

Aus der Anatomischen Anstalt der
Ludwig-Maximilians-Universität München

ehem. Vorstand Lehrstuhl I
Professor Dr. med. Dr. h. c. Reinhard Putz
komm. Vorstand: Prof. Dr. Laurenz Wurzinger

**Eine morphologische Funktionsanalyse
der Uncovertebralgelenke mittels CT-Osteoabsorptiometrie**

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Humanmedizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von
Hinnerk Baecker
aus Bielefeld

2009

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. Magdalena Müller-Gerbl

Mitberichterstatter: Prof. Dr. Hans Roland Dürr
Priv. Doz. Dr. Peter Biberthaler
Prof. Dr. Hans-Christoph Becker

Dekan: Prof. Dr. med. Dr. h. c. M. Reiser, FACR, FRCR

Tag der mündlichen Prüfung: 15.10.2009

meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	8
1.1 Allgemeine Einleitung.....	8
1.2 Spezielle Einleitung	10
1.2.1 Literaturübersicht.....	10
1.2.2 Historischer Kontext	10
1.2.3 Ergebnisse aktueller Studien	12
1.2.4 Zusammenfassung.....	13
1.3 Anatomie und Physiologie der Halswirbelsäule.....	14
1.3.1 Aufbau eines Wirbels	15
1.3.2 Funktionelle Anatomie der Bandscheibe	16
1.3.3 Das ligamentäre System	18
1.3.4 Das Uncovertebralgelenk	19
1.4 Entwicklung und Aufbau des menschlichen Knochens.....	22
1.4.1 Architektur des Knochengerüsts	22
1.4.2 Definition und Morphologie des subchondralen Knochens.....	24
1.5 Darstellung subchondraler Mineralisierung	27
1.5.1 Röntgendensitometrie	27
1.5.2 CT-Osteoabsorptiometrie	28
1.6 Fragestellung	30

Inhaltsverzeichnis

2 Material	32
2.1 Materialauswahl	32
2.2 Darstellung aller Patientendaten	34
2.2.1 Mittels CT-OAM untersuchte Präparate.....	34
2.2.2 Makroskopisch und nativ-radiologisch untersuchte Präparate	34
3 Methoden	36
3.1 Entnahme der Präparate.....	36
3.2 CT-Osteoabsorptiometrie (CT-OAM)	36
3.2.1 Anfertigung der CT-Datensätze.....	36
3.2.2 Erstellung der Densitogramme	37
3.3 Auswertung der Densitogramme.....	41
3.3.1 Auswertung mittels quantitativer CT-OAM	41
3.3.2 Bestimmung der Dichtemaximallokalisationen	42
3.3.3 Berechnung der Mineralisierungsquotienten MQ1 und MQ2	45
3.4 Makroskopische Untersuchung der unteren Halswirbelsäule	47
3.4.1 Beurteilung der Disci intervertebrales.....	47
3.4.2 Dokumentation morphologischer Umbauprozesse.....	47
3.5 Nativ-radiologische Bildgebung der unteren Halswirbelsäule.....	49
3.5.1 Erstellung eines Untersuchungsbogens.....	49
3.5.2 Falschfarbenbelegung der Röntgenschichtaufnahmen.....	50
3.6 Statistik	51

Inhaltsverzeichnis

4 Ergebnisse.....	52
4.1 Auswertung der Dichtemuster.....	52
4.1.1 Dichtemaximaverteilung innerhalb der GP	52
4.1.2 Dichtemaximaverteilung innerhalb der DP	57
4.2 Auswertung der Mineralisierungsverteilungen	61
4.2.1 Vergleich der Gesamtmineralisierung von GP und DP	63
4.2.2 Vergleich des Mineralisierungsquotienten MQ1 von GP und DP	63
4.2.3 Seitenvergleich der Gesamtmineralisierung von GP und DP	64
4.2.4 Vergleich der Gesamtmineralisierung korrespondierender GF	68
4.2.5 Vergleich des Mineralisierungsquotienten MQ2 korrespondierender GF.....	70
4.3 Auswertung makroskopischer Untersuchungen	71
4.3.1 Die Disci intervertebrales	71
4.3.2 Morphologie der knöchernen Halswirbelsäule	76
4.4 Auswertung der nativ-radiologischen Bildgebung	79
4.4.1 Darstellung der Röntgenschichtaufnahmen nach Falschfarbenbelegung	79
5 Diskussion.....	81
5.1 Diskussion des Materials	81
5.2 Diskussion der Methode.....	82
5.2.1 Bewertung der CT-OAM	82

Inhaltsverzeichnis

5.2.2 Bewertung zur Bestimmung der Dichtemaximallokalisationen	84
5.2.3 Bewertung der makroskopischen und nativ-radiologischen Auswertung.....	85
5.3 Diskussion der Ergebnisse	86
5.3.1 Bewertung der Dichtemaximaverteilung	86
5.3.2. Bewertung der Mineralisierungsverteilung im intra- und interindividuellen Vergleich.....	91
5.3.3 Bewertung der makroskopischen Untersuchungen.....	93
5.3.4 Bewertung der radiologischen Bildgebung und Falschfarben- belegung	95
6 Zusammenfassung	98
7 Literaturverzeichnis	101
8 Abbildungsverzeichnis	115
9 Tabellenverzeichnis	118
10 Abkürzungsverzeichnis	119
11 Anhang.....	120
12 Danksagung	123
13 Curriculum vitae.....	124

1 Einleitung

1.1 Allgemeine Einleitung

Halswirbelsäulenerkrankungen nehmen in der Pathologie des Bewegungsapparates eine herausragende Stellung ein. Verletzungen der Halswirbelsäule (HWS) stellen heutzutage unter den Wirbelsäulenverletzungen mit neurologischen Defiziten das Hauptkontingent mit einem Anteil von mehr als 55 Prozent dar.

Dies liegt an den anatomischen und funktionellen Besonderheiten der HWS. Der Kopf befindet sich als exzentrisches, äußerst bewegliches Pendel am Ende eines exponierten, langen Hebelarmes. In Abhängigkeit vom einwirkenden Summationsvektor entstehen hierdurch charakteristische Verletzungen, die eingeteilt werden in Flexions-, Hyperextensions-, Rotations-, Translations- und Kompressionsverletzungen (KREMER et al. 1997). Eine detaillierte Klassifikation der traumatischen HWS-Verletzungen ist von Aebi und Nazarian beschrieben worden.

Hinzu kommen zahlreiche weitere Erkrankungen, die zu den degenerativen (Osteochondrose, Spondylarthrose, Osteoporose), entzündlichen (Arthritis, Spondylitis), genetischen (angeborene Fehlbildungen jeglicher Art) oder tumorösen Krankheitskreisen gezählt werden.

Unabhängig von der zugrunde liegenden Erkrankung vereint eine unspezifische Beschwerdesymptomatik die beginnende klinische Manifestation. Es werden ebenso Ruhe- wie auch Belastungsschmerzen beschrieben, denen gelegentlich ein ausstrahlender Charakter im Sinne einer radikulären oder pseudoradikulären Symptomatik anhaftet.

Es wird deutlich, dass die Pathologie der Wirbelsäule eine Vielzahl von Krankheiten beschreibt, die sich trotz aller Unterschiede in der Genese von der Symptomatik erstaunlich ähneln.

Diese Tatsache unterstreicht die Bedeutung der interdisziplinären Zusammenarbeit zum Wohlergehen des Patienten, denn nur so kann eine bestmögliche, effektive Therapie gewährleistet werden. Wie in kaum einem anderen Bereich der modernen Medizin überschneiden sich in der Behandlung von Wirbelsäulenleiden die Arbeitsbereiche des Neurochirurgen und Orthopäden mit denen des Neurologen, Radiologen und Internisten (EXNER 1958).

