	356	N.S.
VolkM	900	1000	0,200035083209019	274	N.S.
ResKno	900	1000	0,302306962242706	399,5	N.S.
GenLam	900	1000	0,687526184542113	316,5	N.S.
OstKno	900	1000	0,944314615452735	335,5	N.S.
FragKno	900	1000	0,779342618524315	356,5	N.S.
OstFl	900	1000	0,320091740649986	397,5	N.S.
OstU	900	1000	0,320091740649986	397,5	N.S.
OstD	900	1000	0,320091740649986	397,5	N.S.
ResLakFl	900	1000	0,204563744031348	413	N.S.
AktFr	900	1000	0,141631275759482	255	N.S.
BFr	900	1000	0,527960043445225	303	N.S.
PctBfr	900	1000	0,527960043445225	303	N.S.
AOC	900	1000	0,204785134752461	267	N.S.

Tabelle 26: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter im mittleren Bereich der Kompakta zwischen den Positionen der anterioren Femurdiaphyse; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Position1	Position2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
NonHavers	1	3	0,0477381794715431	675,5	*
SekOst	1	4	0,0284661866550272	621	*
OstInt	1	4	0,00904308533436595	575	**
Havers	1	4	0,00904308533436595	575	**
OstFl	1	4	0,0222332123586711	1112,5	*
OstU	1	4	0,0222332123586711	1112,5	*
OstD	1	4	0,0222332123586711	1112,5	*
GenLam	1	6	0,0212676598970707	624,5	*
NonHavers	1	10	0,0128862866998487	426	*
GenLam	1	10	3,47E+09	267,5	***

Parameter	Position1	Position2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
FragKno	1	10	0,0160144977128599	841	*
BFr	1	10	0,0386942525340929	811,5	*
PctBfr	1	10	0,0386942525340929	811,5	*
TypII Ost	1	11	0,0474271312578769	563,5	*
OstFrag	1	11	0,0482397759647659	576,5	*
OPD	1	11	0,00273726471649224	646,5	**
GenLam	1	11	1,00E+10	174	***
OstKno	1	11	0,0449108181492807	579	*
AOC	1	11	0,00273726471649224	646,5	**
OstKno	2	3	0,0315198511772332	624,5	*
ResLakFl	2	3	0,0248876023163783	1106,5	*
OstInt	2	4	0,0388718307727691	618	*
Havers	2	4	0,0388718307727691	618	*
VolkM	2	10	0,0217869830414134	796,5	*
GenLam	2	10	0,00126576686418029	338	**
FragKno	2	10	0,0042869475683584	860,5	**
SekOst	2	11	0,0422867801464838	567	*
OstInt	2	11	0,0251584474611494	581	*
OstFrag	2	11	0,0308861718342019	575,5	*
OPD	2	11	0,00219590762069941	636,5	**
Havers	2	11	0,0251584474611494	581	*
GenLam	2	11	0,00180266041425401	220,5	**
AOC	2	11	0,00219590762069941	636,5	**
GenLam	3	6	0,0242192148015484	630	*
OstKno	3	6	0,022453377913565	1137,5	*
ResLakFl	3	6	0,0130623182071759	606	*
OstKno	3	7	0,0162529344291854	1151	*
TypII Ost	3	8	0,00276495365191491	1197,5	**
OstFrag	3	8	0,0469976091912444	660,5	*
ResLak	3	8	0,0266315506022168	638,5	*
OstKno	3	8	0,00240458171201092	1221,5	**
TypII Ost	3	9	0,0098548593225909	1000,5	**
ResLak	3	9	0,0139735936378838	515	*
ResKno	3	9	0,011145365924898	503	*
OstKno	3	9	0,00590789442385448	1031	**
ResLakFl	3	9	0,0293163254641385	539	*
TypII Ost	3	10	0,0358965889966575	802	*
VolkM	3	10	0,00518882060743285	857,5	**
GenLam	3	10	3,63E+09	268,5	***
OstKno	3	10	0,00687597833976416	867	**
FragKno	3	10	0,0272685532429185	823,5	*
SekOst	3	11	0,00957427997199872	618,5	**
TypII Ost	3	11	0,00128156921066883	647,5	**
OstInt	3	11	0,00151787733048653	658	**
OPD	3	11	0,0028002692569986	646	**
Havers	3	11	0,00151787733048653	658	**
GenLam	3	11	0,000134126552667478	179	***
OstKno	3	11	0,0014010877430545	660,5	**

Parameter	Position1	Position2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
AOC	3	11	0,0028002692569986	646	**
GenLam	4	6	0,00779106439923996	569	**
GenLam	4	7	0,0403980027840151	636	*
SekOst	4	8	0,0291513029855221	1100	*
TypII Ost	4	8	0,0177847818743109	1109	*
OstInt	4	8	0,00918607219678998	1146,5	**
ResLak	4	8	0,013058617053162	594,5	*
Havers	4	8	0,00918607219678998	1146,5	**
VolkM	4	8	0,0184433515027625	1106,5	*
GenLam	4	8	0,0148548221647683	594	*
OstKno	4	8	0,0169194935077407	1123,5	*
TypII Ost	4	9	0,0358380157490501	935	*
OstInt	4	9	0,0424504918543327	936,5	*
ResLak	4	9	0,00407127156819336	463	**
Havers	4	9	0,0379547453212398	941	*
ResKno	4	9	0,0240839190989186	517	*
GenLam	4	9	0,0493419539133272	545,5	*
OstKno	4	9	0,0292154896590199	952	*
ResLak	4	10	0,0298765262679697	433	*
VolkM	4	10	0,000980560999331497	881,5	***
GenLam	4	10	6,11E+08	227	***
OstKno	4	10	0,0397777643603448	792	*
FragKno	4	10	0,000577286488920735	910,5	***
SekOst	4	11	0,000353543503289069	670	***
TypII Ost	4	11	0,0104782844600372	594,5	*
OstInt	4	11	0,000118571343770502	689	***
OstFrag	4	11	0,0229549239908558	583	*
OPD	4	11	0,000124725158345955	688,5	***
Havers	4	11	0,000118571343770502	689	***
GenLam	4	11	3,95E+09	154,5	***
OstKno	4	11	0,00252135302725386	634	**
AOC	4	11	0,000124725158345955	688,5	***
TypII Ost	5	8	0,0391261237054518	1048	*
ResLak	5	8	0,029001628886958	610	*
ResLak	5	9	0,010885765360253	481	*
ResKno	5	9	0,0459448200718246	528	*
GenLam	5	10	0,000618598365487665	311,5	***
FragKno	5	10	0,00758868162877609	825	**
SekOst	5	11	0,00979243584256368	590	**
TypII Ost	5	11	0,0131277851036859	571	*
OstInt	5	11	0,00485487940929968	605,5	**
OstFrag	5	11	0,0253284583258859	567	*
OPD	5	11	0,000708428137667897	643	***
Havers	5	11	0,00485487940929968	605,5	**
GenLam	5	11	0,00108216732496542	204,5	**
OstKno	5	11	0,0174722625460486	577	*
AOC	5	11	0,000708428137667897	643	***
ResLak	6	8	0,0284266183620717	643	*

Parameter	Position1	Position2	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
ResLak	6	9	0,00908343031610243	502,5	**
OstFrag	6	10	0,0335837582003399	816	*
VolkM	6	10	0,0323985964924881	802	*
GenLam	6	10	0,0250125488802618	433,5	*
FragKno	6	10	0,0252906673905534	826	*
SekOst	6	11	0,00924436391888228	619	**
TypIIost	6	11	0,0388830929023341	569,5	*
OstInt	6	11	0,00573232120558175	630	**
OstFrag	6	11	0,0100478964248066	617,5	*
OPD	6	11	0,000360705324759968	685,5	***
Havers	6	11	0,00573232120558175	630	**
GenLam	6	11	0,0236531195737631	285,5	*
OstKno	6	11	0,0241666671783793	596	*
AOC	6	11	0,000360705324759968	685,5	***
TypIIost	7	8	0,0496479509441712	1087,5	*
VolkM	7	10	0,00342169457233881	868,5	**
GenLam	7	10	0,0076992582169535	396,5	**
FragKno	7	10	0,000692565501057765	927	***
SekOst	7	11	0,0191152681353144	601,5	*
TypIIost	7	11	0,0190338001693623	590	*
OstInt	7	11	0,0117763191457475	613,5	*
OstFrag	7	11	0,0188695819421441	602	*
OPD	7	11	0,00365040228276388	640,5	**
Havers	7	11	0,0117763191457475	613,5	*
GenLam	7	11	0,00957698170979259	263	**
OstKno	7	11	0,0480838469368405	577	*
AOC	7	11	0,00365040228276388	640,5	**
OstFrag	8	10	0,0128200876186679	847,5	*
NonHavers	8	10	0,0225201635542193	442	*
GenLam	8	10	0,00257022403356321	366	**
FragKno	8	10	0,00386418423594947	883	**
OstFrag	8	11	0,00260331783243852	647	**
OPD	8	11	0,00215831030169109	651,5	**
GenLam	8	11	0,00504311034148345	248,5	**
AOC	8	11	0,00215831030169109	651,5	**
VolkM	9	10	0,00654367829366249	735,5	**
GenLam	9	10	0,00649907492026655	328,5	**
SekOst	9	11	0,0219022155567659	516,5	*
OstInt	9	11	0,0158279026727992	523,5	*
OPD	9	11	0,00170701542374754	567,5	**
Havers	9	11	0,0158261848384839	523,5	*
GenLam	9	11	0,0097785025162045	221,5	**
OstKno	9	11	0,0417652416515616	501,5	*
AOC	9	11	0,00170701542374754	567,5	**
SekOst	10	11	0,0171209776419197	439,5	*
OstInt	10	11	0,0118313689329321	446,5	*
Havers	10	11	0,0118313689329321	446,5	*

Tabelle 27: Tabelle der mittels des R-Pockages „MVOutlier“ detektierten Ausreißer aus dem Datensatz vom mittleren Bereich der kompakta anhand der gezählten Parameter (SekOst=sekundäre Osteone, TypIOst=Typ-II-Osteone, IntOst=intakke Osteone, OstFrag=Ostkonfragmente, Reslak=Resorptionsläkunen, Hawkan=Havers'sche Kanäle, NichtHavers=nicht-Havers'sche Kanäle, VolkM=Volkmann'sche Kanäle, Reskno=resorbierter Knochen, GenLam=Generallamellen, OstKno=osteotraler Knochen, FragKno=fragmentaler Knochen;

Probe	SekOst	TypIOst	IntOst	OstFrag	OPD	Reslak	Hawkan	NichtHavers	VolkM	Reskno	GenLam	OstKno	FragKno	Individualalter	Temperatur
WF19(1)jnv_mittig_1	4	1	5	18	23	6	5	0	0	36	6	16	42	76	RT
WF45(1)jnv_mittig_2	2	0	2	6	8	5	2	0	0	44	11	22	23	16	RT
WF45(1)jnv_mittig_3	2	0	2	5	7	3	2	1	0	27	25	20	28	16	RT
WF37(2)jnv_mittig_1	8	1	9	15	24	2	9	0	1	22	1	35	42	87	RT
WF29a(2)jnv_mittig_3	21	5	26	17	43	1	26	2	2	2	14	59	25	89	RT
WF37(3)jnv_mittig_2	16	4	20	15	35	0	20	2	1	0	8	61	31	87	RT
WF19(3)jnv_mittig_3	6	2	8	16	24	7	8	0	1	36	7	30	27	76	RT
WF2(3)jnv_mittig_1	10	1	11	10	21	0	11	0	0	0	39	42	19	80	RT
WF34(3)jnv_mittig_2	8	2	10	9	19	5	10	0	1	24	9	47	20	68	RT
WF37(4)jnv_mittig_1	11	5	16	18	34	2	16	0	2	12	3	58	27	87	RT
WF19(4)jnv_mittig_2	8	1	9	10	19	7	9	0	0	48	9	27	16	76	RT
WF29a(4)jnv_mittig_2	21	2	23	11	34	0	23	5	3	0	6	73	21	89	RT
WF29a(5)jnv_mittig_1	18	1	19	18	37	0	19	3	3	0	8	52	40	89	RT
WF45(5)jnv_mittig_1	6	0	6	5	11	1	6	0	0	9	22	28	41	16	RT
WF37(6)jnv_mittig_1	9	1	10	20	30	3	10	0	0	14	4	32	50	87	RT
WF15(6)jnv_mittig_1	15	0	15	17	32	1	15	3	0	6	27	48	19	79	RT
WF29a(6)jnv_mittig_2	22	2	24	9	33	0	24	7	3	0	15	72	13	89	RT
WF45(6)jnv_mittig_1	2	0	2	7	9	2	2	1	2	12	25	14	49	16	RT
WF37(7)jnv_mittig_3	10	2	12	25	37	2	12	0	0	16	7	37	40	87	RT
WF19(7)jnv_mittig_3	3	0	3	10	13	7	3	0	0	47	15	12	26	76	RT
WF15(7)jnv_mittig_3	16	2	18	26	44	1	18	0	1	11	2	47	40	79	RT
WF37(8)jnv_mittig_3	10	6	16	15	31	0	16	0	1	0	7	58	35	87	RT
WF19(8)jnv_mittig_1	5	0	5	11	16	5	5	1	0	54	7	16	23	76	RT
WF26(8)jnv_mittig_1	11	0	11	12	23	6	11	1	0	25	6	39	30	72	RT
WF29a(8)jnv_mittig_3	22	1	23	13	36	1	23	5	2	2	16	71	11	89	RT
WF39a(8)jnv_mittig_1	10	1	11	8	19	2	11	0	1	31	14	38	17	69	RT
WF28(9)jnv_mittig_2	7	1	8	8	16	7	8	1	1	35	16	37	12	64	RT
WF4(9)jnv_mittig_2	8	1	9	16	25	2	9	0	1	34	3	34	29	95	RT
WF38(10)jnv_mittig_2	13	4	17	10	27	0	17	1	1	0	29	51	20	54	RT
WF38(10)jnv_mittig_3	9	1	10	8	18	0	10	4	0	3	41	37	19	54	RT
WF26(10)jnv_mittig_3	14	1	15	13	28	5	15	3	1	15	10	52	23	72	RT
WF15(10)jnv_mittig_2	9	1	10	15	25	7	10	0	0	32	17	32	19	79	RT
WF15(10)jnv_mittig_3	4	2	6	14	20	5	6	0	0	36	4	24	36	79	RT
WF29a(10)jnv_mittig_2	20	1	21	14	35	2	21	6	2	7	14	59	20	89	RT
WF39a(10)jnv_mittig_1	6	0	6	5	11	3	6	1	0	35	21	37	7	69	RT

Probe	SekOst	TypIIOst	IntOst	OstFrag	OPD	Reslak	Havkan	NichtHavers	Volkm	Reskno	Genlam	Ostkno	Fragkno	Individualalter	Temperatur
WF45(1)unv_mittig_3	4	0	4	9	13	2	4	1	0	5	30	24	41	16	RT
WF5_unv_mittig_3	20	6	26	12	38	1	26	1	4	5	9	73	13	55	RT
WF47_unv_mittig_3	11	0	11	3	14	0	11	7	0	0	33	62	5	22	RT
WF53_unv_mittig_1	1	2	3	19	22	6	3	0	0	58	8	14	20	82	RT
WF53_unv_mittig_2	3	2	5	30	35	4	5	0	0	27	10	13	50	82	RT
WF36_unv_mittig_1	7	1	8	16	24	5	8	0	0	44	9	23	24	78	RT
WF36_unv_mittig_2	7	3	10	12	22	4	10	0	1	38	7	36	19	78	RT
WF40b_unv_mittig_1	8	2	10	14	24	5	10	0	0	18	26	27	29	73	RT
WF41_unv_mittig_2	13	4	17	23	40	1	17	0	1	4	5	60	31	64	RT
WF20b_unv_mittig_1	5	1	6	10	16	5	6	1	0	47	9	25	19	86	RT
FS01-13 unv_mittig_1	11	1	12	6	18	0	12	7	1	0	49	43	8	20	RT
FS01-15 unv_mittig_2	14	3	17	22	39	0	17	0	0	0	16	57	27	63	RT
WF19(2)100Grad_mittig_2	7	0	7	9	16	2	7	1	0	30	16	32	22	76	100
WF45(2)100Grad_mittig_2	4	0	4	1	5	1	4	1	0	5	35	29	31	16	100
WF37(3)200Grad_mittig_3	5	2	7	16	23	5	7	0	0	22	6	27	45	87	200
WF29a(3)200Grad_mittig_1	18	1	19	24	43	0	19	1	0	0	12	53	35	89	200
WF37(4)300Grad_mittig_3	7	1	8	15	23	4	8	0	0	36	6	22	36	87	300
WF45(4)300Grad_mittig_1	10	0	10	8	18	2	10	0	1	13	39	35	13	16	300
WF45(4)300Grad_mittig_3	6	0	6	9	15	2	6	1	0	32	29	16	23	16	300
WF37(5)400Grad_mittig_3	10	3	13	8	21	1	13	0	0	6	33	48	13	87	400
WF26(5)400Grad_mittig_2	9	0	9	11	20	4	9	1	0	23	35	33	9	72	400
WF29b(5)400Grad_mittig_2	6	0	6	10	16	2	6	1	0	32	7	43	18	82	400
WF45(5)400Grad_mittig_1	7	1	8	7	15	1	8	0	3	12	8	43	37	16	400
WF45(5)400Grad_mittig_3	7	0	7	7	14	1	7	0	0	9	14	43	34	16	400
WF2(6)500Grad_mittig_3	12	0	12	5	17	1	12	1	0	8	41	45	6	80	500
WF29a(6)500Grad_mittig_1	27	2	29	14	43	0	29	3	0	0	7	76	17	89	500
WF37(7)600Grad_mittig_1	5	2	7	10	17	4	7	0	0	39	18	28	15	87	600
WF29a(7)600Grad_mittig_1	26	1	27	11	38	1	27	1	1	5	14	65	16	89	600
WF34(7)600Grad_mittig_3	14	2	16	4	20	2	16	3	0	18	11	63	8	68	600
WF45(7)600Grad_mittig_1	6	0	6	5	11	3	6	1	0	16	17	32	35	16	600
WF26(8)700Grad_mittig_3	24	1	25	10	35	3	25	1	0	9	21	59	11	72	700
WF2(8)700Grad_mittig_2	24	2	26	8	34	1	26	1	1	7	10	70	13	80	700
WF15(8)700Grad_mittig_3	21	2	23	13	36	2	23	1	1	27	17	38	18	79	700
WF29a(8)700Grad_mittig_1	23	1	24	18	42	1	24	3	1	4	30	54	12	89	700
WF29a(8)700Grad_mittig_2	30	0	30	9	39	1	30	4	1	3	23	58	16	89	700
WF29a(8)700Grad_mittig_3	35	1	36	9	45	0	35	4	1	0	18	74	8	89	700
WF45(8)700Grad_mittig_1	5	0	5	6	11	1	5	2	1	8	26	30	36	16	700
WF45(8)700Grad_mittig_2	6	0	6	3	9	3	6	8	2	15	53	17	15	16	700

Probe	SekOst	TypIIost	IntOst	OstFrag	OPD	Reslak	Havkan	NichtHavers	Volkm	Reskno	Genlam	Ostkno	Fragkno	Individualalter	Temperatur
WF45(8)700Grad_mittig_3	6	0	6	5	11	1	6	0	1	13	28	33	26	16	700
WF4(8)700Grad_mittig_2	20	0	20	12	32	1	20	1	1	10	32	44	14	95	700
WF19(9)800Grad_mittig_1	9	0	9	13	22	2	9	3	0	26	27	24	23	76	800
WF28(9)800Grad_mittig_3	25	1	26	12	38	1	26	3	0	6	8	65	21	64	800
WF15(9)800Grad_mittig_1	26	0	26	15	41	3	26	2	0	11	16	56	17	79	800
WF15(9)800Grad_mittig_2	23	1	24	19	43	2	24	3	0	11	21	43	25	79	800
WF45(9)800Grad_mittig_1	6	0	6	12	18	2	6	0	0	15	48	25	12	16	800
WF45(9)800Grad_mittig_3	6	0	6	4	10	2	6	9	0	13	46	22	19	16	800
WF2(10)900Grad_mittig_1	25	0	25	8	33	3	25	2	0	13	7	68	12	80	900
WF15(10)900Grad_mittig_1	26	0	26	13	39	3	26	1	0	11	24	47	18	79	900
WF34(10)900Grad_mittig_3	15	2	17	12	29	2	17	7	1	8	18	59	15	68	900
WF39a(10)900Grad_mittig_3	15	1	16	11	27	1	16	5	0	7	14	62	17	69	900
WF45(10)900Grad_mittig_3	0	0	0	4	4	4	0	7	0	32	44	0	24	16	900
WF15(11)1000Grad_mittig_2	16	0	16	8	24	6	16	2	0	29	18	41	12	79	1000
WF5_950Grad_mittig_2	36	3	39	8	47	2	39	6	0	5	18	69	8	55	1000
WF33_950Grad_mittig_1	14	1	15	10	25	1	15	1	1	21	25	39	15	82	1000
F501-14 950Grad_mittig_2	22	3	25	14	39	0	25	4	2	0	23	57	20	63	1000
F502-14 950Grad_mittig_3	14	2	16	10	26	2	16	3	1	22	6	57	15	60	1000

Tabelle 28: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Test für alle untersuchten histomorphometrischen Parameter männlicher Individuen im periostalen Bereich der Femurkompakta über alle Verbrennungsstufen (RT-1000°C); der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur [°C]
SekOst	2,14E+08	0,980029605500448	***	100
TypII Ost	1,42E-09	0,81596312741963	***	100
OstInt	2,14E+08	0,980034880552648	***	100
OstFrag	0,000717153095691626	0,988889494555541	***	100
OPD	6,16E+03	0,963069099087382	***	100
ResLak	1,60E-03	0,901327976058673	***	100
Havers	3,32E+08	0,980783146725523	***	100
NonHavers	1,16E-19	0,559835648017561	***	100
VolkM	2,94E-13	0,741998867825296	***	100
ResKno	1,13E+03	0,952353561150522	***	100
GenLam	4,43E-07	0,855971416792626	***	100
OstKno	1,73E+02	0,953581773794277	***	100
FragKno	3,16E+04	0,966967057028449	***	100
OstFl	3,25E-16	0,694304023101745	***	100
OstU	1,43E-08	0,832963192274877	***	100
OstD	8,65E-10	0,829359521791094	***	100
ResLakFl	1,62E-05	0,877465674582111	***	100
AktFr	2,38E-19	0,570548801870911	***	100
Knochenbildungsrate	2,46E-24	0,371158790480215	***	100
BFR	1,70E-24	0,363636834224565	***	100
AOC	1,94E-16	0,661082282434468	***	100
SekOst	2,14E+08	0,980029605500448	***	200
TypII Ost	1,42E-09	0,81596312741963	***	200
OstInt	2,14E+08	0,980034880552648	***	200
OstFrag	0,000717153095691626	0,988889494555541	***	200
OPD	6,16E+03	0,963069099087382	***	200
ResLak	1,60E-03	0,901327976058673	***	200
Havers	3,32E+08	0,980783146725523	***	200
NonHavers	1,16E-19	0,559835648017561	***	200
VolkM	2,94E-13	0,741998867825296	***	200
ResKno	1,13E+03	0,952353561150522	***	200
GenLam	4,43E-07	0,855971416792626	***	200
OstKno	1,73E+02	0,953581773794277	***	200
FragKno	3,16E+04	0,966967057028449	***	200
OstFl	3,25E-16	0,694304023101745	***	200
OstU	1,43E-08	0,832963192274877	***	200
OstD	8,65E-10	0,829359521791094	***	200
ResLakFl	1,62E-05	0,877465674582111	***	200
AktFr	2,38E-19	0,570548801870911	***	200

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur [°C]
Knochenbildungsrate	2,46E-24	0,371158790480215	***	200
BFR	1,70E-24	0,363636834224565	***	200
AOC	1,94E-16	0,661082282434468	***	200
SekOst	2,14E+08	0,980029605500448	***	300
TypIIOst	1,42E-09	0,81596312741963	***	300
OstInt	2,14E+08	0,980034880552648	***	300
OstFrag	0,000717153095691626	0,988889494555541	***	300
OPD	6,16E+03	0,963069099087382	***	300
ResLak	1,60E-03	0,901327976058673	***	300
Havers	3,32E+08	0,980783146725523	***	300
NonHavers	1,16E-19	0,559835648017561	***	300
VolkM	2,94E-13	0,741998867825296	***	300
ResKno	1,13E+03	0,952353561150522	***	300
GenLam	4,43E-07	0,855971416792626	***	300
OstKno	1,73E+02	0,953581773794277	***	300
FragKno	3,16E+04	0,966967057028449	***	300
OstFl	3,25E-16	0,694304023101745	***	300
OstU	1,43E-08	0,832963192274877	***	300
OstD	8,65E-10	0,829359521791094	***	300
ResLakFl	1,62E-05	0,877465674582111	***	300
AktFr	2,38E-19	0,570548801870911	***	300
Knochenbildungsrate	2,46E-24	0,371158790480215	***	300
BFR	1,70E-24	0,363636834224565	***	300
AOC	1,94E-16	0,661082282434468	***	300
SekOst	2,14E+08	0,980029605500448	***	400
TypIIOst	1,42E-09	0,81596312741963	***	400
OstInt	2,14E+08	0,980034880552648	***	400
OstFrag	0,000717153095691626	0,988889494555541	***	400
OPD	6,16E+03	0,963069099087382	***	400
ResLak	1,60E-03	0,901327976058673	***	400
Havers	3,32E+08	0,980783146725523	***	400
NonHavers	1,16E-19	0,559835648017561	***	400
VolkM	2,94E-13	0,741998867825296	***	400
ResKno	1,13E+03	0,952353561150522	***	400
GenLam	4,43E-07	0,855971416792626	***	400
OstKno	1,73E+02	0,953581773794277	***	400
FragKno	3,16E+04	0,966967057028449	***	400
OstFl	3,25E-16	0,694304023101745	***	400
OstU	1,43E-08	0,832963192274877	***	400
OstD	8,65E-10	0,829359521791094	***	400
ResLakFl	1,62E-05	0,877465674582111	***	400
AktFr	2,38E-19	0,570548801870911	***	400

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur [°C]
Knochenbildungsrate	2,46E-24	0,371158790480215	***	400
BFR	1,70E-24	0,363636834224565	***	400
AOC	1,94E-16	0,661082282434468	***	400
SekOst	2,14E+08	0,980029605500448	***	500
TypIIOst	1,42E-09	0,81596312741963	***	500
OstInt	2,14E+08	0,980034880552648	***	500
OstFrag	0,000717153095691626	0,988889494555541	***	500
OPD	6,16E+03	0,963069099087382	***	500
ResLak	1,60E-03	0,901327976058673	***	500
Havers	3,32E+08	0,980783146725523	***	500
NonHavers	1,16E-19	0,559835648017561	***	500
VolkM	2,94E-13	0,741998867825296	***	500
ResKno	1,13E+03	0,952353561150522	***	500
GenLam	4,43E-07	0,855971416792626	***	500
OstKno	1,73E+02	0,953581773794277	***	500
FragKno	3,16E+04	0,966967057028449	***	500
OstFl	3,25E-16	0,694304023101745	***	500
OstU	1,43E-08	0,832963192274877	***	500
OstD	8,65E-10	0,829359521791094	***	500
ResLakFl	1,62E-05	0,877465674582111	***	500
AktFr	2,38E-19	0,570548801870911	***	500
Knochenbildungsrate	2,46E-24	0,371158790480215	***	500
BFR	1,70E-24	0,363636834224565	***	500
AOC	1,94E-16	0,661082282434468	***	500
SekOst	2,14E+08	0,980029605500448	***	600
TypIIOst	1,42E-09	0,81596312741963	***	600
OstInt	2,14E+08	0,980034880552648	***	600
OstFrag	0,000717153095691626	0,988889494555541	***	600
OPD	6,16E+03	0,963069099087382	***	600
ResLak	1,60E-03	0,901327976058673	***	600
Havers	3,32E+08	0,980783146725523	***	600
NonHavers	1,16E-19	0,559835648017561	***	600
VolkM	2,94E-13	0,741998867825296	***	600
ResKno	1,13E+03	0,952353561150522	***	600
GenLam	4,43E-07	0,855971416792626	***	600
OstKno	1,73E+02	0,953581773794277	***	600
FragKno	3,16E+04	0,966967057028449	***	600
OstFl	3,25E-16	0,694304023101745	***	600
OstU	1,43E-08	0,832963192274877	***	600
OstD	8,65E-10	0,829359521791094	***	600
ResLakFl	1,62E-05	0,877465674582111	***	600
AktFr	2,38E-19	0,570548801870911	***	600

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur [°C]
Knochenbildungsrate	2,46E-24	0,371158790480215	***	600
BFR	1,70E-24	0,363636834224565	***	600
AOC	1,94E-16	0,661082282434468	***	600
SekOst	2,14E+08	0,980029605500448	***	700
TypIIOst	1,42E-09	0,81596312741963	***	700
OstInt	2,14E+08	0,980034880552648	***	700
OstFrag	0,000717153095691626	0,988889494555541	***	700
OPD	6,16E+03	0,963069099087382	***	700
ResLak	1,60E-03	0,901327976058673	***	700
Havers	3,32E+08	0,980783146725523	***	700
NonHavers	1,16E-19	0,559835648017561	***	700
VolkM	2,94E-13	0,741998867825296	***	700
ResKno	1,13E+03	0,952353561150522	***	700
GenLam	4,43E-07	0,855971416792626	***	700
OstKno	1,73E+02	0,953581773794277	***	700
FragKno	3,16E+04	0,966967057028449	***	700
OstFl	3,25E-16	0,694304023101745	***	700
OstU	1,43E-08	0,832963192274877	***	700
OstD	8,65E-10	0,829359521791094	***	700
ResLakFl	1,62E-05	0,877465674582111	***	700
AktFr	2,38E-19	0,570548801870911	***	700
Knochenbildungsrate	2,46E-24	0,371158790480215	***	700
BFR	1,70E-24	0,363636834224565	***	700
AOC	1,94E-16	0,661082282434468	***	700
SekOst	2,14E+08	0,980029605500448	***	800
TypIIOst	1,42E-09	0,81596312741963	***	800
OstInt	2,14E+08	0,980034880552648	***	800
OstFrag	0,000717153095691626	0,988889494555541	***	800
OPD	6,16E+03	0,963069099087382	***	800
ResLak	1,60E-03	0,901327976058673	***	800
Havers	3,32E+08	0,980783146725523	***	800
NonHavers	1,16E-19	0,559835648017561	***	800
VolkM	2,94E-13	0,741998867825296	***	800
ResKno	1,13E+03	0,952353561150522	***	800
GenLam	4,43E-07	0,855971416792626	***	800
OstKno	1,73E+02	0,953581773794277	***	800
FragKno	3,16E+04	0,966967057028449	***	800
OstFl	3,25E-16	0,694304023101745	***	800
OstU	1,43E-08	0,832963192274877	***	800
OstD	8,65E-10	0,829359521791094	***	800
ResLakFl	1,62E-05	0,877465674582111	***	800
AktFr	2,38E-19	0,570548801870911	***	800

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur [°C]
Knochenbildungsrate	2,46E-24	0,371158790480215	***	800
BFR	1,70E-24	0,363636834224565	***	800
AOC	1,94E-16	0,661082282434468	***	800
SekOst	2,14E+08	0,980029605500448	***	900
TypII Ost	1,42E-09	0,81596312741963	***	900
OstInt	2,14E+08	0,980034880552648	***	900
OstFrag	0,000717153095691626	0,988889494555541	***	900
OPD	6,16E+03	0,963069099087382	***	900
ResLak	1,60E-03	0,901327976058673	***	900
Havers	3,32E+08	0,980783146725523	***	900
NonHavers	1,16E-19	0,559835648017561	***	900
VolkM	2,94E-13	0,741998867825296	***	900
ResKno	1,13E+03	0,952353561150522	***	900
GenLam	4,43E-07	0,855971416792626	***	900
OstKno	1,73E+02	0,953581773794277	***	900
FragKno	3,16E+04	0,966967057028449	***	900
OstFl	3,25E-16	0,694304023101745	***	900
OstU	1,43E-08	0,832963192274877	***	900
OstD	8,65E-10	0,829359521791094	***	900
ResLakFl	1,62E-05	0,877465674582111	***	900
AktFr	2,38E-19	0,570548801870911	***	900
Knochenbildungsrate	2,46E-24	0,371158790480215	***	900
BFR	1,70E-24	0,363636834224565	***	900
AOC	1,94E-16	0,661082282434468	***	900
SekOst	2,14E+08	0,980029605500448	***	1000
TypII Ost	1,42E-09	0,81596312741963	***	1000
OstInt	2,14E+08	0,980034880552648	***	1000
OstFrag	0,000717153095691626	0,988889494555541	***	1000
OPD	6,16E+03	0,963069099087382	***	1000
ResLak	1,60E-03	0,901327976058673	***	1000
Havers	3,32E+08	0,980783146725523	***	1000
NonHavers	1,16E-19	0,559835648017561	***	1000
VolkM	2,94E-13	0,741998867825296	***	1000
ResKno	1,13E+03	0,952353561150522	***	1000
GenLam	4,43E-07	0,855971416792626	***	1000
OstKno	1,73E+02	0,953581773794277	***	1000
FragKno	3,16E+04	0,966967057028449	***	1000
OstFl	3,25E-16	0,694304023101745	***	1000
OstU	1,43E-08	0,832963192274877	***	1000
OstD	8,65E-10	0,829359521791094	***	1000
ResLakFl	1,62E-05	0,877465674582111	***	1000
AktFr	2,38E-19	0,570548801870911	***	1000

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur [°C]
Knochenbildungsrate	2,46E-24	0,371158790480215	***	1000
BFR	1,70E-24	0,363636834224565	***	1000
AOC	1,94E-16	0,661082282434468	***	1000

Tabelle 29: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Test für alle untersuchten histomorphometrischen Parameter weiblicher Individuen im periostalen Bereich der Femurkompakta über alle Verbrennungsstufen (RT-1000°C); der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur [°C]
SekOst	4,87E+02	0,949469034756792	***	100
TypII Ost	8,55E-06	0,872748619451015	***	100
OstInt	4,00E+02	0,948874603106231	***	100
OstFrag	1,22E+08	0,978888501662224	***	100
OPD	0,000181781451035331	0,986900048689115	***	100
ResLak	3,83E+01	0,941385819035022	***	100
Havers	3,91E+02	0,948806285178092	***	100
NonHavers	1,59E-06	0,862710583454435	***	100
VolkM	9,65E-20	0,553048802843458	***	100
ResKno	1,04E+06	0,969392152725943	***	100
GenLam	1,50E-03	0,900205414052713	***	100
OstKno	0,00155288572610444	0,989828176851654	**	100
FragKno	0,0464736268095782	0,994020237403001	*	100
OstFl	3,26E-09	0,82068373343915	***	100
OstU	6,14E+06	0,973161658413691	***	100
OstD	1,63E+04	0,959380985428823	***	100
ResLakFl	2,46E+01	0,939892127245015	***	100
AktFr	5,78E-05	0,895487902317232	***	100
Knochenbildungsrate	1,69E-15	0,709928627627943	***	100
BFR	6,48E-12	0,789423124450935	***	100
AOC	1,12E-22	0,439282595663835	***	100
SekOst	4,87E+02	0,949469034756792	***	200
TypII Ost	8,55E-06	0,872748619451015	***	200
OstInt	4,00E+02	0,948874603106231	***	200
OstFrag	1,22E+08	0,978888501662224	***	200
OPD	0,000181781451035331	0,986900048689115	***	200
ResLak	3,83E+01	0,941385819035022	***	200
Havers	3,91E+02	0,948806285178092	***	200
NonHavers	1,59E-06	0,862710583454435	***	200
VolkM	9,65E-20	0,553048802843458	***	200
ResKno	1,04E+06	0,969392152725943	***	200
GenLam	1,50E-03	0,900205414052713	***	200
OstKno	0,00155288572610444	0,989828176851654	**	200
FragKno	0,0464736268095782	0,994020237403001	*	200
OstFl	3,26E-09	0,82068373343915	***	200
OstU	6,14E+06	0,973161658413691	***	200
OstD	1,63E+04	0,959380985428823	***	200
ResLakFl	2,46E+01	0,939892127245015	***	200
AktFr	5,78E-05	0,895487902317232	***	200
Knochenbildungsrate	1,69E-15	0,709928627627943	***	200

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur [°C]
BFR	6,48E-12	0,789423124450935	***	200
AOC	1,12E-22	0,439282595663835	***	200
SekOst	4,87E+02	0,949469034756792	***	300
TypII Ost	8,55E-06	0,872748619451015	***	300
OstInt	4,00E+02	0,948874603106231	***	300
OstFrag	1,22E+08	0,978888501662224	***	300
OPD	0,000181781451035331	0,986900048689115	***	300
ResLak	3,83E+01	0,941385819035022	***	300
Havers	3,91E+02	0,948806285178092	***	300
NonHavers	1,59E-06	0,862710583454435	***	300
VolkM	9,65E-20	0,553048802843458	***	300
ResKno	1,04E+06	0,969392152725943	***	300
GenLam	1,50E-03	0,900205414052713	***	300
OstKno	0,00155288572610444	0,989828176851654	**	300
FragKno	0,0464736268095782	0,994020237403001	*	300
OstFl	3,26E-09	0,82068373343915	***	300
OstU	6,14E+06	0,973161658413691	***	300
OstD	1,63E+04	0,959380985428823	***	300
ResLakFl	2,46E+01	0,939892127245015	***	300
AktFr	5,78E-05	0,895487902317232	***	300
Knochenbildungsrate	1,69E-15	0,709928627627943	***	300
BFR	6,48E-12	0,789423124450935	***	300
AOC	1,12E-22	0,439282595663835	***	300
SekOst	4,87E+02	0,949469034756792	***	400
TypII Ost	8,55E-06	0,872748619451015	***	400
OstInt	4,00E+02	0,948874603106231	***	400
OstFrag	1,22E+08	0,978888501662224	***	400
OPD	0,000181781451035331	0,986900048689115	***	400
ResLak	3,83E+01	0,941385819035022	***	400
Havers	3,91E+02	0,948806285178092	***	400
NonHavers	1,59E-06	0,862710583454435	***	400
VolkM	9,65E-20	0,553048802843458	***	400
ResKno	1,04E+06	0,969392152725943	***	400
GenLam	1,50E-03	0,900205414052713	***	400
OstKno	0,00155288572610444	0,989828176851654	**	400
FragKno	0,0464736268095782	0,994020237403001	*	400
OstFl	3,26E-09	0,82068373343915	***	400
OstU	6,14E+06	0,973161658413691	***	400
OstD	1,63E+04	0,959380985428823	***	400
ResLakFl	2,46E+01	0,939892127245015	***	400
AktFr	5,78E-05	0,895487902317232	***	400
Knochenbildungsrate	1,69E-15	0,709928627627943	***	400
BFR	6,48E-12	0,789423124450935	***	400
AOC	1,12E-22	0,439282595663835	***	400
SekOst	4,87E+02	0,949469034756792	***	500
TypII Ost	8,55E-06	0,872748619451015	***	500
OstInt	4,00E+02	0,948874603106231	***	500
OstFrag	1,22E+08	0,978888501662224	***	500

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur [°C]
OPD	0,000181781451035331	0,986900048689115	***	500
ResLak	3,83E+01	0,941385819035022	***	500
Havers	3,91E+02	0,948806285178092	***	500
NonHavers	1,59E-06	0,862710583454435	***	500
VolkM	9,65E-20	0,553048802843458	***	500
ResKno	1,04E+06	0,969392152725943	***	500
GenLam	1,50E-03	0,900205414052713	***	500
OstKno	0,00155288572610444	0,989828176851654	**	500
FragKno	0,0464736268095782	0,994020237403001	*	500
OstFl	3,26E-09	0,82068373343915	***	500
OstU	6,14E+06	0,973161658413691	***	500
OstD	1,63E+04	0,959380985428823	***	500
ResLakFl	2,46E+01	0,939892127245015	***	500
AktFr	5,78E-05	0,895487902317232	***	500
Knochenbildungsrate	1,69E-15	0,709928627627943	***	500
BFR	6,48E-12	0,789423124450935	***	500
AOC	1,12E-22	0,439282595663835	***	500
SekOst	4,87E+02	0,949469034756792	***	600
TypII Ost	8,55E-06	0,872748619451015	***	600
OstInt	4,00E+02	0,948874603106231	***	600
OstFrag	1,22E+08	0,97888501662224	***	600
OPD	0,000181781451035331	0,986900048689115	***	600
ResLak	3,83E+01	0,941385819035022	***	600
Havers	3,91E+02	0,948806285178092	***	600
NonHavers	1,59E-06	0,862710583454435	***	600
VolkM	9,65E-20	0,553048802843458	***	600
ResKno	1,04E+06	0,969392152725943	***	600
GenLam	1,50E-03	0,900205414052713	***	600
OstKno	0,00155288572610444	0,989828176851654	**	600
FragKno	0,0464736268095782	0,994020237403001	*	600
OstFl	3,26E-09	0,82068373343915	***	600
OstU	6,14E+06	0,973161658413691	***	600
OstD	1,63E+04	0,959380985428823	***	600
ResLakFl	2,46E+01	0,939892127245015	***	600
AktFr	5,78E-05	0,895487902317232	***	600
Knochenbildungsrate	1,69E-15	0,709928627627943	***	600
BFR	6,48E-12	0,789423124450935	***	600
AOC	1,12E-22	0,439282595663835	***	600
SekOst	4,87E+02	0,949469034756792	***	700
TypII Ost	8,55E-06	0,872748619451015	***	700
OstInt	4,00E+02	0,948874603106231	***	700
OstFrag	1,22E+08	0,97888501662224	***	700
OPD	0,000181781451035331	0,986900048689115	***	700
ResLak	3,83E+01	0,941385819035022	***	700
Havers	3,91E+02	0,948806285178092	***	700
NonHavers	1,59E-06	0,862710583454435	***	700
VolkM	9,65E-20	0,553048802843458	***	700
ResKno	1,04E+06	0,969392152725943	***	700

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur [°C]
GenLam	1,50E-03	0,900205414052713	***	700
OstKno	0,00155288572610444	0,989828176851654	**	700
FragKno	0,0464736268095782	0,994020237403001	*	700
OstFl	3,26E-09	0,82068373343915	***	700
OstU	6,14E+06	0,973161658413691	***	700
OstD	1,63E+04	0,959380985428823	***	700
ResLakFl	2,46E+01	0,939892127245015	***	700
AktFr	5,78E-05	0,895487902317232	***	700
Knochenbildungsrate	1,69E-15	0,709928627627943	***	700
BFR	6,48E-12	0,789423124450935	***	700
AOC	1,12E-22	0,439282595663835	***	700
SekOst	4,87E+02	0,949469034756792	***	800
TypII Ost	8,55E-06	0,872748619451015	***	800
OstInt	4,00E+02	0,948874603106231	***	800
OstFrag	1,22E+08	0,978888501662224	***	800
OPD	0,000181781451035331	0,986900048689115	***	800
ResLak	3,83E+01	0,941385819035022	***	800
Havers	3,91E+02	0,948806285178092	***	800
NonHavers	1,59E-06	0,862710583454435	***	800
VolkM	9,65E-20	0,553048802843458	***	800
ResKno	1,04E+06	0,969392152725943	***	800
GenLam	1,50E-03	0,900205414052713	***	800
OstKno	0,00155288572610444	0,989828176851654	**	800
FragKno	0,0464736268095782	0,994020237403001	*	800
OstFl	3,26E-09	0,82068373343915	***	800
OstU	6,14E+06	0,973161658413691	***	800
OstD	1,63E+04	0,959380985428823	***	800
ResLakFl	2,46E+01	0,939892127245015	***	800
AktFr	5,78E-05	0,895487902317232	***	800
Knochenbildungsrate	1,69E-15	0,709928627627943	***	800
BFR	6,48E-12	0,789423124450935	***	800
AOC	1,12E-22	0,439282595663835	***	800
SekOst	4,87E+02	0,949469034756792	***	900
TypII Ost	8,55E-06	0,872748619451015	***	900
OstInt	4,00E+02	0,948874603106231	***	900
OstFrag	1,22E+08	0,978888501662224	***	900
OPD	0,000181781451035331	0,986900048689115	***	900
ResLak	3,83E+01	0,941385819035022	***	900
Havers	3,91E+02	0,948806285178092	***	900
NonHavers	1,59E-06	0,862710583454435	***	900
VolkM	9,65E-20	0,553048802843458	***	900
ResKno	1,04E+06	0,969392152725943	***	900
GenLam	1,50E-03	0,900205414052713	***	900
OstKno	0,00155288572610444	0,989828176851654	**	900
FragKno	0,0464736268095782	0,994020237403001	*	900
OstFl	3,26E-09	0,82068373343915	***	900
OstU	6,14E+06	0,973161658413691	***	900
OstD	1,63E+04	0,959380985428823	***	900

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz	Temperatur [°C]
ResLakFl	2,46E+01	0,939892127245015	***	900
AktFr	5,78E-05	0,895487902317232	***	900
Knochenbildungsrate	1,69E-15	0,709928627627943	***	900
BFR	6,48E-12	0,789423124450935	***	900
AOC	1,12E-22	0,439282595663835	***	900
SekOst	4,87E+02	0,949469034756792	***	1000
TypIIIOst	8,55E-06	0,872748619451015	***	1000
OstInt	4,00E+02	0,948874603106231	***	1000
OstFrag	1,22E+08	0,978888501662224	***	1000
OPD	0,000181781451035331	0,986900048689115	***	1000
ResLak	3,83E+01	0,941385819035022	***	1000
Havers	3,91E+02	0,948806285178092	***	1000
NonHavers	1,59E-06	0,862710583454435	***	1000
VolkM	9,65E-20	0,553048802843458	***	1000
ResKno	1,04E+06	0,969392152725943	***	1000
GenLam	1,50E-03	0,900205414052713	***	1000
OstKno	0,00155288572610444	0,989828176851654	**	1000
FragKno	0,0464736268095782	0,994020237403001	*	1000
OstFl	3,26E-09	0,82068373343915	***	1000
OstU	6,14E+06	0,973161658413691	***	1000
OstD	1,63E+04	0,959380985428823	***	1000
ResLakFl	2,46E+01	0,939892127245015	***	1000
AktFr	5,78E-05	0,895487902317232	***	1000
Knochenbildungsrate	1,69E-15	0,709928627627943	***	1000
BFR	6,48E-12	0,789423124450935	***	1000
AOC	1,12E-22	0,439282595663835	***	1000

Tabelle 30: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter zwischen männlichem und weiblichem Geschlecht anhand der unverbrannten Proben entlang der Positionen des anterioren periostalen Femurschaftes; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Position	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
SekOst	1	0,0242965218512152	131	*
TypIIIOst	1	0,347271442729087	184	N.S.
OstInt	1	0,0279740447603525	133	*
OstFrag	1	0,0585864864406433	145	N.S.
OPD	1	0,0323639956377103	135	*
ResLak	1	0,0297100808491339	305,5	*
Havers	1	0,0262524640918637	132	*
NonHavers	1	0,41792526979221	189	N.S.
VolkM	1	0,803566219223212	230,5	N.S.
ResKno	1	0,00375171448148772	336	**
GenLam	1	0,0158623436753071	316,5	*
OstKno	1	0,00363242224697517	104,5	**
FragKno	1	0,762462452951093	208	N.S.
OstFl	1	1	220,5	N.S.
OstU	1	1	220,5	N.S.
OstD	1	1	220,5	N.S.
ResLakFl	1	0,0774338869502176	291	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
AktFr	1	0,2017664566691	169	N.S.
BFr	1	0,0490088778347088	142	*
PctBfr	1	0,0490088778347088	142	*
AOC	1	0,0323639956377103	135	*
SekOst	2	0,0612143249177199	146	N.S.
TypIIost	2	0,435428803971963	191	N.S.
OstInt	2	0,0575296479234907	145	N.S.
OstFrag	2	0,10589415945229	156	N.S.
OPD	2	0,123988952355841	159	N.S.
ResLak	2	0,865533808447772	213,5	N.S.
Havers	2	0,0663306985335209	147,5	N.S.
NonHavers	2	0,0942016222307776	285,5	N.S.
VolkM	2	0,770671775885132	232	N.S.
ResKno	2	0,781438618927438	209	N.S.
GenLam	2	0,010134565774275	323	*
OstKno	2	0,0226727772605478	129,5	*
FragKno	2	0,696143537920764	204,5	N.S.
OstFl	2	0,88000813125985	214	N.S.
OstU	2	0,88000813125985	214	N.S.
OstD	2	0,88000813125985	214	N.S.
ResLakFl	2	0,989919552655256	219,5	N.S.
AktFr	2	0,801375309122913	210	N.S.
BFr	2	0,724692302338574	206	N.S.
PctBfr	2	0,724692302338574	206	N.S.
AOC	2	0,123988952355841	159	N.S.
SekOst	3	0,175797367441757	166,5	N.S.
TypIIost	3	0,0891100350898497	156	N.S.
OstInt	3	0,154056787194969	163,5	N.S.
OstFrag	3	0,0861964511004386	152	N.S.
OPD	3	0,0908907997037671	153	N.S.
ResLak	3	0,378679062410004	255	N.S.
Havers	3	0,165235722187268	165	N.S.
NonHavers	3	0,252160216574342	265	N.S.
VolkM	3	0,59842620034667	200	N.S.
ResKno	3	0,860077141035644	228	N.S.
GenLam	3	0,00441835538510887	334	**
OstKno	3	0,00628981381163255	111,5	**
FragKno	3	0,169737525482523	165,5	N.S.
OstFl	3	0,979925860563062	219	N.S.
OstU	3	0,979925860563062	219	N.S.
OstD	3	0,979925860563062	219	N.S.
ResLakFl	3	0,398793623941748	186,5	N.S.
AktFr	3	0,746237395497266	207	N.S.
BFr	3	0,184431833364782	167	N.S.
PctBfr	3	0,184431833364782	167	N.S.
AOC	3	0,0908907997037671	153	N.S.
SekOst	4	0,0706814958543506	148,5	N.S.
TypIIost	4	0,894674860236788	226	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
OstInt	4	0,0812404061915515	151	N.S.
OstFrag	4	0,068610183750406	148	N.S.
OPD	4	0,0975074744209452	154,5	N.S.
ResLak	4	0,49105674266923	247,5	N.S.
Havers	4	0,0926063203196867	153,5	N.S.
NonHavers	4	0,271089207240716	263,5	N.S.
VolkM	4	0,682270561090365	204,5	N.S.
ResKno	4	0,434559914228528	252	N.S.
GenLam	4	0,000413586687087332	361	***
OstKno	4	0,101245409066719	155	N.S.
FragKno	4	0,158376929010514	164	N.S.
OstFl	4	0,614797547519178	200	N.S.
OstU	4	0,614797547519178	200	N.S.
OstD	4	0,614797547519178	200	N.S.
ResLakFl	4	0,979878508525373	219	N.S.
AktFr	4	0,600930502704714	199	N.S.
BFr	4	0,160491036683625	164	N.S.
PctBfr	4	0,160491036683625	164	N.S.
AOC	4	0,0975074744209452	154,5	N.S.
SekOst	5	0,594353354568034	199	N.S.
TypIIost	5	0,28524025094106	180	N.S.
OstInt	5	0,343149640074023	182,5	N.S.
OstFrag	5	0,0697332042134009	148	N.S.
OPD	5	0,226325006189261	172	N.S.
ResLak	5	0,284801178523862	262	N.S.
Havers	5	0,356153578936132	183,5	N.S.
NonHavers	5	0,0149805621599022	314,5	*
VolkM	5	0,0355793845471773	145	*
ResKno	5	0,377278076358175	256	N.S.
GenLam	5	0,00475857549804084	333	**
OstKno	5	0,0377908011502932	137,5	*
FragKno	5	0,278000536353011	177	N.S.
OstFl	5	0,252322957918164	174,5	N.S.
OstU	5	0,252322957918164	174,5	N.S.
OstD	5	0,252322957918164	174,5	N.S.
ResLakFl	5	0,743297801108952	207	N.S.
AktFr	5	0,690365042994688	204	N.S.
BFr	5	0,0209361336138821	129	*
PctBfr	5	0,0209361336138821	129	*
AOC	5	0,226325006189261	172	N.S.
SekOst	6	1	220	N.S.
TypIIost	6	0,0102798706120246	124,5	*
OstInt	6	0,677026937066174	203,5	N.S.
OstFrag	6	0,0282241192080402	133	*
OPD	6	0,0844920831722384	151,5	N.S.
ResLak	6	0,709403216468813	235	N.S.
Havers	6	0,752316176949979	207,5	N.S.
NonHavers	6	0,0593598228967145	294	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
VolkM	6	0,330450558921371	183,5	N.S.
ResKno	6	0,240996207199296	267,5	N.S.
GenLam	6	0,0160772674349723	316,5	*
OstKno	6	0,0697786071265776	148	N.S.
FragKno	6	0,0331089581688434	135,5	*
OstFl	6	0,959859548289899	218	N.S.
OstU	6	0,959859548289899	218	N.S.
OstD	6	0,959859548289899	218	N.S.
ResLakFl	6	0,165889903271477	276	N.S.
AktFr	6	0,566650767655419	197	N.S.
BFr	6	0,158900666051698	164	N.S.
PctBfr	6	0,158900666051698	164	N.S.
AOC	6	0,0844920831722384	151,5	N.S.
SekOst	7	0,18948924519072	168	N.S.
TypIIost	7	0,357525850223266	185,5	N.S.
OstInt	7	0,197539414866608	169	N.S.
OstFrag	7	0,0674129181576938	147,5	N.S.
OPD	7	0,0538732973731517	143,5	N.S.
ResLak	7	0,427926739013018	251,5	N.S.
Havers	7	0,210934256959569	170,5	N.S.
NonHavers	7	0,118996880479959	281,5	N.S.
VolkM	7	0,0152383426360612	132	*
ResKno	7	0,357683381076407	257,5	N.S.
GenLam	7	0,00677175768373589	328,5	**
OstKno	7	0,0541172068123592	143,5	N.S.
FragKno	7	0,165631804089437	165	N.S.
OstFl	7	0,772304859419004	232,5	N.S.
OstU	7	0,772304859419004	232,5	N.S.
OstD	7	0,772304859419004	232,5	N.S.
ResLakFl	7	0,752569982316189	207,5	N.S.
AktFr	7	0,3923685830314	186	N.S.
BFr	7	0,190821931711974	168	N.S.
PctBfr	7	0,190821931711974	168	N.S.
AOC	7	0,0538732973731517	143,5	N.S.
SekOst	8	0,165115096297356	165	N.S.
TypIIost	8	0,0149901653933519	132,5	*
OstInt	8	0,095816480506429	154	N.S.
OstFrag	8	0,0835832839135453	151,5	N.S.
OPD	8	0,04664813823111	141	*
ResLak	8	0,218426795180508	268,5	N.S.
Havers	8	0,106222197614262	156	N.S.
NonHavers	8	0,857058555136056	213	N.S.
VolkM	8	0,539334129270593	198	N.S.
ResKno	8	0,136928869759831	280	N.S.
GenLam	8	0,0588536717828487	296	N.S.
OstKno	8	0,0167069542159156	125	*
FragKno	8	0,0154971553716058	124	*
OstFl	8	0,919784963272853	225	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
OstU	8	0,919784963272853	225	N.S.
OstD	8	0,919784963272853	225	N.S.
ResLakFl	8	0,391792365529294	255	N.S.
AktFr	8	0,326536715625071	181	N.S.
BFr	8	0,107390738734061	156	N.S.
PctBfr	8	0,107390738734061	156	N.S.
AOC	8	0,04664813823111	141	*
SekOst	9	0,487108515815183	248,5	N.S.
TypIIost	9	0,351842089831849	186,5	N.S.
OstInt	9	0,658474765671279	238,5	N.S.
OstFrag	9	0,283685602933602	177,5	N.S.
OPD	9	0,520472015372292	194,5	N.S.
ResLak	9	0,42987510330907	251,5	N.S.
Havers	9	0,658487829894275	238,5	N.S.
NonHavers	9	0,097658013140028	285	N.S.
VolkM	9	0,827574347451577	212	N.S.
ResKno	9	0,133759018623549	280,5	N.S.
GenLam	9	0,820524109895678	211	N.S.
OstKno	9	0,889874351667146	226,5	N.S.
FragKno	9	0,133759018623549	160,5	N.S.
OstFl	9	0,949846497271717	223,5	N.S.
OstU	9	0,949846497271717	223,5	N.S.
OstD	9	0,949846497271717	223,5	N.S.
ResLakFl	9	0,781663843873726	232	N.S.
AktFr	9	0,424817796785413	253	N.S.
BFr	9	0,881307571266899	227	N.S.
PctBfr	9	0,881307571266899	227	N.S.
AOC	9	0,520472015372292	194,5	N.S.
SekOst	10	0,153116071670753	163,5	N.S.
TypIIost	10	0,135194557921651	165	N.S.
OstInt	10	0,0817130852227289	151	N.S.
OstFrag	10	0,0281406805655874	133	*
OPD	10	0,0226452789170341	129,5	*
ResLak	10	0,148525254819141	277	N.S.
Havers	10	0,103532780222513	155,5	N.S.
NonHavers	10	0,0528832067009026	295,5	N.S.
VolkM	10	0,115001974136596	165	N.S.
ResKno	10	0,256974583570894	266	N.S.
GenLam	10	0,0219240788351345	312	*
OstKno	10	0,134011853182745	160,5	N.S.
FragKno	10	0,00171442557122062	95,5	**
OstFl	10	0,190696087020779	273	N.S.
OstU	10	0,190696087020779	273	N.S.
OstD	10	0,190696087020779	273	N.S.
ResLakFl	10	0,899753458590933	215	N.S.
AktFr	10	0,330172591271232	181	N.S.
BFr	10	0,382495452601037	185	N.S.
PctBfr	10	0,382495452601037	185	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
AOC	10	0,0226452789170341	129,5	*
SekOst	11	0,620963479486166	171	N.S.
TypII Ost	11	0,681648422679378	175,5	N.S.
OstInt	11	0,620286220327313	171	N.S.
OstFrag	11	0,142169596145713	136,5	N.S.
OPD	11	0,142412674718669	136,5	N.S.
ResLak	11	0,29093418121127	226,5	N.S.
Havers	11	0,600708790113058	170	N.S.
NonHavers	11	0,139188106064618	240,5	N.S.
VolkM	11	0,500501608741587	211	N.S.
ResKno	11	0,330474087327988	224	N.S.
GenLam	11	0,799647529689304	198,5	N.S.
OstKno	11	0,988754615320167	188	N.S.
FragKno	11	0,366351667195697	156,5	N.S.
OstFl	11	0,682867540960208	204	N.S.
OstU	11	0,682867540960208	204	N.S.
OstD	11	0,682867540960208	204	N.S.
ResLakFl	11	0,446089244623458	216,5	N.S.
AktFr	11	0,900294223233772	184	N.S.
BFr	11	0,586776010136826	169	N.S.
PctBfr	11	0,586776010136826	169	N.S.
AOC	11	0,142412674718669	136,5	N.S.

Tabelle 31: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter zwischen männlichem und weiblichem Geschlecht über die Verbrennungsstufen am periostalen Femurschaft; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
SekOst	200	0,015317025506623	317	*
TypII Ost	200	0,803760171867206	230,5	N.S.
OstInt	200	0,0177498729923471	315	*
OstFrag	200	0,0712576802107081	292,5	N.S.
OPD	200	0,0509731159600074	298,5	N.S.
ResLak	200	0,465739743661148	191,5	N.S.
Havers	200	0,0177498729923471	315	*
NonHavers	200	0,00635965782366444	118,5	**
VolkM	200	0,61471271052442	201	N.S.
ResKno	200	0,364170576353684	184	N.S.
GenLam	200	0,0204650290198698	128	*
OstKno	200	0,273075330832289	264,5	N.S.
FragKno	200	0,449747064058996	251	N.S.
OstFl	200	0,687202033030046	204	N.S.
OstU	200	0,687202033030046	204	N.S.
OstD	200	0,687202033030046	204	N.S.
ResLakFl	200	0,2210737438625	171,5	N.S.
AktFr	200	0,282625185885613	264	N.S.
BFr	200	0,636096978512789	240	N.S.
PctBfr	200	0,636096978512789	240	N.S.
AOC	200	0,0509731159600074	298,5	N.S.

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
SekOst	300	0,516973609318174	213,5	N.S.
TypII Ost	300	0,737761328033018	179	N.S.
OstInt	300	0,525176173287179	213	N.S.
OstFrag	300	0,38183068918922	158,5	N.S.
OPD	300	0,943911587673153	187	N.S.
ResLak	300	0,665975963879334	205,5	N.S.
Havers	300	0,506886132346946	214	N.S.
NonHavers	300	0,0334274784874023	117	*
VolkM	300	0,165378778533177	152	N.S.
ResKno	300	0,564180886259724	169	N.S.
GenLam	300	0,284968749044616	228,5	N.S.
OstKno	300	0,76767803039435	201	N.S.
FragKno	300	0,111705323138083	133	N.S.
OstFl	300	0,298472101606928	152,5	N.S.
OstU	300	0,298472101606928	152,5	N.S.
OstD	300	0,298472101606928	152,5	N.S.
ResLakFl	300	0,414460346879929	160,5	N.S.
AktFr	300	0,900547409547748	195	N.S.
BFr	300	0,568685322402012	169	N.S.
PctBfr	300	0,568685322402012	169	N.S.
AOC	300	0,943911587673153	187	N.S.
SekOst	400	0,24782759790765	266,5	N.S.
TypII Ost	400	0,11076557357102	280	N.S.
OstInt	400	0,0808921347399865	290	N.S.
OstFrag	400	0,001154723911994	350	**
OPD	400	0,00115740684433542	350	**
ResLak	400	0,813532769731179	211	N.S.
Havers	400	0,0808921347399865	290	N.S.
NonHavers	400	0,220890840181775	172,5	N.S.
VolkM	400	0,467945815503867	245,5	N.S.
ResKno	400	0,949781411865026	223,5	N.S.
GenLam	400	0,000922286692583541	88,5	***
OstKno	400	0,537257225589053	245,5	N.S.
FragKno	400	0,0509542884350181	298,5	N.S.
OstFl	400	0,112921575758711	157	N.S.
OstU	400	0,112921575758711	157	N.S.
OstD	400	0,112921575758711	157	N.S.
ResLakFl	400	0,949758980165715	223,5	N.S.
AktFr	400	0,0240493466212039	310	*
BFr	400	0,145858771815797	279	N.S.
PctBfr	400	0,145858771815797	279	N.S.
AOC	400	0,00115740684433542	350	**
SekOst	500	0,0655777113074536	294	N.S.
TypII Ost	500	0,21834045122945	266,5	N.S.
OstInt	500	0,0583708018731651	296	N.S.
OstFrag	500	0,0161031407695155	316,5	*
OPD	500	0,00979248105774958	323,5	**
ResLak	500	0,159185440911788	166	N.S.

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
Havers	500	0,0583708018731651	296	N.S.
NonHavers	500	0,156616488723365	165,5	N.S.
VolkM	500	0,0560042654210517	292	N.S.
ResKno	500	0,106507350576629	156	N.S.
GenLam	500	0,00060993736859651	84	***
OstKno	500	0,0891158598788073	288,5	N.S.
FragKno	500	0,0571666277419662	296,5	N.S.
OstFl	500	0,273776196567736	176,5	N.S.
OstU	500	0,273776196567736	176,5	N.S.
OstD	500	0,273776196567736	176,5	N.S.
ResLakFl	500	0,570421183355832	197,5	N.S.
AktFr	500	0,138928174481051	280	N.S.
BFr	500	0,533317303362552	246	N.S.
PctBfr	500	0,533317303362552	246	N.S.
AOC	500	0,00979248105774958	323,5	**
SekOst	600	0,463430760612482	250	N.S.
TypIIost	600	0,0707464834926761	288,5	N.S.
OstInt	600	0,336713878625366	259	N.S.
OstFrag	600	0,16169935737421	276,5	N.S.
OPD	600	0,0506720247503591	298,5	N.S.
ResLak	600	0,323496898976295	182	N.S.
Havers	600	0,164563193045315	276	N.S.
NonHavers	600	0,751533363284606	208	N.S.
VolkM	600	0,321480871709008	259	N.S.
ResKno	600	0,147424969292824	162,5	N.S.
GenLam	600	0,0715689447558076	148,5	N.S.
OstKno	600	0,080101493371432	290,5	N.S.
FragKno	600	0,668553894503185	238	N.S.
OstFl	600	0,959870926275127	223	N.S.
OstU	600	0,959870926275127	223	N.S.
OstD	600	0,959870926275127	223	N.S.
ResLakFl	600	0,464888834236416	191	N.S.
AktFr	600	0,672084915596205	238	N.S.
BFr	600	0,533317303362552	246	N.S.
PctBfr	600	0,533317303362552	246	N.S.
AOC	600	0,0506720247503591	298,5	N.S.
SekOst	700	0,733761228882355	206,5	N.S.
TypIIost	700	0,0131178553901557	311,5	*
OstInt	700	0,889638265401338	214,5	N.S.
OstFrag	700	0,000673814699438322	355,5	***
OPD	700	0,0480359904751752	299,5	*
ResLak	700	1	221	N.S.
Havers	700	0,86972739730865	213,5	N.S.
NonHavers	700	0,0634381551584077	147,5	N.S.
VolkM	700	0,772968855053657	209,5	N.S.
ResKno	700	0,570499633778844	243,5	N.S.
GenLam	700	0,00944929760793744	117	**
OstKno	700	0,79146096168204	209,5	N.S.

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
FragKno	700	0,0117502173425782	321	*
OstFl	700	0,641577471247387	201,5	N.S.
OstU	700	0,641577471247387	201,5	N.S.
OstD	700	0,641577471247387	201,5	N.S.
ResLakFl	700	1	221	N.S.
AktFr	700	0,396313341135855	255	N.S.
BFr	700	0,424817796785413	253	N.S.
PctBfr	700	0,424817796785413	253	N.S.
AOC	700	0,0480359904751752	299,5	*
SekOst	800	0,84977448115252	212,5	N.S.
TypIIost	800	0,0662938025260389	288	N.S.
OstInt	800	0,810137796353871	230,5	N.S.
OstFrag	800	0,0730944746975581	292	N.S.
OPD	800	0,194669904969297	272,5	N.S.
ResLak	800	0,281797909872747	179,5	N.S.
Havers	800	0,810137796353871	230,5	N.S.
NonHavers	800	0,481884950517945	192,5	N.S.
VolkM	800	0,642616761886094	236	N.S.
ResKno	800	0,246399868982001	174	N.S.
GenLam	800	0,351292570071911	183	N.S.
OstKno	800	0,668477927845077	238	N.S.
FragKno	800	0,0637410982438505	294,5	N.S.
OstFl	800	0,899894998002877	215	N.S.
OstU	800	0,899894998002877	215	N.S.
OstD	800	0,899894998002877	215	N.S.
ResLakFl	800	0,631738503241995	201	N.S.
AktFr	800	0,382495452601037	256	N.S.
BFr	800	0,305799827789325	262	N.S.
PctBfr	800	0,305799827789325	262	N.S.
AOC	800	0,194669904969297	272,5	N.S.
SekOst	900	0,631557814575547	240	N.S.
TypIIost	900	0,146667781832925	274,5	N.S.
OstInt	900	0,52040416652523	246,5	N.S.
OstFrag	900	0,0359675271155174	304	*
OPD	900	0,25193823759075	266,5	N.S.
ResLak	900	0,297027509755119	179,5	N.S.
Havers	900	0,52040416652523	246,5	N.S.
NonHavers	900	0,186876375469872	169	N.S.
VolkM	900	0,371815823215327	250,5	N.S.
ResKno	900	0,480620852116654	192	N.S.
GenLam	900	0,0309759665737465	134,5	*
OstKno	900	0,295934247892283	262,5	N.S.
FragKno	900	0,0463276800718211	300	*
OstFl	900	0,614826224486921	200	N.S.
OstU	900	0,614826224486921	200	N.S.
OstD	900	0,614826224486921	200	N.S.
ResLakFl	900	0,949709933752419	223,5	N.S.
AktFr	900	0,784245957745026	232	N.S.

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
BFr	900	0,803447073947465	231	N.S.
PctBfr	900	0,803447073947465	231	N.S.
AOC	900	0,25193823759075	266,5	N.S.
SekOst	1000	0,00226967304896856	1723	**
TypIIost	1000	0,0542594561295664	1549,5	N.S.
OstInt	1000	0,00232601042121034	1722	**
OstFrag	1000	3.39E+06	2085	***
OPD	1000	7.17E+07	2003,5	***
ResLak	1000	0,0953834395606667	1514,5	N.S.
Havers	1000	0,00214834889344992	1725,5	**
NonHavers	1000	0,983471309087829	1270,5	N.S.
VolkM	1000	0,497259157513076	1366,5	N.S.
ResKno	1000	0,878248570007635	1297	N.S.
GenLam	1000	0,00029912913677797	742	***
OstKno	1000	0,374916963928171	1405	N.S.
FragKno	1000	6.66E+09	1860,5	***
OstFl	1000	0,0081238981559423	884	**
OstU	1000	0,0081238981559423	884	**
OstD	1000	0,0081238981559423	884	**
ResLakFl	1000	0,0864058107022308	1022	N.S.
AktFr	1000	0,109548117669109	1510	N.S.
BFr	1000	0,584379269179484	1355	N.S.
PctBfr	1000	0,584379269179484	1355	N.S.
AOC	1000	4.16E+07	1951,5	***

Tabelle 32: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Test für alle untersuchten histomorphometrischen Parameter männlicher Individuen im mittigen Bereich der Femurkompakta über alle Verbrennungsstufen (RT-1000°C); der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz
SekOst	4,99E+08	0,978871838882688	***
TypIIost	4,00E-06	0,849313644128868	***
OstInt	0,000153257627592394	0,984930891353322	***
OstFrag	9,32E+09	0,984108956839655	***
OPD	0,016808202906452	0,991904420199017	*
ResLak	6,52E-04	0,881279503806965	***
Havers	0,000218047493620075	0,98550300004549	***
NonHavers	2,78E-11	0,750050496382875	***
VolkM	3,67E-09	0,795509237782151	***
ResKno	4,10E-02	0,914293397771777	***
GenLam	1,18E+01	0,928630732098497	***
OstKno	2,57E+09	0,9818924705059	***
FragKno	0,000113388178469121	0,984434777966345	***
OstFl	4,12E-06	0,849514591575848	***
OstU	3,17E+00	0,93252258382222	***
OstD	1,15E+00	0,928542208607411	***
ResLakFl	4,08E+00	0,941893527537735	***
AktFr	2,64E-18	0,541178505044284	***
PctBfr	5,31E-19	0,514623151642938	***

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz
AOC	7,27E-14	0,684581644042357	***
Temp	1,55E-12	0,719730677987963	***
SekOst	4,99E+08	0,978871838882688	***
TypIIost	4,00E-06	0,849313644128868	***
OstInt	0,000153257627592394	0,984930891353322	***
OstFrag	9,32E+09	0,984108956839655	***
OPD	0,016808202906452	0,991904420199017	*
ResLak	6,52E-04	0,881279503806965	***
Havers	0,000218047493620075	0,98550300004549	***
NonHavers	2,78E-11	0,750050496382875	***
VolkM	3,67E-09	0,795509237782151	***
ResKno	4,10E-02	0,91429339771777	***
GenLam	1,18E+01	0,928630732098497	***
OstKno	2,57E+09	0,9818924705059	***
FragKno	0,000113388178469121	0,984434777966345	***
OstFl	4,12E-06	0,849514591575848	***
OstU	3,17E+00	0,93252258382222	***
OstD	1,15E+00	0,928542208607411	***
ResLakFl	4,08E+00	0,941893527537735	***
AktFr	2,64E-18	0,541178505044284	***
PctBfr	5,31E-19	0,514623151642938	***
AOC	7,27E-14	0,684581644042357	***
Temp	1,55E-12	0,719730677987963	***
SekOst	4,99E+08	0,978871838882688	***
TypIIost	4,00E-06	0,849313644128868	***
OstInt	0,000153257627592394	0,984930891353322	***
OstFrag	9,32E+09	0,984108956839655	***
OPD	0,016808202906452	0,991904420199017	*
ResLak	6,52E-04	0,881279503806965	***
Havers	0,000218047493620075	0,98550300004549	***
NonHavers	2,78E-11	0,750050496382875	***
VolkM	3,67E-09	0,795509237782151	***
ResKno	4,10E-02	0,91429339771777	***
GenLam	1,18E+01	0,928630732098497	***
OstKno	2,57E+09	0,9818924705059	***
FragKno	0,000113388178469121	0,984434777966345	***
OstFl	4,12E-06	0,849514591575848	***
OstU	3,17E+00	0,93252258382222	***
OstD	1,15E+00	0,928542208607411	***
ResLakFl	4,08E+00	0,941893527537735	***
AktFr	2,64E-18	0,541178505044284	***
PctBfr	5,31E-19	0,514623151642938	***
AOC	7,27E-14	0,684581644042357	***
Temp	1,55E-12	0,719730677987963	***
SekOst	4,99E+08	0,978871838882688	***
TypIIost	4,00E-06	0,849313644128868	***
OstInt	0,000153257627592394	0,984930891353322	***
OstFrag	9,32E+09	0,984108956839655	***