Einleitung

Bei der Diagnostik und Therapie von Halswirbelsäulenerkrankungen ist es von großer Bedeutung, nicht nur der einzelnen betroffenen Struktur Aufmerksamkeit zu schenken, sondern stets das komplette Bewegungssegment als funktionelle Einheit zu betrachten (KOTANI et al. 1998). Dieses besteht aus dem Raum zwischen zwei Wirbelkörpern samt Grund- und Deckplatte, dem Discus intervertebralis, dem vorderen und dem hinteren Längsband, den kleinen Wirbelgelenken, dem gelben Band, den zahlreichen Bändern zwischen den einzelnen Wirbelbogenfortsätzen und der langen Rückenstreckmuskulatur (JUNGHANNS 1939). Auf die Funktion und das exakte Zusammenspiel der morphologischen Bestandteile wird im Verlauf der vorliegenden Studie eingegangen. Es soll jedoch bereits an dieser Stelle erwähnt werden, dass sich ein Defekt, je nach Größe und Bedeutung im Bewegungssegment, auf angrenzende Strukturen auswirken kann und benachbarte Segmente durchaus beeinflusst.

Die Halswirbelsäule und ihre Pathologie hebt sich aufgrund spezieller anatomischer und somit auch funktioneller Besonderheiten von der restlichen Wirbelsäule ab.

Der 1. und 2. Halswirbel (Atlas/ Axis) unterscheiden sich grundlegend von der Konstruktion der übrigen Wirbel und gewährleisten hierdurch die Stabilität und Bewegungsmöglichkeiten im cranio-cervicalen Übergang.

Der 3. bis 7. Halswirbel fällt durch das Vorhandensein von sog. Uncovertebralgelenken auf, die im Laufe der kindlichen Entwicklung ausgebildet werden und eine überragende Rolle in der Physiologie und Pathologie der unteren HWS einnehmen.

Die Uncovertebralgelenke und die daraus resultierenden morphologischen und funktionellen Veränderungen für die gesamte untere Halswirbelsäule sind Thema dieser Arbeit. Das Hauptaugenmerk richtet sich dabei auf die CT-OAM gestützten Untersuchungen der subchondralen Mineralisierung, anerkanntermaßen das morphologische Korrelat der Langzeitbeanspruchung in Gelenkflächen, im Bereich der Grund- und Deckplatten der Halswirbelkörper. Insbesondere wird auf die Mineralisierungsverteilung innerhalb der Uncovertebralgelenke eingegangen, anhand derer die Umbauvorgänge des Knochens, als Ausdruck einer stattfindenden Adaptation an sich verändernde Belastungen, mit den makroskopisch und nativ-radiologisch gewonnenen Beobachtungen korreliert werden.

Einleitung

1.2 Spezielle Einleitung

1.2.1 Literaturübersicht

Befasst man sich mit der Literaturrecherche zum Thema Uncovertebralgelenke und -spalten, so stößt man immer wieder auf dieselben Namen. Die einschlägige Literatur ist von einigen Wenigen verfasst worden. Auch wenn es eine Vielzahl an Veröffentlichungen gibt, Grundlage bilden hier fast ausnahmslos die Arbeiten von sieben wichtigen Anatomen und Medizinern, die Mitte des 20. Jahrhunderts ihre Werke über die Halswirbelsäule veröffentlichten. Namentlich zu nennen sind: LUSCHKA, EXNER, ECKLIN, JUNGHANNS, RATHKE, SCHMORL und TÖNDURY. Aufgrund der hohen Anzahl erschienener Bücher und Artikel wird es umso wichtiger, das bereits vorhandene Wissen zusammenzufassen, um die wesentlichen Aussagen kurz, präzise und vollständig wiederzugeben.

1.2.2 Historischer Kontext

Die Erforschung der Region um die Procc. uncinati erreichte mit der Erstbeschreibung durch LUSCHKA im Jahre 1858 eine neue Ebene. Beschränkten sich die vorherigen Untersuchungen vornehmlich auf die rein anatomische Deskription der Wirbelsäule und ihrer einzelnen Bestandteile, so versuchte LUSCHKA (1858) erstmals Morphologie und Funktion in Zusammenhang zu bringen. Sein Werk "Die Halbgelenke des Menschen" setzt sich detailliert mit der speziellen Anatomie im Bereich der Halswirbelsäule auseinander und schafft erstmals Verknüpfungen zwischen Form und Funktion. Er prägte den Begriff der „Hemiarthrosis intervertebralis lateralis“ und beschrieb damit erstmals die Sonderstellung dieser gelenkartigen Verbindungen, die seiner Meinung nach durch Einrisse der Zwischenwirbelscheiben und sich verändernde Belastungen im Bereich der HWS zustande kamen.

Nach LUSCHKA (1858) beschäftigte sich auch TROLARD (1897) mit diesen „Gelenken“ und nannte sie erstmals „Uncovertebralgelenke“.

Ob es sich hierbei per definitionem um „echte“ Gelenke handelte, darüber wurde in den folgenden Jahrzehnten eingehend diskutiert und gestritten.

Einleitung

In diesem Zusammenhang sollten die Arbeiten von RATHKE (1933), KROGDAHL et al. (1944) und TÖNDURY (1968) Erwähnung finden.

RATHKE (1933) stellte in seinem Artikel „Zur normalen und pathologischen Anatomie der Wirbelsäule“ die Behauptung auf, dass die von LUSCHKA (1858) beschriebenen Strukturen weder makroskopisch noch mikroskopisch den Kriterien eines „echten“ Gelenkes entsprachen. Seiner Auffassung zur Folge handelte es sich lediglich um Spaltbildungen in einer ansonsten gesunden Zwischenwirbelscheibe. Er war daher der Meinung, dass die Bedeutung der Uncovertebralgelenke, so wie Luschka sie dargestellt hatte, aus wissenschaftlicher Sicht nicht zu rechtfertigen sei.

Schließlich beschäftigten sich noch KROGDAHL et al. (1940) mit der Frage nach der Existenz von Uncovertebralgelenken. Nach Durchführung einer morphometrischen Studie an 12 Wirbelsäulen von Erwachsenen im Alter von 28 bis 80 Jahren, betrachteten sie die Existenz der Uncovertebralgelenke als gesichert und befanden die Behauptungen von RATHKE (1933) für falsch.

1943 griff TÖNDURY (1958) das Thema erneut auf und stellte eingehende Untersuchungen an den Wirbelsäulen von Feten, Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen an. Er beobachtete, dass weder bei Feten noch bei Kindern oder bei Jugendlichen morphologische Beweise zu finden waren, welche die Behauptungen von Luschka rechtfertigten, an dieser Stelle von Gelenken zu sprechen. Zwar bestätigte er das Vorhandensein von uncovertebralen Spalten in den Zwischenwirbelscheiben, diese jedoch waren auch für ihn nicht mehr als Einrisse einer ansonsten gesunden Bandscheibe, denen keine weitere Bedeutung zugesprochen wurde.

Die Diskussion fand ein Ende, als ECKLIN (1960) in umfassenden experimentellen Studien eindeutig bewies, dass die Procc. uncinati aus den Wirbelbögen entstehen und diese erst um das zweite Lebensjahr herum mit den Wirbelkörpern verschmelzen. Die daraus gezogene Schlussfolgerung lautete folgendermaßen: Da die Procc. uncinati nachweislich nicht primär angelegt sind, sondern sich erst im Laufe der Entwicklung zum Erwachsenen ausbilden, kann es sich bei den Uncovertebralgelenken per definitionem nicht um „echte“ Gelenke handeln, da als wirkliche Diarthrosen nur diejenigen gelten, welche primär angelegt sind.

Hinzu kommt, dass die Bestandteile einer Diarthrose, einer beweglichen Verbindung zwischen mindestens zwei Knochen, aus wissenschaftlicher Sicht exakt definiert sind. Demnach besteht ein „echtes“ Gelenk aus zwei artikulierenden Gelenkflächen,

Einleitung

die meistens von hyalinem Knorpel und nur selten von Faserknorpel überzogen sind. Zwischen den artikulierenden Gelenkflächen findet sich ein Gelenkspalt, der wiederum Teil einer Gelenkhöhle ist. Diese Cavitas articularis wird von einer Gelenkkapsel, der Capsula articularis umschlossen und enthält Gelenkschmiere, die sog. Synovialflüssigkeit.