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz
OPD	0,016808202906452	0,991904420199017	*
ResLak	6,52E-04	0,881279503806965	***
Havers	0,000218047493620075	0,98550300004549	***
NonHavers	2,78E-11	0,750050496382875	***
VolkM	3,67E-09	0,795509237782151	***
ResKno	4,10E-02	0,914293397771777	***
GenLam	1,18E+01	0,928630732098497	***
OstKno	2,57E+09	0,9818924705059	***
FragKno	0,000113388178469121	0,984434777966345	***
OstFl	4,12E-06	0,849514591575848	***
OstU	3,17E+00	0,93252258382222	***
OstD	1,15E+00	0,928542208607411	***
ResLakFl	4,08E+00	0,941893527537735	***
AktFr	2,64E-18	0,541178505044284	***
PctBfr	5,31E-19	0,514623151642938	***
AOC	7,27E-14	0,684581644042357	***
Temp	1,55E-12	0,719730677987963	***
SekOst	4,99E+08	0,978871838882688	***
TypIIost	4,00E-06	0,849313644128868	***
OstInt	0,000153257627592394	0,984930891353322	***
OstFrag	9,32E+09	0,984108956839655	***
OPD	0,016808202906452	0,991904420199017	*
ResLak	6,52E-04	0,881279503806965	***
Havers	0,000218047493620075	0,98550300004549	***
NonHavers	2,78E-11	0,750050496382875	***
VolkM	3,67E-09	0,795509237782151	***
ResKno	4,10E-02	0,914293397771777	***
GenLam	1,18E+01	0,928630732098497	***
OstKno	2,57E+09	0,9818924705059	***
FragKno	0,000113388178469121	0,984434777966345	***
OstFl	4,12E-06	0,849514591575848	***
OstU	3,17E+00	0,93252258382222	***
OstD	1,15E+00	0,928542208607411	***
ResLakFl	4,08E+00	0,941893527537735	***
AktFr	2,64E-18	0,541178505044284	***
PctBfr	5,31E-19	0,514623151642938	***
AOC	7,27E-14	0,684581644042357	***
Temp	1,55E-12	0,719730677987963	***
SekOst	4,99E+08	0,978871838882688	***
TypIIost	4,00E-06	0,849313644128868	***
OstInt	0,000153257627592394	0,984930891353322	***
OstFrag	9,32E+09	0,984108956839655	***
OPD	0,016808202906452	0,991904420199017	*
ResLak	6,52E-04	0,881279503806965	***
Havers	0,000218047493620075	0,98550300004549	***
NonHavers	2,78E-11	0,750050496382875	***
VolkM	3,67E-09	0,795509237782151	***
ResKno	4,10E-02	0,914293397771777	***

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz
GenLam	1,18E+01	0,928630732098497	***
OstKno	2,57E+09	0,9818924705059	***
FragKno	0,000113388178469121	0,984434777966345	***
OstFl	4,12E-06	0,849514591575848	***
OstU	3,17E+00	0,93252258382222	***
OstD	1,15E+00	0,928542208607411	***
ResLakFl	4,08E+00	0,941893527537735	***
AktFr	2,64E-18	0,541178505044284	***
PctBFr	5,31E-19	0,514623151642938	***
AOC	7,27E-14	0,684581644042357	***
Temp	1,55E-12	0,719730677987963	***
SekOst	4,99E+08	0,978871838882688	***
TypIIost	4,00E-06	0,849313644128868	***
OstInt	0,000153257627592394	0,984930891353322	***
OstFrag	9,32E+09	0,984108956839655	***
OPD	0,016808202906452	0,991904420199017	*
ResLak	6,52E-04	0,881279503806965	***
Havers	0,000218047493620075	0,98550300004549	***
NonHavers	2,78E-11	0,750050496382875	***
VolkM	3,67E-09	0,795509237782151	***
ResKno	4,10E-02	0,914293397771777	***
GenLam	1,18E+01	0,928630732098497	***
OstKno	2,57E+09	0,9818924705059	***
FragKno	0,000113388178469121	0,984434777966345	***
OstFl	4,12E-06	0,849514591575848	***
OstU	3,17E+00	0,93252258382222	***
OstD	1,15E+00	0,928542208607411	***
ResLakFl	4,08E+00	0,941893527537735	***
AktFr	2,64E-18	0,541178505044284	***
PctBFr	5,31E-19	0,514623151642938	***
AOC	7,27E-14	0,684581644042357	***
Temp	1,55E-12	0,719730677987963	***
SekOst	4,99E+08	0,978871838882688	***
TypIIost	4,00E-06	0,849313644128868	***
OstInt	0,000153257627592394	0,984930891353322	***
OstFrag	9,32E+09	0,984108956839655	***
OPD	0,016808202906452	0,991904420199017	*
ResLak	6,52E-04	0,881279503806965	***
Havers	0,000218047493620075	0,98550300004549	***
NonHavers	2,78E-11	0,750050496382875	***
VolkM	3,67E-09	0,795509237782151	***
ResKno	4,10E-02	0,914293397771777	***
GenLam	1,18E+01	0,928630732098497	***
OstKno	2,57E+09	0,9818924705059	***
FragKno	0,000113388178469121	0,984434777966345	***
OstFl	4,12E-06	0,849514591575848	***
OstU	3,17E+00	0,93252258382222	***
OstD	1,15E+00	0,928542208607411	***

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz
ResLakFl	4,08E+00	0,941893527537735	***
AktFr	2,64E-18	0,541178505044284	***
PctBFr	5,31E-19	0,514623151642938	***
AOC	7,27E-14	0,684581644042357	***
Temp	1,55E-12	0,719730677987963	***
SekOst	4,99E+08	0,978871838882688	***
TypIIost	4,00E-06	0,849313644128868	***
OstInt	0,000153257627592394	0,984930891353322	***
OstFrag	9,32E+09	0,984108956839655	***
OPD	0,016808202906452	0,991904420199017	*
ResLak	6,52E-04	0,881279503806965	***
Havers	0,000218047493620075	0,98550300004549	***
NonHavers	2,78E-11	0,750050496382875	***
VolkM	3,67E-09	0,795509237782151	***
ResKno	4,10E-02	0,914293397771777	***
GenLam	1,18E+01	0,928630732098497	***
OstKno	2,57E+09	0,9818924705059	***
FragKno	0,000113388178469121	0,984434777966345	***
OstFl	4,12E-06	0,849514591575848	***
OstU	3,17E+00	0,93252258382222	***
OstD	1,15E+00	0,928542208607411	***
ResLakFl	4,08E+00	0,941893527537735	***
AktFr	2,64E-18	0,541178505044284	***
PctBFr	5,31E-19	0,514623151642938	***
AOC	7,27E-14	0,684581644042357	***
Temp	1,55E-12	0,719730677987963	***
SekOst	4,99E+08	0,978871838882688	***
TypIIost	4,00E-06	0,849313644128868	***
OstInt	0,000153257627592394	0,984930891353322	***
OstFrag	9,32E+09	0,984108956839655	***
OPD	0,016808202906452	0,991904420199017	*
ResLak	6,52E-04	0,881279503806965	***
Havers	0,000218047493620075	0,98550300004549	***
NonHavers	2,78E-11	0,750050496382875	***
VolkM	3,67E-09	0,795509237782151	***
ResKno	4,10E-02	0,914293397771777	***
GenLam	1,18E+01	0,928630732098497	***
OstKno	2,57E+09	0,9818924705059	***
FragKno	0,000113388178469121	0,984434777966345	***
OstFl	4,12E-06	0,849514591575848	***
OstU	3,17E+00	0,93252258382222	***
OstD	1,15E+00	0,928542208607411	***
ResLakFl	4,08E+00	0,941893527537735	***
AktFr	2,64E-18	0,541178505044284	***
PctBFr	5,31E-19	0,514623151642938	***
AOC	7,27E-14	0,684581644042357	***
Temp	1,55E-12	0,719730677987963	***

Tabelle 33: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Test für alle untersuchten histomorphometrischen Parameter weiblicher Individuen im mittleren Bereich der Femurkompakta über alle Verbrennungsstufen (RT-1000°C); der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz
SekOst	1,61E+07	0,96904761737212	***
TypIIost	5,22E-05	0,867601862692735	***
OstInt	2,89E+07	0,970465711672779	***
OstFrag	7,82E+06	0,967242818509079	***
OPD	0,00100852648465001	0,98676595881387	**
ResLak	1,93E+00	0,913133207281376	***
Havers	2,89E+07	0,970465711672779	***
NonHavers	4,66E-08	0,797166158664051	***
VolkM	6,23E-08	0,799708970889488	***
ResKno	1,12E+02	0,930987927657355	***
GenLam	4,73E+00	0,917326083460079	***
OstKno	1,13E+09	0,978551551707289	***
FragKno	2,94E+06	0,964703406972213	***
OstFl	1,98E+05	0,957122077277002	***
OstU	7,06E+06	0,966981182044935	***
OstD	7,06E+06	0,966981181604525	***
ResLakFl	4,51E+03	0,944897425579759	***
AktFr	2,73E+02	0,934518692988242	***
PctBFr	6,33E+05	0,966702096151633	***
AOC	2,32E-24	0,242904491675391	***
Temp	7,48E-12	0,708412474209638	***
SekOst	1,61E+07	0,96904761737212	***
TypIIost	5,22E-05	0,867601862692735	***
OstInt	2,89E+07	0,970465711672779	***
OstFrag	7,82E+06	0,967242818509079	***
OPD	0,00100852648465001	0,98676595881387	**
ResLak	1,93E+00	0,913133207281376	***
Havers	2,89E+07	0,970465711672779	***
NonHavers	4,66E-08	0,797166158664051	***
VolkM	6,23E-08	0,799708970889488	***
ResKno	1,12E+02	0,930987927657355	***
GenLam	4,73E+00	0,917326083460079	***
OstKno	1,13E+09	0,978551551707289	***
FragKno	2,94E+06	0,964703406972213	***
OstFl	1,98E+05	0,957122077277002	***
OstU	7,06E+06	0,966981182044935	***
OstD	7,06E+06	0,966981181604525	***
ResLakFl	4,51E+03	0,944897425579759	***
AktFr	2,73E+02	0,934518692988242	***
PctBFr	6,33E+05	0,966702096151633	***
AOC	2,32E-24	0,242904491675391	***
Temp	7,48E-12	0,708412474209638	***
SekOst	1,61E+07	0,96904761737212	***
TypIIost	5,22E-05	0,867601862692735	***
OstInt	2,89E+07	0,970465711672779	***

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz
OstFrag	7,82E+06	0,967242818509079	***
OPD	0,00100852648465001	0,98676595881387	**
ResLak	1,93E+00	0,913133207281376	***
Havers	2,89E+07	0,970465711672779	***
NonHavers	4,66E-08	0,797166158664051	***
VolkM	6,23E-08	0,799708970889488	***
ResKno	1,12E+02	0,930987927657355	***
GenLam	4,73E+00	0,917326083460079	***
OstKno	1,13E+09	0,978551551707289	***
FragKno	2,94E+06	0,964703406972213	***
OstFl	1,98E+05	0,957122077277002	***
OstU	7,06E+06	0,966981182044935	***
OstD	7,06E+06	0,966981181604525	***
ResLakFl	4,51E+03	0,944897425579759	***
AktFr	2,73E+02	0,934518692988242	***
PctBFr	6,33E+05	0,966702096151633	***
AOC	2,32E-24	0,242904491675391	***
Temp	7,48E-12	0,708412474209638	***
SekOst	1,61E+07	0,96904761737212	***
TypIIost	5,22E-05	0,867601862692735	***
OstInt	2,89E+07	0,970465711672779	***
OstFrag	7,82E+06	0,967242818509079	***
OPD	0,00100852648465001	0,98676595881387	**
ResLak	1,93E+00	0,913133207281376	***
Havers	2,89E+07	0,970465711672779	***
NonHavers	4,66E-08	0,797166158664051	***
VolkM	6,23E-08	0,799708970889488	***
ResKno	1,12E+02	0,930987927657355	***
GenLam	4,73E+00	0,917326083460079	***
OstKno	1,13E+09	0,978551551707289	***
FragKno	2,94E+06	0,964703406972213	***
OstFl	1,98E+05	0,957122077277002	***
OstU	7,06E+06	0,966981182044935	***
OstD	7,06E+06	0,966981181604525	***
ResLakFl	4,51E+03	0,944897425579759	***
AktFr	2,73E+02	0,934518692988242	***
PctBFr	6,33E+05	0,966702096151633	***
AOC	2,32E-24	0,242904491675391	***
Temp	7,48E-12	0,708412474209638	***
SekOst	1,61E+07	0,96904761737212	***
TypIIost	5,22E-05	0,867601862692735	***
OstInt	2,89E+07	0,970465711672779	***
OstFrag	7,82E+06	0,967242818509079	***
OPD	0,00100852648465001	0,98676595881387	**
ResLak	1,93E+00	0,913133207281376	***
Havers	2,89E+07	0,970465711672779	***
NonHavers	4,66E-08	0,797166158664051	***
VolkM	6,23E-08	0,799708970889488	***

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz
ResKno	1,12E+02	0,930987927657355	***
GenLam	4,73E+00	0,917326083460079	***
OstKno	1,13E+09	0,978551551707289	***
FragKno	2,94E+06	0,964703406972213	***
OstFl	1,98E+05	0,957122077277002	***
OstU	7,06E+06	0,966981182044935	***
OstD	7,06E+06	0,966981181604525	***
ResLakFl	4,51E+03	0,944897425579759	***
AktFr	2,73E+02	0,934518692988242	***
PctBfr	6,33E+05	0,966702096151633	***
AOC	2,32E-24	0,242904491675391	***
Temp	7,48E-12	0,708412474209638	***
SekOst	1,61E+07	0,96904761737212	***
TypIIost	5,22E-05	0,867601862692735	***
OstInt	2,89E+07	0,970465711672779	***
OstFrag	7,82E+06	0,967242818509079	***
OPD	0,00100852648465001	0,98676595881387	**
ResLak	1,93E+00	0,913133207281376	***
Havers	2,89E+07	0,970465711672779	***
NonHavers	4,66E-08	0,797166158664051	***
VolkM	6,23E-08	0,799708970889488	***
ResKno	1,12E+02	0,930987927657355	***
GenLam	4,73E+00	0,917326083460079	***
OstKno	1,13E+09	0,978551551707289	***
FragKno	2,94E+06	0,964703406972213	***
OstFl	1,98E+05	0,957122077277002	***
OstU	7,06E+06	0,966981182044935	***
OstD	7,06E+06	0,966981181604525	***
ResLakFl	4,51E+03	0,944897425579759	***
AktFr	2,73E+02	0,934518692988242	***
PctBfr	6,33E+05	0,966702096151633	***
AOC	2,32E-24	0,242904491675391	***
Temp	7,48E-12	0,708412474209638	***
SekOst	1,61E+07	0,96904761737212	***
TypIIost	5,22E-05	0,867601862692735	***
OstInt	2,89E+07	0,970465711672779	***
OstFrag	7,82E+06	0,967242818509079	***
OPD	0,00100852648465001	0,98676595881387	**
ResLak	1,93E+00	0,913133207281376	***
Havers	2,89E+07	0,970465711672779	***
NonHavers	4,66E-08	0,797166158664051	***
VolkM	6,23E-08	0,799708970889488	***
ResKno	1,12E+02	0,930987927657355	***
GenLam	4,73E+00	0,917326083460079	***
OstKno	1,13E+09	0,978551551707289	***
FragKno	2,94E+06	0,964703406972213	***
OstFl	1,98E+05	0,957122077277002	***
OstU	7,06E+06	0,966981182044935	***

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz
OstD	7,06E+06	0,966981181604525	***
ResLakFl	4,51E+03	0,944897425579759	***
AktFr	2,73E+02	0,934518692988242	***
PctBFr	6,33E+05	0,966702096151633	***
AOC	2,32E-24	0,242904491675391	***
Temp	7,48E-12	0,708412474209638	***
SekOst	1,61E+07	0,96904761737212	***
TypIIost	5,22E-05	0,867601862692735	***
OstInt	2,89E+07	0,970465711672779	***
OstFrag	7,82E+06	0,967242818509079	***
OPD	0,00100852648465001	0,98676595881387	**
ResLak	1,93E+00	0,913133207281376	***
Havers	2,89E+07	0,970465711672779	***
NonHavers	4,66E-08	0,797166158664051	***
VolkM	6,23E-08	0,799708970889488	***
ResKno	1,12E+02	0,930987927657355	***
GenLam	4,73E+00	0,917326083460079	***
OstKno	1,13E+09	0,978551551707289	***
FragKno	2,94E+06	0,964703406972213	***
OstFl	1,98E+05	0,957122077277002	***
OstU	7,06E+06	0,966981182044935	***
OstD	7,06E+06	0,966981181604525	***
ResLakFl	4,51E+03	0,944897425579759	***
AktFr	2,73E+02	0,934518692988242	***
PctBFr	6,33E+05	0,966702096151633	***
AOC	2,32E-24	0,242904491675391	***
Temp	7,48E-12	0,708412474209638	***
SekOst	1,61E+07	0,96904761737212	***
TypIIost	5,22E-05	0,867601862692735	***
OstInt	2,89E+07	0,970465711672779	***
OstFrag	7,82E+06	0,967242818509079	***
OPD	0,00100852648465001	0,98676595881387	**
ResLak	1,93E+00	0,913133207281376	***
Havers	2,89E+07	0,970465711672779	***
NonHavers	4,66E-08	0,797166158664051	***
VolkM	6,23E-08	0,799708970889488	***
ResKno	1,12E+02	0,930987927657355	***
GenLam	4,73E+00	0,917326083460079	***
OstKno	1,13E+09	0,978551551707289	***
FragKno	2,94E+06	0,964703406972213	***
OstFl	1,98E+05	0,957122077277002	***
OstU	7,06E+06	0,966981182044935	***
OstD	7,06E+06	0,966981181604525	***
ResLakFl	4,51E+03	0,944897425579759	***
AktFr	2,73E+02	0,934518692988242	***
PctBFr	6,33E+05	0,966702096151633	***
AOC	2,32E-24	0,242904491675391	***
Temp	7,48E-12	0,708412474209638	***

Parameter	p-Wert	w-Wert	Signifikanz
SekOst	1,61E+07	0,96904761737212	***
TypIIost	5,22E-05	0,867601862692735	***
OstInt	2,89E+07	0,970465711672779	***
OstFrag	7,82E+06	0,967242818509079	***
OPD	0,00100852648465001	0,98676595881387	**
ResLak	1,93E+00	0,913133207281376	***
Havers	2,89E+07	0,970465711672779	***
NonHavers	4,66E-08	0,797166158664051	***
VolkM	6,23E-08	0,799708970889488	***
ResKno	1,12E+02	0,930987927657355	***
GenLam	4,73E+00	0,917326083460079	***
OstKno	1,13E+09	0,978551551707289	***
FragKno	2,94E+06	0,964703406972213	***
OstFl	1,98E+05	0,957122077277002	***
OstU	7,06E+06	0,966981182044935	***
OstD	7,06E+06	0,966981181604525	***
ResLakFl	4,51E+03	0,944897425579759	***
AktFr	2,73E+02	0,934518692988242	***
PctBfr	6,33E+05	0,966702096151633	***
AOC	2,32E-24	0,242904491675391	***
Temp	7,48E-12	0,708412474209638	***

Tabelle 34: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter zwischen männlichem und weiblichem Geschlecht anhand der unverbrannten Proben entlang der Positionen des mittigen Femurschaftes; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Position	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
SekOst	1	0,979831644902834	222	N.S.
TypIIost	1	0,88929782814513	215	N.S.
OstInt	1	0,959656377502135	223	N.S.
OstFrag	1	0,397313399683265	186,5	N.S.
OPD	1	0,318878009707	180,5	N.S.
ResLak	1	1	220,5	N.S.
Havers	1	0,959656377502135	223	N.S.
NonHavers	1	0,133619252297781	274	N.S.
VolkM	1	0,502540499363245	246	N.S.
ResKno	1	0,587854750500837	242,5	N.S.
GenLam	1	0,0225463864513123	311,5	N.S.
OstKno	1	0,257341563440606	175	N.S.
FragKno	1	0,879824311830656	214	N.S.
OstFl	1	0,56283959147362	197	N.S.
OstU	1	0,56283959147362	197	N.S.
OstD	1	0,56283959147362	197	N.S.
ResLakFl	1	0,375971806353401	256	N.S.
AktFr	1	0,822764971178078	211	N.S.
Bfr	1	0,260645623311989	175	N.S.
PctBfr	1	0,260645623311989	175	N.S.
AOC	1	0,318878009707	180,5	N.S.
SekOst	2	0,463293790511956	181,5	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
TypIIost	2	0,153453561298176	157	N.S.
OstInt	2	0,295065874363543	169,5	N.S.
OstFrag	2	0,763045795643798	198	N.S.
OPD	2	0,178232225478063	158	N.S.
ResLak	2	0,957235896841957	207,5	N.S.
Havers	2	0,295065874363543	169,5	N.S.
NonHavers	2	0,664460308786709	226	N.S.
VolkM	2	0,447232662116829	238	N.S.
ResKno	2	0,947908676621217	213	N.S.
GenLam	2	9,17E+09	360	N.S.
OstKno	2	0,0717410014425534	140,5	N.S.
FragKno	2	0,979170133093525	211,5	N.S.
OstFl	2	0,734515240965083	196,5	N.S.
OstU	2	0,734515240965083	196,5	N.S.
OstD	2	0,734515240965083	196,5	N.S.
ResLakFl	2	0,647244968015951	228	N.S.
AktFr	2	0,94858644800916	207	N.S.
BFr	2	0,27085427352025	167	N.S.
PctBfr	2	0,27085427352025	167	N.S.
AOC	2	0,178232225478063	158	N.S.
SekOst	3	0,00526870924456177	109,5	N.S.
TypIIost	3	0,0249642926986168	136	N.S.
OstInt	3	0,00156513689520224	95	N.S.
OstFrag	3	1	220	N.S.
OPD	3	0,0116240706353873	120	N.S.
ResLak	3	0,415746421406727	252,5	N.S.
Havers	3	0,00156513689520224	95	N.S.
NonHavers	3	0,203073924545776	172	N.S.
VolkM	3	0,701103582289197	205,5	N.S.
ResKno	3	0,166375349125733	275,5	N.S.
GenLam	3	0,00119031309239627	349,5	N.S.
OstKno	3	0,000143855129657694	69	N.S.
FragKno	3	0,0622233916257958	295	N.S.
OstFl	3	0,929838002771415	224,5	N.S.
OstU	3	0,929838002771415	224,5	N.S.
OstD	3	0,929838002771415	224,5	N.S.
ResLakFl	3	0,483455815042861	248,5	N.S.
AktFr	3	0,160491036683625	164	N.S.
BFr	3	0,0740782246995893	149	N.S.
PctBfr	3	0,0740782246995893	149	N.S.
AOC	3	0,0116240706353873	120	N.S.
SekOst	4	0,34502999996824	173,5	N.S.
TypIIost	4	0,214393667436405	163,5	N.S.
OstInt	4	0,265559942641824	167	N.S.
OstFrag	4	0,140303388830382	153,5	N.S.
OPD	4	0,170064043405931	157	N.S.
ResLak	4	0,250207664770526	253	N.S.
Havers	4	0,265559942641824	167	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
NonHavers	4	0,117385033330966	266	N.S.
VolkM	4	0,12566581793545	153	N.S.
ResKno	4	0,118324756466417	270	N.S.
GenLam	4	0,207397548335875	258,5	N.S.
OstKno	4	0,108473207697548	148	N.S.
FragKno	4	0,28353888977042	168,5	N.S.
OstFl	4	0,927248672709903	206	N.S.
OstU	4	0,927248672709903	206	N.S.
OstD	4	0,927248672709903	206	N.S.
ResLakFl	4	0,461933233690072	238,5	N.S.
AktFr	4	0,341079011303927	173	N.S.
BFr	4	0,235312871671449	164	N.S.
PctBfr	4	0,235312871671449	164	N.S.
AOC	4	0,170064043405931	157	N.S.
SekOst	5	0,733877805339421	212,5	N.S.
TypIIost	5	0,714828970946993	212,5	N.S.
OstInt	5	0,734107594706835	212,5	N.S.
OstFrag	5	0,94565135415192	196,5	N.S.
OPD	5	0,967465731365255	197,5	N.S.
ResLak	5	0,489519232824294	174,5	N.S.
Havers	5	0,734107594706835	212,5	N.S.
NonHavers	5	0,712674305017448	186,5	N.S.
VolkM	5	0,621582550752649	182	N.S.
ResKno	5	0,978277351443293	198	N.S.
GenLam	5	0,01960498509148	286	N.S.
OstKno	5	0,135975309774808	144	N.S.
FragKno	5	0,796697000845617	209,5	N.S.
OstFl	5	0,122605084024519	142	N.S.
OstU	5	0,122605084024519	142	N.S.
OstD	5	0,122605084024519	142	N.S.
ResLakFl	5	0,333758113843527	235,5	N.S.
AktFr	5	0,851308765478132	207	N.S.
BFr	5	0,537427401248072	176	N.S.
PctBfr	5	0,537427401248072	176	N.S.
AOC	5	0,967465731365255	197,5	N.S.
SekOst	6	0,630594313727959	201	N.S.
TypIIost	6	1	221	N.S.
OstInt	6	0,695058163226762	204,5	N.S.
OstFrag	6	0,211493693336569	170,5	N.S.
OPD	6	0,487268690871064	192,5	N.S.
ResLak	6	0,0846591350960964	154	N.S.
Havers	6	0,695058163226762	204,5	N.S.
NonHavers	6	0,331649860985854	256,5	N.S.
VolkM	6	0,957367031329593	218	N.S.
ResKno	6	0,0363244978431015	137	N.S.
GenLam	6	0,00155423589812079	346,5	N.S.
OstKno	6	0,570766045695258	197,5	N.S.
FragKno	6	0,650094340299938	239	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
OstFl	6	0,811076390712762	230,5	N.S.
OstU	6	0,811076390712762	230,5	N.S.
OstD	6	0,811076390712762	230,5	N.S.
ResLakFl	6	0,160947506084206	164,5	N.S.
AktFr	6	0,5498622643318	245	N.S.
BFr	6	0,600930502704714	199	N.S.
PctBfr	6	0,600930502704714	199	N.S.
AOC	6	0,487268690871064	192,5	N.S.
SekOst	7	0,471610539294115	191,5	N.S.
TypIIost	7	0,686601761683599	205	N.S.
OstInt	7	0,478775001847651	192	N.S.
OstFrag	7	0,411247590548209	187,5	N.S.
OPD	7	0,283783663748607	177,5	N.S.
ResLak	7	0,227363970643	173	N.S.
Havers	7	0,478775001847651	192	N.S.
NonHavers	7	0,0254113070741027	303,5	N.S.
VolkM	7	0,558462069672295	243	N.S.
ResKno	7	0,318423793402063	180,5	N.S.
GenLam	7	0,35139039982662	258	N.S.
OstKno	7	0,850239026444479	228,5	N.S.
FragKno	7	0,668097310724591	203	N.S.
OstFl	7	0,252265283454914	266,5	N.S.
OstU	7	0,252265283454914	266,5	N.S.
OstD	7	0,252265283454914	266,5	N.S.
ResLakFl	7	0,265707442266722	176	N.S.
AktFr	7	0,842188562416529	229	N.S.
BFr	7	0,533317303362552	246	N.S.
PctBfr	7	0,533317303362552	246	N.S.
AOC	7	0,283783663748607	177,5	N.S.
SekOst	8	0,829888444496827	229,5	N.S.
TypIIost	8	0,368155124335704	187	N.S.
OstInt	8	0,939536569688521	217	N.S.
OstFrag	8	0,175797367441757	166,5	N.S.
OPD	8	0,449433672967144	190	N.S.
ResLak	8	0,330055665035137	182	N.S.
Havers	8	0,939536569688521	217	N.S.
NonHavers	8	0,396611204215338	251,5	N.S.
VolkM	8	0,395972887221685	252	N.S.
ResKno	8	0,442173703827625	189,5	N.S.
GenLam	8	0,0652811800410987	294	N.S.
OstKno	8	0,449525901444373	251	N.S.
FragKno	8	0,0555495225087669	144	N.S.
OstFl	8	0,811083903545832	230,5	N.S.
OstU	8	0,811083903545832	230,5	N.S.
OstD	8	0,811083903545832	230,5	N.S.
ResLakFl	8	0,939635129026323	217	N.S.
AktFr	8	0,746237395497266	234	N.S.
BFr	8	0,86170657461269	228	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
PctBfr	8	0,86170657461269	228	N.S.
AOC	8	0,449433672967144	190	N.S.
SekOst	9	0,176807266319252	205	N.S.
TypIIost	9	0,866020229641568	167,5	N.S.
OstInt	9	0,170989250428419	205,5	N.S.
OstFrag	9	0,848318228555887	168,5	N.S.
OPD	9	0,0525830105568101	223,5	N.S.
ResLak	9	0,549414985889753	143	N.S.
Havers	9	0,175991338119831	205	N.S.
NonHavers	9	0,772693358451915	153	N.S.
VolkM	9	0,156284311993754	205	N.S.
ResKno	9	0,287605703057847	128	N.S.
GenLam	9	0,600964626743202	145	N.S.
OstKno	9	0,267741551529163	197,5	N.S.
FragKno	9	1	162,5	N.S.
OstFl	9	0,57965454284232	144	N.S.
OstU	9	0,57965454284232	144	N.S.
OstD	9	0,57965454284232	144	N.S.
ResLakFl	9	0,495246791789874	140	N.S.
AktFr	9	0,00963088252799934	243	N.S.
BFr	9	0,406417505643139	189	N.S.
PctBfr	9	0,406417505643139	189	N.S.
AOC	9	0,0525830105568101	223,5	N.S.
SekOst	10	0,187382841027399	76,5	N.S.
TypIIost	10	0,305361977353384	130,5	N.S.
OstInt	10	0,225756774913192	79	N.S.
OstFrag	10	0,594673899960726	95	N.S.
OPD	10	0,270187037466903	81,5	N.S.
ResLak	10	0,407243314578598	88,5	N.S.
Havers	10	0,225756774913192	79	N.S.
NonHavers	10	0,741760935959627	116	N.S.
VolkM	10	0,861351478773154	104	N.S.
ResKno	10	0,75062250366876	100	N.S.
GenLam	10	0,432297257126275	89	N.S.
OstKno	10	0,350821904563815	130,5	N.S.
FragKno	10	0,881687383695096	112	N.S.
OstFl	10	0,0594171797727446	153	N.S.
OstU	10	0,0594171797727446	153	N.S.
OstD	10	0,0594171797727446	153	N.S.
ResLakFl	10	0,288773855964522	133,5	N.S.
AktFr	10	0,786500699910311	101	N.S.
BFr	10	0,539279931090979	123	N.S.
PctBfr	10	0,539279931090979	123	N.S.
AOC	10	0,270187037466903	81,5	N.S.
SekOst	11	0,813905191528298	41,5	N.S.
TypIIost	11	0,964380223504232	44	N.S.
OstInt	11	0,78353630309459	41	N.S.
OstFrag	11	0,307555530402326	58,5	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
OPD	11	0,531410310629966	53,5	N.S.
ResLak	11	0,474040348634942	35,5	N.S.
Havers	11	0,78353630309459	41	N.S.
NonHavers	11	0,244152054342396	31	N.S.
VolkM	11	0,866194337819859	47,5	N.S.
ResKno	11	0,458535446788941	35	N.S.
GenLam	11	0,0101243664800905	11,5	N.S.
OstKno	11	0,0794473179795389	68	N.S.
FragKno	11	0,0781755525026813	68	N.S.
OstFl	11	0,00806161422615063	79,5	N.S.
OstU	11	0,00806161422615063	79,5	N.S.
OstD	11	0,00806161422615063	79,5	N.S.
ResLakFl	11	0,183393989692418	27,5	N.S.
AktFr	11	0,790984814978623	49	N.S.
BFr	11	0,0364514226743329	72	N.S.
PctBfr	11	0,0364514226743329	72	N.S.
AOC	11	0,531410310629966	53,5	N.S.

Tabelle 35: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter zwischen männlichem und weiblichem Geschlecht über die Verbrennungsstufen am mittigen Femurschaft; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
SekOst	100	0,328669804022921	183	N.S.
TypII Ost	100	0,209977708074266	189	N.S.
OstInt	100	0,297449118414979	185	N.S.
OstFrag	100	0,369076064591824	125,5	N.S.
OPD	100	0,655232199557778	167	N.S.
ResLak	100	0,287281015214427	184,5	N.S.
Havers	100	0,297449118414979	185	N.S.
NonHavers	100	0,156069263431644	192,5	N.S.
VolkM	100	1	153,5	N.S.
ResKno	100	0,986811357890263	152	N.S.
GenLam	100	0,0706608516021291	98	*
OstKno	100	0,0798861842394328	206,5	N.S.
FragKno	100	0,107943193234752	104	N.S.
OstFl	100	0,632219782058985	138	N.S.
OstU	100	0,632219782058985	138	N.S.
OstD	100	0,632219782058985	138	N.S.
ResLakFl	100	0,320230992397498	122,5	N.S.
AktFr	100	0,287379561162025	120	N.S.
BFr	100	0,90922308254732	149	N.S.
PctBfr	100	0,90922308254732	149	N.S.
AOC	100	0,655232199557778	167	N.S.
SekOst	200	0,363200737478002	211,5	N.S.
TypII Ost	200	0,458032764814928	204,5	N.S.
OstInt	200	0,283229647236704	217	N.S.
OstFrag	200	0,111941964663371	234,5	N.S.
OPD	200	0,106556410809599	235,5	N.S.

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
ResLak	200	0,728996754792349	192	N.S.
Havers	200	0,283229647236704	217	N.S.
NonHavers	200	0,315097099275111	148	N.S.
VolkM	200	0,172295213550776	223,5	N.S.
ResKno	200	0,509487039469083	157	N.S.
GenLam	200	0,0137292297883897	95,5	***
OstKno	200	0,213550852894607	223	*
FragKno	200	0,941643459381238	183	N.S.
OstFl	200	0,930102879073795	176,5	N.S.
OstU	200	0,930102879073795	176,5	N.S.
OstD	200	0,930102879073795	176,5	N.S.
ResLakFl	200	0,386253616017319	150	N.S.
AktFr	200	0,80373722763585	171	N.S.
BFr	200	0,299312527541523	216	N.S.
PctBfr	200	0,299312527541523	216	N.S.
AOC	200	0,106556410809599	235,5	N.S.
SekOst	300	0,0792493751852222	74,5	**
TypIIost	300	0,982661915469959	118	*
OstInt	300	0,097821619025441	77	**
OstFrag	300	0,231735455976115	88,5	N.S.
OPD	300	0,140751520912316	81,5	*
ResLak	300	0,584796979509889	132,5	N.S.
Havers	300	0,097821619025441	77	**
NonHavers	300	1	119	N.S.
VolkM	300	0,0609369420234347	91	N.S.
ResKno	300	0,675720462515801	130	N.S.
GenLam	300	0,195626653648511	86	**
OstKno	300	0,47438560414779	137,5	***
FragKno	300	0,349258980312947	95	N.S.
OstFl	300	0,059314470950643	167	N.S.
OstU	300	0,059314470950643	167	N.S.
OstD	300	0,059314470950643	167	N.S.
ResLakFl	300	0,632704989318664	131,5	N.S.
AktFr	300	0,0115683791758148	56	N.S.
BFr	300	0,710092929388918	109	N.S.
PctBfr	300	0,710092929388918	109	N.S.
AOC	300	0,140751520912316	81,5	*
SekOst	400	0,838562422153156	207,5	N.S.
TypIIost	400	0,0838649281803999	260	N.S.
OstInt	400	0,59600422254535	219,5	N.S.
OstFrag	400	0,462318402846235	172	N.S.
OPD	400	0,817420200502578	190,5	N.S.
ResLak	400	0,76176429720289	188,5	N.S.
Havers	400	0,59600422254535	219,5	N.S.
NonHavers	400	0,330455369585939	166	N.S.
VolkM	400	0,873045148510503	205,5	N.S.
ResKno	400	0,615720149480643	180,5	N.S.
GenLam	400	0,69380444758974	214,5	N.S.

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
OstKno	400	0,363497690874758	233,5	N.S.
FragKno	400	0,0342833377603915	121	N.S.
OstFl	400	0,727665587798586	186	N.S.
OstU	400	0,727665587798586	186	N.S.
OstD	400	0,727665587798586	186	N.S.
ResLakFl	400	0,724048466411942	186	N.S.
AktFr	400	0,177646481065014	149	N.S.
BFr	400	0,375508052928133	166	N.S.
PctBfr	400	0,375508052928133	166	N.S.
AOC	400	0,817420200502578	190,5	N.S.
SekOst	500	0,0633090407782692	294,5	N.S.
TypIIost	500	0,93589812315797	224	N.S.
OstInt	500	0,0752215759471053	291,5	N.S.
OstFrag	500	0,560832050046887	244	N.S.
OPD	500	0,169442549624044	275,5	N.S.
ResLak	500	0,611704700922819	201	N.S.
Havers	500	0,0752215759471053	291,5	N.S.
NonHavers	500	0,758339231769661	209	N.S.
VolkM	500	0,0483997029569199	293,5	N.S.
ResKno	500	0,419810154513363	188	N.S.
GenLam	500	0,762462452951093	208	*
OstKno	500	0,301811083645255	262	N.S.
FragKno	500	0,979877689169907	219	N.S.
OstFl	500	0,267678108938478	176	N.S.
OstU	500	0,267678108938478	176	N.S.
OstD	500	0,267678108938478	176	N.S.
ResLakFl	500	0,294636424244933	178,5	N.S.
AktFr	500	0,708823623659833	205	N.S.
BFr	500	0,355740727745441	183	N.S.
PctBfr	500	0,355740727745441	183	N.S.
AOC	500	0,169442549624044	275,5	N.S.
SekOst	600	0,853973795930885	196	N.S.
TypIIost	600	0,581675961493783	207,5	N.S.
OstInt	600	0,776568399211897	199,5	N.S.
OstFrag	600	0,274196791352026	228	N.S.
OPD	600	0,497785186958504	213,5	N.S.
ResLak	600	0,348842022531529	221	N.S.
Havers	600	0,776568399211897	199,5	N.S.
NonHavers	600	0,546041867490705	168,5	N.S.
VolkM	600	0,351359583079613	157,5	N.S.
ResKno	600	0,270707284808853	228,5	*
GenLam	600	0,141885846057613	136,5	**
OstKno	600	0,921343639991131	185	N.S.
FragKno	600	0,562258398291655	168	N.S.
OstFl	600	0,876846169471784	195	N.S.
OstU	600	0,876846169471784	195	N.S.
OstD	600	0,876846169471784	195	N.S.
ResLakFl	600	0,252055081513276	230	N.S.