Das Vorhandensein eben dieser Strukturen im Bereich der Procc. uncinati ist aus wissenschaftlicher Sicht umstritten (GRIGNON et al. 2000).

Die Tatsache, dass eine Existenz der einzelnen Bestandteile nicht nachgewiesen werden konnte, verbietet in diesem Fall von einem „echten“ oder auch „primären“ Gelenk zu sprechen. Sehr wohl kann man das Uncovertebralgelenk hingegen als „sekundäres Gelenk“ bezeichnen.

Hierauf wird nach Betrachtung der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse in der Diskussion näher eingegangen. In den folgenden Ausführungen ist in Bezug auf die Uncovertebralgelenke der Halswirbelsäule stets von sekundären Gelenken die Rede.

1.2.3 Ergebnisse aktueller Studien

Die zuletzt veröffentlichten Arbeiten, die sich mit den uncovertebralen Spalten und Gelenken auseinandersetzen, konzentrierten sich auf rein funktionelle Aspekte. CLAUSEN et al. (1997) z.B. gingen der Frage nach, welche Rolle die uncovertebralen Spalten und Gelenke für das Rotationsvermögen der Halswirbelsäule spielen. Hierfür wurde das Modell eines Bewegungssegmentes (C5/6) entwickelt, und vor und nach Abtragung der Procc. uncinati wurden verschiedene Rotationsversuche durchgeführt. Darüber hinaus wurde die biomechanische Bedeutung der Procc. uncinati einerseits und der Uncovertebralspalten andererseits untersucht. Zu diesem Zweck wurden die uncovertebralen Spalten mit Material des Anulus fibrosus aufgefüllt und die Auswirkungen auf die Biomechanik analysiert. Es galt herauszufinden, inwiefern sich das zulässige Bewegungsausmaß der Halswirbelsäule hierdurch beeinflussen ließ. Die Resultate ergaben, dass die Uncovertebralspalten und die Procc. uncinati funktionell gegeneinander arbeiten. Während durch die Spaltenbildung der Grad der maximal zulässigen Bewegung erhöht wird, verringert er sich durch das

Einleitung

Vorhandensein der Procc. uncinati. Diese Ergebnisse korrelieren mit den Studien von HALL (1987) und PENNING et al. (1987).

Eine weitere in diesem Zusammenhang zu erwähnende Studie wurde 1998 von KOTANI et al. (1998) veröffentlicht. Es ist hier die biomechanische Rolle des uncovertebralen Gelenkes vor und nach Foraminotomie am Präparat untersucht worden. Es zeigte sich, dass nach Entfernung der Procc. uncinati ein Stabilitätsverlust bis zu 36 % innerhalb des betroffenen Segmentes beobachtet wurde, was die Bedeutung der uncovertebralen Gelenke für die Gesamtkonstruktion der Halswirbelsäule hervorhob und deren Stellenwert im Hinblick auf operative Eingriffe an der HWS unterstrich.

1997 wurde von EBRAHEIM et al. (1997) eine umfassende morphometrische Studie durchgeführt, in der 54 Wirbelsäulen von C3 bis C7 sorgfältig vermessen wurden. Sie kamen zu dem Schluss, dass aufgrund geringer Höhenunterschiede der Procc. uncinati, die untere HWS als Prädilektionsstelle für das Auftreten einer uncovertebralen Spondylosis gilt, da sich in diesem Bereich größere uncovertebrale Osteophyten bilden.

Weiter gibt es zahlreiche Studien, die sich mit der radiologischen (SCHMORL et al. 1953, JUNGHANNS 1954/ 1963, HOLDER 1996), der mikroskopischen (GRIGNON et al. 2000), der makroskopischen (MILNE 1991, KUMARESAN et al. 2000) und der embryologischen Forschung auf dem Gebiet der HWS beschäftigen. Gemeinsamkeit dieser Arbeiten ist, dass der Schwerpunkt in der Beschreibung der Uncovertebralspalten liegt und die Geschehnisse an den Procc. uncinati, samt den im Knochen ablaufenden Adaptationsvorgängen, weitestgehend außer Acht gelassen werden.

1.2.4 Zusammenfassung

Festzuhalten bleibt, dass sich thematisch deutlich weniger Arbeiten mit den Uncovertebralgelenken auseinandersetzen als mit den Uncovertebralspalten. Während Letztere ausgiebig beschrieben und erforscht wurden, sowohl anatomisch als auch röntgenologisch und biomechanisch, finden sich bei den uncovertebralen Gelenken große Defizite (LUSCHKA 1858, ECKLIN 1960, TÖNDURY 1974/ 1981, JUNGHANNS 1954/ 1963, RATHKE 1933). Sofern überhaupt vorhanden, beschränken sich aktuelle Ausführungen lediglich auf mikro- bzw. makroskopische

Einleitung

Untersuchungen, die zwar morphologische Veränderungen zu einem gewissen Grad erfassen können, jedoch keine differenzierte Aussage über die im Knochen stattfindenden Ereignisse ermöglichen. Es existiert keine Studie, die sich mit den Geschehnissen unter der Oberfläche, mit den im Knochen ablaufenden Stoffwechselprozessen und Anpassungsvorgängen in Abhängigkeit von wechselnder Belastung wissenschaftlich auseinandersetzt.

Aufgrund der klinischen Bedeutung und der noch nicht restlos geklärten morphologischen und funktionellen Besonderheiten dieses Wirbelsäulenabschnittes liegt ein gesteigertes wissenschaftliches Interesse vor.

1.3 Anatomie und Physiologie der Halswirbelsäule

Das mögliche Bewegungsausmaß sämtlicher Halswirbelsäulengelenke resultiert aus einer Vielzahl von Faktoren, die in sechs Hauptgruppen eingeteilt werden können:

1. dreidimensionale Form der Gelenkflächen
2. kapsulo- ligamentäre Strukturen
3. Muskeln
4. Schwerkraft
5. innere Kraft
6. äußere Kraft.

Die aufgezählten Punkte unterliegen keiner speziellen funktionalen Hierarchie, so dass je nach Art der Bewegung und Belastung die Dominanz eines Faktors zu- oder abnehmen kann. Das Einwirken verschiedener mechanischer Momente, wie z.B. statische Belastung oder kinetische Beanspruchung, führen zu einem unterschiedlichen Verschleiß der Gelenke. Es entstehen Veränderungen der Druckverteilung im Bereich der Kontaktflächen. Hierdurch wird die Form der Gelenkflächen beeinflusst, was wiederum direkt die Funktion bzw. das Bewegungsverhalten der Gelenkpartner beeinflusst (HACKENBROCH et al. 1983, HOFER 1957). Die komplementäre Beziehung von Form und Funktion kommt hier zum Ausdruck (KLEIN et al. 2004).

Einleitung

1.3.1 Aufbau eines Wirbels

Alle menschlichen Wirbel, mit Ausnahme des 1. und 2. Halswirbels (Atlas, Axis), entsprechen einem gemeinsamen Konstrukt, das eine Gliederung in fünf Bauelemente zulässt, beschrieben von SCHÜNKE et al. (1987/ 2005). Hiernach setzt sich ein Wirbel zusammen aus:

1. einem Wirbelkörper (Corpus vertebrae)
2. einem Wirbelbogen (Arcus vertebrae)
3. einem Dornfortsatz (Proc. spinosus)
4. zwei Querfortsätzen (Procc. transversi bzw. costales bei den LWK)
5. vier Gelenkfortsätzen (Procc. articulares).

Die Gelenkfortsätze dienen den Bändern und Muskeln als Ansatzpunkt und sind im Bereich der Brustwirbelkörper an der Bildung der Rippenwirbelgelenke, bestehend aus der *Articulatio costotransversaria* und der *Articulatio capitis costae*, beteiligt. Der Wirbelkanal wird nach ventral vom *Corpus vertebrae* und nach dorsal vom *Arcus vertebrae* umschlossen. Im Wirbelkanal zieht der Rückenmarksstrang nach kaudal. Der Durchmesser des Rückenmarkes, der von kranial nach kaudal abnimmt, korreliert mit dem des Wirbelkanals. Im Gegensatz zum Wirbelkanal werden die Wirbelkörper von kranial nach kaudal immer größer. Hier wird eine Anpassung an zunehmende biomechanische Belastungen durch das steigende Körpergewicht widergespiegelt.

Wie zuvor erwähnt, nehmen der 1. und 2. Halswirbel eine Sonderstellung unter den insgesamt sieben Halswirbeln ein. Aufgrund der besonderen Morphologie können diese Wirbel die Hauptlast des Kopfes tragen und ermöglichen gleichzeitig eine Bewegung in drei Ebenen, wodurch funktionell Bewegungsausmaße ähnlich denen eines Kugelgelenkes erreicht werden.

Die restlichen fünf Halswirbel fallen durch einen verhältnismäßig kleinen Wirbelkörper und ein großes, dreieckiges *Foramen vertebrale* auf. Die Endflächen sind sattelförmig gekrümmt und die Deckplatten zeigen am seitlichen Rand Erhebungen, die auch als *Unci corporis vertebrae* oder *Procc. uncinati* bezeichnet werden.

Einleitung

Der Proc. transversus setzt sich aus einer dorsalen und einer ventralen Spange zusammen, welche zusammen das Foramen transversarium (Foramen proc. transversi) umschließen. Durch dieses Foramen läuft ab dem 6. Halswirbel die Arteria vertebralis beidseits nach kranial. Auf der kranialen Fläche des Querfortsatzes findet sich ab dem 3. Halswirbel der sog. Sulcus nervi spinalis, durch den der jeweilige Spinalnerv den Rückenmarkskanal verlässt.

Der Wirbelbogen setzt sich aus zwei symmetrischen Hälften zusammen, die dorsal in der Medianebene miteinander verschmelzen und in den Proc. spinosus übergehen.

Der Dornfortsatz des 7. Halswirbels ist im Vergleich zu den Procc. spinosi der anderen Wirbel lang und durch die Haut gut zu tasten, weshalb er auch als Vertebra prominens bezeichnet wird und bei der klinischen Untersuchung der Wirbelsäule eine wichtige Orientierungshilfe darstellt.

Der Wirbelbogen wird in einen vorderen und einen hinteren Abschnitt unterteilt. Der ventrale Abschnitt wird als Pediculus arcus vertebrae bezeichnet, während der dorsale Anteil als Lamina arcus vertebrae beschrieben wird. Im Bereich des Pediculus arcus vertebrae findet sich ein oberer (Proc. articularis superior) und ein unterer (Proc. articularis inferior) Gelenkfortsatz. Die Gelenkfortsätze der Halswirbelsäule sind breit, flach und neigen sich um ca. 45° gegen die Horizontale. Die Facies articulares superiores richten sich nach hinten oben, während die Facies articulares inferiores nach vorne unten abfallen (TILLMANN et al. 1985, TÖNDURY 1981). Die Wirbelbogengelenke werden als Articulationes zygapophysiales bezeichnet.

1.3.2 Funktionelle Anatomie der Bandscheibe

Die Bandscheiben, als integrierter Bestandteil des Bewegungssegmentes, sind maßgeblich an der Beweglichkeit und damit Beanspruchung der Wirbelsäule beteiligt. Insgesamt machen die Zwischenwirbelscheiben ungefähr ein Viertel der Länge des präsakralen Teiles der Wirbelsäule aus.

Der Discus intervertebralis besteht aus einem äußeren Faserring, dem Anulus fibrosus und einem inneren Gallertkern, dem sog. Nucleus pulposus. Innerhalb des Anulus fibrosus lässt sich eine äußere und eine innere Zone voneinander abgrenzen. Die äußere Zone besteht aus bindegewebsähnlichem, zugfestem Gewebe, welches histologisch aus Lamellen von Typ I Kollagenfasern aufgebaut ist. Die Fasern in

Einleitung

dieser Außenzone des Anulus fibrosus überkreuzen sich aufgrund verschiedener Steigungswinkel und verbinden die Randleisten (Epiphysis anularis) zweier benachbarter Wirbel miteinander.

Betrachtet man in diesem Zusammenhang die Lage des Discus intervertebralis im Bewegungssegment, so zeigt sich, dass, bis auf die Außenzone des Anulus fibrosus, die gesamte Bandscheibe sowohl kranial als auch kaudal an die hyaline Knorpelschicht der Grund- bzw. Deckplatte grenzt. Unterhalb des Knorpels, in der subchondralen Schicht, findet man die sog. Facies intervertebralis. Es handelt sich hierbei um eine aus kompaktem Knochen bestehende Schicht, die siebartig von vielen kleinen Poren durchzogen ist. So wird eine Verbindung zu den Knochenmarksräumen der Wirbelkörper hergestellt und die Ernährung der Bandscheibe nach dem Prinzip der Diffusion gewährleistet.

Die Hauptfunktion der Bandscheibe besteht in der gleichmäßigen Druckverteilung innerhalb eines Bewegungssegmentes, besonders hinsichtlich axial einwirkender Stauchungskräfte. Aus mechanischen Gesichtspunkten entspricht die Bandscheibe einem druckelastischen, hydrostatischen System mit einer zugfesten Hülle, gebildet vom Anulus fibrosus. Der wiederum umschließt einen wässrigen, nicht komprimierbaren Inhalt, den sog. Nucleus pulposus (SCHÜNKE et al. 2005), der zum überwiegenden Teil aus Typ II Kollagenfasern besteht. Diese Glykosaminoglykane setzen sich aus Chondroitin-6-sulfat und Keratansulfat zusammen, das im Alter durch Dermatansulfat ersetzt wird. Aufgrund des hohen Anteils von Glykosaminoglykanen im Nucleus pulposus besitzt dieser die Fähigkeit, bis zu 80 % Wasser zu binden. Der Nucleus pulposus dient somit mechanisch als Puffer bzw. als hydraulische Presse. In Kombination mit dem Anulus fibrosus entsteht funktionell ein Stoßdämpfer, der die in der Wirbelsäule auftretenden Druckkräfte gleichmäßig auf die angrenzenden Grund- bzw. Deckplatten verteilt.

Im Rahmen der alltäglichen Belastung, besonders aber bei lang andauernder, schwerer körperlicher Beanspruchung, kommt es durch den permanenten mechanischen Druck zu einem Flüssigkeitsverlust der Bandscheibe. Dieser Verlust äußert sich in einer Höhenminderung des Discus intervertebralis, was über eine druckabhängige Flüssigkeitsverschiebung, auch Konversion genannt, zu einer Reduktion der Körpergröße bis zu 2 cm innerhalb von 24 Stunden führen kann. Die beschriebene Entwicklung wird durch Entlastung der Wirbelsäule rückgängig gemacht, z.B. während des Schlafes, wenn die verlorene Flüssigkeit über die

Einleitung

subchondralen Gefäße der Knochenmarksräume wieder zugeführt wird. Dem aktuellen Stand der Wissenschaft entsprechend wird hierfür im Mittel eine Dauer von fünf Stunden pro Tag benötigt.

Die Bandscheibenniedrigung führt zu einem Stabilitätsverlust, dem solange keine weitere Bedeutung zukommt, wie die autochthone Rückenmuskulatur die Insuffizienz der passiven Verspannungsstrukturen kompensieren kann. Ist eine muskuläre Kompensation nicht mehr möglich, kann daraus ein Bandscheibenvorfall resultieren.

1.3.3 Das ligamentäre System

Eine belastungsfähige, stabile Verbindung der einzelnen Wirbel wird durch die zahlreichen Bandstrukturen der Wirbelsäule gewährleistet. Als Ergebnis multipler und äußerst komplexer, symbiotischer Funktionen wird eine hohe mechanische Stabilität erreicht.