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
AktFr	600	0,645698773293889	172	N.S.
BFr	600	0,878290648550001	183	N.S.
PctBfr	600	0,878290648550001	183	N.S.
AOC	600	0,497785186958504	213,5	N.S.
SekOst	700	0,69944579480889	170	N.S.
TypIIost	700	0,410591225539327	181,5	N.S.
OstInt	700	0,629256717192494	173	N.S.
OstFrag	700	0,365061635663322	186	N.S.
OPD	700	0,797078621052144	166	N.S.
ResLak	700	0,0757175854950399	210,5	N.S.
Havers	700	0,629256717192494	173	N.S.
NonHavers	700	0,5677775164939	175	*
VolkM	700	0,294529494058736	127,5	N.S.
ResKno	700	0,469283848317334	180,5	N.S.
GenLam	700	0,563175373354374	139	N.S.
OstKno	700	0,342795575886203	187,5	N.S.
FragKno	700	0,274450023799332	123	N.S.
OstFl	700	0,961601887276015	159,5	N.S.
OstU	700	0,961601887276015	159,5	N.S.
OstD	700	0,961601887276015	159,5	N.S.
ResLakFl	700	0,948549239179076	160	N.S.
AktFr	700	0,751396543476867	168	N.S.
BFr	700	0,446115219731863	182	N.S.
PctBfr	700	0,446115219731863	182	N.S.
AOC	700	0,797078621052144	166	N.S.
SekOst	800	0,799209099235645	103,5	N.S.
TypIIost	800	0,0635066547174682	134,5	N.S.
OstInt	800	0,6764732934403	107	N.S.
OstFrag	800	0,516852373726538	112	N.S.
OPD	800	0,257825076508885	122,5	N.S.
ResLak	800	0,729846632931344	90	N.S.
Havers	800	0,6764732934403	107	N.S.
NonHavers	800	0,682944526377462	106,5	N.S.
VolkM	800	0,654510453420518	89	N.S.
ResKno	800	0,405393497824141	79	N.S.
GenLam	800	0,00794082595129698	39,5	N.S.
OstKno	800	0,0174577283376735	149,5	N.S.
FragKno	800	1	97	N.S.
OstFl	800	0,596183697339362	109,5	N.S.
OstU	800	0,596183697339362	109,5	N.S.
OstD	800	0,596183697339362	109,5	N.S.
ResLakFl	800	0,309456864171635	75	N.S.
AktFr	800	0,785648904870873	104	N.S.
BFr	800	0,235166774566425	124	N.S.
PctBfr	800	0,235166774566425	124	N.S.
AOC	800	0,257825076508885	122,5	N.S.
SekOst	900	0,468847314010616	44	N.S.
TypIIost	900	0,91327472481285	34,5	N.S.

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
OstInt	900	0,530151315128487	43	N.S.
OstFrag	900	0,732786215609948	40	N.S.
OPD	900	0,846363413531128	38,5	N.S.
ResLak	900	0,456056540250256	28	N.S.
Havers	900	0,530151315128487	43	N.S.
NonHavers	900	0,720683071744105	40	N.S.
VolkM	900	0,401046862622702	43,5	N.S.
ResKno	900	0,311430297616559	25	N.S.
GenLam	900	0,59596404998221	30	N.S.
OstKno	900	0,335033801376162	46,5	N.S.
FragKno	900	0,227045101610789	23	N.S.
OstFl	900	0,814808720691074	39	N.S.
OstU	900	0,814808720691074	39	N.S.
OstD	900	0,814808720691074	39	N.S.
ResLakFl	900	0,923106626443861	34,5	N.S.
AktFr	900	0,605841217605923	42	**
BFr	900	0,541423282599753	43	N.S.
PctBfr	900	0,541423282599753	43	N.S.
AOC	900	0,846363413531128	38,5	N.S.
SekOst	1000	0,712458147153552	50	N.S.
TypIIost	1000	0,509166423184747	53	N.S.
OstInt	1000	0,682299786245522	50,5	N.S.
OstFrag	1000	0,934464818866048	46,5	N.S.
OPD	1000	0,594801847128367	52	N.S.
ResLak	1000	0,900369473249128	43	N.S.
Havers	1000	0,682299786245522	50,5	N.S.
NonHavers	1000	1	45,5	N.S.
VolkM	1000	1	45	N.S.
ResKno	1000	0,539579092502513	53	N.S.
GenLam	1000	0,0206812015933116	16,5	N.S.
OstKno	1000	0,623749125277439	51,5	N.S.
FragKno	1000	0,967320743119099	46	N.S.
OstFl	1000	0,603780120807985	38	N.S.
OstU	1000	0,603780120807985	38	N.S.
OstD	1000	0,603780120807985	38	N.S.
ResLakFl	1000	0,0785214622280427	67	N.S.
AktFr	1000	0,0788932429799303	23	N.S.
BFr	1000	0,315378120331681	32	N.S.
PctBfr	1000	0,315378120331681	32	N.S.
AOC	1000	0,594801847128367	52	N.S.

Tabelle 36: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter im Vergleich des periostalen und mittigen Bereichs der Femurkompakta der unverbrannten Proben entlang des Schaftes; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Position	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
OstFl	1	0,00389241324303677	570	**
OstU	1	0,000721662229537567	504	***
OstD	1	0,000743799751468343	506,5	***
ResLakFl	1	0,105912927399252	702,5	N.S.
AktFr	1	0,000106213470365669	1315,5	***
BFR	1	0,380620294406288	980,5	N.S.
AOC	1	0,000682083375242069	1262	***
SekOst	1	0,00754686111074214	1180	**
TypIIost	1	0,06173943652694	1079	N.S.
OstInt	1	0,00220755159480223	1223,5	**
OstFrag	1	0,000166181902367474	1302,5	***
OPD	1	3,71E+09	1343	***
ResLak	1	0,927218112532921	871,5	N.S.
HavKan	1	0,00217571310295856	1224	**
NonHav	1	0,00501200763454419	1178,5	**
VolkM	1	0,1871626808224	1023	N.S.
ResKno	1	0,353827786728363	778	N.S.
GenLam	1	0,868238421907141	863	N.S.
OstKno	1	0,809027569485703	854,5	N.S.
FragKno	1	0,0453043738401213	1106	*
OstFl	2	0,000186378882909842	479	***
OstU	2	4,91E+09	428	***
OstD	2	4,75E+09	429	***
ResLakFl	2	0,0615851647525377	674,5	N.S.
AktFr	2	0,0027494556678873	1217	**
BFR	2	0,754164146931788	917,5	N.S.
AOC	2	0,00251870174736953	1220	**
SekOst	2	0,0169265011587143	1148,5	*
TypIIost	2	0,210148138287263	748,5	N.S.
OstInt	2	0,0320172010462916	1121,5	*
OstFrag	2	9,95E+08	1316,5	***
OPD	2	0,000102976857117087	1316	***
ResLak	2	0,000391527835543313	1269	***
HavKan	2	0,0334948332106945	1119,5	*
NonHav	2	0,000246714913425485	1276,5	***
VolkM	2	0,702568130262558	923	N.S.
ResKno	2	0,29264105503111	1000	N.S.
GenLam	2	0,928588469784379	892,5	N.S.
OstKno	2	0,12924079928023	712	N.S.
FragKno	2	0,278474565765223	1003,5	N.S.
OstFl	3	8,84E+06	306,5	***
OstU	3	1,18E+07	290	***
OstD	3	1,84E+07	302	***
ResLakFl	3	0,103250428643344	1063	N.S.
AktFr	3	0,00102126702943201	1249,5	**
BFR	3	0,61950880227785	826	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
AOC	3	0,0015514430644548	1236	**
SekOst	3	0,00137958691574545	1239	**
TypIIost	3	0,0975432580217577	705,5	N.S.
OstInt	3	0,0063819322485569	1186,5	**
OstFrag	3	0,000189346463066767	1298,5	***
OPD	3	3,24E+08	1346,5	***
ResLak	3	0,00280317198693389	1210	**
HavKan	3	0,0063819322485569	1186,5	**
NonHav	3	0,0967306567098627	1061	N.S.
VolkM	3	0,865865719193688	900,5	N.S.
ResKno	3	0,0179392370046268	1146,5	*
GenLam	3	0,454322557201269	966	N.S.
OstKno	3	0,00337251270115751	554	**
FragKno	3	0,910860391344603	895	N.S.
OstFl	4	0,000302212296574513	503,5	***
OstU	4	0,000159216101053135	460	***
OstD	4	0,000346181767381391	485	***
ResLakFl	4	0,52761673268661	811,5	N.S.
AktFr	4	0,00591693656528002	1190	**
BFR	4	0,935822511884386	891,5	N.S.
AOC	4	0,0897133852775972	1072	N.S.
SekOst	4	0,124399485211596	1053,5	N.S.
TypIIost	4	0,139045066064475	722,5	N.S.
OstInt	4	0,466825356828171	963,5	N.S.
OstFrag	4	1,61E+09	1363	***
OPD	4	0,000924486322292425	1252	***
ResLak	4	0,000424055006787928	1268	***
HavKan	4	0,466825356828171	963,5	N.S.
NonHav	4	6,93E+09	1310,5	***
VolkM	4	0,99628865008719	881	N.S.
ResKno	4	0,0469199530902483	1104	*
GenLam	4	0,50953711669586	956	N.S.
OstKno	4	0,0266898319349175	634	*
FragKno	4	0,105796707145318	1063	N.S.
OstFl	5	2,41E+09	421,5	***
OstU	5	6,73E+09	423,5	***
OstD	5	5,33E+09	420,5	***
ResLakFl	5	0,790086031763872	890,5	N.S.
AktFr	5	0,0169709774760448	1123,5	*
BFR	5	0,729230437470536	822,5	N.S.
AOC	5	0,0246484956653429	1108	*
SekOst	5	0,138335184568956	1023,5	N.S.
TypIIost	5	0,125981244265383	701,5	N.S.
OstInt	5	0,212133013279591	998	N.S.
OstFrag	5	0,000908321073063997	1225	***
OPD	5	0,000591156173175011	1238	***
ResLak	5	0,00641671273169629	1152	**
HavKan	5	0,212133013279591	998	N.S.
NonHav	5	0,0287415880267721	1089	*

Parameter	Position	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
VolkM	5	0,383326505296618	773	N.S.
ResKno	5	0,134118358913616	1025,5	N.S.
GenLam	5	0,553255712928963	795,5	N.S.
OstKno	5	0,030432823851326	623	*
FragKno	5	0,0351760843966826	1092,5	*
OstFl	6	0,00170689196865453	545	**
OstU	6	0,000634064204568684	500	***
OstD	6	0,00063908120369483	502	***
ResLakFl	6	0,0264297316653772	635	*
AktFr	6	6,79E+09	1327,5	***
BFR	6	0,291071386940697	1000,5	N.S.
AOC	6	0,00411620869604251	1203	**
SekOst	6	0,00359938259465643	1207	**
TypIIost	6	0,976840743359529	878,5	N.S.
OstInt	6	0,00439312436185336	1200	**
OstFrag	6	0,000236461716777514	1292,5	***
OPD	6	6,47E+09	1328,5	***
ResLak	6	0,000595633423193437	1251	***
HavKan	6	0,00439312436185336	1200	**
NonHav	6	0,00221868676714877	1209,5	**
VolkM	6	0,6844741666516	925,5	N.S.
ResKno	6	0,554275344455899	948,5	N.S.
GenLam	6	0,536526909606542	812,5	N.S.
OstKno	6	0,760744055798739	847,5	N.S.
FragKno	6	0,501564286073337	957,5	N.S.
OstFl	7	0,000196195551490073	482,5	***
OstU	7	0,00044094197372299	489	***
OstD	7	0,000790775578694203	509	***
ResLakFl	7	0,814478766464428	855,5	N.S.
AktFr	7	0,00795948235305501	1179	**
BFR	7	0,737235601225701	844	N.S.
AOC	7	0,0444863048338662	1107	*
SekOst	7	0,00381874163632512	1205	**
TypIIost	7	0,217335473305162	751,5	N.S.
OstInt	7	0,00780453520469922	1179	**
OstFrag	7	0,0667223785228428	1087	N.S.
OPD	7	0,0041593478682383	1202,5	**
ResLak	7	0,0629996815327912	1086	N.S.
HavKan	7	0,00780547716156689	1179	**
NonHav	7	0,0112102679442667	1154	*
VolkM	7	0,08480474360431	700,5	N.S.
ResKno	7	0,379919820763129	980,5	N.S.
GenLam	7	0,548479885545088	949,5	N.S.
OstKno	7	0,826408061232968	857	N.S.
FragKno	7	0,121188552799993	708,5	N.S.
OstFl	8	2,78E+08	391,5	***
OstU	8	4,23E+07	317	***
OstD	8	1,19E+08	343,5	***
ResLakFl	8	0,931545593079906	892	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
AktFr	8	0,0816130817797422	1077	N.S.
BFR	8	0,145968771056851	719	N.S.
AOC	8	0,235683328695457	1015	N.S.
SekOst	8	0,0115436985853424	1164	*
TypIIost	8	0,833483794696074	904	N.S.
OstInt	8	0,025536091336506	1131,5	*
OstFrag	8	0,217163016021331	1020	N.S.
OPD	8	0,0385704389991458	1113,5	*
ResLak	8	0,0411905779594804	1106,5	*
HavKan	8	0,025536091336506	1131,5	*
NonHav	8	0,00108387539367734	1231	**
VolkM	8	0,735379137853951	847	N.S.
ResKno	8	0,493310009971595	959	N.S.
GenLam	8	0,00611577766611319	1188,5	**
OstKno	8	0,127983443554009	711,5	N.S.
FragKno	8	0,0529413928062523	665,5	N.S.
OstFl	9	1,09E+09	338,5	***
OstU	9	1,67E+09	326,5	***
OstD	9	2,68E+09	339	***
ResLakFl	9	0,315130050095561	656,5	N.S.
AktFr	9	0,0448888891469964	956,5	*
BFR	9	0,189121897095895	624,5	N.S.
AOC	9	0,0269914244439573	977	*
SekOst	9	0,0591583274872309	944	N.S.
TypIIost	9	0,19864046210371	637	N.S.
OstInt	9	0,0819039253867072	929,5	N.S.
OstFrag	9	0,0158893622469908	996,5	*
OPD	9	0,00542264457082863	1033,5	**
ResLak	9	0,396976149155734	839	N.S.
HavKan	9	0,0767190646076165	932,5	N.S.
NonHav	9	0,0104439238906154	1002	*
VolkM	9	0,155927413858501	622,5	N.S.
ResKno	9	0,892233391148017	742	N.S.
GenLam	9	0,0716687250878473	936	N.S.
OstKno	9	0,0397857310898486	550,5	*
FragKno	9	0,794138649609333	729,5	N.S.
OstFl	10	0,0201146130693261	439	*
OstU	10	0,0185063351458912	423,5	*
OstD	10	0,0100499635593168	406	*
ResLakFl	10	0,166830234389082	510	N.S.
AktFr	10	0,303661650199897	720,5	N.S.
BFR	10	0,564018554701007	579	N.S.
AOC	10	0,401003128757448	704	N.S.
SekOst	10	0,805319019897196	652	N.S.
TypIIost	10	0,223510627316578	530,5	N.S.
OstInt	10	0,995431298516487	631	N.S.
OstFrag	10	0,0748672936504736	786	N.S.
OPD	10	0,156277768065084	754,5	N.S.
ResLak	10	0,257254527357324	727,5	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
HavKan	10	0,995431298516487	631	N.S.
NonHav	10	0,29912724862173	718,5	N.S.
VolkM	10	0,611628012980451	669	N.S.
ResKno	10	0,954398756899927	635,5	N.S.
GenLam	10	0,196382162197785	743,5	N.S.
OstKno	10	0,0215758393958648	428,5	*
FragKno	10	0,420111938687837	701	N.S.
OstFl	11	0,0387462214261013	280,5	*
OstU	11	0,0328637676962561	271,5	*
OstD	11	0,0403679052895015	278	*
ResLakFl	11	0,280395536155378	340	N.S.
AktFr	11	0,63622712596985	440,5	N.S.
BFR	11	0,302644266011424	342,5	N.S.
AOC	11	0,079721366862345	523	N.S.
SekOst	11	0,173319044209342	497,5	N.S.
TypIIost	11	0,416974159292342	362	N.S.
OstInt	11	0,171060967706549	498	N.S.
OstFrag	11	0,219696589755588	489	N.S.
OPD	11	0,0405353819518936	542	*
ResLak	11	0,310286333472565	474,5	N.S.
HavKan	11	0,178564380167484	496,5	N.S.
NonHav	11	0,0421057862715891	535,5	*
VolkM	11	0,608710258336802	379	N.S.
ResKno	11	0,565992695156477	447	N.S.
GenLam	11	0,49493873328162	454	N.S.
OstKno	11	0,882895828811781	419,5	N.S.
FragKno	11	0,376008933477513	352	N.S.

Tabelle 37: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter im Vergleich des periostalen und mittigen Bereichs der Femurkompakta über die Temperaturstufen der Verbrennungsreihe; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und *für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
OstFl	100	0,000181772960088296	398,5	***
OstU	100	6,40E+09	357	***
OstD	100	3,96E+09	348	***
ResLakFl	100	0,377333936930244	668,5	N.S.
AktFr	100	0,000277535969089888	1119	***
BFR	100	0,651932961709304	801,5	N.S.
AOC	100	0,00155733246972381	1072	**
SekOst	100	0,0132362916579371	1029	*
TypIIost	100	0,526282185992423	715,5	N.S.
OstInt	100	0,0249970649035064	1005	*
OstFrag	100	4,05E+08	1245,5	***
OPD	100	3,70E+09	1197	***
ResLak	100	0,0527410771692326	969	N.S.
HavKan	100	0,0249970649035064	1005	*
NonHav	100	0,880333398627427	792	N.S.
VolkM	100	0,869894468241939	793,5	N.S.
ResKno	100	0,595131096630961	831,5	N.S.

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
GenLam	100	0,639911245274227	729	N.S.
OstKno	100	0,24198525632689	657,5	N.S.
FragKno	100	0,0992785871826327	945	N.S.
OstFl	200	3,63E+08	370	***
OstU	200	8,14E+07	319,5	***
OstD	200	1,39E+08	333,5	***
ResLakFl	200	0,440269717659005	776,5	N.S.
AktFr	200	0,010181533447744	1143,5	*
BFR	200	0,182029546295091	714	N.S.
AOC	200	0,00301356338348118	1187	**
SekOst	200	0,0120304877516022	1162,5	*
TypIIost	200	1	882,5	N.S.
OstInt	200	0,0143748253348326	1155,5	*
OstFrag	200	0,00197521476798863	1227,5	**
OPD	200	0,000158800047130731	1304	***
ResLak	200	0,0130033123291602	1154,5	*
HavKan	200	0,0143748253348326	1155,5	*
NonHav	200	0,657196263420305	929	N.S.
VolkM	200	0,285557824825453	994,5	N.S.
ResKno	200	0,249134356083773	1011	N.S.
GenLam	200	0,578419514313504	819,5	N.S.
OstKno	200	0,0521105051566783	664,5	N.S.
FragKno	200	0,158375862929044	1040	N.S.
OstFl	300	0,00402975792139353	414	**
OstU	300	0,00251689967633762	389,5	**
OstD	300	0,00287225209035641	394,5	**
ResLakFl	300	0,316133571391388	753,5	N.S.
AktFr	300	0,553859889426386	717	N.S.
BFR	300	0,0616024547454767	493,5	N.S.
AOC	300	0,710871602210573	697	N.S.
SekOst	300	0,443905040236909	732,5	N.S.
TypIIost	300	0,118432104156816	533	N.S.
OstInt	300	0,714026060942229	696,5	N.S.
OstFrag	300	0,602284590766867	710,5	N.S.
OPD	300	0,360962767564207	746	N.S.
ResLak	300	0,000808637081956919	958	***
HavKan	300	0,709877088314018	697	N.S.
NonHav	300	0,66766631392367	700,5	N.S.
VolkM	300	0,345659971427639	723,5	N.S.
ResKno	300	0,0134971489171042	886,5	*
GenLam	300	0,0330336742359547	856	*
OstKno	300	0,00127863237672648	371,5	**
FragKno	300	0,777538391019642	637	N.S.
OstFl	400	0,000168367829644606	457,5	***
OstU	400	5,65E+09	406	***
OstD	400	3,77E+08	399	***
ResLakFl	400	0,0824390354737495	654	N.S.
AktFr	400	0,00212308239066007	1171,5	**
BFR	400	0,752426699540958	874,5	N.S.

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
AOC	400	0,00251869740655141	1166	**
SekOst	400	0,00438539343630679	1146,5	**
TypIIost	400	0,792294303195915	813	N.S.
OstInt	400	0,00613581898216239	1135	**
OstFrag	400	0,000934056408857896	1196,5	***
OPD	400	7,30E+09	1267,5	***
ResLak	400	0,00189750543561094	1162,5	**
HavKan	400	0,00613581898216239	1135	**
NonHav	400	3,22E+08	1272	***
VolkM	400	0,116855407039054	688	N.S.
ResKno	400	0,23989107796715	967	N.S.
GenLam	400	0,874494601646254	822,5	N.S.
OstKno	400	0,365424804917034	742	N.S.
FragKno	400	0,494863693324955	914	N.S.
OstFl	500	0,000998398326182732	527,5	***
OstU	500	0,000115439114148799	451	***
OstD	500	0,000158596556610147	461,5	***
ResLakFl	500	0,0176261388142236	619	*
AktFr	500	0,00110637362449081	1247	**
BFR	500	0,482451332863068	961	N.S.
AOC	500	0,00309500353182854	1213	**
SekOst	500	0,0100711894763572	1169,5	*
TypIIost	500	0,825790694722956	858,5	N.S.
OstInt	500	0,0128713640339056	1160	*
OstFrag	500	2,22E+08	1410,5	***
OPD	500	5,92E+09	1331	***
ResLak	500	0,00154658451248481	1222	**
HavKan	500	0,0128713640339056	1160	*
NonHav	500	0,00330866339959001	1192,5	**
VolkM	500	0,63985415566551	931	N.S.
ResKno	500	0,251489147597587	1010,5	N.S.
GenLam	500	0,198679666342376	738	N.S.
OstKno	500	0,0526016633713099	665	N.S.
FragKno	500	1,92E+08	1414	***
OstFl	600	5,68E+08	360,5	***
OstU	600	3,81E+08	330	***
OstD	600	3,84E+06	332,5	***
ResLakFl	600	0,242295489883668	696	N.S.
AktFr	600	0,00192483513106501	1147,5	**
BFR	600	0,551493346469036	755,5	N.S.
AOC	600	0,000916218856919441	1170	***
SekOst	600	0,0207491010123376	1063	*
TypIIost	600	0,146022589429601	674	N.S.
OstInt	600	0,0547623577117523	1022	N.S.
OstFrag	600	8,41E+07	1339,5	***
OPD	600	5,79E+08	1298,5	***
ResLak	600	0,00431720482474494	1111	**
HavKan	600	0,0979165748233073	994	N.S.
NonHav	600	0,159055222930107	961,5	N.S.

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
VolkM	600	0,223047266583365	942,5	N.S.
ResKno	600	0,102480598318732	992	N.S.
GenLam	600	0,680501345639143	775	N.S.
OstKno	600	0,000534155764725159	452,5	***
FragKno	600	0,0050057952817196	1116	**
OstFl	700	0,200261976133372	638	N.S.
OstU	700	0,172172801325286	619,5	N.S.
OstD	700	0,21722646886807	633,5	N.S.
ResLakFl	700	0,302019751164021	654	N.S.
AktFr	700	0,2231022404168	878	N.S.
BFR	700	0,932099861911342	747	N.S.
AOC	700	0,461151128058145	830	N.S.
SekOst	700	0,884221823557424	741	N.S.
TypIIost	700	0,725346341544222	723,5	N.S.
OstInt	700	0,888162782055425	741,5	N.S.
OstFrag	700	7,48E+09	1150,5	***
OPD	700	0,0119744794088325	1007	*
ResLak	700	0,00132510131550556	1068	**
HavKan	700	0,888161370942079	741,5	N.S.
NonHav	700	0,437566737814618	832	N.S.
VolkM	700	0,612838887624985	802,5	N.S.
ResKno	700	0,0451444081402485	956	*
GenLam	700	0,374560229058962	667	N.S.
OstKno	700	0,0202240909093115	524	*
FragKno	700	0,13487505467207	905,5	N.S.
OstFl	800	0,0227386161640891	432,5	*
OstU	800	0,00236503542216597	349	**
OstD	800	0,00329687151682621	360	**
ResLakFl	800	0,0151260997887542	405	*
AktFr	800	0,281644974006837	701,5	N.S.
BFR	800	0,508617138540753	552	N.S.
AOC	800	0,0542173437247295	774	N.S.
SekOst	800	0,121576259848415	741,5	N.S.
TypIIost	800	0,824280092265848	591	N.S.
OstInt	800	0,122826824425151	741	N.S.
OstFrag	800	0,00238887257376011	868,5	**
OPD	800	0,00219990832008234	871	**
ResLak	800	0,000322878187081856	903	***
HavKan	800	0,122826824425151	741	N.S.
NonHav	800	0,0719590273230652	760	N.S.
VolkM	800	0,919926618643362	601,5	N.S.
ResKno	800	0,316272553254184	695	N.S.
GenLam	800	0,489646180084782	549,5	N.S.
OstKno	800	0,178089902726587	493,5	N.S.
FragKno	800	0,0615223185937751	769	N.S.
OstFl	900	0,0190013976214537	224,5	*
OstU	900	0,0067945008298872	195	**
OstD	900	0,00738203279823415	197,5	**
ResLakFl	900	0,110189902660504	262,5	N.S.

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
AktFr	900	0,535463843865077	394,5	N.S.
BFR	900	0,0732900823044749	249,5	N.S.
AOC	900	0,0155316195677958	502	*
SekOst	900	0,0841760835195945	435,5	N.S.
TypII Ost	900	0,361392867967589	384,5	N.S.
OstInt	900	0,0996094318691182	431	N.S.
OstFrag	900	0,000153172606724589	553,5	***
OPD	900	0,00290270285559189	507,5	**
ResLak	900	0,00493713322262313	494,5	**
HavKan	900	0,0996094318691182	431	N.S.
NonHav	900	0,0892196070282222	432	N.S.
VolkM	900	0,924617086243735	341	N.S.
ResKno	900	0,253923959648529	402	N.S.
GenLam	900	0,827442954708965	323	N.S.
OstKno	900	0,109172187878912	243,5	N.S.
FragKno	900	0,368783858103197	388	N.S.
OstFl	1000	1,79E+07	1095,5	***
OstU	1000	3,00E+07	944	***
OstD	1000	9,26E+07	998,5	***
ResLakFl	1000	0,172238982230885	1788	N.S.
AktFr	1000	0,604511474400449	2207,5	N.S.
BFR	1000	0,00458390713956565	1455,5	**
AOC	1000	0,00367754191615067	2742	**
SekOst	1000	5,78E+09	3090,5	***
TypII Ost	1000	0,153343278746665	2482	N.S.
OstInt	1000	3,51E+09	3117,5	***
OstFrag	1000	6,69E+09	3081,5	***
OPD	1000	1,72E+08	3268	***
ResLak	1000	0,0546323721962837	2596	N.S.
HavKan	1000	4,47E+09	3104,5	***
NonHav	1000	0,0589131977666964	2591	N.S.
VolkM	1000	0,750782925133343	2228	N.S.
ResKno	1000	0,986198880361329	2164,5	N.S.
GenLam	1000	0,678152143905097	2063,5	N.S.
OstKno	1000	0,739384710284421	2082,5	N.S.
FragKno	1000	0,469981671347217	2327,5	N.S.

Tabelle 38: Ausreifertabelle der gemittelten Zählungen der jeweils drei Einzelzählungen pro Individuum pro Temperaturstufe bzw. Position am Datensatz des periostalen Bereichs der Femurkompakta; der Ausreifertest wurde durchgeführt mithilfe des R-Packages MVOutlier und der darin enthaltenen PCQR-Methode sowohl anhand der gezählten als auch der berechneten Parameter; (SekO=sekundäre Osteone, TypII=Typ-II-Osteone InOst=Intakte Osteone, OstFrag=Osteonfragmente, ResLak=Resorptionslakunen, Hawk=Hawer'sche Kanäle, NichtHawer=nicht-Hawer'sche Kanäle, VolkM=Volkman'sche Kanäle, ResKO=resorbierter Knochen, GenLam=Generallamelle, OstKO=osteonale Knochen, FragKO=fragmentaler Knochen, OstF=Osteonfläche, OstU=Osteonumfang, OstD=Osteondurchmesser, ResLakF=Resorptionslakunenfläche, Age=Alter, AktF=Aktivierungsfrequenz, BFR=Knochenbildungsrate, Temp=Temperatur, Pos=Position, Sex=Geschlecht);

Probe	SekOst	TypIIost	OstInt	OstFrag	OPD	ResLak	Hawers	NonHawers	VolkM	ResKO	GenLam	OstKO	FragKO	OstH	OstU	OstD	ResLakF	Age	AktF	BFR	AOC	Temp	Pos	Sex
WF15(1)unv	15	1,67	16,67	24,67	41,33	6	16,67	0	2	23,67	3,67	39,33	33,33	0,02	0,54	0,17	0,04	76	0,68	1,58	55,78	20	1	m
WF37(1)unv	17,33	2	19,33	27,67	47	0,67	19,33	0	1,33	3	4	67,67	25,33	0,04	0,66	0,21	0,01	87	0,84	2,96	80,94	20	1	w
WF38(1)unv	11	3,67	14,67	21,67	36,33	0,33	15	2	1,67	2	4,67	60,33	33	0,04	0,73	0,23	0,02	54	1,07	4,49	45,2	20	1	w
WF45(1)unv	0,67	0	0,67	8,67	9,33	3	0,67	1,33	0,33	26,67	21,33	8	44	0,08	0,82	0,26	0,09	16	2,74	19,65	9,35	20	1	m
WF9(1)unv	9	3	12	11	23	0,67	12	1,33	0,67	5,67	4,33	69,67	20,33	0,06	0,85	0,27	0,05	68	0,48	2,76	23,84	20	1	m
WF28(2)unv	17,33	0,67	18	19,33	37,33	3,33	18,33	1,67	1,33	12,33	12,67	51,67	23,33	0,03	0,6	0,19	0,04	64	0,77	2,2	46,43	20	2	w
WF34(2)unv	11	0	11	15	26	2,67	11	0,67	3,67	12,67	15,33	50,67	21,33	0,05	0,76	0,24	0,05	68	0,51	2,39	27,42	20	2	m
WF37(2)unv	14	0,67	14,67	19	33,67	3	14,33	1	1,33	14,67	12,33	44,33	28,67	0,03	0,62	0,2	0,05	87	0,47	1,42	40,2	20	2	w
WF45(2)unv	2	0	2	5,33	7,33	5,33	2	10,67	0	35	46,67	5	13,33	0,03	0,6	0,19	0,07	16	2,1	5,91	7,34	20	2	m
WF15(3)unv	20,33	1,33	21,67	13,33	35	2,67	21,67	1,67	2,67	14,67	4	62	19,33	0,03	0,61	0,19	0,06	79	0,55	1,59	42,19	20	3	m
WF45(3)unv	2,67	0	2,67	5	7,67	4	2,67	10,33	0	36,33	44	13,67	6	0,06	0,83	0,27	0,09	16	2,2	12,88	7,67	20	3	m
WF29(4)unv	18,67	3,67	22,33	16,33	38,67	2	22,33	2,33	1,33	5,67	20,33	52,33	21,67	0,02	0,54	0,17	0,03	89	0,52	1,22	49,1	20	4	m
WF45(4)unv	1	0	1	8,33	9,33	3,33	1	3	0	35,33	30,33	7,67	26,67	0,02	0,42	0,13	0,11	16	2,88	7,42	9,37	20	4	m
WF15(5)unv	19,67	0,67	20,33	13,67	34	1,67	20,33	3	0,67	13	5,33	58,33	23,33	0,03	0,6	0,19	0,11	79	0,53	1,54	39,75	20	5	m
WF45(5)unv	1,67	0	1,67	4,67	6,33	3,67	1,67	11,67	0	15,67	40,33	10,67	33,33	0,03	0,52	0,17	0,05	16	1,81	6,65	6,34	20	5	m
WF34(6)unv	14,33	0,33	14,67	13,67	28,33	2,33	14,67	1	3,67	9,33	20,33	52,67	17,67	0,04	0,67	0,21	0,04	68	0,54	1,92	30,52	20	6	m
WF37(6)unv	14,67	0,67	15,33	22,67	38	2,33	15,33	1	1	10,33	4	55,33	30,33	0,04	0,67	0,21	0,05	87	0,58	2,09	48,41	20	6	w
WF45(6)unv	2	0	2	6,33	8,33	3,33	2	4,33	0	39,67	26,33	13	21	0,07	0,88	0,28	0,13	16	2,4	15,48	8,34	20	6	m
WF27(7)unv	10	0,67	10,67	7,33	18	3	10,67	0,33	0,33	11	41,67	38,33	9	0,04	0,7	0,22	0,04	80	0,27	0,97	18,94	20	7	m
WF45(7)unv	2	0	2	4	6	3	1,33	10	0	33,33	43	10,33	13,33	0,05	0,8	0,26	0,16	16	1,72	8,86	6	20	7	m
WF37(8)unv	17	0,67	17,67	28	45,67	2,33	17,67	2	1,33	16	7	47,67	29,33	0,03	0,59	0,19	0,07	87	0,67	1,83	77,44	20	8	w
WF45(8)unv	4	0	4	1,33	5,33	3,67	4	25,33	0	13,67	64,67	16,67	5	0,04	0,73	0,23	0,05	16	1,53	7,31	5,34	20	8	m
WF34(9)unv	14,33	0,33	14,67	13,67	28,33	2,33	14,67	1	3,67	9,33	20,33	52,67	17,67	0,04	0,67	0,21	0,04	68	0,54	1,92	30,52	20	6	m
WF37(9)unv	14,67	0,67	15,33	22,67	38	2,33	15,33	1	1	10,33	4	55,33	30,33	0,04	0,67	0,21	0,05	87	0,58	2,09	48,41	20	6	w
WF45(9)unv	2	0	2	6,33	8,33	3,33	2	4,33	0	39,67	26,33	13	21	0,07	0,88	0,28	0,13	16	2,4	15,48	8,34	20	6	m
WF29(10)unv	10	0,67	10,67	7,33	18	3	10,67	0,33	0,33	11	41,67	38,33	9	0,04	0,7	0,22	0,04	80	0,27	0,97	18,94	20	7	m
WF45(11)unv	2	0	2	4	6	3	1,33	10	0	33,33	43	10,33	13,33	0,05	0,8	0,26	0,16	16	1,72	8,86	6	20	7	m
WF37(12)unv	17	0,67	17,67	28	45,67	2,33	17,67	2	1,33	16	7	47,67	29,33	0,03	0,59	0,19	0,07	87	0,67	1,83	77,44	20	8	w
WF45(13)unv	4	0	4	1,33	5,33	3,67	4	25,33	0	13,67	64,67	16,67	5	0,04	0,73	0,23	0,05	16	1,53	7,31	5,34	20	8	m
WF9(8)unv	9	0	9	13,67	22,67	4,67	9	0	0	34	17	26,67	22,33	0,03	0,61	0,19	0,07	68	0,41	1,22	23,52	20	8	m
WF15(9)unv	17,33	0,33	17,67	14	31,67	2,67	17,67	1,33	2,67	17,33	8,67	50,67	23,33	0,03	0,6	0,19	0,07	79	0,49	1,41	35,64	20	9	m
WF29(9)unv	10,33	0,33	10,67	6,33	17	0,67	10,67	1,33	0	2	39,33	40,67	18	0,04	0,72	0,23	0,02	80	0,25	1,02	17,26	20	9	m
WF29(9)unv	18,33	1,67	20	14,33	34,33	6	20	3,67	0,67	12,33	17,67	48	22	0,02	0,55	0,18	0,04	89	0,46	1,1	42,56	20	9	m
WF38(9)unv	10	0	10	6,67	16,67	2	10	1,67	1	10,67	42,67	39	7,67	0,03	0,66	0,21	0,05	54	0,43	1,5	16,86	20	9	w
WF45(9)unv	2,67	0	2,67	2,33	5	4,33	2,67	17,67	0,33	24,33	60	12	3,67	0,05	0,76	0,24	0,06	16	1,43	6,92	5	20	9	m
WF27(10)unv	6,33	0,67	7	5,33	12,33	2	7	1,33	0	10,67	50,67	30,67	8	0,05	0,76	0,24	0,04	80	0,18	0,82	12,39	20	10	m
WF45(10)unv	3	0	3	4,67	7,67	4,67	3	20	0	12,67	65,67	14,33	7,33	0,06	0,83	0,26	0,03	16	2,2	11,68	7,67	20	10	m
WF19(11)unv	3,33	0	3,33	7	10,33	5	3,33	0	0	38,33	30,33	12,33	19	0,04	0,68	0,22	0,08	76	0,16	0,64	10,36	20	11	m
WF37(11)unv	9,67	0,33	10	26,33	36,33	3,67	10	1,67	0	21,67	13,33	34,67	30,33	0,03	0,65	0,21	0,06	87	0,54	1,84	43,43	20	11	w
WF38(11)unv	12	1	13	19,67	32,67	0,67	13	2,33	0,67	3,33	22	44,33	30,33	0,03	0,65	0,21	0,02	54	0,92	3,13	44,08	20	11	w
WF45(11)unv	1,67	0	1,67	2,67	4,33	5	1,67	16,67	0	24	52,67	12,67	10,67	0,04	0,55	0,18	0,05	16	1,24	4,65	4,33	20	11	m