Der Bandapparat unterteilt sich in Wirbelkörper- und Wirbelbogenbänder. Zu den Wirbelkörperbändern gehört das Ligamentum longitudinale anterius und das Lig. longitudinale posterius, während zu den Wirbelbogenbändern die Ligg. flava, Ligg. interspinalia, Ligg. intertransversaria und das Lig. supraspinale sowie das Lig. nuchae zählt.

Das Lig. longitudinale anterius zieht vom Atlas und Os occipitale kommend ventral über die Wirbelkörper bis zum 1. Kreuzwirbel. Funktionell verbindet es die Wirbelkörper und hemmt die Extension des Rumpfes. Das Lig. longitudinale posterius zieht dorsal über die Wirbelkörper hinweg und ist dabei mit den Disci intervertebrales verwachsen. Funktionell begrenzt es die Flexion des Rumpfes und sichert die Zwischenwirbelscheiben.

Die Ligg. flava verlaufen zwischen den angrenzenden Wirbelbögen. Sie bestehen aus elastischen Fasern, die bereits in Ruhestellung gespannt sind. Bei einer Flexionsbewegung der Wirbelsäule nimmt die Spannung weiter zu und unterstützt so die Extension aus der Beugung heraus.

Die Ligg. intertransversaria spannen sich zwischen den Procc. transversi und begrenzen die Seitwärtsbeugung zur Gegenseite. Diese Bänder können im Bereich der Halswirbelsäule fehlen.

Das Lig. interspinale befindet sich zwischen zwei benachbarten Procc. spinosi und hemmt die Beugung des Rumpfes.

Einleitung

Das Lig. supraspinale zieht, beginnend auf Höhe des 7. Halswirbels, über die Spitzen der Procc. spinosi zum Os sacrum. Durch die Verbindung mit den Procc. spinosi wird auch durch dieses Band die Flexion des Rumpfes gehemmt.

Das Lig. nuchae, auch Nackenband genannt, ist eine bindegewebsartige Platte, die von der Protuberantia occipitalis externa des Os occipitale zu den Procc. spinosi der Halswirbelsäule verläuft. Funktionell ist es sowohl ein weiterer Antagonist der Flexionsbewegung, als auch ein Muskelseptum, das wiederum als Ursprungs- und Ansatzpunkt für verschiedene andere Muskeln dient.

1.3.4 Das Uncovertebralgelenk

Der Begriff des Uncovertebralgelenkes ist nicht einheitlich definiert. Bezeichnen manche Autoren lediglich die Rissbildung im Bereich der Zwischenwirbelscheiben der HWS als Uncovertebralgelenk und übergehen dabei die Procc. uncinati, so sehen andere in dem Begriff die Beschreibung einer funktionellen Einheit ähnlich dem Bewegungssegment, bestehend aus Processus uncinatus, der unteren Abschlussplatte des darüber gelegenen Halswirbelkörpers und der Zwischenwirbelscheibe.

In der vorliegenden Studie soll, in Anlehnung an LUSCHKA (1858), letztere Begriffsauslegung Anwendung finden, da die Komplexität der stattfindenden morphologischen und pathologischen Geschehnisse ausdrückt, dass hier eine Vielzahl verschiedener anatomischer Strukturen funktionell eng miteinander verknüpft sind und diese Funktionalität auch begrifflich erfasst werden soll.

Entwicklungsgeschichtlich kommt es nach der Verschmelzung von Wirbelbogen und Wirbelkörper zunächst zu einer Höhenzunahme der Procc. uncinati, wodurch die charakteristische sog. „Kochtopfform“ der Halswirbelkörper zur Ausprägung kommt. Die Entwicklung dieser, für den unteren Teil der Halswirbelsäule typischen Wirbelform ist Teil des physiologischen Umbaus als Zeichen der Anpassung an die spezifische Belastung (JUNGHANNS 1979/ 1986, ECKLIN 1960, TÖNDURY 1981).

Der Winkel, in dem die Procc. uncinati zur horizontalen, kranialen Kante des Wirbelkörpers stehen, flacht mit fortschreitendem Lebensalter ab. Dies geschieht laut LUSCHKA (1858) und BAERTSCHI-ROCHAIX (1949) aufgrund einer Überbelastung des uncovertebralen „Stützgelenkes“. Dieses gibt als Folge einer erhöhten

Einleitung

biomechanischen Belastung nach und fällt in eine statisch ungünstigere Schräglage. Diesem Prozess wird zunächst durch eine örtliche, subchondrale Sklerosierung sowie durch eine kolbenartige Verdickung der Fortsätze entgegengewirkt. Häufig kommt es dennoch zu einem kompletten „Abkippen“ der Procc. uncinati und den damit verbundenen Komplikationen im Sinne einer Kompression angrenzender Strukturen in den Foramina intervertebralia. Es können sowohl die Arteria oder Vena vertebralis betroffen sein als auch das Spinalganglion, der entsprechende Spinalnerv oder ein Teil des vegetativen Nervensystems (THOMAS 1979). Kann die Uncovertebralregion die Aufgabe des Stützgelenkes nicht mehr erfüllen, so übernehmen die zentralen Wirbelkörperendplatten die Tragfunktion. Als Ausdruck der gesteigerten Belastung lässt sich dort im Laufe der Zeit ebenfalls eine vermehrte Sklerosierung nachweisen. Das Resultat sind zum Teil erhebliche Bewegungseinschränkungen, zurückzuführen auf eine durch die andauernden Umbauprozesse veränderte Statik der unteren Halswirbelsäule.

Zeitgleich mit den beginnenden Veränderungen im Bereich der Procc. uncinati lassen sich gegen Ende des ersten Dezenniums Spaltbildungen im Bereich der Zwischenwirbelscheiben finden. Bei diesen, zunächst ausschließlich lateral vorkommenden Fissuren der Disci intervertebrales, handelt es sich um sekundäre Einrisse in gesundem Bandscheibengewebe (TILLMANN et al. 1985). Die uncovertebrale Spaltbildung ist zum Teil als physiologischer Anpassungsprozess an die besonderen mechanischen Belastungen innerhalb der unteren Halswirbelsäule zu sehen. Die Einrisse im lateralen Bereich der Bandscheiben erhöhen das zulässige Maß an Beweglichkeit einerseits, sind aber auch für eine stetig fortschreitende Gefügelockerung verantwortlich. Auf diesem Wege kommt es zu einer über das physiologische Maß hinausgehenden Lockerung der Bewegungssegmente, was zu einer Instabilität führen kann (TÖNDURY 1981).

Der Nachweis der Uncovertebralspalten beginnt mit der Ausbildung der Procc. uncinati, also nach stattgefundener Verschmelzung der Wirbelbögen mit den Wirbelkörpern. Der Entstehungsmechanismus beruht auf sich verändernden biomechanischen Belastungen im Bereich der unteren HWS. Im Wesentlichen ist diese Veränderung auf die Ausbildung der Halslordose im kindlichen Alter zurückzuführen. Hierbei verschiebt sich das Zentrum der Krümmungszone der Halslordose und der Punkt der maximalen Belastung verlagert sich auf die Höhe des

Einleitung

3. bis 5. Halswirbelkörpers. TÖNDURY (1981) hat beschrieben, dass es in diesem Bereich der HWS zuerst zur Ausbildung der Spaltbildungen kommt. Bedingt durch die starken Scherkräfte, die besonders bei der Lateralflexion (PUTZ 1981) sowie der Rotation entstehen, kommt es schließlich zu einem Einreißen der lateralen Lamellen. Zu Beginn sind die am seitlichen Rand liegenden Uncovertebralspalten glatt begrenzt und verlaufen sich zum Mittelpunkt der Bandscheibe diffus. Im Laufe der weiteren Entwicklung lässt sich häufig ein kontinuierliches Fortschreiten der Risse in Richtung Zentrum beobachten.

Durch die Entstehung und das Fortschreiten der Uncovertebralspalten wird eine zunehmende Gefügelockerung innerhalb der Bewegungssegmente initiiert, die durch die Längsbänder und die zuvor beschriebenen Bänder der Wirbelbögen sowie die ausgeprägte Halsmuskulatur stabilisiert wird. Es wird hier der direkte Einfluss der Uncovertebralspalten und -gelenke auf die Kinematik der gesamten Halswirbelsäule ersichtlich.

Die Zwischenwirbelscheiben der unteren HWS sind flach und die Spaltbildung schreitet häufig mit zunehmendem Lebensalter in Richtung Nucleus pulposus fort. Pathogenetisch ist hier die Ursache für einen Großteil der cervikalen Bandscheibenvorfälle im frühen Erwachsenenalter zu sehen. Kommt es zu einer sich bis in die Gallertkernhöhle ausdehnenden Rissbildung und der Kern des Nucleus besitzt noch weiche bzw. wässrige Anteile, so wird ein prolabieren des Gallertkerns durch die fehlende Begrenzung des Faserrings möglich und ein Bandscheibenvorfall entsteht. Das Risiko, einen solchen Discusprolaps zu erleiden, sinkt mit zunehmendem Lebensalter, da dem Nucleus pulposus ab dem ca. 30 Lebensjahr zunehmend Wasser entzogen wird. Hierdurch kommt es zu einer beginnenden Dehydratation bzw. Degeneration mit Verlust an Elastizität, wodurch die Wahrscheinlichkeit eines Prolapses deutlich reduziert wird (TÖNDURY 1981).

Einleitung

1.4 Entwicklung und Aufbau des menschlichen Knochens

1.4.1 Architektur des Knochengerüsts

Die Geschichte der Erforschung des funktionellen Knochenaufbaus bzw. der unmittelbaren Auseinandersetzung mit morpho-physiologischen Abläufen im knöchernen Skelett beginnt mit der von MEYER (1867) angestellten Beobachtung der trajektoriiellen Anordnung der Spongiosa Mitte des 19. Jahrhunderts.

Die Entwicklung einer spannungsoptischen Untersuchungsmethode durch PAUWELS (1965) ermöglichte erstmals die experimentelle Überprüfung dieser Theorie.

Pauwels hatte damals ein System entwickelt, welches es ihm ermöglichte, Röntgenbilder mit der spannungsoptisch ermittelten Beanspruchung von Knochen zu vergleichen. Er setzte hierbei voraus, dass der Grad der Filmschwärzung des Röntgenbildes direkt proportional zur durchleuchteten Knochendichte und Materialmenge war. Dabei fand er heraus, dass eine qualitative Übereinstimmung der Knochendichte mit der Verteilung der Spannungsgrößen im Versuchsmodell vorlag und entwickelte daraus den Begriff des „verkörperten Spannungsfeldes“.

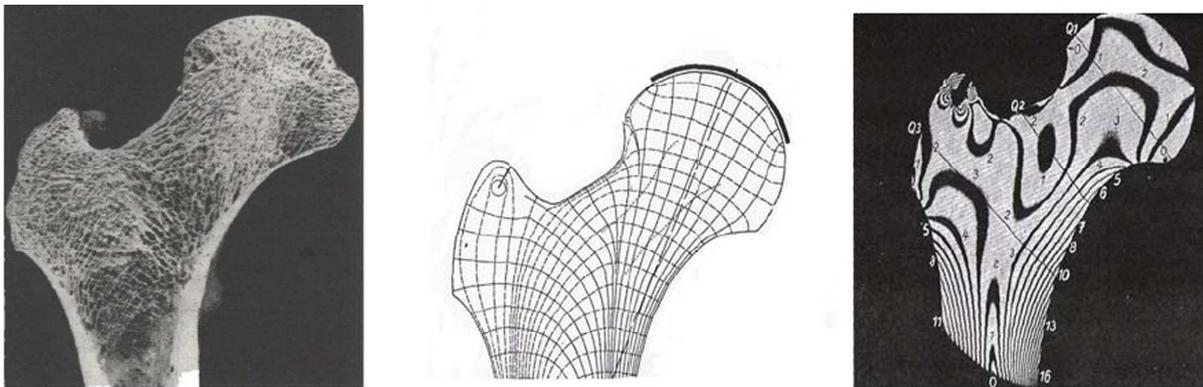


Abb. 1: Spannungsoptisches Modell und der daraus abgeleitete theoretische Trajektorienverlauf nach PAUWELS (1965)

Pauwels erkannte, dass eine positive Korrelation zwischen dem lokalen Knochenumbau und der lokalen Spannungsgröße vorlag. Seine Erkenntnisse in Bezug auf den funktionellen Bau des Knochens waren der praktische Beweis des im menschlichen Knochen zur Anwendung kommenden „Minimum-Maximum Gesetzes“ nach Roux. Dieses besagt, dass Knochen nach einem „ökonomischen“

Einleitung

Bauprinzip mit größtmöglicher Materialersparnis gebaut sind. Demnach wird mit einem Minimum an Material ein Maximum an Festigkeit erzielt.

Die im menschlichen Körper auf diese Weise umgesetzte Leichtbauweise setzt voraus, dass es im System keine Schwachstellen gibt. Da Knochen so konzipiert sind, dass sie primär auf Sicherheit und sekundär auf Leichtbau ausgelegt sind, muss das Gewebe unter physiologischen Bedingungen der auftretenden Höchstbeanspruchung an jeder Stelle standhalten können (TILLMANN et al. 1985, TÖNDURY 1981). Technisch ausgedrückt handelt es sich um einen Körper gleicher Festigkeit, sprich um ein Stützelement ohne Schwachstelle, auch wenn sein Gewebsaufbau inhomogen ist.

An der funktionellen Anpassung des Knochens, bezogen auf die einwirkenden Biegungs-, Zug- und Druckkräfte, sind die Substantia compacta und die Substantia spongiosa gleichermaßen beteiligt. Wird ein massives Stützelement wie z.B. ein Wirbelkörper durch Biegung beansprucht, so lassen sich die höchsten Spannungen an den Randbereichen nachweisen. Demzufolge findet sich am Rand des Stützelementes eine besonders kräftige Substantia compacta. Zum Kern des Wirbelkörpers zeigt sich eine kontinuierliche Abnahme der Spannung, was bedeutet, dass an dieser Stelle, unter dem Gesichtspunkt der Ökonomie, Baumaterial eingespart werden kann. Die Substantia spongiosa passt sich an die vorherrschende Beanspruchung auf verschiedene Weise an. Es wird einerseits eine Anpassung in der Materialmenge und -verteilung erkennbar, andererseits ist ebenso die Ausrichtung der Spongiosaelemente von entscheidender Bedeutung. Die Trabekel der Spongiosa richten sich so aus, dass sie nur auf Druck oder Zug beansprucht werden. Skelettelemente, die sowohl großen Druck- als auch Zugkräften ausgesetzt sind, zeigen eine sog. trajektorielle Bauweise. Trajektorien zeigen den Verlauf von Druck- (Kompression) und Zugspannungen (Dehnung) an. Da in einem solchen sog. trajektorialen System ausschließlich Druck- und Zugspannungen existieren, wird unter physikalischen Gesichtspunkten von einem sog. biegungsfreien System gesprochen. Betrachtet man beispielsweise einen Medianschnitt durch einen Lendenwirbelkörper, so fällt auf, dass die Substantia spongiosa in Form eines trajektorialen Fachwerkes angeordnet ist. Die Anordnung der Druck- und Zugtrabekel entspricht dem Verlauf der Druck- und Zugtrajektorien im spannungsoptischen Modell nach Kummer (TÖNDURY 1981).

Einleitung

1.4.2 Definition und Morphologie des subchondralen Knochens

Der Begriff des subchondralen Knochens ist in der Vergangenheit für die Umschreibung verschiedener anatomischer Strukturen in Gelenknähe verwendet worden.