Probe	Skort	Typlokt	Oskint	OskFræg	OPP	Reslak	Havers	NonHavers	ValkM	Reskno	Gentam	Ostko	Frægkno	OskH	OskU	OskD	ReslakH	Age	AktF	BRR	AOC	Temp	Pos	Sex
WF19(1)100°C	11	1,67	12,67	13,67	26,33	0,33	12,33	1,33	1	2,33	4,33	71	22,33	0,06	0,84	0,27	0,02	68	0,59	3,3	28,01	20	11	m
WF38(2)100°C	17,33	4,67	22	24,33	46,33	1	22	2	0,67	4,33	2,67	65,33	27,67	0,03	0,61	0,2	0,03	54	1,31	3,99	76,66	100	2	w
WF45(2)100°C	2	0	2	6	8	2,67	2	5,33	0	22,33	32	15,33	30,33	0,09	1,05	0,33	0,09	16	2,64	29,72	8,01	100	2	m
WF19(3)200°C	11,67	2	13,67	18,33	32	5,67	13,67	0,67	1,33	22	7,67	36	34,33	0,03	0,58	0,18	0,04	76	0,52	1,36	35,84	200	3	m
WF29(3)200°C	25,33	3,33	28,67	18,67	47,33	0,33	28,67	1,33	2,67	1,33	8,67	65,67	24,33	0,02	0,54	0,17	0,01	89	0,66	1,51	85,68	200	3	m
WF38(3)200°C	19,67	4	23,67	24,33	48	1,67	23,67	2	1	5,67	0	62,33	32	0,03	0,58	0,18	0,03	54	1,3	3,46	106,68	200	3	w
WF45(3)200°C	0,67	0	0,67	4,33	5	2,67	0,67	14,67	0	16,33	31,33	13,33	39	0,08	0,84	0,27	0,06	16	1,47	17,05	5	200	3	m
WF26(4)200°C	23,33	0	23,33	9	32,33	3	23,33	0,33	0,33	10	28	50,67	10,67	0,02	0,52	0,17	0,03	72	0,55	1,18	38,74	300	4	w
WF28(4)200°C	12,67	0,33	13	11	24	2,33	13,33	0,67	0	11	32,33	43	13,67	0,03	0,65	0,21	0,06	64	0,48	1,6	25,12	300	4	w
WF45(4)200°C	2,33	0	2,33	2	4,33	3,33	2,33	10	0	26,67	50,33	15,33	7,67	0,09	1,01	0,32	0,09	16	1,24	8,44	4,33	300	4	m
WF29(5)400°C	22,33	1,33	23,67	18,33	42	1,67	23,67	3,67	0,67	5	19	55,67	20,33	0,02	0,55	0,17	0,04	89	0,57	1,36	64,55	400	5	m
WF37(5)400°C	15,67	1	16,67	28,67	45,33	2	16,67	1	0,33	15	4,67	50,67	29,67	0,03	0,62	0,2	0,08	87	0,7	2,14	75,12	400	5	w
WF38(5)400°C	16,67	4	20,67	32,67	53,33	1	20,67	5	1,67	4,33	0	65,33	30,33	0,03	0,63	0,2	0,03	54	1,78	5,63	248,33	400	5	w
WF45(5)400°C	2,67	0	2,67	3	5,67	3	2,67	12,67	2,67	33	35	22,67	9,33	0,1	1,08	0,34	0,11	16	1,63	14,16	5,67	400	5	m
WF19(6)500°C	12,67	0,67	13,33	17,33	30,67	3,67	13,33	1,67	0,33	20,33	9	35,33	35,33	0,03	0,58	0,18	0,06	76	0,49	1,32	34,5	500	6	m
WF29(6)500°C	21,67	1,67	23,33	21,33	44,67	2	23,33	2,33	1,33	8,33	22,33	47	22,33	0,02	0,5	0,16	0,04	89	0,6	1,21	68,91	500	6	m
WF37(6)500°C	16,67	1	17,67	32,33	50	3	17,67	1	1,33	15,67	4,67	46,33	33,33	0,03	0,58	0,18	0,06	87	0,76	2	143,46	500	6	w
WF45(6)500°C	3,67	0	3,67	4,67	8,33	3,33	3,67	13	2	21,33	32,67	27,67	18,33	0,09	1,03	0,33	0,06	16	2,48	23,27	8,34	500	6	m
WF19(7)500°C	16,33	0	16,33	19	35,33	4,67	13	1,33	1,33	23,67	9	35	32,33	0,02	0,53	0,17	0,05	76	0,57	1,24	42,29	600	7	m
WF28(7)500°C	16,67	1,33	18	17,33	35,33	2,67	18	2	3,67	11,67	6	66	16,33	0,04	0,68	0,22	0,04	64	0,8	2,99	42,56	600	7	w
WF29(7)600°C	26,67	1,67	28,33	22	50,33	1	28,33	1,67	1,67	4,67	10,67	58,67	26	0,02	0,51	0,16	0,03	89	0,69	1,44	113,81	600	7	m
WF47(8)600°C	15,33	1,33	16,67	9,67	26,33	0,67	16,67	1,33	0	5	33	45,33	16,67	0,03	0,58	0,19	0,03	95	0,33	0,9	28,27	600	7	w
WF45(7)800°C	3	0	3	3	6	2,67	3	21	1,67	21	46,67	21,67	10,67	0,09	1,02	0,32	0,09	16	1,72	13,46	6	600	7	m
WF19(8)700°C	19,33	0,33	19,67	18,67	38,33	5,67	19,67	3,33	0	20	19,67	36,33	24	0,02	0,48	0,15	0,04	76	0,61	1,12	50,16	700	8	m
WF29(8)700°C	28,67	0,33	29	14,33	43,33	2	29	6,33	1,33	7	19,33	57,67	16	0,02	0,5	0,16	0,04	89	0,58	1,16	63,76	700	8	m
WF4(8)700°C	15,33	1,33	16,67	10	26,67	1,33	16,67	1,67	1	6	34,33	44,67	15	0,03	0,58	0,18	0,03	95	0,33	0,88	29,01	700	8	w
WF45(8)700°C	3	0	3	0,67	3,67	3	3	27	3,33	9,33	70,33	17,33	3	0,06	0,87	0,28	0,04	16	1,05	5,84	3,67	700	8	m
WF9(8)700°C	10,67	0,67	11,33	13,67	25	3,33	11,67	0,67	0	19,33	17,33	40,33	23	0,04	0,67	0,21	0,06	68	0,46	1,65	26,29	700	8	m
WF19(9)800°C	11	0	11	16,33	27,33	5,67	11	2,33	0,33	25	23,67	28,33	23	0,03	0,57	0,18	0,05	76	0,44	1,14	29,39	800	9	m
WF29(9)800°C	20,67	1	21,67	19,67	41,33	2,33	21,67	5	0	9,33	21	48,33	21,33	0,02	0,53	0,17	0,04	89	0,56	1,25	58,04	800	9	m
WF29(9)800°C	15	1	16	17,67	33,67	3,33	16	0,67	8,33	16,33	11,67	46,67	25,33	0,03	0,61	0,19	0,05	82	0,51	1,49	38,78	800	9	w
WF38(9)800°C	19,67	0	19,67	10,33	30	1,33	19,67	4	0	5	34	47	14	0,02	0,55	0,17	0,03	54	0,73	1,75	32,86	800	9	w
WF45(9)800°C	2,67	0	2,67	3,33	6	2,67	2,67	19	1	18	41,33	22	18,67	0,09	1,03	0,33	0,07	16	1,73	13,39	6,01	800	9	m
WF19(10)900°C	14	0	14	12,33	26,33	6	14	2,33	0	24	26	32,67	17,33	0,02	0,55	0,17	0,04	76	0,42	1	27,97	900	10	m
WF26(10)900°C	26,33	1,33	27,67	17,33	45	3	27,67	5,33	0,33	11,67	17,33	52	19	0,02	0,49	0,15	0,04	89	0,6	1,13	72,79	900	10	m
WF37(10)900°C	16,67	0	16,67	14,33	31	4,67	16,67	0,67	0,67	30,67	16	32,33	21	0,02	0,5	0,16	0,07	87	0,42	0,82	34,35	900	10	w
WF38(10)900°C	28,33	3,33	31,67	20,67	52,33	1	31,67	2	1,33	4	9	65,33	21,67	0,02	0,51	0,16	0,03	54	1,34	2,75	136,27	900	10	w
WF45(10)900°C	3,33	0	3,33	3,33	6,67	3,67	3,33	27,67	3	19,67	51,33	26	3	0,09	1,03	0,33	0,05	16	1,94	15,67	6,68	900	10	m

Probe	SeKort	TypIost	OsInt	OsFrq	OPD	Reslak	Havers	NonHavers	VolKIm	Reskno	Genlam	Ostkno	Fragkno	OsHf	OsU	OstD	ReslakHf	Age	AktF	BFR	AOC	Temp	Pos	Sex
WF19(11)1000°C	11	0	11	6	17	7	7	2	0	32	35,5	21,5	11	0,02	0,51	0,16	0,05	76	0,27	0,52	17,41	1000	11	m
WF2(11)1000°C	12,33	0	12,33	5,67	18	2,33	12,33	1,67	0	13	49,33	29	8,67	0,02	0,55	0,18	0,05	80	0,27	0,63	18,37	1000	11	m
WF26(11)1000°C	31	0	31	25,67	56,67	3,33	31	1,67	0	8	14,33	59,67	18	0,02	0,49	0,16	0,03	72	1,01	1,96	31,05	1000	11	w
WF29(11)1000°C	25,67	0,33	26	11,33	37,33	2,33	26	4,33	0	7	39,67	40	13,33	0,02	0,44	0,14	0,02	89	0,49	0,75	46,58	1000	11	m
WF38(11)1000°C	28,33	1,33	29,67	16,33	46	1	29,67	4,33	0,67	3	18	59,33	19,67	0,02	0,5	0,16	0,02	54	1,15	2,29	73,97	1000	11	w
WF45(11)1000°C	3	0	3	8	11	2,67	3	11,67	3	17,33	28,33	28,67	25,67	0,1	1,11	0,35	0,09	16	3,84	39,18	11,06	1000	11	m

Tabelle 39: Auswertetabelle der gemittelten Zählungen der jeweils drei Einzelzählungen pro Individuum pro Temperaturstufe bzw. Position am Datensatz des mittleren Bereichs der Femurkompakta; der Auswertetest wurde durchgeführt mithilfe des R-Packages MVOutlier und der darin enthaltenen PCOut-Methode sowohl anhand der gezählten als auch der berechneten Parameter; (SeKort=sekundäre Osteone, TypIost=Typ-II-Osteone, IntOst=Intakte Osteone, OsFrq=Osteonfrequenz, Reslak=Resorptionsläkunen, HovKan=Havers'sche Kanäle, NichtHavers=nicht-Havers'sche Kanäle, VolKIm=Volkman'sche Kanäle, Reskno=resorbierter Knochen, Genlam=Generallamellen, AktF=Aktivierungsfrequenz, BFR=Knochenbildungsrate, Temp=Temperatur, Pos=Position, OstU=Osteonumfang, OstD=Osteondurchmesser, ReslakF=Resorptionsläkunenfläche, Age=Alter, AktF=Aktivierungsfrequenz, BFR=Knochenbildungsrate, Temp=Temperatur, Pos=Position, Sex=Geschlecht);

Probe	SeKort	TypIost	OsInt	OsFrq	OPD	Reslak	Havers	NonHavers	VolKIm	Reskno	Genlam	Ostkno	Fragkno	OsHf	OsU	OstD	ReslakHf	Age	AktF	BFR	AOC	Temp	Pos	Sex
WF29(1)Junv	17,67	2	19,67	15,33	35	1	19,67	2,67	0,67	2,33	14	54,67	29	0,03	0,6	0,19	0,02	89	0,48	1,33	65,94	20	1	m
WF37(2)Junv	7,33	1,67	9	16	25	2	9	0,33	0,33	20,33	4,33	39,67	35,67	0,05	0,76	0,24	0,1	87	0,36	1,68	27,94	20	2	w
WF29(2)Junv	19	3	22	15	37	1	22	1,67	1,33	2,33	15,67	57,33	24,67	0,03	0,57	0,18	0,02	89	0,5	1,31	77,19	20	2	w
WF37(3)Junv	12,33	3,33	15,67	14,33	30	1	15,67	1,67	1	4,33	6,67	62	27	0,04	0,69	0,22	0,04	87	0,47	1,76	38,83	20	3	m
WF34(3)Junv	10,33	1	11,33	6,67	18	2,33	11,33	3	1,67	15,67	11,33	59,67	13,33	0,05	0,82	0,26	0,05	68	0,34	1,78	18,67	20	3	m
WF45(3)Junv	6	0,33	6,33	7,67	14	0,67	6,33	0	0,33	8,67	16,33	48,67	26,33	0,08	1,01	0,32	0,08	16	4,28	34,31	14,24	20	3	m
WF37(4)Junv	12	4	16	17,67	33,67	1,33	16	0	2	8,33	4	61	26,67	0,04	0,7	0,22	0,06	87	0,51	1,97	47,68	20	4	w
WF29(4)Junv	20,67	1,67	22,33	13,67	36	0,33	22,33	3	1,33	0,33	11	67,33	21,33	0,03	0,62	0,2	0	89	0,5	1,5	57,16	20	4	m
WF45(4)Junv	5	0,33	5,33	7,67	13	1,33	5,33	0,67	1	15,67	19	42,33	23	0,1	1,08	0,34	0,12	16	3,92	32,7	13,35	20	4	m
WF37(5)Junv	8	1	9	17,67	26,67	2,67	9	0,67	0,67	17	7	35,33	40,67	0,04	0,74	0,23	0,07	87	0,39	1,67	31,42	20	5	w
WF29(5)Junv	17	1,33	18,33	16	34,33	0,33	18,33	3	1,67	0,67	16	54,33	29	0,03	0,61	0,2	0,01	89	0,47	1,39	54,31	20	5	m
WF39(5)Junv	11	0,33	11,33	14,33	25,67	1	11,33	1	0,67	8	11,67	52,67	27,67	0,05	0,77	0,24	0,05	69	0,53	2,63	28,98	20	5	w
WF45(5)Junv	8	0	8	5,33	13,33	1	8	0,33	0	7	23	42,33	27,67	0,05	0,81	0,26	0,07	16	3,88	20,47	13,54	20	5	m
WF29(6)Junv	19,33	1,67	21	13,67	34,67	0,67	21	4	2	2,33	19	61	17,67	0,03	0,6	0,19	0,02	89	0,48	1,37	64,22	20	6	m
WF29(6)Junv	13,33	0,67	14	14,33	28,33	1,67	14	0,67	1,33	17,33	5	55,33	22,33	0,04	0,73	0,23	0,07	82	0,44	1,8	38,29	20	6	w
WF45(6)Junv	4,33	0,33	4,67	5,33	10	1,33	4,67	0,67	0,67	8,67	18	44,33	29	0,09	1,05	0,33	0,07	16	2,98	26,91	10,04	20	6	m
WF15(7)Junv	12,67	1,67	14,33	20,67	35	1,67	14,33	0,33	1	13,33	5,33	48,33	33	0,03	0,66	0,21	0,09	79	0,57	1,92	81,45	20	7	m
WF34(7)Junv	11,33	0,67	12	10	22	1	12	2,33	2,33	5	12,67	64,67	17,67	0,05	0,83	0,26	0,02	68	0,43	2,33	23,61	20	7	m
WF29(7)Junv	8,67	0	8,67	9,67	18,33	2,67	8,67	0,33	1,67	24,33	7	46,67	22	0,05	0,82	0,26	0,09	82	0,28	1,51	19,12	20	7	w
WF45(7)Junv	7	0,33	7,33	5	12,33	0,67	7,33	1	1	7,33	24,67	47	21	0,07	0,91	0,29	0,07	16	3,6	23,47	12,48	20	7	m
WF37(8)Junv	11,67	3,67	15,33	19	34,33	1,33	15,33	0,33	1	4	7,67	52,67	35,67	0,03	0,66	0,21	0,02	87	0,5	1,71	51,26	20	8	w
WF19(8)Junv	7	0,33	7,33	12	19,33	4,33	7,33	1	0,33	35,33	9,67	30,67	24,33	0,04	0,72	0,23	0,08	76	0,32	1,36	20,29	20	8	m
WF29(8)Junv	19,33	1	20,33	14	34,33	0,67	20,33	3,67	1,33	1,33	18	66	14,67	0,03	0,64	0,2	0,01	89	0,48	1,57	50,13	20	8	m
WF19(9)Junv	16,67	0,67	17,33	10,67	28	2,33	17	1	1,67	16	13	53,33	17,67	0,03	0,62	0,2	0,09	76	0,45	1,4	33,39	20	9	m
WF28(9)Junv	9,67	0,67	10,33	9	19,33	4,67	10,33	1	1,33	22,67	10,67	49,67	17	0,05	0,78	0,25	0,05	64	0,39	1,87	20,29	20	9	w
WF45(9)Junv	9,33	1,33	10,67	15	25,67	2,33	10,67	1	1,67	23	8,33	44	24,67	0,04	0,73	0,23	0,1	95	0,33	1,37	29,52	20	9	w

Probe	SchOst	TypOst	OstInt	OstFrag	OPD	ResLak	Havers	NonHavers	Volkm	Resko	Genlam	Ostko	Fragko	OstFI	OstU	OstD	ResLakFI	Age	AltrF	BFR	AOC	Temp	Pos	Sex
WF38(10)univ	11,67	2	13,67	9	22,67	0,67	13,67	1,67	0,33	4,33	31	45,33	19,33	0,03	0,55	0,21	0,02	54	0,56	1,85	24,89	20	10	w
WF29a(10)univ	17,67	0,67	18,33	12,33	30,67	1,33	18,33	4	2	7	15	59,33	18,67	0,03	0,54	0,2	0,06	89	0,42	1,34	41,27	20	10	m
WF38(11)univ	8,67	1	9,67	9	18,67	2	9,67	1,33	1	19,67	29	36,33	15	0,04	0,69	0,22	0,1	54	0,46	1,72	19,45	20	11	w
WF26(11)univ	10,67	0,33	11	7,67	18,67	3	11	0,67	0,33	15,67	24,67	26,33	18,33	0,02	0,51	0,16	0,05	72	0,32	0,8	19,74	20	11	w
WF45(11)univ	7,33	0	7,33	7	14,33	1,33	7,33	0,67	0,67	4,67	24,67	42,33	28,33	0,06	0,86	0,27	0,04	16	4,19	24,28	14,58	20	11	m
WF19(21)000°C	8	0	8	10,67	18,67	2,33	8	1	0,33	23	15	34,67	27,33	0,04	0,74	0,24	0,11	76	0,3	1,3	19,49	100	2	m
WF45(21)000°C	4,33	0	4,33	5,33	9,67	1,33	4,33	0,33	0,67	12,67	22,33	35,67	29,33	0,08	1,03	0,33	0,09	16	2,93	24,66	9,79	100	2	m
WF38(21)200°C	13,33	3	16,33	14,67	31	1	16,33	1	1	3,33	4,33	63	29,33	0,04	0,72	0,23	0,03	54	0,82	3,4	39,65	200	3	w
WF29a(21)200°C	17	2,33	19,33	20,33	39,67	0	19,33	1	1	1	9	62	28	0,03	0,55	0,21	0	89	0,57	1,84	83,78	200	3	m
WF45(21)200°C	6	0,67	6,67	8,33	15	0,67	6,67	0	0,67	7	16,33	48,33	28,33	0,07	0,95	0,3	0,07	16	4,54	32,77	15,27	200	3	m
WF38(21)300°C	11,33	0,33	11,67	6	17,67	0,33	11,67	1	0	2	12	71	15	0,06	0,88	0,28	0,02	64	0,36	2,26	18,26	300	4	w
WF24(21)300°C	15,5	0	15,5	11	26,5	1	15,5	0,5	0,5	7	24	45,5	23,5	0,03	0,61	0,2	0,07	80	0,4	1,18	31,04	300	4	m
WF34(21)300°C	13,67	0,33	14	6,67	20,67	0,33	14	2	0	3,67	19,67	62,67	14	0,04	0,75	0,24	0,03	68	0,39	1,73	21,81	300	4	m
WF45(21)300°C	8,33	0,33	8,67	7,33	16	1,67	8,67	0,33	1	19,67	30	35	15,33	0,04	0,69	0,22	0,12	16	4,62	17,74	16,37	300	4	m
WF37(21)400°C	11,33	2,33	13,67	6,33	20	1,67	13,67	0	0,67	11,67	29,33	49	10	0,04	0,67	0,21	0,08	87	0,27	0,98	21,02	400	5	w
WF26(21)400°C	11,33	0,33	11,67	8	19,67	2,67	11,67	1	0	17,67	32,67	40	9,67	0,03	0,66	0,21	0,07	72	0,33	1,15	20,6	400	5	w
WF3(21)400°C	20	0	20	13	33	1	20	1	1	13	7	55	25	0,03	0,59	0,19	0,13	80	0,5	1,39	45,17	400	5	m
WF29a(21)400°C	8,67	0,67	9,33	10,67	20	1,33	9,33	0,33	0,67	19,67	5,67	53,33	21,33	0,06	0,87	0,28	0,14	82	0,31	1,83	21,22	400	5	w
WF45(21)400°C	6	0,33	6,33	7	13,33	1,67	6,33	0	2,67	12,33	14,67	42,33	30,67	0,07	0,95	0,3	0,09	16	3,94	27,7	13,5	400	5	m
WF29a(21)500°C	21,33	1,67	23	14,33	37,33	0,33	23	2,33	0	2	11,33	70,33	16,33	0,03	0,63	0,2	0,02	89	0,53	1,64	80,72	500	6	m
WF37(21)600°C	5,67	1,33	7	10,67	17,67	3,33	7	0	0	29,33	20,67	30	20	0,04	0,74	0,23	0,09	87	0,24	1,04	18,26	600	7	w
WF38(21)600°C	17	1,67	18,67	12,67	31,33	1,33	18,67	2,33	0	6,67	5,33	71,33	16,67	0,04	0,69	0,22	0,04	64	0,66	2,53	41,02	600	7	w
WF29a(21)800°C	23,33	1	24,33	15,33	39,67	0,33	24,33	1,33	1,33	1,67	13,67	62,33	17,33	0,03	0,59	0,19	0,02	89	0,55	1,55	90,21	600	7	m
WF28(21)800°C	21,67	1,33	23	9	32	1	23	0,67	0,33	5,33	9,67	71	14	0,03	0,62	0,2	0,05	80	0,49	1,53	43,34	700	8	m
WF15(21)800°C	18,67	1	19,67	12,33	32	2,33	19,67	2,33	0,67	17,33	14,67	49,33	18,67	0,03	0,57	0,18	0,08	79	0,49	1,26	44,89	700	8	m
WF29a(21)700°C	29,33	0,67	30	12	42	0,67	29,67	3,67	1	2,33	23,67	62	12	0,02	0,51	0,16	0,02	89	0,56	1,18	136,86	700	8	m
WF45(21)700°C	5,67	0	5,67	4,67	10,33	1,67	5,67	3,33	1,33	12	35,67	26,67	25,67	0,05	0,77	0,24	0,09	16	2,97	14,58	10,38	700	8	m
WF45(21)900°C	14,33	0	14,33	10,67	25	1,67	14,33	1,67	1	15,33	24,67	42,33	17,67	0,03	0,6	0,19	0,09	76	0,4	1,17	28,13	800	9	m
WF15(21)900°C	23	0,33	23,33	16	39,33	2,67	23,33	2	0	11,67	18,33	48,67	21,33	0,02	0,51	0,16	0,05	79	0,6	1,26	93,25	800	9	m
WF45(21)900°C	5,67	0,33	6	7	13	2	6	3	1	18,67	38,33	28,33	16,67	0,05	0,76	0,24	0,08	16	3,75	17,47	13,24	800	9	m
WF21(10)900°C	25	0	25	8	33	3	25	2	0	13	7	68	12	0,03	0,58	0,19	0,04	80	0,5	1,37	45,17	900	10	m
WF15(10)900°C	23	0	23	11	34	2,5	23	1	0	11,5	24,5	47	17	0,02	0,51	0,16	0,05	79	0,52	1,05	55,25	900	10	m
WF34(10)900°C	13	1,67	14,67	10,33	25	1	14,67	3,33	0,67	9,67	10,67	63	16,67	0,04	0,74	0,24	0,08	68	0,48	2,08	28,26	900	10	m
WF39a(10)900°C	13,67	0,33	14	10,67	24,67	1,67	14	3	0,67	11,33	15,67	55,33	17,67	0,04	0,71	0,23	0,07	69	0,45	1,81	27,61	900	10	w
WF45(10)900°C	5,67	0,33	6	7,33	13,33	3	6	2,67	0	25	30,33	23	21,67	0,03	0,47	0,15	0,08	16	3,47	13,36	13,83	900	10	m
WF38(11)1000°C	24,67	1,33	26	15	41	1	26	1,33	0,33	4	13,67	62	20,33	0,02	0,55	0,17	0,04	54	1,03	2,45	105,03	1000	11	w

Tabelle 40: Verbrennungsbedingte Veränderung von sekundären und intakten Osteonen, Typ-II-Osteonen und Osteonfragmenten der Knochenmikrostruktur im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im periostalen Bereich der Tibiakompakta; SekOst=sekundäre Osteone, TypIIOst=Typ-II-Osteone, OstInt=intakte Osteone, OstFrag=Osteonfragmente;

Parameter	Temperatur [°C]	RT	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
SekOst	MW unv.	13,67	14,61	16,11	13,78	12,67	13,50	13,11	12,22	14,00	12,50	12,33
	MW verbr.	13,67	12,39	12,44	11,61	14,72	16,06	14,61	20,22	18,78	19,94	19,31
	STABW unv.	6,30	5,70	4,60	6,64	5,56	4,99	5,09	5,41	4,87	4,34	4,03
	STABW verbr.	6,30	6,72	6,00	5,66	4,55	5,20	4,72	6,46	7,20	8,65	7,87
	Veränderung [%]	0,00	-15,21	-22,76	-15,73	16,23	18,93	11,44	65,45	34,13	59,56	56,55
TypIIOst	MW unv.	1,61	1,39	1,50	1,33	1,44	1,56	1,83	1,67	1,78	1,89	1,33
	MW verbr.	1,61	1,94	1,17	0,83	1,22	2,06	1,44	1,33	1,17	0,94	1,50
	STABW unv.	1,29	0,85	1,10	1,14	1,20	1,10	1,10	1,03	1,11	0,90	1,09
	STABW verbr.	1,29	1,51	1,34	0,99	1,00	0,87	0,70	0,97	0,92	0,94	1,03
	Veränderung [%]	0,00	40,00	-22,22	-37,50	-15,38	32,14	-21,21	-20,00	-34,38	-50,00	12,50
OstInt	MW unv.	15,28	16,00	17,61	15,11	14,11	15,06	14,94	13,89	15,78	14,39	13,67
	MW verbr.	15,28	14,33	13,61	12,44	15,94	18,11	16,06	21,56	19,94	20,89	20,81
	STABW unv.	7,00	6,13	4,97	7,23	6,35	5,44	5,85	6,10	5,75	4,90	4,64
	STABW verbr.	7,00	7,72	6,83	6,25	5,12	5,88	4,62	6,85	7,69	9,01	8,06
	Veränderung [%]	0,00	-10,42	-22,71	-17,65	12,99	20,30	7,43	55,20	26,41	45,17	52,25
OstFrag	MW unv.	10,78	10,33	11,22	10,67	10,50	10,83	9,61	10,67	10,89	10,06	11,57
	MW verbr.	10,78	11,89	12,33	7,56	9,00	10,22	10,33	11,00	10,56	10,00	11,31
	STABW unv.	5,64	5,01	4,70	5,36	5,17	3,55	4,38	3,85	3,71	4,11	3,72
	STABW verbr.	5,64	5,96	6,40	4,36	3,99	4,63	3,07	2,89	3,31	2,83	5,63
	Veränderung [%]	0,00	15,05	9,90	-29,17	-14,29	-5,64	7,51	3,13	-3,06	-0,55	-2,24

Tabelle 41: Veränderung der Osteongeometrie (Osteonfläche=OstFl, Osteonumfang=OstU, Osteondurchmesser=OstD) über die Verbrennungstemperaturen im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im periostalen Bereich der Tibiakompakta (Verbrennungstemperaturen RT-1000°C entsprechen den Positionen 1-11 entlang des anterioren Tibiaschaftes);

Parameter	Temperatur [°C]	RT	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
OstFl	MW unv.	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04
	MW verbr.	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
	STABW unv.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	STABW verbr.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Veränderung [%]	0,00	-3,87	0,73	14,91	-6,30	-11,49	2,29	-31,25	-12,36	-33,88	-32,52
OstU	MW unv.	0,67	0,67	0,68	0,65	0,71	0,69	0,69	0,74	0,66	0,71	0,68
	MW verbr.	0,67	0,66	0,68	0,69	0,68	0,65	0,70	0,62	0,61	0,57	0,56
	STABW unv.	0,11	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,12	0,07	0,09	0,10
	STABW verbr.	0,11	0,08	0,07	0,12	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,09	0,07
	Veränderung [%]	0,00	-1,24	0,86	6,75	-3,38	-6,10	0,76	-17,14	-6,94	-19,06	-17,69
OstD	MW unv.	0,21	0,21	0,22	0,21	0,23	0,22	0,22	0,24	0,21	0,23	0,22
	MW verbr.	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,21	0,22	0,20	0,20	0,18	0,18
	STABW unv.	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,04	0,02	0,03	0,03
	STABW verbr.	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
	Veränderung [%]	0,00	-1,24	0,86	6,75	-3,38	-6,10	0,76	-17,14	-6,94	-19,06	-17,69

Tabelle 42: Veränderung der Resorptionslakunenfläche über die Verbrennungstemperaturen im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im periostalen Bereich der Tibiakompakta (Verbrennungstemperaturen RT-1000°C entsprechen den Positionen 1-11 entlang des anterioren Tibiaschaftes);

Temperatur [°C]	RT	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
MW unv.	0,02	0,03	0,05	0,03	0,02	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,05
MW verbr.	0,02	0,03	0,05	0,07	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,05
STABW unv.	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03
STABW verbr.	0,02	0,03	0,03	0,07	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
Veränderung (unv.-verbr.) [%]	0,00	-3,25	4,81	94,85	117,71	55,41	-2,15	-29,51	10,27	27,61	6,55

Tabelle 43: Veränderung der Metabolismus-abhängigen Parameter über die Verbrennungstemperaturen im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im periostalen Bereich der Tibiakompakta (Verbrennungstemperaturen RT-1000°C entsprechen den Positionen 1-11 entlang des anterioren Tibiaschaftes); BFR=Knochenbildungsrate, AktFr=Aktivierungsfrequenz;

Parameter	Temperatur [°C]	RT	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
OPD	MW unv.	26,06	26,33	28,83	25,78	24,61	25,89	24,56	24,56	26,67	24,44	25,23
	MW verbr.	26,06	26,22	25,94	20,00	24,94	28,33	26,39	32,56	30,50	30,89	32,12
	STABW unv.	11,74	10,34	6,55	12,06	10,24	7,51	9,30	9,41	8,33	8,20	6,06
	STABW verbr.	11,74	12,36	12,00	9,79	7,72	9,92	6,79	8,90	10,09	10,29	11,45
	Veränderung [%]	0,00	-0,42	-10,02	-22,41	1,35	9,44	7,47	32,58	14,38	26,36	27,27
AOC	MW unv.	32,10	31,05	32,86	30,38	27,79	28,70	27,81	27,82	30,16	26,84	27,45
	MW verbr.	32,10	30,84	30,53	21,37	27,53	46,59	29,33	42,11	39,39	44,53	48,50
	STABW unv.	21,02	16,01	9,71	17,06	13,82	9,99	13,68	13,50	11,76	10,37	7,99
	STABW verbr.	21,02	16,48	16,58	11,18	10,46	70,17	9,67	19,67	21,61	36,47	40,54
	Veränderung [%]	0,00	-0,69	-7,07	-29,67	-0,92	62,33	5,45	51,35	30,60	65,95	76,71
BFR	MW unv.	0,02	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	MW verbr.	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02
	STABW unv.	0,02	0,03	0,04	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03
	STABW verbr.	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,04	0,04	0,02	0,03	0,01
	Veränderung [%]	0,00	-27,83	-39,68	-14,87	22,99	10,89	40,83	4,40	6,52	-12,49	-27,23
AktFr	MW unv.	0,64	0,75	0,96	0,60	0,62	0,75	0,67	0,70	0,75	0,70	0,64
	MW verbr.	0,64	0,60	0,64	0,46	0,78	0,97	0,82	0,98	0,87	0,89	0,73
	STABW unv.	0,26	0,48	0,82	0,24	0,27	0,40	0,29	0,38	0,36	0,39	0,43
	STABW verbr.	0,26	0,32	0,37	0,27	0,57	0,80	0,57	0,63	0,47	0,53	0,32
	Veränderung [%]	0,00	-19,38	-33,27	-23,16	26,28	28,70	23,43	40,01	16,72	25,98	14,65

Tabelle 44: Verbrennungsbedingte Veränderung der prozentualen Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im periostalen Bereich der Tibiakompakta;

Temperatur [°C]	RT	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
ResKno MW unv.	3,67	6,17	7,00	5,50	5,22	5,44	7,28	9,22	7,67	7,33	9,43
ResKno MW verbr.	3,67	6,67	10,89	9,17	8,83	6,44	6,72	5,00	7,28	13,00	11,38
ResKno STABW unv.	4,00	6,84	5,99	5,69	7,04	6,78	5,98	11,32	8,17	9,41	7,47
ResKno STABW verbr.	4,00	7,91	11,86	8,07	10,60	5,41	6,66	4,51	6,83	12,18	7,77
ResKno Veränderung [%]	0,00	8,11	55,56	66,67	69,15	18,37	-7,63	-45,78	-5,07	77,27	20,68
GenLam MW unv.	27,28	18,94	13,39	27,17	24,83	21,94	21,56	19,11	22,22	20,56	22,47
GenLam MW verbr.	27,28	24,72	23,06	32,89	21,33	18,56	17,28	18,28	23,61	22,61	23,69
GenLam STABW unv.	24,62	19,66	6,06	30,05	25,57	14,67	20,43	11,07	20,02	14,84	10,70
GenLam STABW verbr.	24,62	30,29	29,70	24,47	11,73	15,78	6,60	8,84	14,75	12,50	17,70
GenLam Veränderung [%]	0,00	30,50	72,20	21,06	-14,09	-15,44	-19,85	-4,36	6,25	10,00	5,46
OstKno MW unv.	50,50	55,50	61,72	49,67	51,83	54,39	54,50	54,61	52,06	53,67	47,83
OstKno MW verbr.	50,50	47,17	48,33	44,22	55,94	59,44	59,22	60,94	54,78	49,67	48,88
OstKno STABW unv.	18,15	15,19	10,13	20,86	18,24	11,94	16,06	12,40	14,14	12,76	10,73
OstKno STABW verbr.	18,15	21,13	21,70	17,58	8,73	14,63	6,00	10,79	9,58	12,03	13,28
OstKno Veränderung [%]	0,00	-15,02	-21,69	-10,96	7,93	9,30	8,66	11,60	5,23	-7,45	2,20
FragKno MW unv.	18,33	19,39	17,78	17,61	18,11	18,22	16,67	17,06	18,06	18,44	20,27
FragKno MW verbr.	18,33	21,44	17,72	13,72	13,89	15,56	16,78	15,78	14,33	14,72	15,54
FragKno STABW unv.	8,55	6,47	4,80	9,54	8,96	5,85	8,17	4,58	7,67	5,88	6,49
FragKno STABW verbr.	8,55	10,74	10,74	8,06	5,60	5,00	3,96	3,34	4,60	4,70	7,06
Veränderung [%]	0,00	10,60	-0,31	-22,08	-23,31	-14,63	0,67	-7,49	-20,62	-20,18	-23,33