So umfasst die subchondrale Knochenplatte z.B. bei DUNCAN et al. (1987) und bei CLARK et al. (1990) die kalzifizierte Zone des Gelenkknorpels und die darunter befindliche Schicht des lamellaren Knochens. BÖHRINGER et al. (1995) hingegen schließen in ihre Umschreibung der subchondralen Knochenplatte noch die subartikuläre Spongiosa mit ein.

Der vorliegenden Studie wird die Definition der subchondralen Knochenplatte von MILZ et al. (1994) und PUTZ (1993) zugrunde gelegt. Hier wird in Anlehnung an WHITEHOUSE et al. (1993) die Zone des kalzifizierten Gelenkknorpels und die direkt daran angrenzende Knochenplatte als funktionelle Einheit aufgefasst und „subchondrale Mineralisierungszone“ genannt.

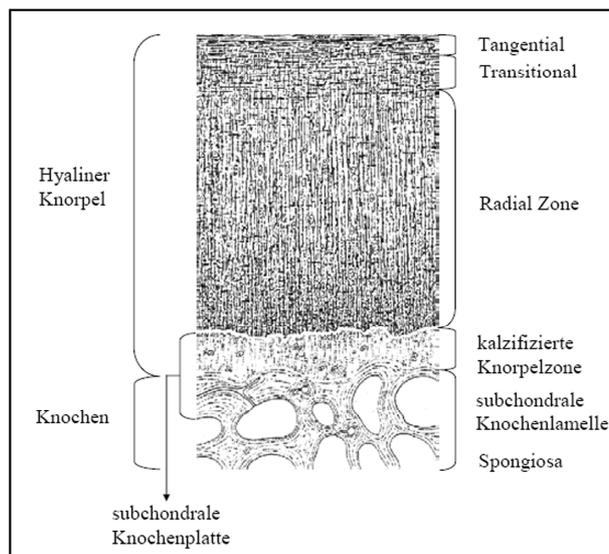


Abb. 2: Schematische Darstellung des Gelenkknorpels mit der angrenzenden subchondralen Knochenplatte (MÜLLER-GERBL 1998)

In der vorliegenden Arbeit beschreibt der Begriff der „subchondralen Knochenplatte“ (SCBP) demnach die kalzifizierte Zone des Gelenkknorpels inklusive der direkt darunter gelegenen Zone des lamellaren Knochens.

Ein weiterer bedeutender Aspekt bei der Auseinandersetzung mit der subchondralen Knochenplatte ist die Dichteverteilung innerhalb dieses Bereiches. Knochen ist in der

Einleitung

Lage, sich variierenden funktionellen und mechanischen Beanspruchungen anzupassen. Beschrieben wurde diese Anpassungsfähigkeit des Knochens erstmals im Wolff'schen Transformationsgesetz (WOLFF 1892). Demnach besteht ein physiologisches Fließgewicht zwischen Knochenaufbau und Knochenabbau. Eine vermehrte Belastung bzw. Beanspruchung hat einen gesteigerten Knochenanbau zur Folge, ebenso erzeugt eine reduzierte Beanspruchung eine gesteigerte Knochenresorption. Dieser allgemeingültige Regelkreislauf gilt in besonderem Maße für die subchondrale Knochenplatte. Der Knochen verhält sich in diesem Zusammenhang ähnlich der Skelettmuskulatur des Menschen. Gesteigerte Belastung resultiert in einer Hypertrophie der Muskulatur. Ebenso lässt sich im Knochen eine Zunahme der Dichtemaxima am Punkt der höchsten Beanspruchung nachweisen. Heutzutage gelten die beschriebenen Wechselwirkungen zwischen Beanspruchung und Mineralisierungsverteilung als wissenschaftlich gesichert (CARTER 1984, KUMMER 1962, PAUWELS 1965, MÜLLER-GERBL et al. 1990). Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass man über die Analyse der Dichtemaxima und Verteilungsmuster im Bereich der subchondralen Knochenplatte Rückschlüsse auf die mechanische Belastung ziehen kann. Die regionale Mineralisierungs- und Dichteverteilung der subchondralen Knochenplatte kann demnach als eine morphologische Antwort auf lokale Langzeitbeanspruchungen angesehen werden (PUTZ 1981, MILZ et al. 1994, MÜLLER-GERBL et al. 1990/ 1993).

Nach Anetzberger hängt die Beanspruchung der subchondralen Knochenplatte indirekt ebenso von der Größe und Lage der Kontaktflächen ab wie von der Höhe und Positionierung der Gelenkresultierenden (ANETZBERGER et al. 1995). Diese drei Faktoren beeinflussen die Spannungsverteilung im Bereich der Gelenkfläche, wodurch nach Ablauf eines entsprechenden zeitlichen Rahmens die charakteristischen Verteilungsmuster der subchondralen Mineralisierungsverteilung zustande kommen. Abb. 3 auf der folgenden Seite veranschaulicht die Zusammenhänge.

Einleitung

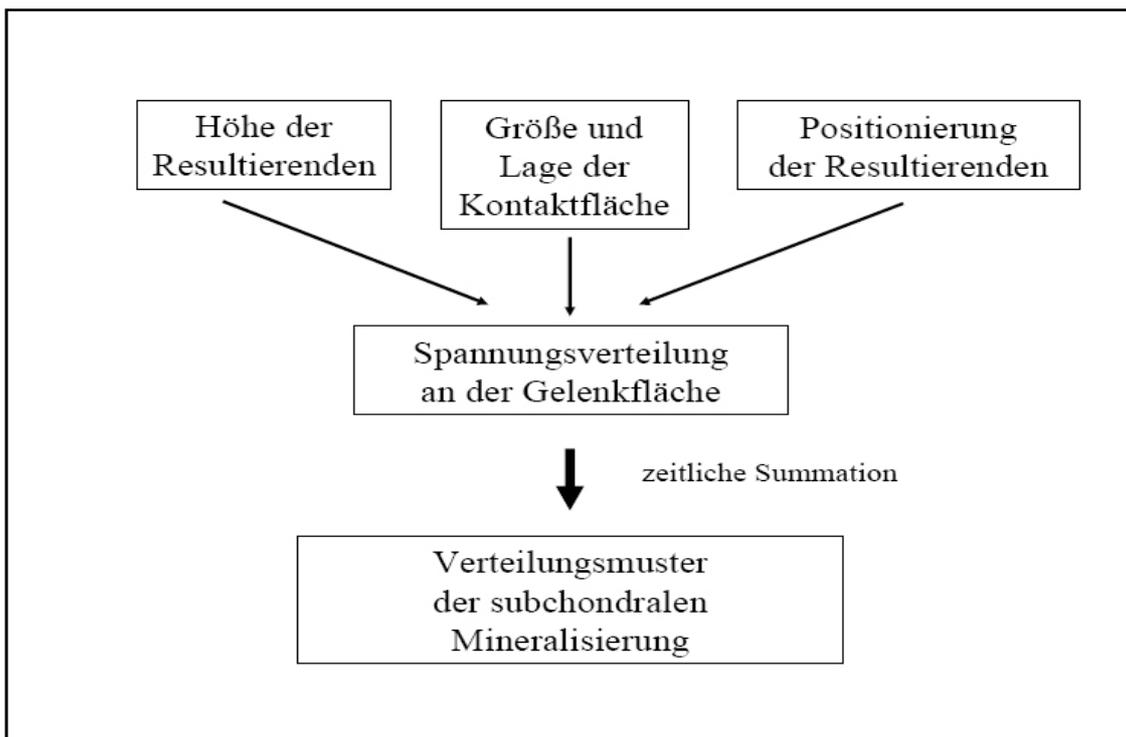


Abb. 3: Spannungsverteilung direkt an der Gelenkfläche in Abhängigkeit von drei Faktoren: Höhe und Positionierung der Gelenkresultierenden sowie Größe und Lage der Kontaktflächen (ANETZBERGER et al. 1994)

Es existieren verschiedene Methoden und Verfahren zur flächenhaften Darstellung der Mineralisierungsverteilungen der subchondralen Knochenplatte.