Tabelle 45: Verbrennungsbedingte Veränderung von sekundären und intakten Osteonen, Typ-II-Osteonen und Osteonfragmenten der Knochenmikrostruktur im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im mittigen Bereich der Tibiakompakta; SekOst=sekundäre Osteone, TypIIOst=Typ-II-Osteone, OstInt=intakte Osteone, OstFrag=Osteonfragmente;

Parameter	Temperatur [°C]	RT	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
SekOst	MW unv.	12,22	11,72	11,11	10,94	12,78	12,11	12,33	11,33	10,39	12,50	11,82
	MW verbr.	12,22	11,12	10,59	10,87	12,00	12,61	12,89	18,17	15,06	18,69	18,91
	STABW unv.	6,43	3,48	3,55	4,77	4,91	4,30	4,20	4,14	4,69	5,62	5,51
	STABW verbr.	6,43	4,31	3,97	7,95	4,49	4,17	4,00	6,44	7,45	6,94	6,96
	Veränderung [%]	0,00	-5,16	-4,71	-0,71	-6,09	4,13	4,50	60,29	44,99	49,54	59,93
TypIIOst	MW unv.	1,44	1,72	1,17	1,61	1,61	1,28	1,39	1,17	1,33	1,44	1,71
	MW verbr.	1,44	1,06	1,24	0,67	0,72	1,56	1,17	1,50	1,19	0,85	0,27
	STABW unv.	0,86	0,67	0,79	0,70	1,20	0,96	0,98	1,10	0,91	1,04	1,16
	STABW verbr.	0,86	0,90	1,09	1,11	0,83	0,62	0,79	0,86	1,05	0,90	0,65
	Veränderung [%]	0,00	-38,52	5,88	-58,62	-55,17	21,74	-16,00	28,57	-10,94	-41,42	-84,01
OstInt	MW unv.	13,67	13,44	12,28	12,56	14,39	13,39	13,72	12,50	11,72	13,94	13,53
	MW verbr.	13,67	12,18	11,82	11,53	12,72	14,17	14,06	19,67	16,25	19,54	19,18
	STABW unv.	6,95	3,90	4,03	4,98	5,77	4,85	4,81	4,96	5,31	6,17	6,16
	STABW verbr.	6,95	4,99	4,59	8,85	4,82	4,34	4,53	6,83	8,16	7,64	7,35
	Veränderung [%]	0,00	-9,43	-3,70	-8,14	-11,58	5,81	2,43	57,33	38,63	40,12	41,78
OstFrag	MW unv.	11,44	11,83	11,17	11,11	10,33	10,89	10,67	10,28	11,17	11,00	12,35
	MW verbr.	11,44	11,47	10,00	7,60	7,89	9,44	9,61	10,50	9,94	9,85	11,45
	STABW unv.	4,62	3,03	3,94	3,66	3,79	3,89	4,52	2,72	2,92	4,09	5,72
	STABW verbr.	4,62	4,61	4,30	5,34	2,27	2,73	3,43	3,78	3,96	4,65	4,37
	Veränderung [%]	0,00	-3,07	-10,45	-31,60	-23,66	-13,27	-9,90	2,16	-11,01	-10,49	-7,27

Tabelle 46: Veränderung der Osteongeometrie (Osteonfläche=OstFI, Osteonumfang=OstU, Osteondurchmesser=OstD) über die Verbrennungstemperaturen im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im mittigen Bereich der Tibiakompakta (Verbrennungstemperaturen RT-1000°C entsprechen den Positionen 1-11 entlang des anterioren Tibiaschaftes);

Parameter	Temperatur [°C]	RT	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
OstFI	MW unv.	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	MW verbr.	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
	STABW unv.	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
	STABW verbr.	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Veränderung [%]	0,00	-1,04	6,49	5,04	8,38	-1,38	4,26	-24,15	-23,78	-34,20	-24,18
OstU	MW unv.	0,75	0,74	0,74	0,74	0,71	0,72	0,71	0,71	0,74	0,71	0,67
	MW verbr.	0,75	0,73	0,76	0,76	0,63	0,61	0,62	0,52	0,61	0,54	0,59
	STABW unv.	0,13	0,08	0,08	0,10	0,08	0,11	0,09	0,07	0,09	0,12	0,13
	STABW verbr.	0,13	0,12	0,11	0,15	0,30	0,29	0,29	0,24	0,19	0,17	0,08
	Veränderung [%]	0,00	-1,12	2,76	1,51	-10,83	-15,71	-13,39	-26,98	-18,53	-24,51	-12,08
OstD	MW unv.	0,24	0,24	0,23	0,24	0,22	0,23	0,23	0,22	0,24	0,23	0,21
	MW verbr.	0,24	0,23	0,24	0,24	0,21	0,20	0,20	0,17	0,20	0,17	0,19
	STABW unv.	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,04	0,04
	STABW verbr.	0,04	0,04	0,03	0,05	0,08	0,08	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03
	Veränderung [%]	0,00	-1,12	2,76	1,51	-7,90	-13,31	-9,87	-24,32	-17,13	-23,01	-12,08

Tabelle 47: Veränderung der Resorptionslakunenfläche über die Verbrennungstemperaturen im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im mittigen Bereich der Tibiakompakta (Verbrennungstemperaturen RT-1000°C entsprechen den Positionen 1-11 entlang des anterioren Tibiaschaftes);

Temperatur [°C]	RT	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
MW unv.	0,04	0,06	0,07	0,03	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05
MW verbr.	0,04	0,06	0,05	0,07	0,05	0,05	0,05	0,04	0,06	0,07	0,04
STABW unv.	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04
STABW verbr.	0,04	0,04	0,04	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03
Veränderung (unv.-verbr.) [%]	0,00	-8,78	-28,78	95,63	6,42	22,50	5,42	-30,76	11,58	73,01	-13,32

Tabelle 48: Veränderung der Metabolismus-abhängigen Parameter über die Verbrennungstemperaturen im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im mittigen Bereich der Tibiakompakta (Verbrennungstemperaturen RT-1000°C entsprechen den Positionen 1-11 entlang des anterioren Tibiaschaftes);BFR=Knochenbildungsrate, AktFr=Aktivierungsfrequenz;

Parameter	Temperatur [°C]	RT	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
OPD	MW unv.	25,11	25,28	23,44	23,67	24,72	24,28	24,39	22,78	22,89	24,94	25,88
	MW verbr.	25,11	23,65	21,82	19,13	20,61	23,61	23,67	30,17	26,19	29,38	30,64
	STABW unv.	11,12	5,80	7,21	7,77	9,05	7,25	8,73	6,16	6,59	9,04	10,86
	STABW verbr.	11,12	8,43	6,95	13,27	4,60	5,87	7,10	9,51	11,30	11,41	10,93
	Veränderung [%]	0,00	-6,45	-6,91	-19,15	-16,63	-2,75	-2,96	32,44	14,41	17,80	18,37
AOC	MW unv.	33,41	27,50	25,62	26,00	29,13	26,88	28,23	24,38	24,70	30,15	31,07
	MW verbr.	33,41	26,46	23,33	22,19	21,46	25,52	25,67	30,99	35,36	40,18	42,43
	STABW unv.	28,55	7,96	10,36	10,73	17,57	11,38	15,84	8,11	9,08	20,79	17,64
	STABW verbr.	28,55	12,83	8,94	18,12	5,55	8,92	9,28	13,58	29,44	28,53	28,21
	Veränderung [%]	0,00	-3,78	-8,93	-14,62	-26,33	-5,04	-9,08	27,12	43,19	33,25	36,58
BFR	MW unv.	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03
	MW verbr.	0,04	0,03	0,03	0,02	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
	STABW unv.	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04
	STABW verbr.	0,04	0,03	0,03	0,02	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
	Veränderung [%]	0,00	-21,52	-6,63	-41,95	10,08	1,99	15,29	-6,63	-14,08	-33,61	12,19
AktFr	MW unv.	0,78	0,91	0,81	0,74	0,79	0,77	0,74	0,80	0,79	0,85	0,71
	MW verbr.	0,78	0,78	0,75	0,52	0,73	0,82	0,81	1,01	0,96	0,92	1,07
	STABW unv.	0,51	0,81	0,72	0,54	0,60	0,55	0,47	0,77	0,66	0,70	0,51
	STABW verbr.	0,51	0,52	0,55	0,41	0,68	0,76	0,68	0,81	0,86	0,76	0,79
	Veränderung [%]	0,00	-14,61	-7,18	-30,06	-7,05	5,42	10,11	26,36	21,63	7,62	50,84

Tabelle 49: Verbrennungsbedingte Veränderung der prozentualen Zusammensetzung der Knochenmikrostruktur im Vergleich zu den unverbrannten Referenzproben im mittigen Bereich der Tibiakompakta;

Temperatur [°C]	RT	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
ResKno MW unv.	9,11	11,72	12,28	9,22	10,72	10,39	10,39	15,56	12,78	10,67	12,47
ResKno MW verbr.	9,11	12,82	11,29	16,40	14,39	11,44	10,44	7,67	13,81	13,23	12,18
ResKno STABW unv.	10,99	11,40	9,25	13,68	10,85	10,30	8,76	14,37	10,71	12,85	14,67
ResKno STABW verbr.	10,99	12,42	11,98	19,72	14,31	8,69	8,99	6,55	10,32	8,72	12,33
ResKno Veränderung [%]	0,00	9,40	-8,01	77,83	34,20	10,16	0,53	-50,71	8,10	24,04	-2,32
GenLam MW unv.	15,78	13,28	16,17	19,44	17,39	18,39	18,67	18,44	16,78	16,83	23,35
GenLam MW verbr.	15,78	18,24	19,29	29,27	20,06	16,44	16,78	20,44	21,38	23,54	23,45
GenLam STABW unv.	10,60	5,77	10,96	12,48	10,20	10,30	12,23	7,53	7,27	6,68	11,15
GenLam STABW verbr.	10,60	14,80	12,69	26,33	10,08	5,52	11,58	10,92	14,10	11,75	11,69
GenLam Veränderung [%]	0,00	37,34	19,35	50,51	15,34	-10,57	-10,12	10,84	27,40	39,83	0,44
OstKno MW unv.	54,22	57,00	50,61	52,17	54,11	51,89	52,72	47,44	47,94	51,44	43,65
OstKno MW verbr.	54,22	49,88	50,76	41,87	50,72	55,78	56,89	55,72	49,50	49,15	49,09
OstKno STABW unv.	11,93	10,92	8,07	14,65	12,11	10,66	10,45	13,27	11,68	11,31	11,84
OstKno STABW verbr.	11,93	14,36	13,71	21,02	8,09	8,58	10,78	8,55	13,03	9,10	7,69
OstKno Veränderung [%]	0,00	-12,49	0,30	-19,74	-6,26	7,49	7,90	17,45	3,24	-4,45	12,47
FragKno MW unv.	20,89	18,00	20,94	19,17	17,78	19,33	18,22	18,56	22,50	21,06	20,53
FragKno MW verbr.	20,89	19,06	18,65	12,47	14,83	16,33	15,89	16,17	15,31	14,08	15,27
FragKno STABW unv.	5,45	3,93	6,03	5,84	5,54	4,65	5,09	5,01	7,93	6,33	7,89
FragKno STABW verbr.	5,45	5,74	8,65	7,88	6,94	4,42	4,36	4,68	7,76	4,63	4,03
Veränderung [%]	0,00	5,88	-10,97	-34,96	-16,56	-15,52	-12,80	-12,87	-31,94	-33,14	-25,61

Tabelle 50: Histomorphometrische Parameter jedes Individuums über alle Temperaturstufen, für welche sich unter Einbeziehung des jeweiligen Schrumpfungskoeffizienten im periostalen Bereich der Tibiakompakta ein an die unverbrannte Probe genäherter Wert ergab;

Probe	Schrumpfungskoeffizient	Temperatur	Verrannte Probe	Verbrannte Probe nach Korrektur	Unverbrannte Referenzprobe (RT)	Individualalter	Parameter
WF17	-0,08	400	20,00	-1,56	18,33	63	SekOst
WF18	0,02	400	14,00	0,32	10,00	38	SekOst
WF22	0,00	400	18,00	0,06	17,00	77	SekOst
WF17	-0,01	500	22,33	-0,17	18,33	63	SekOst
WF18	-0,01	500	16,33	-0,21	9,33	38	SekOst
WF17	0,10	700	27,67	2,69	18,00	63	SekOst
WF18	0,10	700	15,33	1,46	8,67	38	SekOst
WF24	0,05	700	10,33	0,48	6,33	21	SekOst
WF27	0,06	700	23,00	1,31	9,67	73	SekOst
WF33	0,08	700	24,67	2,03	16,67	87	SekOst
WF22	0,09	700	20,33	1,87	14,00	77	SekOst
WF17	0,06	800	28,67	1,59	19,33	63	SekOst
WF18	0,04	800	13,67	0,51	12,33	38	SekOst
WF24	0,02	800	8,67	0,16	6,67	21	SekOst
WF27	0,02	800	21,33	0,48	15,00	73	SekOst
WF22	-0,05	800	19,67	-1,05	17,33	77	SekOst
WF18	-0,03	900	12,00	-0,36	12,00	38	SekOst
WF24	0,08	900	10,00	0,77	5,33	21	SekOst
WF27	-0,06	900	19,33	-1,12	12,67	73	SekOst
WF33	0,03	900	22,33	0,72	15,33	87	SekOst
WF22	0,01	900	21,67	0,11	14,33	77	SekOst
WF24	0,11	1000	8,00	0,86	7,67	21	SekOst
WF27	0,09	1000	19,33	1,77	10,67	73	SekOst
WF33	0,13	1000	24,67	3,29	10,33	87	SekOst
WF22	0,11	1000	21,33	2,28	13,33	77	SekOst
WF18	-0,01	500	2,00	-0,03	1,67	38	TypII Ost
WF18	0,10	700	1,67	0,16	1,00	38	TypII Ost
WF18	0,04	800	1,00	0,04	1,67	38	TypII Ost
WF27	0,09	1000	2,67	0,24	1,33	73	TypII Ost
WF18	0,02	400	15,33	0,35	11,33	38	OstInt
WF24	0,05	700	11,00	0,51	6,67	21	OstInt
WF22	-0,05	800	21,67	-1,16	20,33	77	OstInt
WF22	0,01	900	22,67	0,12	17,00	77	OstInt
WF24	0,11	1000	8,00	0,86	8,00	21	OstInt
WF27	0,09	1000	22,00	2,01	12,00	77	OstInt
WF18	0,02	400	32,78	0,76	27,44	38	OPD
WF27	0,09	1000	40,33	3,69	26,00	73	OPD
WF18	0,02	400	1,00	0,02	2,00	38	ResLak
WF27	0,01	400	2,67	0,02	2,33	73	ResLak
WF33	0,01	400	1,00	0,01	0,00	87	ResLak
WF18	-0,01	500	1,33	-0,02	1,67	38	ResLak
WF33	-0,01	500	1,00	-0,01	1,00	87	ResLak
WF18	0,10	700	1,33	0,13	2,00	38	ResLak
WF22	0,09	700	0,67	0,06	1,00	77	ResLak
WF22	-0,05	800	1,33	-0,07	1,00	77	ResLak
WF18	-0,03	900	3,33	-0,10	1,67	38	ResLak
WF33	0,03	900	0,67	0,02	1,33	87	ResLak

Probe	Schrumpfungskoeffizient	Temperatur	Verrannte Probe	Verbrannte Probe nach Korrektur	Unverbrannte Referenzprobe (RT)	Individualalter	Parameter
WF33	0,13	1000	1,67	0,22	2,33	87	ResLak
WF18	0,02	400	55,33	1,28	50,33	38	OstKno

Tabelle 51: Histomorphometrische Parameter jedes Individuums über alle Temperaturstufen, für welche sich unter Einbeziehung des jeweiligen Schrumpfungskoeffizienten im mittigen Bereich der Tibiakompakta ein an die unverbrannte Probe genäherter Wert ergab;

Probe	Schrumpfungskoeffizient	Temperatur	Verrannte Probe	Verbrannte Probe nach Korrektur	Unverbrannte Referenzprobe (RT)	Individualalter	Parameter
WF17	0,10	700	28,33	2,76	16,67	63	SekOst
WF24	0,06	700	12,00	0,68	11,33	21	SekOst
WF24	0,02	800	11,67	0,27	7,00	21	SekOst
WF24	-0,06	900	11,33	-0,66	7,00	21	SekOst
WF24	0,09	1000	11,00	1,01	6,67	21	SekOst
WF27	0,13	1000	16,00	2,13	8,33	73	SekOst
WF17	-0,08	400	1,00	-0,08	3,33	63	TypII Ost
WF24	0,00	500	1,00	0,00	0,67	21	TypII Ost
WF17	0,10	700	2,00	0,19	2,33	63	TypII Ost
WF22	0,05	700	1,67	0,08	2,00	77	TypII Ost
WF24	0,06	700	0,67	0,04	0,00	21	TypII Ost
WF24	0,02	800	0,33	0,01	0,67	21	TypII Ost
WF17	0,10	700	30,33	2,95	19,00	63	OstInt
WF24	0,06	700	12,67	0,72	11,33	21	OstInt
WF24	0,02	800	12,00	0,27	7,67	21	OstInt
WF24	-0,06	900	11,33	-0,66	8,33	21	OstInt
WF27	0,13	1000	16,00	2,13	9,33	73	OstInt
WF17	0,00	100	16,33	0,00	16,67	63	OstFr
WF17	0,00	200	14,00	0,00	15,33	63	OstFr
WF17	-0,08	400	7,67	-0,60	16,33	63	OstFr
WF22	0,01	400	6,67	0,06	10,33	77	OstFr
WF17	-0,01	500	11,33	-0,09	14,67	63	OstFr
WF33	0,00	600	7,67	0,00	9,00	87	OstFr
WF17	0,10	700	16,00	1,56	13,33	63	OstFr
WF22	0,05	700	6,33	0,29	8,33	77	OstFr
WF24	0,02	800	9,67	0,22	9,67	21	OstFr
WF24	-0,06	900	6,00	-0,35	9,33	21	OstFr
WF33	0,01	900	6,33	0,03	10,00	87	OstFr
WF27	0,13	1000	12,00	1,60	13,00	73	OstFr
WF17	0,10	700	56,44	5,50	38,67	63	OPD
WF27	0,13	1000	33,33	4,44	25,44	73	OPD
WF22	0,05	700	0,67	0,03	2,00	77	ResLak
WF18	0,04	800	3,00	0,11	1,67	38	ResLak
WF22	0,02	800	2,00	0,04	1,00	77	ResLak
WF33	-0,05	800	1,67	-0,09	3,33	87	ResLak
WF22	0,08	900	3,00	0,23	1,33	77	ResLak
WF17	0,10	700	30,33	2,95	19,00	63	HavKan
WF24	0,06	700	12,67	0,72	11,33	21	HavKan
WF24	0,02	800	12,00	0,27	7,67	21	HavKan
WF24	-0,06	900	11,33	-0,66	8,33	21	HavKan
WF27	0,13	1000	16,00	2,13	9,33	73	HavKan

Tabelle 52: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Test für alle untersuchten histomorphometrischen Parameter im periostalen Bereich der Tibiakompakta über alle Verbrennungsstufen (RT-1000°C); der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	p-Wert	W-Wert (Statistik)	Signifikanz	Temperatur
SekOst	0,0778826300364335	0,988112964323323	N.S.	RT
TypII Ost	3,07E+04	0,906099100690423	***	RT
OstInt	0,0362542185694595	0,986005544128882	*	RT
OstFrag	0,0122248844358611	0,982960622326265	*	RT
OPD	0,000294569651591854	0,971498042932448	***	RT
ResLak	1,38E+02	0,866980716371252	***	RT
Havers	0,0362542185694595	0,986005544128882	*	RT
NonHavers	3,35E+01	0,855207096049137	***	RT
VolkM	2,53E+01	0,852794299056569	***	RT
ResKno	2,84E+00	0,832939608320444	***	RT
GenLam	1,17E-04	0,74666945970447	***	RT
OstKno	2,42E+05	0,918750326737726	***	RT
FragKno	0,0282879045500983	0,985317756305331	*	RT
OstFl	2,61E+08	0,953701005862529	***	RT
OstU	0,00609785325313959	0,980956820502458	**	RT
OstD	0,00609785261867093	0,980956820198759	**	RT
ResLakFl	5,76E+04	0,91006896293466	***	RT
AktFr	7,42E-03	0,769501227730295	***	RT
BFr	9,13E-06	0,678794452921036	***	RT
PctBfr	9,13E-06	0,678794452372853	***	RT
AOC	1,15E+09	0,959748130934887	***	RT
SekOst	0,100805065440849	0,913897563495151	N.S.	100
TypII Ost	0,00969000571933757	0,853695041199795	**	100
OstInt	0,102500945000673	0,914307332072386	N.S.	100
OstFrag	0,0103857777764257	0,855585233840928	*	100
OPD	0,00652158243877821	0,842746398449676	**	100
ResLak	0,00266087537961214	0,816926889321663	**	100
Havers	0,102500945000673	0,914307332072386	N.S.	100
NonHavers	0,0329497610123007	0,885979670317695	*	100
VolkM	0,00178892516254613	0,805004670610095	**	100
ResKno	0,0040983371347147	0,829551964020986	**	100
GenLam	1,08E+09	0,620078281589705	***	100
OstKno	0,00583347523218394	0,839614521587164	**	100
FragKno	0,13185397142694	0,92048483458637	N.S.	100
OstFl	0,245325805922867	0,935805284550835	N.S.	100
OstU	0,664522496449751	0,963206826836061	N.S.	100
OstD	0,664522498470971	0,963206826937987	N.S.	100
ResLakFl	0,00212279668945899	0,810180976526991	**	100
AktFr	0,2427968726629	0,935546224915043	N.S.	100
BFr	0,00024426064326367	0,740268296469617	***	100
PctBfr	0,000244260605399579	0,740268291089983	***	100
AOC	0,285419326726047	0,939614923931291	N.S.	100
SekOst	0,230481707004095	0,9342476150296	N.S.	200
TypII Ost	0,00272508210841542	0,817633068123799	**	200
OstInt	0,210528647076547	0,931998319798864	N.S.	200
OstFrag	0,00977904014367186	0,853944812383778	**	200

Parameter	p-Wert	W-Wert (Statistik)	Signifikanz	Temperatur
OPD	0,0360470151146079	0,888268160312605	*	200
ResLak	0,0691640034148046	0,904608473722639	N.S.	200
Havers	0,210528647076547	0,931998319798864	N.S.	200
NonHavers	0,0256800683486321	0,879577201273488	*	200
VolkM	0,000159560397516294	0,725280893520122	***	200
ResKno	0,00153719299479475	0,800368245742568	**	200
GenLam	3,94E+08	0,575947520841256	***	200
OstKno	0,0232490087455007	0,8769999478517	*	200
FragKno	0,233997809777775	0,934624867054449	N.S.	200
OstFl	0,644692683193787	0,962204342587326	N.S.	200
OstU	0,85268754896855	0,973050462664619	N.S.	200
OstD	0,852687519635272	0,973050460950146	N.S.	200
ResLakFl	0,10190930776474	0,914165163158017	N.S.	200
AktFr	0,00282537557165046	0,818701436569426	**	200
BFr	0,000311254518534491	0,748612532345363	***	200
PctBfr	0,000311254468341196	0,748612526838073	***	200
AOC	0,622998693372064	0,961099641505504	N.S.	200
SekOst	0,204318978306243	0,931256924359894	N.S.	300
TypII Ost	0,00124051781980821	0,793733253693679	**	300
OstInt	0,178638232145716	0,927941712870061	N.S.	300
OstFrag	0,173240027936072	0,927186397929115	N.S.	300
OPD	0,0432896963151865	0,892902903146961	*	300
ResLak	0,0228423977211168	0,876541299719572	*	300
Havers	0,178638232145716	0,927941712870061	N.S.	300
NonHavers	0,000347331054251008	0,752344245469618	***	300
ResKno	0,0420488629008937	0,892169227820195	*	300
GenLam	0,00175801864056258	0,804474225531287	**	300
OstKno	0,00365913259218934	0,82627259611766	**	300
FragKno	0,149993178010856	0,923646289817491	N.S.	300
OstFl	0,0908487128766608	0,911340886671036	N.S.	300
OstU	0,591762056386979	0,959487365732403	N.S.	300
OstD	0,591762041191366	0,959487364940419	N.S.	300
ResLakFl	0,00260855029938364	0,816337835964847	**	300
AktFr	0,167181121110651	0,926310811801817	N.S.	300
BFr	0,0174424599345794	0,869475509238554	*	300
PctBfr	0,0174424559899806	0,869475503269779	*	300
AOC	0,188016257919954	0,929202690030635	N.S.	300
SekOst	0,876912038710721	0,974512660265021	N.S.	400
TypII Ost	0,025306156393615	0,879197944727114	*	400
OstInt	0,332374511894316	0,943509640054616	N.S.	400
OstFrag	0,638143492456402	0,96187187697248	N.S.	400
OPD	0,95914155116738	0,980935007988284	N.S.	400
ResLak	0,014317433222486	0,864235468485945	*	400
Havers	0,332374511894316	0,943509640054616	N.S.	400
NonHavers	0,0387879571976394	0,890127883960851	*	400
VolkM	0,000327101999121128	0,750305737689301	***	400
ResKno	0,00300659042525382	0,820533173301364	**	400
GenLam	0,00721185999595501	0,845553621153678	**	400
OstKno	0,488344145647304	0,953837875592682	N.S.	400

Parameter	p-Wert	W-Wert (Statistik)	Signifikanz	Temperatur
FragKno	0,593998952970043	0,959603861845997	N.S.	400
OstFl	0,0636480090536712	0,902546485012013	N.S.	400
OstU	0,261392939445231	0,937395753884577	N.S.	400
OstD	0,26139296695666	0,937395756530091	N.S.	400
ResLakFl	0,0101046416090366	0,854838128088949	*	400
AktFr	0,00106127820385944	0,788845138740825	**	400
BFr	0,000418303379357262	0,758609282692395	***	400
PctBfr	0,000418303352978192	0,758609280580531	***	400
AOC	0,965884817918712	0,981706410362371	N.S.	400
SekOst	0,721296970512894	0,966065008409948	N.S.	500
TypII Ost	0,000568877352149496	0,768801366790459	***	500
OstInt	0,505859436561005	0,954839503077601	N.S.	500
OstFrag	0,0728666689908392	0,905899638510269	N.S.	500
OPD	0,184479814151911	0,928734483915806	N.S.	500
ResLak	0,0228423977211168	0,876541299719572	*	500
Havers	0,505859436561005	0,954839503077601	N.S.	500
NonHavers	0,00153213875551546	0,800267047164883	**	500
VolkM	0,00016503839437128	0,726484441681042	***	500
ResKno	0,0931268147676438	0,91195019676696	N.S.	500
GenLam	0,0035755720252352	0,825601349349308	**	500
OstKno	0,178811849423218	0,927965635207466	N.S.	500
FragKno	0,162649674762918	0,925635433496288	N.S.	500
OstFl	0,0847019780991728	0,909615689705857	N.S.	500
OstU	0,237660068955383	0,935012205270911	N.S.	500
OstD	0,237660078181052	0,935012206239625	N.S.	500
ResLakFl	0,234638477997855	0,934693034097999	N.S.	500
AktFr	0,00184289218222971	0,805907899754328	**	500
BFr	4,84E+09	0,680964227654618	***	500
PctBfr	4,84E+09	0,680964228432407	***	500
AOC	1,04E+07	0,391240669379219	***	500
SekOst	0,946247882933543	0,979642494718202	N.S.	600
TypII Ost	0,00557855977572896	0,838353337428866	**	600
OstInt	0,637647403199001	0,961846659923243	N.S.	600
OstFrag	0,455451045237512	0,951891140345021	N.S.	600
OPD	0,472479696389397	0,952910401330253	N.S.	600
ResLak	0,0130907002194828	0,861838317117602	*	600
Havers	0,637647403199001	0,961846659923243	N.S.	600
NonHavers	0,000901880655060324	0,783693389315554	***	600
VolkM	0,000734537592900386	0,777116851965446	***	600
ResKno	0,0290762505201293	0,882777415386317	*	600
GenLam	0,53065285959438	0,956221793448249	N.S.	600
OstKno	0,00754132881262596	0,846794437349156	**	600
FragKno	0,726162574753165	0,966310779968734	N.S.	600
OstFl	0,120225585590382	0,918221028760173	N.S.	600
OstU	0,483849013052876	0,953577122345017	N.S.	600
OstD	0,483848986570132	0,953577120804159	N.S.	600
ResLakFl	0,0197044177880047	0,872682857892211	*	600
AktFr	0,000189100165838643	0,73130988796471	***	600
BFr	2,47E+09	0,654417644530313	***	600

Parameter	p-Wert	W-Wert (Statistik)	Signifikanz	Temperatur
PctBfr	2,47E+09	0,654417643101065	***	600
AOC	0,386491883041658	0,947454351522342	N.S.	600
SekOst	0,75116102171849	0,967580542298967	N.S.	700
TypII Ost	0,0357521900949264	0,888059364608157	*	700
OstInt	0,769123017259091	0,968503544781503	N.S.	700
OstFrag	0,167801973552603	0,926401946108924	N.S.	700
OPD	0,412373529398919	0,94918488521089	N.S.	700
ResLak	0,00222855976087814	0,811641198939523	**	700
Havers	0,769123017259091	0,968503544781503	N.S.	700
NonHavers	0,143089406971224	0,922490220243958	N.S.	700
VolkM	0,00371905266396565	0,82674396920497	**	700
ResKno	0,0790998926984461	0,907927979079072	N.S.	700
GenLam	0,000203978695522277	0,733976508969221	***	700
OstKno	0,00416850482903405	0,830041033525077	**	700
FragKno	0,776545737623965	0,968888540479186	N.S.	700
OstFl	0,000537734829546317	0,766950582106677	***	700
OstU	0,00446129195611912	0,831991338655535	**	700
OstD	0,0044612917025531	0,831991337026077	**	700
ResLakFl	0,151428341493723	0,923879995925645	N.S.	700
AktFr	0,000801425517727752	0,779920353461366	***	700
BFr	1,29E+08	0,62762388241131	***	700
PctBfr	1,29E+09	0,62762388163045	***	700
AOC	0,0583151711008929	0,900369381665794	N.S.	700
SekOst	0,766800972975145	0,968383574786577	N.S.	800
TypII Ost	0,000175026641070416	0,728573129718727	***	800
OstInt	0,588494005104565	0,959316843713262	N.S.	800
OstFrag	0,147036411895248	0,923157752599627	N.S.	800
OPD	0,560982728983059	0,957864453051094	N.S.	800
ResLak	0,0138198390713676	0,863290345264079	*	800
Havers	0,588494005104565	0,959316843713262	N.S.	800
NonHavers	0,203596011389902	0,931169213443512	N.S.	800
VolkM	9,70E+07	0,615581768511998	***	800
ResKno	0,0288147695744415	0,882545339907756	*	800
GenLam	0,387450552383802	0,94752005063709	N.S.	800
OstKno	0,22212884457072	0,933329287837468	N.S.	800
FragKno	0,369657573686327	0,946278804376686	N.S.	800
OstFl	0,130045286598089	0,92014616729043	N.S.	800
OstU	0,423894468727144	0,949928396460988	N.S.	800
OstD	0,423894476140774	0,949928396934504	N.S.	800
ResLakFl	0,0604963742080686	0,901283784310364	N.S.	800
AktFr	0,0209987856585789	0,874347813723625	*	800
BFr	0,000209475571756678	0,734909587633849	***	800
PctBfr	0,000209475596347675	0,734909591749467	***	800
AOC	0,0488481271454645	0,895940797301542	*	800
SekOst	0,140311439991839	0,922009357409704	N.S.	900
TypII Ost	0,00105928643292109	0,788785989850498	**	900
OstInt	0,307442865543474	0,941506538103001	N.S.	900
OstFrag	0,246604959247002	0,93593537707427	N.S.	900
OPD	0,158773553612274	0,92504291692391	N.S.	900

Parameter	p-Wert	W-Wert (Statistik)	Signifikanz	Temperatur
ResLak	0,0589108192112586	0,900622558131629	N.S.	900
Havers	0,307442865543474	0,941506538103001	N.S.	900
NonHavers	0,12039887224473	0,918256348827998	N.S.	900
VolkM	0,000147311221744912	0,722422270789941	***	900
ResKno	0,0239856616476209	0,877809761385532	*	900
GenLam	0,181166817631284	0,928287912196574	N.S.	900
OstKno	0,349654537535779	0,944823748520339	N.S.	900
FragKno	0,291398411530177	0,940140950501627	N.S.	900
OstFl	0,0339497498821316	0,88674232828714	*	900
OstU	0,185483142900288	0,928868195098878	N.S.	900
OstD	0,185483146454727	0,928868195571329	N.S.	900
ResLakFl	0,0778154639266661	0,907523769512007	N.S.	900
AktFr	0,000528880403905749	0,766403446276431	***	900
BFr	2,34E+07	0,65217259825635	***	900
PctBfr	2,34E+09	0,652172600632077	***	900
AOC	1,69E+09	0,638830825368847	***	900
SekOst	0,43047665405556	0,961908057985757	N.S.	1000
TypIIost	0,00210247726280198	0,858644479528318	**	1000
OstInt	0,397927915561478	0,960322894521417	N.S.	1000
OstFrag	0,0522583427938178	0,922778979599424	N.S.	1000
OPD	0,840656358367254	0,978502316399699	N.S.	1000
ResLak	0,0443299626007173	0,919737389520587	*	1000
Havers	0,397927915561478	0,960322894521417	N.S.	1000
NonHavers	0,00850539508121611	0,887937281745696	**	1000
VolkM	6,28E+05	0,437671050004713	***	1000
ResKno	0,197978382459239	0,947081643683048	N.S.	1000
GenLam	0,000627802666667219	0,831203775270803	***	1000
OstKno	0,0108379034818486	0,892777032375748	*	1000
FragKno	0,390173326055606	0,959930778199183	N.S.	1000
OstFl	0,110433194327594	0,936444313994436	N.S.	1000
OstU	0,259931909056929	0,952126337112227	N.S.	1000
OstD	0,259931898179636	0,952126336328733	N.S.	1000
ResLakFl	0,258095180400229	0,951993611129682	N.S.	1000
AktFr	0,000119814218147294	0,79004512383249	***	1000
BFr	2,17E+09	0,742822606413102	***	1000
PctBfr	2,17E+09	0,742822607901845	***	1000
AOC	1,31E+09	0,727878040825645	***	1000

Tabelle 53: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Test für alle untersuchten histomorphometrischen Parameter im mittigen Bereich der Tibiakompakta über alle Verbrennungsstufen (RT-1000°C); der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	p-Wert	w-Wert (Statistik)	Signifikanz	Temperatur
SekOst	8,88E+09	0,965313975645654	***	RT
TypIIost	7,74E+03	0,890093708242246	***	RT
OstInt	2,43E+09	0,960258076587334	***	RT
OstFrag	1,55E+08	0,94835397022609	***	RT
OPD	1,28E+07	0,936093210034998	***	RT
ResLak	6,95E+02	0,889301038261008	***	RT
Havers	2,43E+09	0,960258076587334	***	RT
NonHavers	2,80E-02	0,770070713647986	***	RT

Parameter	p-Wert	w-Wert (Statistik)	Signifikanz	Temperatur
VolkM	2,76E-03	0,740584750694887	***	RT
ResKno	5,72E+02	0,869962250849701	***	RT
GenLam	3,00E+05	0,91473120510864	***	RT
OstKno	0,0171931883068717	0,982954835057841	*	RT
FragKno	0,0229056031167141	0,983810296109747	*	RT
OstFl	3,93E+09	0,962165037011014	***	RT
OstU	0,103421292049223	0,988239381337311	N.S.	RT
OstD	0,103421287048889	0,98823938119509	N.S.	RT
ResLakFl	7,12E+06	0,933013326179871	***	RT
AktFr	6,30E-02	0,77977814852495	***	RT
BFr	5,01E-05	0,683136582342089	***	RT
PctBfr	5,01E-05	0,68313658242492	***	RT
AOC	4,57E-03	0,747219522345084	***	RT
SekOst	0,199096688518267	0,927692538827159	N.S.	100
TypIIost	0,0216692527042962	0,869621248232607	*	100
OstInt	0,145026815275542	0,919535493560759	N.S.	100
OstFrag	0,123615147442173	0,915435786482844	N.S.	100
OPD	0,303454011953693	0,938731722751475	N.S.	100
ResLak	0,0413403786864479	0,886989783753688	*	100
Havers	0,145026815275542	0,919535493560759	N.S.	100
NonHavers	0,000319783098815654	0,737722964425089	***	100
VolkM	0,000500551934752914	0,753539992926323	***	100
ResKno	0,01444781717721	0,858411855787252	*	100
GenLam	0,00315486377267904	0,813787433185707	**	100
OstKno	0,248547780541633	0,933460802994964	N.S.	100
FragKno	0,797618853844268	0,968829739102112	N.S.	100
OstFl	0,46144978459095	0,950310488987887	N.S.	100
OstU	0,401868582215169	0,946382130552078	N.S.	100
OstD	0,401868603976275	0,946382132064715	N.S.	100
ResLakFl	0,167061348304373	0,923169597718365	N.S.	100
AktFr	0,0226958230844719	0,870885168257736	*	100
BFr	0,000275030964718138	0,732293761375746	***	100
PctBfr	0,000275030952701187	0,732293759794324	***	100
AOC	0,0167865617147454	0,86259100290222	*	100
SekOst	0,912613302615361	0,97603112573306	N.S.	200
TypIIost	0,0148943218232373	0,859262594664866	*	200
OstInt	0,656177020517552	0,961307544458787	N.S.	200
OstFrag	0,206476033299811	0,928634276310278	N.S.	200
OPD	0,595884855365181	0,958088946682578	N.S.	200
ResLak	0,123023723607577	0,915312703080855	N.S.	200
Havers	0,656177020517552	0,961307544458787	N.S.	200
NonHavers	0,000500551934752914	0,753539992926323	***	200
VolkM	1,33E+09	0,610926791204097	***	200
ResKno	0,014721855471267	0,858937229742932	*	200
GenLam	0,040701176712363	0,886577175522296	*	200
OstKno	0,121883692904601	0,915073761412325	N.S.	200
FragKno	0,267074647334412	0,93534820561525	N.S.	200
OstFl	0,566078184695932	0,956454018985023	N.S.	200
OstU	0,812639155664942	0,969670353403188	N.S.	200

Parameter	p-Wert	w-Wert (Statistik)	Signifikanz	Temperatur
OstD	0,812639161829885	0,96967035375171	N.S.	200
ResLakFl	0,0597313437683201	0,896655993199863	N.S.	200
AktFr	0,0102195138755538	0,848625160599981	*	200
BFr	0,000375912056077724	0,743486174712592	***	200
PctBfr	0,000375912032483043	0,743486172487738	***	200
AOC	0,190060421398136	0,926492587551399	N.S.	200
SekOst	0,201518340635251	0,921284757823317	N.S.	300
TypII Ost	7,78E+09	0,650926387813305	***	300
OstInt	0,134184890303186	0,909742649999156	N.S.	300
OstFrag	0,600080333893937	0,954630999445186	N.S.	300
OPD	0,567484569468132	0,952672593774882	N.S.	300
ResLak	0,010483042765249	0,834279150097564	*	300
Havers	0,164117715032034	0,915448230803846	N.S.	300
NonHavers	0,000280056172423444	0,704833877016184	***	300
ResKno	0,00469261014560755	0,808195020053754	**	300
GenLam	0,000419925780077032	0,720931187609013	***	300
OstKno	0,0214468438079016	0,856435578356961	*	300
FragKno	0,236899897828529	0,925915010098103	N.S.	300
OstFl	0,242297948995926	0,926563210166104	N.S.	300
OstU	0,569079620007232	0,952769595837832	N.S.	300
OstD	0,569079644234431	0,9527695973102	N.S.	300
ResLakFl	0,193103436407151	0,916088903019261	N.S.	300
AktFr	0,0141914551268356	0,843770159501811	*	300
BFr	0,00521082450332014	0,811671662942835	**	300
PctBfr	0,00521082543050277	0,811671668828257	**	300
AOC	0,239502343791537	0,92622921962304	N.S.	300
SekOst	0,0644254258283877	0,902848023349087	N.S.	400
TypII Ost	0,000442485637960973	0,760487877169026	***	400
OstInt	0,0284490626305485	0,882217022725286	*	400
OstFrag	0,49897021670603	0,954448186265316	N.S.	400
OPD	0,297543581380394	0,940671662497042	N.S.	400
ResLak	0,0688163045896648	0,90448358962756	N.S.	400
Havers	0,0284490626305485	0,882217022725286	*	400
NonHavers	3,21E+08	0,566498640040193	***	400
VolkM	1,06E+05	0,252691755543225	***	400
ResKno	0,0211734544388427	0,874564169721338	*	400
GenLam	0,275040564724368	0,938677887055645	N.S.	400
OstKno	0,377023018726123	0,946798337750167	N.S.	400
FragKno	0,0973039457260588	0,913029004866011	N.S.	400
OstFl	0,704520668253654	0,96521964755319	N.S.	400
OstU	0,000217302252239225	0,736194046455711	***	400
OstD	0,000921690787844677	0,784384388330855	***	400
ResLakFl	0,00999816292887641	0,854549395176802	**	400
AktFr	7,31E+09	0,696713125220653	***	400
BFr	3,15E+09	0,664198260733197	***	400
PctBfr	3,15E+09	0,66419826012104	***	400
AOC	0,100330161660072	0,913781560680508	N.S.	400
SekOst	0,433438274991886	0,950532927685089	N.S.	500
TypII Ost	7,79E+09	0,69907743997311	***	500

Parameter	p-Wert	w-Wert (Statistik)	Signifikanz	Temperatur
OstInt	0,72093545394375	0,966046760518981	N.S.	500
OstFrag	0,520341532713042	0,955651632597387	N.S.	500
OPD	0,177930112222477	0,927843908082578	N.S.	500
ResLak	0,0281743850061491	0,881967499623337	*	500
Havers	0,72093545394375	0,966046760518981	N.S.	500
NonHavers	0,00010255039911705	0,709269374757799	***	500
VolkM	0,000266646767309471	0,743302632640405	***	500
ResKno	0,540341199992108	0,956751836456919	N.S.	500
GenLam	0,673008664386463	0,963634432113825	N.S.	500
OstKno	0,131272983778314	0,920376555954239	N.S.	500
FragKno	0,628471744893787	0,961379314020693	N.S.	500
OstFl	0,482864372927052	0,953519794259489	N.S.	500
OstU	0,000228538050505265	0,737954244563206	***	500
OstD	0,000844938911994765	0,781613296676535	***	500
ResLakFl	0,0357961134774306	0,888090585230867	*	500
AktFr	9,91E+09	0,7080245008129	***	500
BFr	1,77E+09	0,640821477651136	***	500
PctBfr	1,77E+09	0,640821476365056	***	500
AOC	0,00162988467179715	0,802163742798444	**	500
SekOst	0,227789732301595	0,933955121141804	N.S.	600
TypIIost	0,00172864810502333	0,803960851266003	**	600
OstInt	0,248970739780119	0,936174343977607	N.S.	600
OstFrag	0,364844367700543	0,945934725287117	N.S.	600
OPD	0,353583798393469	0,945114915624856	N.S.	600
ResLak	0,0353047893946137	0,887739046932484	*	600
Havers	0,248970739780119	0,936174343977607	N.S.	600
NonHavers	5,74E+09	0,68755023026821	***	600
VolkM	0,000235355816614488	0,738977898359065	***	600
ResKno	0,0854971652158405	0,909845949058751	N.S.	600
GenLam	0,00989844269674039	0,854276016810889	**	600
OstKno	0,0478957515735336	0,895446688299455	*	600
FragKno	0,226679890397986	0,933833586162156	N.S.	600
OstFl	0,2120514558734	0,932176952234973	N.S.	600
OstU	0,000182353332545929	0,730026007744593	***	600
OstD	0,00174683076218934	0,804279755364071	**	600
ResLakFl	0,0764967542949374	0,907101586394034	N.S.	600
AktFr	0,00181363871905135	0,805421847178131	**	600
BFr	0,000126689046491005	0,716983689557259	***	600
PctBfr	0,00012668905137031	0,716983690953065	***	600
AOC	0,210792383695337	0,932029345097004	N.S.	600
SekOst	0,0153769177915348	0,866137060377008	*	700
TypIIost	0,033644391794207	0,886511965576121	*	700
OstInt	0,0299901992416619	0,883571707059214	*	700
OstFrag	0,480361674189971	0,953373734031483	N.S.	700
OPD	0,0268494883388684	0,880726900215547	*	700
ResLak	0,0104556347166887	0,855767550840841	*	700
Havers	0,0299901992416619	0,883571707059214	*	700
NonHavers	0,000994823492813199	0,786804843479206	***	700
VolkM	1,64E+09	0,637822358001081	***	700

Parameter	p-Wert	w-Wert (Statistik)	Signifikanz	Temperatur
ResKno	0,0666458620809582	0,903689014195651	N.S.	700
GenLam	0,151360083695953	0,92386893027465	N.S.	700
OstKno	0,670878066771241	0,963527132042848	N.S.	700
FragKno	0,607128405862701	0,960284219217374	N.S.	700
OstFl	0,601702595402946	0,960003741895403	N.S.	700
OstU	0,00019887737858997	0,733086273052226	***	700
OstD	0,00105162697019109	0,788557419673377	**	700
ResLakFl	0,0578913169679522	0,900187588963141	N.S.	700
AktFr	0,00124015972779777	0,793724257010492	**	700
BFr	0,000135182120721474	0,719330283107221	***	700
PctBfr	0,00013518212753399	0,719330284925824	***	700
AOC	0,525856544757894	0,955957382671565	N.S.	700
SekOst	0,0937693815748104	0,904174773644814	N.S.	800
TypIIost	0,00362343361501633	0,809250102768799	**	800
OstInt	0,0402865490263697	0,881044008499571	*	800
OstFrag	0,575013437531081	0,955129806250341	N.S.	800
OPD	0,0301006367920404	0,872873272985152	*	800
ResLak	0,201296477191901	0,924780558472831	N.S.	800
Havers	0,0402865490263697	0,881044008499571	*	800
NonHavers	0,000658779476806065	0,751308363429415	***	800
VolkM	0,000121009697189121	0,686744067767133	***	800
ResKno	0,0701513148035604	0,896304907140339	N.S.	800
GenLam	0,0419860624461804	0,882193153563202	*	800
OstKno	0,658879921809753	0,959839581401018	N.S.	800
FragKno	0,00714953371257584	0,830587695771519	**	800
OstFl	0,816627516216111	0,968669835249009	N.S.	800
OstU	0,000969636761133352	0,765032341371084	***	800
OstD	0,0213805801365722	0,863127091853857	*	800
ResLakFl	0,826804111865735	0,969279380512099	N.S.	800
AktFr	0,00100185306802585	0,766176536469566	**	800
BFr	0,000481605231999303	0,73992049102662	***	800
PctBfr	0,000481605242319122	0,73992049181383	***	800
AOC	0,000133800323860422	0,690780732578024	***	800
SekOst	0,789046426876732	0,962320206986835	N.S.	900
TypIIost	0,00275687205141265	0,765879182063165	**	900
OstInt	0,777612692411813	0,961563304424758	N.S.	900
OstFrag	0,403797608947597	0,935709931155223	N.S.	900
OPD	0,671569952028881	0,954744989723043	N.S.	900
ResLak	0,140924360322443	0,901658540978146	N.S.	900
Havers	0,777612692411813	0,961563304424758	N.S.	900
NonHavers	0,00801870087001817	0,805907691379194	**	900
VolkM	5,57E+09	0,591831249208932	***	900
ResKno	0,0447558918888486	0,864921340862601	*	900
GenLam	0,852408329158663	0,966727814843393	N.S.	900
OstKno	0,844156744872744	0,966125789421796	N.S.	900
FragKno	0,959283972348864	0,976672573867237	N.S.	900
OstFl	0,406062685314956	0,935901449565384	N.S.	900
OstU	0,000693270642908613	0,709592308306272	***	900
OstD	0,0071605954267826	0,801798508628061	**	900

Parameter	p-Wert	w-Wert (Statistik)	Signifikanz	Temperatur
ResLakFl	0,264954497329501	0,921763237005326	N.S.	900
AktFr	0,00496515457789368	0,788292139980204	**	900
BFr	0,000537311025133519	0,698599207243222	***	900
PctBfr	0,000537311029873298	0,698599207627119	***	900
AOC	0,00528468314954237	0,790616153810084	**	900
SekOst	0,294945234276567	0,917064664995703	N.S.	1000
TypII Ost	1,69E+08	0,50384674182482	***	1000
OstInt	0,125471283043635	0,886434530440035	N.S.	1000
OstFrag	0,933934414608032	0,975234063865413	N.S.	1000
OPD	0,194031348524519	0,90172739778134	N.S.	1000
ResLak	0,0897848725346028	0,874975446456145	N.S.	1000
Havers	0,125471283043635	0,886434530440035	N.S.	1000
NonHavers	0,0031188347006204	0,763485284413325	**	1000
VolkM	2,24E+06	0,344991205115848	***	1000
ResKno	0,0526611342169451	0,857010769919723	N.S.	1000
GenLam	0,148473901934811	0,89228033453017	N.S.	1000
OstKno	0,226257296606133	0,907260857028658	N.S.	1000
FragKno	0,896959837413251	0,971053501315656	N.S.	1000
OstFl	0,151746969944371	0,893042491508961	N.S.	1000
OstU	0,214688750682626	0,905360301331217	N.S.	1000
OstD	0,214688752049385	0,905360301561064	N.S.	1000
ResLakFl	0,257069287605675	0,911935951670732	N.S.	1000
AktFr	0,00664422562318136	0,788519746977497	**	1000
BFr	0,000188948387697592	0,669227640294052	***	1000
PctBfr	0,000188948389604015	0,669227640638303	***	1000
AOC	0,0092809874250823	0,799554287569353	**	1000

Tabelle 54: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter im mittleren Bereich der Kompakta zwischen den Positionen der anterioren Tibiadiaphyse; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Position1	Position2	p-Wert	Statistik	Signifikanz
GenLam	1	11	0,0204705904870619	47	*
OstKno	1	11	0,0205484689484122	151	*
OstKno	2	3	0,0216326744623461	235	*
FragKno	2	3	0,0422927370430568	97,5	*
ResLakFl	2	4	0,010313736400035	243	*
GenLam	2	8	0,0336334223523347	94,5	*
OstKno	2	8	0,0277655837930602	232	*
OstKno	2	9	0,0191027602170728	236,5	*
GenLam	2	11	0,00488200817953774	36	**
OstKno	2	11	0,00129603228260375	171	**
ResLakFl	3	4	0,00742057876025688	246,5	**
ResLakFl	3	6	0,032821839993518	229,5	*
ResLakFl	3	10	0,0398380593464878	227	*
OstKno	3	11	0,0307854610917563	147,5	*
OstKno	4	11	0,038395395133888	145,5	*
OstKno	5	11	0,0125139865932197	155	*

Parameter	Position1	Position2	p-Wert	Statistik	Signifikanz
OstKno	6	11	0,0275423795911637	148,5	*
OstKno	7	11	0,0160964250154743	153	*

Tabelle 55: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter im periostalen Bereich der Kompakta zwischen den Positionen der anterioren Tibiadiaphyse; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Position1	Position2	p-Wert	Statistik	Signifikanz
NonHavers	1	4	0,0447765356704593	100	*
ResLakFl	1	7	0,0191528091344928	89	*
ResLakFl	1	8	0,0155752986195632	87	*
ResLakFl	1	10	0,0324929362875228	96,5	*
SekOst	1	11	0,0491635056176859	224,5	*
OstInt	1	11	0,0286904373847479	231,5	*
ResLak	1	11	0,0250564123040571	93	*
Havers	1	11	0,0286904373847479	231,5	*
ResKno	1	11	0,0174013181204849	87,5	*
OstKno	1	11	0,0366755095009385	228,5	*
ResLakFl	1	11	0,00427887650400124	73	**
SekOst	2	11	0,0336793151634644	229,5	*
OstInt	2	11	0,02621482245683	232,5	*
Havers	2	11	0,02621482245683	232,5	*
GenLam	2	11	0,0207448604827228	88,5	*
OstKno	2	11	0,00249603095314427	258	**
GenLam	3	6	0,0243683434489089	90,5	*
SekOst	3	11	0,000680902489417446	269,5	***
OstInt	3	11	0,000599596513378805	270,5	***
OPD	3	11	0,00896953477461381	245	**
Havers	3	11	0,000599596513378805	270,5	***
GenLam	3	11	0,000983183366896527	57,5	***
OstKno	3	11	5,43E+09	290	***
AOC	3	11	0,00896953477461381	245	**
OstFl	4	8	0,0141943453844311	84	*
OstU	4	8	0,0141943453844311	84	*
OstD	4	8	0,0141943453844311	84	*
OstKno	4	11	0,0478226244506915	225	*
ResLakFl	5	7	0,0389106823716296	97,5	*
ResLakFl	5	8	0,0297902027789876	94,5	*
OstKno	5	11	0,028927762403923	231,5	*
ResLakFl	5	11	0,0229594315623554	91	*
OstKno	6	11	0,010807062761687	243	*
TypIIost	7	11	0,012831423932252	238,5	*
OstKno	7	11	0,00675345106852894	248	**
FragKno	7	11	0,0407730527393544	97	*
OstFl	8	9	0,0397079976062559	227,5	*
OstU	8	9	0,0397079976062559	227,5	*
OstD	8	9	0,0397079976062559	227,5	*
TypIIost	8	11	0,0288402837550709	229	*
OstKno	8	11	0,0113076511640541	242,5	*
SekOst	9	11	0,0360714584511143	228,5	*

Parameter	Position1	Position2	p-Wert	Statistik	Signifikanz
TypIIost	9	11	0,0192200584821333	234	*
OstInt	9	11	0,0212113486655289	235	*
OPD	9	11	0,0440661352841277	226	*
Havers	9	11	0,0212113486655289	235	*
OstKno	9	11	0,049545255279955	224,5	*
AOC	9	11	0,0440661352841277	226	*
TypIIost	10	11	0,00412004868100049	249	**
OstKno	10	11	0,0118232752575132	242	*

Tabelle 56: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter im mittigen Bereich der Tibiakompakta über die Verbrennungstemperaturen mit der unverbrannten Referenzprobe; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Position	Temperatur	p-Wert	Statistik	Signifikanz
TypIIost	2	100	0,0223473776507325	218,5	*
TypIIost	4	300	0,000911497152075038	209,5	***
OstFrag	4	300	0,0358927129880642	181,5	*
FragKno	4	300	0,0148291938074215	190,5	*
TypIIost	5	400	0,0215876807834152	232	*
NonHavers	5	400	0,0290217522546205	223,5	*
VolkM	5	400	0,00128803874565232	245	**
FragKno	6	500	0,049207525341934	224,5	*
SekOst	8	700	0,000405678451800036	50	***
OstInt	8	700	0,00110002598866185	58,5	**
OPD	8	700	0,0101596877286042	80,5	*
Havers	8	700	0,00110002598866185	58,5	**
OstKno	8	700	0,0380981912238981	96	*
OstFl	8	700	0,00155473958185798	262,5	**
OstU	8	700	0,0011172873682346	265,5	**
OstD	8	700	0,0011172873682346	265,5	**
AOC	8	700	0,0455912299043582	98,5	*
SekOst	9	800	0,0380347531802744	83,5	*
FragKno	9	800	0,00361334047710211	228,5	**
OstFl	9	800	0,0091661603603182	220	**
OstU	9	800	0,00491004539107859	226	**
OstD	9	800	0,00491004539107859	226	**
SekOst	10	900	0,0151178903964332	56	*
OstInt	10	900	0,0491452268531639	67,5	*
Havers	10	900	0,0491452268531639	67,5	*
FragKno	10	900	0,00361816489419091	190	**
OstFl	10	900	0,00191701878047535	195	**
OstU	10	900	0,00145824114254833	197	**
OstD	10	900	0,00145824114254833	197	**
SekOst	11	1000	0,00770560306280718	19,5	**
TypIIost	11	1000	0,0137722588428698	95	*
OstInt	11	1000	0,0192986665657563	24,5	*
Havers	11	1000	0,0192986665657563	24,5	*

Tabelle 57: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter im periostalen Bereich der Tibiakompakta über die Verbrennungstemperaturen mit der unverbrannten Referenzprobe; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Position	Temperatur	p-Wert	Statistik	Signifikanz
OstFrag	4	300	0,0203114460314737	235,5	*
OPD	4	300	0,0287935451680451	231,5	*
VolkM	4	300	1.68E+09	279	***
AktFr	4	300	0,0470848321126408	225	*
AOC	4	300	0,0287935451680451	231,5	*
VolkM	5	400	0,0461615549490217	221,5	*
SekOst	8	700	0,000877924420311772	56,5	***
OstInt	8	700	0,00259972142947914	66,5	**
OPD	8	700	0,0189328345595606	87,5	*
Havers	8	700	0,00259972142947914	66,5	**
OstFl	8	700	0,000632714106386079	270,5	***
OstU	8	700	0,000632714106386079	270,5	***
OstD	8	700	0,000632714106386079	270,5	***
AOC	8	700	0,0189328345595606	87,5	*
SekOst	9	800	0,0377757148717662	96	*
VolkM	9	800	0,0376833227399987	222	*
SekOst	10	900	0,00639339026135501	75,5	**
TypII Ost	10	900	0,00309555694274278	252	**
OstInt	10	900	0,0215481596200706	89	*
OPD	10	900	0,0410206580212677	97	*
ResLak	10	900	0,0476321548311097	101	*
Havers	10	900	0,0215481596200706	89	*
FragKno	10	900	0,0391103184975759	227,5	*
OstFl	10	900	0,000242029104319753	278,5	***
OstU	10	900	0,000242029104319753	278,5	***
OstD	10	900	0,000242029104319753	278,5	***
AOC	10	900	0,0410206580212677	97	*
SekOst	11	1000	0,000777680444935401	55,5	***
OstInt	11	1000	0,000972801867341928	57,5	***
OPD	11	1000	0,00855382008450335	78,5	**
Havers	11	1000	0,000972801867341928	57,5	***
VolkM	11	1000	0,000189293898447354	262	***
FragKno	11	1000	0,00371411463818016	254	**
OstFl	11	1000	9,25E+08	286	***
OstU	11	1000	9,25E+08	286	***
OstD	11	1000	9,25E+08	286	***
AOC	11	1000	0,00855382008450335	78,5	**

Tabelle 58: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter im mittigen Bereich der Tibiakompakta zwischen aufeinanderfolgenden Temperaturstufen; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Temperatur1	Temperatur2	p-Wert	Statistik	Signifikanz
TypIIost	200	300	0,0347502472246022	169	*
FragKno	200	300	0,0442980627039658	170	*
TypIIost	400	500	0,00331463777115307	74,5	**
VolkM	400	500	0,00348700489214139	89,5	**
SekOst	600	700	0,0116063815923568	82	*
OstInt	600	700	0,0106447577065301	81	*
Havers	600	700	0,0106447577065301	81	*
OstFl	600	700	0,000349703694530899	275,5	***
OstU	600	700	0,0170781711651175	237	*
OstD	600	700	0,015572731130521	238	*

Tabelle 59: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter im periostalen Bereich der Tibiakompakta zwischen aufeinanderfolgenden Temperaturstufen; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Temperatur1	Temperatur2	p-Wert	Statistik	Signifikanz
OstFrag	200	300	0,00425854660898231	252,5	**
OPD	200	300	0,0324875902484162	230	*
VolkM	200	300	0,000317645307338252	252	***
GenLam	200	300	0,00411019258194285	71	**
AOC	200	300	0,0324875902484162	230	*
VolkM	300	400	0,00183280326380077	90	**
OstKno	300	400	0,023561777867595	90	*
AktFr	300	400	0,0470848321126408	99	*
TypIIost	400	500	0,0171370194921769	90,5	*
TypIIost	500	600	0,032508391479141	224	*
SekOst	600	700	0,00978399467154786	80	**
OstInt	600	700	0,0151485740648584	85	*
OPD	600	700	0,0297920443502894	93	*
Havers	600	700	0,0151485740648584	85	*
OstFl	600	700	0,0068247992394794	248	**
OstU	600	700	0,0068247992394794	248	**
OstD	600	700	0,0068247992394794	248	**
AOC	600	700	0,0297920443502894	93	*
OstKno	700	800	0,0300569519655681	231	*
VolkM	900	1000	0,043886737417213	300,5	*

Tabelle 60: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter im Vergleich des periostalen und mittigen Bereichs der Tibiakompakta der unverbrannten Proben entlang des Schaftes; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Position	p-Wert	Statistik	Signifikanz
OstFl	1	0,164578379207785	118,5	N.S.
OstU	1	0,0963646251812713	109	N.S.
OstD	1	0,0725998371831489	105	N.S.
ResLakFl	1	0,0779337364883177	108	N.S.
AktFr	1	0,886712403055316	157	N.S.
BFR	1	0,318888696705213	130	N.S.
AOC	1	0,333933293979723	193	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik	Signifikanz
SekOst	1	0,204653719475108	202,5	N.S.
TypIIost	1	0,830132240640216	169	N.S.
IntOst	1	0,18835567611114	204	N.S.
OstFrag	1	0,739021119325845	151	N.S.
OPD	1	0,333933293979723	193	N.S.
ResLak	1	0,32558159987965	132	N.S.
HavKan	1	0,18835567611114	204	N.S.
NonHav	1	0,171845578146743	203	N.S.
VolkM	1	0,104068044701338	210	N.S.
ResKno	1	0,266920769948714	127,5	N.S.
GenLam	1	0,153832250570742	207,5	N.S.
OstKno	1	0,800020321549874	153,5	N.S.
FragKno	1	0,280783124661268	127,5	N.S.
OstFl	2	0,0812831435389551	108,5	N.S.
OstU	2	0,0553983797427713	101	N.S.
OstD	2	0,0402659433430202	97	*
ResLakFl	2	0,00148167567721766	62	**
AktFr	2	0,824659726265619	169,5	N.S.
BFR	2	0,334525078772481	131	N.S.
AOC	2	0,668809641603283	176	N.S.
SekOst	2	0,0955914460185431	215	N.S.
TypIIost	2	0,278884882471381	130	N.S.
IntOst	2	0,198644564192685	203	N.S.
OstFrag	2	0,332839230846817	131	N.S.
OPD	2	0,668809641603283	176	N.S.
ResLak	2	0,70135075694307	150	N.S.
HavKan	2	0,198644564192685	203	N.S.
NonHav	2	0,194744762114068	201,5	N.S.
VolkM	2	0,0930681024731366	212,5	N.S.
ResKno	2	0,065136614173067	103,5	N.S.
GenLam	2	0,775499972113309	171,5	N.S.
OstKno	2	0,987364722455856	163	N.S.
FragKno	2	0,36445488722387	191	N.S.
OstFl	3	0,0871925283540594	109,5	N.S.
OstU	3	0,0616613898965377	102,5	N.S.
OstD	3	0,0827910408485351	107	N.S.
ResLakFl	3	0,155598538344911	117	N.S.
AktFr	3	0,154310318568726	207,5	N.S.
BFR	3	0,911815107935961	166	N.S.
AOC	3	0,0224924451017317	234,5	*
SekOst	3	0,00128549038679503	264	**
TypIIost	3	0,452349084537086	185	N.S.
IntOst	3	0,00132354598917309	263,5	**
OstFrag	3	0,987337748065471	161	N.S.
OPD	3	0,0224924451017317	234,5	*
ResLak	3	0,248483247639379	126,5	N.S.
HavKan	3	0,00132354598917309	263,5	**
NonHav	3	0,150591247524542	205,5	N.S.
VolkM	3	0,22346632376242	199	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik	Signifikanz
ResKno	3	0,0909959522662398	108,5	N.S.
GenLam	3	0,557829245032316	143	N.S.
OstKno	3	0,00558445839512984	250	**
FragKno	3	0,0509455201729116	100	N.S.
OstFl	4	0,00939820492437315	83,5	**
OstU	4	0,00677125079665068	76	**
OstD	4	0,00589070925181037	75	**
ResLakFl	4	1	161,5	N.S.
AktFr	4	0,849354865642991	155,5	N.S.
BFR	4	0,183822304410389	119,5	N.S.
AOC	4	0,288665146451538	196	N.S.
SekOst	4	0,127864575864295	210,5	N.S.
TypIIost	4	0,287928953293742	130	N.S.
IntOst	4	0,168021959251297	206	N.S.
OstFrag	4	0,656648414060014	176,5	N.S.
OPD	4	0,288665146451538	196	N.S.
ResLak	4	0,586120304637227	145	N.S.
HavKan	4	0,168021959251297	206	N.S.
NonHav	4	0,00202667564875309	256,5	**
VolkM	4	0,0138123304303027	235	*
ResKno	4	0,735906766598726	151	N.S.
GenLam	4	0,987363092549241	161	N.S.
OstKno	4	0,974740754318454	160,5	N.S.
FragKno	4	0,987358199042251	161	N.S.
OstFl	5	0,811327452620044	154,5	N.S.
OstU	5	0,861608728846981	156	N.S.
OstD	5	0,810226234922272	154	N.S.
ResLakFl	5	0,0411897550340995	99	*
AktFr	5	0,899222109953949	166,5	N.S.
BFR	5	0,899267296828491	166,5	N.S.
AOC	5	0,400699863428611	189	N.S.
SekOst	5	0,567596219908987	180,5	N.S.
TypIIost	5	0,532258672183259	142,5	N.S.
IntOst	5	0,69173294889407	175	N.S.
OstFrag	5	0,679798195694981	175,5	N.S.
OPD	5	0,400699863428611	189	N.S.
ResLak	5	0,34736155057652	133	N.S.
HavKan	5	0,69173294889407	175	N.S.
NonHav	5	0,156284311993754	205	N.S.
VolkM	5	0,187597355990266	201,5	N.S.
ResKno	5	0,102713765779938	111,5	N.S.
GenLam	5	0,886465088497127	167	N.S.
OstKno	5	0,974727725009505	160,5	N.S.
FragKno	5	0,578822031868454	180	N.S.
OstFl	6	0,415779284093251	137	N.S.
OstU	6	0,456826929145519	138	N.S.
OstD	6	0,524227696622871	141,5	N.S.
ResLakFl	6	0,298189704085703	129,5	N.S.
AktFr	6	0,568896032061276	180,5	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik	Signifikanz
BFR	6	0,911798144055481	166	N.S.
AOC	6	0,349401700181744	192	N.S.
SekOst	6	0,341075799099876	192,5	N.S.
TypII Ost	6	0,536082786222656	181	N.S.
IntOst	6	0,348808677722747	192	N.S.
OstFrag	6	0,702659996420439	174,5	N.S.
OPD	6	0,349401700181744	192	N.S.
ResLak	6	0,23059899863164	125	N.S.
HavKan	6	0,348808677722747	192	N.S.
NonHav	6	0,0795475858692615	215,5	N.S.
VolkM	6	0,362577085082774	189,5	N.S.
ResKno	6	0,200338859434353	122	N.S.
GenLam	6	0,391932872283131	189,5	N.S.
OstKno	6	0,428607660516912	187,5	N.S.
FragKno	6	0,714919655549588	150	N.S.
OstFl	7	0,499951023938278	141,5	N.S.
OstU	7	0,302175445587699	129	N.S.
OstD	7	0,420093024856807	136,5	N.S.
ResLakFl	7	0,425306591934946	136,5	N.S.
AktFr	7	0,71583459912199	174	N.S.
BFR	7	0,987377739044405	161	N.S.
AOC	7	0,357847686116111	191,5	N.S.
SekOst	7	0,364985016646028	191	N.S.
TypII Ost	7	0,190746009398712	202	N.S.
IntOst	7	0,260227280970018	198	N.S.
OstFrag	7	0,535209804520304	142	N.S.
OPD	7	0,357847686116111	191,5	N.S.
ResLak	7	0,629226171155311	147	N.S.
HavKan	7	0,260227280970018	198	N.S.
NonHav	7	0,0335839872462931	226	*
VolkM	7	0,10624520721271	210,5	N.S.
ResKno	7	0,455925398880261	138	N.S.
GenLam	7	0,849201205091935	155,5	N.S.
OstKno	7	0,221877958458001	201	N.S.
FragKno	7	0,228059173003942	123,5	N.S.
OstFl	8	0,361876609026821	190	N.S.
OstU	8	0,466057722796075	185,5	N.S.
OstD	8	0,554592841543935	181	N.S.
ResLakFl	8	0,910767900287346	158	N.S.
AktFr	8	0,447481914533292	186,5	N.S.
BFR	8	0,254615767149811	198,5	N.S.
AOC	8	0,505687268621164	183,5	N.S.
SekOst	8	0,633707704299265	177,5	N.S.
TypII Ost	8	0,179725070137308	203,5	N.S.
IntOst	8	0,485300626569525	184,5	N.S.
OstFrag	8	0,726329471231828	173,5	N.S.
OPD	8	0,505687268621164	183,5	N.S.
ResLak	8	0,15815153172534	118	N.S.
HavKan	8	0,485300626569525	184,5	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik	Signifikanz
NonHav	8	0,162589913849622	204,5	N.S.
VolkM	8	0,0468680401490865	220	*
ResKno	8	0,175117143593392	119	N.S.
GenLam	8	0,911690478327221	158	N.S.
OstKno	8	0,0903325233405398	216	N.S.
FragKno	8	0,417836616684472	136	N.S.
OstFl	9	0,0348497923650388	97,5	*
OstU	9	0,0093985002329908	79,5	**
OstD	9	0,00620369735912506	75,5	**
ResLakFl	9	0,157577852982925	117,5	N.S.
AktFr	9	0,350490066915414	192	N.S.
BFR	9	0,739653500444207	151	N.S.
AOC	9	0,0894195202875654	216	N.S.
SekOst	9	0,0335531531447989	229,5	*
TypIIost	9	0,194201152717669	202	N.S.
IntOst	9	0,0527978460540778	223,5	N.S.
OstFrag	9	0,798746567247005	170,5	N.S.
OPD	9	0,0894195202875654	216	N.S.
ResLak	9	0,200308450092525	122	N.S.
HavKan	9	0,0527978460540778	223,5	N.S.
NonHav	9	0,234421983342174	199	N.S.
VolkM	9	0,133037703786079	207	N.S.
ResKno	9	0,115030694024699	112	N.S.
GenLam	9	0,899066720616299	157,5	N.S.
OstKno	9	0,241141772217376	199,5	N.S.
FragKno	9	0,0864049078209302	107,5	N.S.
OstFl	10	0,934317311585998	159	N.S.
OstU	10	1	162,5	N.S.
OstD	10	0,91086729930805	158	N.S.
ResLakFl	10	0,846066678035876	168,5	N.S.
AktFr	10	0,987367980377953	163	N.S.
BFR	10	0,751647714115871	172,5	N.S.
AOC	10	0,668729189780709	176	N.S.
SekOst	10	0,824146499080175	169,5	N.S.
TypIIost	10	0,125368689637112	208	N.S.
IntOst	10	0,485187680009579	184,5	N.S.
OstFrag	10	0,750558178472897	151,5	N.S.
OPD	10	0,668729189780709	176	N.S.
ResLak	10	0,470279579086676	139,5	N.S.
HavKan	10	0,485187680009579	184,5	N.S.
NonHav	10	0,947480054918136	159,5	N.S.
VolkM	10	0,0758650690325644	214	N.S.
ResKno	10	0,421733289401985	136,5	N.S.
GenLam	10	0,727467824375272	173,5	N.S.
OstKno	10	0,350241757930431	192	N.S.
FragKno	10	0,417897032312962	136	N.S.
OstFl	11	0,676533848632607	108,5	N.S.
OstU	11	0,392236533815681	118,5	N.S.
OstD	11	0,482261589474959	115	N.S.

Parameter	Position	p-Wert	Statistik	Signifikanz
ResLakFl	11	0,873156433923396	95	N.S.
AktFr	11	0,892698990156853	95,5	N.S.
BFR	11	0,892725268840593	102,5	N.S.
AOC	11	0,513746909974426	114	N.S.
SekOst	11	0,484334431017905	115	N.S.
TypIIost	11	0,309503526972835	77	N.S.
IntOst	11	0,635508910207192	110	N.S.
OstFrag	11	0,839204818059113	104	N.S.
OPD	11	0,513746909974426	114	N.S.
ResLak	11	0,945037795562617	101	N.S.
HavKan	11	0,635508910207192	110	N.S.
NonHav	11	0,0681986494343731	138,5	N.S.
VolkM	11	0,291610959638864	121	N.S.
ResKno	11	0,68330988485377	89,5	N.S.
GenLam	11	1	98,5	N.S.
OstKno	11	0,604923909886565	111	N.S.
FragKno	11	0,751979096673902	106,5	N.S.

Tabelle 61: Wilcoxon-Rangsummentest zur Untersuchung signifikanter Unterschiede in der Anzahl der Parameter im Vergleich des periostalen und mittigen Bereichs der Tibiakompakta verbrannten Proben über die Temperaturstufe der Verbrennungsgreihe; der p-Wert wird in der Spalte „Signifikanz“ verdeutlicht: *** stehen für einen hochsignifikanten p-Wert (0,001), ** für einen signifikanten Wert (0,01) und * für einen signifikanten Wert (0,05);

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
OstFl	100	0,0271043624029943	88	*
OstU	100	0,0434171530380242	91,5	*
OstD	100	0,0556633775506375	95	N.S.
ResLakFl	100	0,03603517598745	90,5	*
AktFr	100	0,530453998490598	133,5	N.S.
BFR	100	0,150940630854203	109	N.S.
AOC	100	0,146102102679649	197,5	N.S.
SekOst	100	0,477145414205604	175	N.S.
TypIIost	100	0,0815878652202089	204,5	N.S.
IntOst	100	0,267998576899763	187	N.S.
OstFrag	100	0,52804446201972	172,5	N.S.
OPD	100	0,146102102679649	197,5	N.S.
ResLak	100	0,264342433636054	120	N.S.
HavKan	100	0,267998576899763	187	N.S.
NonHav	100	0,0789781413026596	205	N.S.
VolkM	100	0,316842692793785	181,5	N.S.
ResKno	100	0,118718695344045	106	N.S.
GenLam	100	0,907900239237641	157	N.S.
OstKno	100	0,947336841060157	150,5	N.S.
FragKno	100	0,16963934425562	195	N.S.
OstFl	200	0,0327169842613814	91,5	*
OstU	200	0,02461916444660863	84,5	*
OstD	200	0,0303311605982834	87,5	*
ResLakFl	200	0,827922758699098	160	N.S.
AktFr	200	0,81721259656538	160,5	N.S.
BFR	200	0,692020562427202	140,5	N.S.
AOC	200	0,071736481310929	208	N.S.

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
SekOst	200	0,227184590069724	190	N.S.
TypIIost	200	0,679370004639992	140,5	N.S.
IntOst	200	0,26048541104683	187,5	N.S.
OstFrag	200	0,0846199221744731	205,5	N.S.
OPD	200	0,071736481310929	208	N.S.
ResLak	200	1	153	N.S.
HavKan	200	0,26048541104683	187,5	N.S.
NonHav	200	0,0484391480762937	210	*
VolkM	200	0,116752599882392	196	N.S.
ResKno	200	1	153	N.S.
GenLam	200	0,214156814760733	115	N.S.
OstKno	200	0,960487301258441	155	N.S.
FragKno	200	0,868568439294112	158,5	N.S.
OstFl	300	0,0354659658062764	71,5	*
OstU	300	0,0678429295127893	77,5	N.S.
OstD	300	0,0638198657513391	77	N.S.
ResLakFl	300	0,658711901403347	114	N.S.
AktFr	300	0,581174755785557	141	N.S.
BFR	300	0,879195432607091	121,5	N.S.
AOC	300	0,517886505413975	143,5	N.S.
SekOst	300	0,813697528881816	142	N.S.
TypIIost	300	0,479219674562533	153	N.S.
IntOst	300	0,690109458288491	146,5	N.S.
OstFrag	300	0,985495577751297	136	N.S.
OPD	300	0,772137909938169	143,5	N.S.
ResLak	300	0,692755319170696	124	N.S.
HavKan	300	0,457076896086985	156	N.S.
NonHav	300	0,181414986404842	169,5	N.S.
VolkM	300	0,125952314932413	117	N.S.
ResKno	300	0,583250518481271	119,5	N.S.
GenLam	300	0,355787537100913	161	N.S.
OstKno	300	0,758248672824341	126	N.S.
FragKno	300	0,524905092220847	153	N.S.
OstFl	400	0,119784806446317	115	N.S.
OstU	400	0,419131517234736	136	N.S.
OstD	400	0,38093651928295	134	N.S.
ResLakFl	400	0,883680294776225	157	N.S.
AktFr	400	0,217060562626162	201,5	N.S.
BFR	400	0,506345461119926	183,5	N.S.
AOC	400	0,0393643743006703	227,5	*
SekOst	400	0,0396298458649129	239	*
TypIIost	400	0,0846620743414575	225,5	N.S.
IntOst	400	0,0290812714992156	243	*
OstFrag	400	0,164290093831628	217	N.S.
OPD	400	0,0242905442163684	245,5	*
ResLak	400	0,314214138845927	138,5	N.S.
HavKan	400	0,0290812714992156	243	*
NonHav	400	0,0015146704214577	268	**
VolkM	400	0,0100952215257336	235	*

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
ResKno	400	0,213495495806041	130	N.S.
GenLam	400	0,843149354912214	164	N.S.
OstKno	400	0,0497570627115325	236	*
FragKno	400	0,90290174588101	175,5	N.S.
OstFl	500	0,0346341053175463	97,5	*
OstU	500	0,375158856660213	133,5	N.S.
OstD	500	0,348495937444898	132	N.S.
ResLakFl	500	0,676312606635493	148,5	N.S.
AktFr	500	0,428905003812269	187,5	N.S.
BFR	500	0,911809454396729	166	N.S.
AOC	500	0,128037136302675	210,5	N.S.
SekOst	500	0,0589675728795876	210,5	N.S.
TypIIost	500	0,163997734962531	189,5	N.S.
IntOst	500	0,0546433827710213	211,5	N.S.
OstFrag	500	0,986736598614134	154	N.S.
OPD	500	0,196989293305982	192,5	N.S.
ResLak	500	0,22033106073734	117	N.S.
HavKan	500	0,0546433827710213	211,5	N.S.
NonHav	500	0,514544394030249	171,5	N.S.
VolkM	500	0,985283481278516	154	N.S.
ResKno	500	0,104187553916967	103,5	N.S.
GenLam	500	0,67948241352202	140	N.S.
OstKno	500	0,254208093447731	188	N.S.
FragKno	500	0,397574437929409	127	N.S.
OstFl	600	0,520275414087796	142	N.S.
OstU	600	0,812159174606945	154	N.S.
OstD	600	0,811489380294595	154	N.S.
ResLakFl	600	0,430433827491995	137	N.S.
AktFr	600	0,466632611961615	185,5	N.S.
BFR	600	0,787945049924183	171	N.S.
AOC	600	0,32497470393718	193,5	N.S.
SekOst	600	0,25351268782327	198,5	N.S.
TypIIost	600	0,363521554847398	189	N.S.
IntOst	600	0,244923849628196	199	N.S.
OstFrag	600	0,472645391578016	185	N.S.
OPD	600	0,32497470393718	193,5	N.S.
ResLak	600	0,327884415399583	132	N.S.
HavKan	600	0,244923849628196	199	N.S.
NonHav	600	0,269205354753267	194,5	N.S.
VolkM	600	0,309736162912414	192	N.S.
ResKno	600	0,237445245596794	124,5	N.S.
GenLam	600	0,366196389268875	191	N.S.
OstKno	600	0,726789922895835	173,5	N.S.
FragKno	600	0,534784662861404	182	N.S.
OstFl	700	0,480298943205985	140,5	N.S.
OstU	700	0,680228473497268	175,5	N.S.
OstD	700	0,59954661429639	179	N.S.
ResLakFl	700	0,935614704024191	159	N.S.
AktFr	700	0,419641130935433	188	N.S.

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
BFR	700	0,466661308406695	185,5	N.S.
AOC	700	0,0681819569872909	220	N.S.
SekOst	700	0,158322851333254	207	N.S.
TypIOst	700	0,605311546597188	146	N.S.
IntOst	700	0,199341582112613	203	N.S.
OstFrag	700	0,523604542724869	182,5	N.S.
OPD	700	0,210251956488201	202	N.S.
ResLak	700	0,252569333403617	127	N.S.
HavKan	700	0,199341582112613	203	N.S.
NonHav	700	0,024946584679673	231	*
VolkM	700	0,0822907377498586	213	N.S.
ResKno	700	0,20014524674542	121,5	N.S.
GenLam	700	0,775146571536262	152,5	N.S.
OstKno	700	0,0394661113542684	227,5	*
FragKno	700	0,738187167545255	151	N.S.
OstFl	800	0,201208632040665	108	N.S.
OstU	800	0,522603631667041	125	N.S.
OstD	800	0,567457874276228	127	N.S.
ResLakFl	800	0,134765527154674	100,5	N.S.
AktFr	800	0,569090762489286	161	N.S.
BFR	800	0,78247932062962	135,5	N.S.
AOC	800	0,146711462847515	186,5	N.S.
SekOst	800	0,119911683289169	189,5	N.S.
TypIOst	800	0,885300517478333	148,5	N.S.
IntOst	800	0,141901292387507	187	N.S.
OstFrag	800	0,753164058936532	153,5	N.S.
OPD	800	0,146711462847515	186,5	N.S.
ResLak	800	0,244803181216358	111	N.S.
HavKan	800	0,141901292387507	187	N.S.
NonHav	800	0,00320548302372747	227	**
VolkM	800	0,661501121759773	133	N.S.
ResKno	800	0,0547556056038856	88	N.S.
GenLam	800	0,64110777602856	158	N.S.
OstKno	800	0,183550883129987	183	N.S.
FragKno	800	1	144,5	N.S.
OstFl	900	0,632631506236292	105,5	N.S.
OstU	900	0,856580993278256	112	N.S.
OstD	900	0,983850537079859	118	N.S.
ResLakFl	900	0,341371160752876	93	N.S.
AktFr	900	0,548105320052676	132,5	N.S.
BFR	900	0,872754685472877	121,5	N.S.
AOC	900	0,703320325821389	127	N.S.
SekOst	900	0,717813232719625	126,5	N.S.
TypIOst	900	0,831079145936047	122,5	N.S.
IntOst	900	0,71795010831191	126,5	N.S.
OstFrag	900	1	116,5	N.S.
OPD	900	0,703320325821389	127	N.S.
ResLak	900	0,885076966974312	121	N.S.
HavKan	900	0,71795010831191	126,5	N.S.

Parameter	Temperatur	p-Wert	Statistik (w-Wert)	Signifikanz
NonHav	900	0,108709115949552	156,5	N.S.
VolkM	900	0,318932013014269	139	N.S.
ResKno	900	0,446110406560291	97,5	N.S.
GenLam	900	0,616366263766933	104	N.S.
OstKno	900	0,98400477749717	118	N.S.
FragKno	900	0,951928222327216	119	N.S.
OstFl	1000	0,0821220296172482	63	N.S.
OstU	1000	0,344695777348978	77,5	N.S.
OstD	1000	0,389467904358525	79,5	N.S.
ResLakFl	1000	0,891346272568005	102,5	N.S.
AktFr	1000	0,964123325294975	100,5	N.S.
BFR	1000	0,471777622599155	82,5	N.S.
AOC	1000	0,769921462482764	106	N.S.
SekOst	1000	0,685463532455771	108,5	N.S.
TypIIost	1000	0,0154809431181769	149	*
IntOst	1000	0,457374287736708	116	N.S.
OstFrag	1000	0,250803504411818	73,5	N.S.
OPD	1000	0,769921462482764	106	N.S.
ResLak	1000	0,677250920969541	108,5	N.S.
HavKan	1000	0,457374287736708	116	N.S.
NonHav	1000	0,926181679953347	101,5	N.S.
VolkM	1000	0,758809786924417	95,5	N.S.
ResKno	1000	0,821797919546472	104,5	N.S.
GenLam	1000	1	99	N.S.
OstKno	1000	0,769367525069736	106	N.S.
FragKno	1000	0,542752004726487	85	N.S.

Tabelle 62: Ausreisertabelle der gemittelten Zählungen der jeweils drei Einzelzählungen pro Individuum pro Temperaturstufe bzw. Position am Datensatz des periostalen Bereichs der Tibiakompakta; der Ausreisertest wurde durchgeführt mithilfe des R-Packages MVOutiler und der darin enthaltenen PCOU-Methode sowohl anhand der gezählten als auch der berechneten Parameter; (SekOst=sekundäre Osteone, TypIIIOst=Typ-II-Osteone, IntOst=Intakte Osteone, OstFrag=Osteonfragmente, Reslak=Resorptionslaken, HowKan=Howers'sche Kanäle, NichtHowers=nicht-Howers'sche Kanäle, VolkM= Volkman'sche Kanäle, Reskno=resorbierter Knochen, Genlam=Generallamellen, Ostkno=osteonaler Knochen, Fragkno=fragmentaler Knochen, OstF=Osteonfläche, OstU=Osteonumfang, OstD=Osteondurchmesser, ReslakF=Resorptionslakenfläche, Age=Alter, AktF=Aktivierungsfrequenz, BFR=Knochenbildungsrate, Temp=Temperatur, Pos=Position);

Probe	SektOst	TypIIIOst	OstInt	OstFrag	OPD	Reslak	Howers	NonHowers	VolkM	Reskno	Genlam	Ostkno	Fragkno	OstF=	OstU	OstD	ReslakF	Age	AktF	BFR	AOC	Temp	Pos	Geschlecht
WF24(1)Iunv	3	0	3	3	6	0	3	2	0,33	0	75,33	15	9,67	0,05	0,75	0,24	0	21	0,71	3,81	6,01	20	1	m
WF27(1)Iunv	14	0,67	14,67	14,67	29,33	1,33	14,67	1	0,67	7	16,67	49,67	26,67	0,03	0,65	0,21	0,04	73	0,51	1,71	32,75	20	1	m
WF27(3)Iunv	13,33	1,33	14,67	14,67	29,33	2,67	14,67	0,67	1	15,33	9,67	52	23	0,04	0,67	0,21	0,06	73	0,51	1,81	32,31	20	3	m
WF24(4)Iunv	3	0	3	0,67	3,67	0	3	3,67	0	0	91	8,33	0,67	0,03	0,59	0,19	0	21	0,43	1,21	3,67	20	4	m
WF27(4)Iunv	15,33	1,33	16,67	11,67	28,33	2	16,67	1,67	1	11	8,67	58,67	21,67	0,04	0,67	0,21	0,05	73	0,49	1,73	31,03	20	4	m
WF24(5)Iunv	3,33	0,33	3,67	2	5,67	0	3,67	2,67	0,67	0	77,67	17,67	4,67	0,05	0,82	0,26	0	21	0,67	3,15	5,67	20	5	m
WF24(7)Iunv	5	0,33	5,33	3,67	9	0,33	5,33	1	0,33	1,33	63,67	23	12	0,04	0,75	0,24	0,01	21	1,06	4,69	9,01	20	7	m
WF27(8)Iunv	9,67	1,33	11	10	21	2,33	11	0,33	0,33	24	12,67	48,33	15	0,05	0,78	0,25	0,1	73	0,36	1,65	21,06	20	8	m
WF24(9)Iunv	6,67	0	6,67	4,67	11,33	0	6,67	5	1,67	0	62,33	27,33	10,33	0,04	0,72	0,23	0	21	1,34	5,59	11,38	20	9	m
WF24(2)100GGrad	1,67	0	1,67	0,33	2	0	1,67	5,67	0	0	89,33	6,67	4	0,04	0,69	0,22	0	21	0,24	0,96	2	100	2	m
WF24(3)200GGrad	2,67	0	2,67	0,67	3,33	0,33	2,67	3,33	0	0,33	87	12,33	0,33	0,05	0,75	0,24	0	21	0,39	1,84	3,33	200	3	m
WF27(3)200GGrad	9,33	0	9,33	13,33	22,67	4	9,33	0	0,33	34,33	9,67	31,33	24,67	0,03	0,66	0,21	0,09	73	0,38	1,28	23,67	200	3	m
WF24(4)300GGrad	1,67	0	1,67	0	1,67	0,67	1,67	0	0	11,67	78	10,33	0	0,05	0,78	0,25	0,12	21	0,2	1,22	1,67	300	4	m
WF24(5)400GGrad	11,33	0,33	11,67	2,67	14,33	0,33	11,67	1,67	0,67	0,67	39	53,67	6,67	0,05	0,78	0,25	0,01	21	1,71	7,76	14,57	400	5	m
WF27(5)400GGrad	9,33	0,33	9,67	8,67	18,33	2,67	9,67	0	0	28,33	11,67	46	14	0,05	0,77	0,25	0,11	73	0,31	1,49	18,7	400	5	m
WF24(1)1000GGrad	8	0	8	2,67	10,67	1,67	8	0,67	0	6,33	62	26,67	5	0,03	0,65	0,21	0,04	21	1,26	4,11	10,73	1000	11	m
WF17(1)Iunv	21	2,67	23,67	16,33	40	1	23,67	1	2	3,67	14,67	57,67	22,67	0,02	0,56	0,18	0,03	63	0,83	2,03	61,7	20	1	w
WF31(1)Iunv	14,33	3,33	17,67	14,67	32,33	2	17,67	0,67	1	7,67	11,33	58,33	22,67	0,03	0,66	0,21	0,04	87	0,46	1,52	40,7	20	1	w
WF31(3)Iunv	11,33	1,33	12,67	8	20,67	0,67	12,67	1,33	0,33	5,67	19,67	57	17	0,05	0,75	0,24	0,06	38	0,84	3,78	21,56	20	3	w
WF31(3)Iunv	14	2,67	16,67	16,67	33,33	0,67	16,67	1	1,33	6	7,67	66	20,33	0,04	0,71	0,23	0,06	87	0,51	2,02	39,1	20	3	w
WF22(3)Iunv	23,33	2,67	26	6,67	32,67	0,33	26	1,33	3,67	3,67	16,67	67,33	12,33	0,03	0,57	0,18	0,04	77	0,52	1,34	38,08	20	3	w
WF31(4)Iunv	16	0,67	16,67	14,67	31,33	1,33	16,67	1,33	3	5,33	9	63	22,67	0,04	0,69	0,22	0,02	87	0,46	1,75	36,02	20	4	w
WF17(8)Iunv	18	2,67	20,67	14,33	35	1,67	20,67	6,67	2,67	7,67	16	59	17,33	0,03	0,6	0,19	0,04	63	0,72	2,06	43,29	20	8	w
WF31(8)Iunv	16,67	2,67	19,33	14,33	33,67	1	19,33	1,33	2,33	5,33	9,33	66,33	19	0,03	0,66	0,21	0,05	87	0,49	1,66	41,06	20	8	w
WF27(9)Iunv	17,33	3	20,33	11,33	31,67	1	20,33	0,33	2,67	6,33	14,67	57,67	21,33	0,03	0,6	0,19	0,03	77	0,51	1,45	36,38	20	9	w
WF31(1)Iunv	7	0,33	7,33	15,33	22,67	2,67	7,33	2,33	0,67	17,33	21,67	33,33	27,67	0,05	0,76	0,24	0,06	38	0,94	4,34	23,67	20	11	w
WF18(2)100GGrad	10	0,67	10,67	16,67	27,33	2	10,67	0,67	0,67	12,67	7	45,67	34,67	0,04	0,74	0,24	0,04	38	1,16	5,05	29,68	100	2	w
WF17(3)200GGrad	18	3,33	21,33	15,33	36,67	2	21,33	1,33	0,33	11,67	9	63,33	16	0,03	0,61	0,2	0,06	63	0,77	2,29	47,66	200	3	w
WF33(3)200GGrad	15,33	1	16,33	17,33	33,67	1,67	16,33	2	1,67	7	9	63,33	20,67	0,04	0,7	0,22	0,05	87	0,51	1,96	41,22	200	3	w
WF18(4)300GGrad	12,33	0,33	12,67	9,67	22,33	1,67	12,67	1	0	13	15	53,67	18,33	0,04	0,73	0,23	0,08	38	0,91	3,87	23,33	300	4	w
WF18(7)600GGrad	10,67	1,67	12,33	9,33	21,67	1,67	12,33	0,67	0	12	13,33	54,67	20	0,04	0,75	0,24	0,07	38	0,88	3,92	22,42	600	7	w
WF17(8)700GGrad	27,67	2,67	30,33	12,33	42,67	0,33	30,33	4	1,67	1,33	20	66	12,67	0,02	0,52	0,17	0,01	63	0,87	1,9	70,12	700	8	w
WF33(8)700GGrad	24,67	0,67	25,33	12,33	37,67	1,33	25,33	2,67	0,33	4	16,33	63,67	16	0,03	0,56	0,18	0,02	87	0,52	1,31	49,56	700	8	w
WF17(9)800GGrad	28,67	2	30,67	12,67	43,33	2	30,67	2,33	0,67	7,33	21	60	11,67	0,02	0,5	0,16	0,04	63	0,88	1,74	72,43	800	9	w

Probe	Seköst	TypIlost	OsInt	OstFrag	OPD	Reslak	Havers	NonHavers	Volkm	Reskno	Genlam	Ostkno	Fragkno	OSFI	OstU	OSU	ReslakFI	Age	AKtr	BFR	AOC	Temp	Pos	Gschlecht
WF17(10)900°C	34,33	0,67	35	10,67	45,67	2	35	3,67	0,67	8,33	23,67	58,33	9,67	0,02	0,46	0,15	0,04	63	0,92	1,54	107,87	900	10	w
WF18(10)900°C	12	0,67	12,67	10	22,67	3,33	12,67	0,33	0,67	32,67	18	37	12,33	0,03	0,61	0,2	0,1	38	0,9	2,67	23,64	900	10	w
WF17(11)1000°C	31,33	1	32,33	6,33	38,67	1,33	32,33	2	0	6	28	58,67	7,33	0,02	0,48	0,15	0,03	63	0,78	1,41	55,45	1000	11	w
WF18(11)1000°C	14,33	1,33	15,67	10,67	26,33	2,67	15,67	0,33	0	19	10	48,33	18,33	0,03	0,63	0,2	0,07	38	1,06	3,33	28,55	1000	11	w

Tabelle 63: Ausreißertabelle der gemittelten Zählungen der jeweils drei Einzelzählungen pro Individuum pro Temperaturstufe bzw. Position am Datensatz des mittleren Bereichs der Tibiakompakta; der Ausreißertest wurde durchgeführt mithilfe des R-Packages MVOutlier und der darin enthaltenen PCOut-Methode sowohl anhand der gezählten als auch der berechneten Parameter; (Seköst=sekundäre Osteone, TypIlost=Typ-II-Osteone, InOst=intakte Osteone, OstFrag=Osteonfragmente, Reslak=Resorptionslakunen, Haverk=Havers'sche Kanäle, NichtHavers=nicht-Havers'sche Kanäle, Volkm= Volkmann'sche Kanäle, Reskno=resorbierter Knochen, Genlam=Generallamellen, Ostkno=osteoider Knochen, Fragkno=fragmentierter Knochen, OstFI=Osteonfläche, OstU=Osteonumfang, OstD=Osteondurchmesser, ReslakFI=Resorptionslakunenfläche, Age=Alter, AKtr=Aktivierungsfrequenz, BFR=Knochenbildungsrate, Temp=Temperatur, Pos=Position);

Probe	Seköst	TypIlost	OsInt	OstFrag	OPD	Reslak	Havers	NonHavers	Volkm	Reskno	Genlam	Ostkno	Fragkno	OSFI	OstU	OSU	ReslakFI	Age	AKtr	BFR	AOC	Temp	Pos	Sex
WF22(6)mitHg	8,33	0,33	8,67	12,67	21,33	4	8,67	0,67	0,67	25,67	12,67	38	23,67	0,04	0,74	0,24	0,07	73	0,37	1,65	22,03	20	6	m
WF22(8)mitHg	6,67	0,33	7	12	19	5,33	7	0,33	0	37	15,33	28,67	19	0,04	0,72	0,23	0,07	73	0,32	1,31	19,43	20	8	m
WF24(9)mitHg	7	0,67	7,67	9,67	17,33	0,33	7,67	1,67	0,33	1,67	26,67	43	28,67	0,06	0,84	0,27	0,02	21	2,12	11,73	17,62	20	9	m
WF27(10)mitHg	7,33	1,33	8,67	9,33	18	4,33	8,67	0,33	0	32,33	11,33	38	18,33	0,05	0,76	0,24	0,08	73	0,3	1,35	18,55	20	10	m
WF24(2)100°C_mitHg	8,33	0,33	8,67	5	13,67	0	8,67	2,33	0,33	0	43	45,67	11,33	0,05	0,81	0,26	0	21	1,63	8,61	13,76	100	2	m
WF24(4)300°C_mitHg	2	0	2	0	2	0,33	2	0,33	0	6,67	7,67	15,67	10,67	0,08	0,97	0,31	0,07	21	0,24	1,84	2	300	4	m
WF27(4)300°C_mitHg	4,33	0,33	4,67	6	10,67	5	4,67	0	0	50,67	18	20,67	10,67	0,05	0,76	0,24	0,1	73	0,18	0,8	10,71	300	4	m
WF17(1)mitHg	24,67	2,33	27	19,67	46,67	0,67	27	1	1	2,67	13,33	63	21	0,02	0,54	0,17	0,03	63	0,98	2,28	91,75	20	1	w
WF17(5)mitHg	21,67	3,33	25	16,33	41,33	0,67	25	1,33	2,33	3	12	66,67	18,33	0,03	0,58	0,19	0,03	63	0,87	2,34	62,59	20	5	w
WF17(6)mitHg	17,33	2	19,33	14,67	34	0,33	19,33	2,67	2	2,33	26,33	53,67	17,67	0,03	0,59	0,19	0,02	63	0,71	1,98	43,12	20	6	w
WF17(10)mitHg	21,67	3	24,67	15,33	40	0	24,67	2,33	1,33	0	15,67	66,67	17,67	0,03	0,58	0,19	0	63	0,84	2,22	65,72	20	10	w
WF17(11)mitHg	18,33	2,33	20,67	16,33	37	1,67	20,67	2	2,33	5	22	51,67	21,33	0,03	0,57	0,18	0,02	63	0,76	1,93	48,87	20	11	w
WF17(8)700°C_mitHg	28,33	2	30,33	16	46,33	1,33	30,33	1,67	0,67	5	23,33	54,67	17	0,02	0,48	0,15	0,02	63	0,94	1,7	38	700	8	w
WF22(8)700°C_mitHg	16,67	1,67	18,33	6,33	24,67	0,67	18,33	2,33	1	3,67	33	52,67	10,67	0,03	0,02	0,04	0	77	0,38	1,1	26,29	700	8	w
WF33(8)700°C_mitHg	21,33	1,33	22,67	9	31,67	2,33	22,67	1	0,33	11,67	13,33	61,33	13,67	0,03	0,58	0,19	0,05	87	0,44	1,19	36,38	700	8	w
WF17(9)800°C_mitHg	26,67	2,67	29,33	14	43,33	1,67	29,33	1,67	0	9	16,33	60,33	14,33	0,02	0,51	0,16	0,06	63	0,89	1,82	82,45	800	9	w
WF22(9)800°C_mitHg	10	1	11	7	18	2	11	3	2	17	37	40	6	0,04	0,01	0,06	0	77	0,28	1,01	18,3	800	9	w
WF33(9)800°C_mitHg	14	0,33	14,33	5	19,33	1,67	14,33	0,33	1,67	7	34	49,33	9,67	0,03	0,66	0,21	0,05	87	0,26	0,92	19,99	800	9	w
WF17(10)900°C_mitHg	28	2	30	14,67	44,67	1,33	30	3	0,33	6,33	19,33	58	16,33	0,02	0,49	0,16	0,03	63	0,91	1,76	82,47	900	10	w
WF22(10)900°C_mitHg	14	0	14	6	20	3	14	3	1	9	42	38	11	0,03	0,02	0,05	0	77	0,31	0,84	20,49	900	10	w
WF33(10)900°C_mitHg	19	0,33	19,33	6,33	25,67	1,67	19,33	0,33	0,67	9	29,67	53	8,33	0,03	0,59	0,19	0,06	87	0,35	0,96	27,47	900	10	w
WF17(11)1000°C_mitHg	28	1	29	17	46	1,67	29	4,33	0	5,33	22,67	55	17	0,02	0,49	0,16	0,03	63	0,94	1,78	84,29	1000	11	w

8.) Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die in irgendeiner Weise zu der Erstellung dieser Dissertation beigetragen haben und mich während der Zeit meiner Promotion unterstützt und gefördert haben.

Mein erster Dank gilt **Frau Prof. Dr. Gisela Grupe**, für die Bereitstellung des spannenden Themas, die Betreuung meiner Dissertation und die Erstellung von Gutachten für mein Promotionsstipendium der Hanns-Seidel-Stiftung.

An zweiter Stelle möchte ich **Herrn Prof. Dr. Martin Heß** danken, für die Übernahme der Erstellung des Zweitgutachtens für meine Arbeit.

Allen **weiteren Gutachtern** meiner Prüfungskommission danke ich ebenfalls für ihre Mühen und die Bereitschaft zur Beteiligung an der Kommission.

Herrn Prof. Dr. Matthias Graw und **Herrn Dr. Braun** möchte ich für die Bereitstellung und Probenahme der Femurproben aus dem Institut für Rechtsmedizin danken und für die Unterstützung bei der Erstellung des Ethikantrages. Darüber hinaus geht mein Dank an Herrn Prof. Dr. Matthias Graw für die Erstellung des Zweitgutachtens für die Hanns-Seidel-Stiftung.

Ein weiterer Dank gilt den Studenten, die innerhalb meines Dissertationsprojektes ein Forschungspraktikum oder eine Abschlussarbeit gemacht haben. Hierbei möchte ich mich namentlich bei **Helmut Müller, Alexandra Mussauer, Lara Fetzer** und **Pia-Maria Schellerer** bedanken.

Den Mitgliedern der Arbeitsgruppe möchte ich danken für die schöne gemeinsame Zeit an der Universität, die gemeinsamen Kaffeepausen, die Unterstützung und die gute Zusammenarbeit. Besonders ohne **Dr. Andrea Göring, Sidney Sebald, Fabiola Lengfelder, Dominic Anders** und **Frankziska Schreil** wäre die Zeit an der Universität nicht dieselbe gewesen.

Vor allem möchte ich mich auch bei **meinen Freunden** und **meiner Familie** bedanken, die mich in jeder Phase meiner Dissertation bedingungslos unterstützt hat und ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Mein besonderer Dank gilt dabei meinem **Papa**, meiner Cousine **Miriam** und ganz besonders Dir, **Daniel**, für das Korrekturlesen meiner Arbeit und die Unterstützung bei den verzweifelten Momenten in Sachen R.

Ein gesonderter Dank gilt der **Hanns-Seidel-Stiftung e.V.** aus München für die finanzielle aber auch ideelle Förderung meiner Dissertation im Rahmen eines Promotionsstipendiums in den Jahren 2018 bis 2020.

9.) Lebenslauf

LARISSA ANNA-MARIA OTTO

LEBENS LAUF

seit 2016

- Ludwigs-Maximilians-Universität München
Promotionsstudentin
Promotionsthema: „Mikrostrukturelle
Leichenbranduntersuchungen“

seit 2018

- **Promotionsstipendiatin** der Hanns-Seidel-Stiftung e.V.

04-12/2020

- Administrator Quality Operations bei ITG
(Isotopen Technologien Garching)

seit 01/2021

- Manager Quality Operations bei ITM
(Isotopen Technologien München)

NEBENTÄTIGKEITEN

01/2019-03/2020

- Mitarbeiterin bei „LifeScience Akademie Dr. Bichlmeier -
Beratung und Seminare“
 - Verfassen von SOPs zur Erstellung eines QM-
Handbuchs,
 - externe Bearbeitung von PQRs für
Pharmaunternehmen,
 - Datenauswertung,
 - Follow-Up von Zulassungslöschungen im Rahmen des
Change Control
 - Aktualisierung von Schulungsmatrizes

2016-2017

- Wissenschaftliche Mitarbeiterin der Ludwig-Maximilians-
Universität München in der DFG-Forschergruppe
„Transalpine mobility and research“ zur Aufbereitung von
Leichenbrandmaterial für Strontium- und Bleisotopenanalysen

04-09/2014

- Studentische Hilfskraft der Ludwig-Maximilians-Universität
München in der Arbeitsgruppe „Anthropologie“ mit dem Thema
„Isotopenanalysen der Menschenknochenfunde
aus Dillingen an der Donau“

BETREUUNG STUDENTEN

09-12/2018

- Betreuung einer studentischen Abschlussarbeit (Bachelor)
*Fetzer L: The application of histology for the analysis
of experimentally cremated bones*

04-06/2018

- Betreuung eines studentischen Forschungspraktikums

2015-2018

- Betreuung des Histologie-Teils des studentischen Archäometrie-Praktikums im Masterstudiengang Biologie der LMU

04-07/2017

- Betreuung zweier studentischer Abschlussarbeiten
Müller H: Intraindividuelle Variabilität der Knochenmikrostruktur am Beispiel der Oberschenkelkompakta
Mussauer A: Belastungsabhängige Variabilität der Knochenmikrostruktur

2016-2017

- Betreuung des Leichenbrand-Kurstages im Praktikum „Osteologie“

12/2015

- im Bachelor-Studiengang Biologie der Ludwig-Maximilians-Universität
- Tutor im Praktikum „Osteologie“ im Bachelor-Studiengang Biologie der Ludwig-Maximilians-Universität

WEITERBILDUNG

09/2018

- Teilnahme an dem “GMP Kurs für Studenten“ an der Ludwig-Maximilians-Universität München

10/2018

- Praktikum bei „LifeScience Akademie Dr. Bichlmeier – Beratung und Seminare“ im Bereich PQR und SOP

08/2007

- Praktikum bei Organon-Biosciences im Marketing

VORTRÄGE

2019

- **Otto L, Braun C, Graw M, Grupe G (2019):**
The influence of temperature-related alterations of the bone's microstructure for histological age determination
25th Congress of the European Association of Archaeologists (EAA),
Switzerland September 22nd to 25th 2018

2018

- **Otto L, Greiner M, Braun C, Graw M, Grupe G (2018):**
Age-identification of cremations via microstructural analysis of burned human bones
21st congress of the European Anthropological Association (EAA),
Denmark August 4th to 7th 2019

2017

- **Otto L, Greiner M, Braun C, Graw M, Grupe G (2017):**

Age-related microstructure of burned bones has a hand in identifying cremations.
12th Meeting of the Society of Anthropology (GfA): Homo homini lupus, Geislingen an der Steige, September 18th to 22nd 2017.

- **Otto L, Greiner M, Braun C, Graw M, Grupe G (2017):**
Age-related microstructure of burned bones has a hand in identifying cremations.
2nd International conference of the DFG research unit FOR 1670
“Transalpine mobility and cultural transfer”: Cremation burials in Europe, Munich October 12th to 14th 2017.
- **Metzner-Nebelsick C, Klaut D, Otto L, Hajdu T, Köhler K (2017):**
Selective depositions of cremated bones in burials of the Urnfield period between Bavaria and the western Carpathian Basin.
2nd International conference of the DFG research unit FOR 1670:
“Transalpine mobility and cultural transfer”: Cremation burials in Europe,
Munich October 12th to 14th 2017.
- **Reuß S, Klaut D, Metzner-Nebelsick C, Otto L (2017):**
Considerations on mobility in the North Tyrolean Inn Valley during the Urnfield period (1320/1300-800 BC).
2nd International conference of the DFG research unit FOR 1670
“Transalpine mobility and cultural transfer”: Cremation burials in Europe,
Munich October 12th to 14th 2017.
- **Lang A, Klaut D, Otto L (2017):**
Burials of the Fritzens-Sanzano Culture: An archeological and anthropological perspective.
2nd International conference of the DFG research unit FOR 1670:
“Transalpine mobility and cultural transfer”: Cremation burials in Europe,
Munich October 12th to 14th 2017.
- **Otto L, Greiner M, Braun C, Graw M, Grupe G (2017):**
Age-related microstructure of burned bones has a hand in identifying cremations.
International Conference Vienna: New approaches to burnt human bones and teeth:
The bioarchaeology of cremations and tooth cementum annulation,

Vienna November 15th 17th 2017.

POSTER

2017

Müller H, Mussauer M, **Otto L**, Grupe G (2017):
Intersectional differences in microscopic age estimation in the anterior cortex of the femoral bone. 12th Meeting of the Society of Anthropology (GfA): Homo homini lupus, Geislingen an der Steige, September 18th to 22nd 2017.

VERÖFFENTLICHUNGEN

2020, IN PREP.

- **Otto L**, Fetzer L, Müller H, Mussauer A, Grupe G:
Histomorphometry of thermally induced alterations of compact human bone

2016

- Drexl M, **Otto L**, Wiegrebe L, Marquardt T, Gürkov R, Krause E:
Low-frequency sound exposure causes reversible long-term changes of cochlear transfer characteristics. Hearing Research 332, 87-94.

KONGRESSE / WORKSHOPS

04/2019

- „Möglichkeiten und Grenzen der anthropologischen Leichenbranduntersuchung“ in Weimar

11/2017

- New approaches to burnt human bones and teeth: the bioarchaeology of cremations and tooth cementum annulation

10/2017

- „Cremation burials in Europe“ der DFG-Forschergruppe „Transalpine mobility and research“

09/2015

- Teilnahme an dem 11. Kongress der „Gesellschaft für Anthropologie“ zum Thema: „Evolutionary and modern challenges to Homo sapiens – an anthropological inquiry“

10/2014

- „A critical look at the concept of isotopic landscapes and its application in future biological research“ der DFG-Forschergruppe „Transalpine mobility and research“

AUSBILDUNG

seit 2016

- Ludwigs-Maximilians-Universität München
Promotionsstudentin
Promotionsthema:
„Mikrostrukturelle Leichenbranduntersuchungen“

2013 – 2015

- Ludwigs-Maximilians-Universität München
Master of Science (1,39)
Masterarbeit in Anthropologie (1,7):
„Anthropologische Bearbeitung des urnenfelderzeitlichen
Gräberfeldes Kleinaitingen“

2010 – 2013

- Ludwigs-Maximilians-Universität München
Bachelor of Science (2,18)
Bachelorarbeit in Neurobiologie (1,0):
„Cochlea-mechanische Grundlagen des Bounce-Phänomens“

10.) Eidesstattliche Versicherung und Erklärung zur Arbeit

Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass die vorgelegte Dissertation von mir selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt ist.

München, den.....09.06.2020.....Larissa Anna-Maria Otto.....
(Unterschrift)

Erklärung zur Arbeit

Hiermit erkläre ich,

dass die Dissertation nicht ganz oder in wesentlichen Teilen einer anderen Prüfungskommission vorgelegt worden ist und dass ich mich anderweitig einer Doktorprüfung ohne Erfolg **nicht** unterzogen habe.

München, den.....09.06.2020.....Larissa Anna-Maria Otto.....
(Unterschrift)