Mit Hilfe der sog. CT-Osteoabsorptiometrie (CT-OAM) konnten MÜLLER-GERBL et al. (1993) eine erhöhte subchondrale Knochenmineralisierung im Schultergelenk von Turnern nachweisen. Es wurde herausgefunden, dass sich im Vergleich zur Normalbevölkerung, bei der sich im Regelfall zwei Dichtemaxima in der Cavitas glenoidalis finden, bei Turnern ein großes, zentral gelegenes Dichtemaximum findet. Dieses zentrale Maximum ist Ausdruck einer erhöhten Beanspruchung, die eine Knochendichtezunahme hervorruft.

Resultate weiterer Studien unterstreichen die erzielten Ergebnisse. So ließ sich z.B. im Kniegelenk bei Varusfehlstellung der unteren Extremität eine höhere Knochendichte im Bereich des stärker belasteten medialen Tibiaplateaus nachweisen (NOBLE et al. 1985, MÜLLER-GERBL et al. 1990/ 1992, ANETZBERGER et al. 1995).

Diese Studien belegen, dass erhöhte Beanspruchungen, seien sie auf eine Zunahme des Körpergewichtes oder auf eine vermehrte körperliche Beanspruchung, z.B. im

Einleitung

Sinne einer gesteigerten sportlichen Aktivität, zurückzuführen, zu einer Zunahme der Knochendichte führen (JONES et al. 1977, NILSSON et al. 1971). Im Gegensatz dazu steht die Reduktion der Knochendichte durch schwindende körperliche Anstrengung bzw. Aktivität (ISSEKUTZ et al. 1966, DONALDSON et al. 1970, WHEDON 1984).

Die lebenslang stattfindenden Umbauprozesse im menschlichen Körper sind somit als Ausdruck einer Anpassungsreaktion an die Lebensumstände und die stattgehabte Langzeitbelastung eines jeden Individuums zu interpretieren.

1.5 Darstellung subchondraler Mineralisierung

1.5.1 Röntgendensitometrie

Das konventionelle Röntgenbild eignet sich in erster Linie zur Beurteilung morphologischer Befunde und weniger zur Messung des Mineralgehaltes, da bei einer rein optischen Auswertung erst eine Abnahme des Mineralgehaltes von ca. 30 % im Röntgenbild sichtbar wird.

Eine Alternative stellt die Röntgendensitometrie dar, bei der ein definiertes Referenzmaterial mit abgebildet wird und eine photometrische Auswertung der Schwärzung erfolgt. Mit Hilfe dieser Methode lässt sich der Mineralgehalt des Knochens auf bis zu 3-5 % genau bestimmen.

Zurückzuführen ist diese Methode wiederum auf die von Pauwels erstmals angestellten Untersuchungen seines „verkörperten Spannungsfeldes“. Hierauf wurde bereits in Kapitel 1.4.1 genauer eingegangen.

KNIEF (1967) entwickelte schließlich eine Methode zur densitometrischen Bestimmung von Materialverteilungen anhand von Röntgenbildern im Bereich des proximalen Femurendes. Hierbei wurden unterschiedliche Intensitäten der Schwärzung des Röntgenbildes über einen definierten Graukeil in eine Dichteverteilung umgerechnet. Der Nachteil dieser Methode lag in dem äußerst zeitaufwendigen und komplizierten Messverfahren.

KONERMANN (1970) entwickelte ein Verfahren zur direkten photographischen Dichtemessung in Röntgenbildern, das ebenfalls eine Darstellung der Materialverteilung zuließ. Es wurden sog. Äquidensiten, Zonen gleicher Schwärzung, durch einen Spezialfilm direkt photographisch dargestellt.

Einleitung

SCHLEICHER et al. (1980) gelang es, diese sog. Äquidensitenmethode weiterzuentwickeln. Es wurde erstmals das mechanische Scannen und quantitative Analysieren des Röntgenbildes ermöglicht. Die Filmschwärzung wurde hierbei über ein Bildanalysegerät erfasst und computertechnisch ausgewertet.

Nachteil aller erwähnten Methoden war jedoch die begrenzte quantitative Aussagekraft über die Dichteverteilung im Knochen. Hinzu kam, dass das Material für die Untersuchung in planparallele Schnitte zerlegt werden musste. Das bedeutete einerseits, dass man das Untersuchungsmaterial nur einmal verwenden konnte und andererseits auch, dass eine in vivo Anwendung nicht möglich war. Erschwerend wirkte sich zusätzlich der hohe Zeitaufwand für die Anfertigung der Schnitte sowie das Erstellen der Röntgenbilder aus. Das mühsam hergestellte Produkt war ein Summationsbild und somit ließen sich kaum Aussagen über die flächenhafte Beanspruchung einer Gelenkfläche treffen.

Die Entwicklung des Verfahrens der CT-Osteoabsorptiometrie (CT-OAM) von MÜLLER-GERBL et al. (1990) ermöglichte es erstmals, die Mineralisierungsverteilung im subchondralen Knochen flächenhaft darzustellen und gleichzeitig die gewonnenen Daten schnell und einfach zu analysieren.

Auf die zur Anwendung kommende Technik wird sowohl im folgenden Abschnitt als auch in Kapitel 3 ausführlich eingegangen.

1.5.2 CT-Osteoabsorptiometrie

Die Entwicklung der Computertomographie durch Hounsfield und Cormack im Jahre 1971 bildet die Grundlage der CT-Osteoabsorptiometrie.

Mit der Computertomographie wurde ein spezielles Röntgenschnittaufnahmeverfahren entwickelt, das sich im Bildaufbau von allen bis zu diesem Zeitpunkt verwendeten klassischen, nach dem Verwischungsprinzip funktionierenden Verfahren unterscheidet.

Das Prinzip der Computertomographie beruht auf einer Röntgenröhre und einem speziellen Blendensystem, wodurch ein schmaler, sog. Fächerstrahl produziert wird. Dieser Fächerstrahl wird innerhalb des Körpers, in Abhängigkeit von den durchleuchteten Strukturen, verschieden abgeschwächt. Eine Vielzahl von

Einleitung

Detektoren, zusammengeschlossen im sog. Detektorkranz, empfängt die abgeschwächte Röntgenstrahlung, führt die elektronische Aufarbeitung durch und schickt die gewonnenen Daten an einen Rechner. Während dieser Signalakquisition rotieren Röntgenröhre und der Detektor, die fest miteinander verbunden sind, um das Objekt. Der gleichzeitige konstante Tischvorschub ermöglicht die kontinuierliche Datenaufnahme eines Objektes, wodurch man in der Lage ist, sog. Spiralaufnahmen anzufertigen. Es werden verschiedene Projektionen derselben Schicht erzeugt, die per Computer zu einem Bild zusammengefügt werden. Dieses Bild spiegelt die Verteilung der Schwächungswerte in der durchstrahlten Körperschicht wider. Die Schwächungswerte werden digital vom Computer verarbeitet und in verschiedene Grautöne umgewandelt, die wieder zu einem Bild zusammengesetzt werden. Die Schwächungswerte werden nach dem Erfinder in Hounsfield-Einheiten (HE) angegeben, sind auf Wasser bezogen (0 HE) und sollten als Grautonskala jedem Bild beigefügt sein. Die gewonnenen Dichtewerte ermöglichen eine Gewebe- bzw. Stofferkennung:

Substanz / Stoff	Hounsfield-Einheiten (HE)
Luft	-1000
kalzifizierter Knochen	bis 500
Fett	-50
koaguliertes Blut	20 - 30

Tab. 1: Zuordnung von HE zu bestimmten Substanzen/ Stoffen

Aus den digitalisierten CT-Datensätzen wird mit Hilfe der CT-Osteoabsorptiometrie (CT-OAM) die subchondrale Mineralisierungsverteilung berechnet und kann flächenhaft und bildlich dargestellt werden (MÜLLER-GERBL et al. 1990/ 1992/ 1998).

Mit Einführung der CT-Osteoabsorptiometrie wurde ein Verfahren entwickelt, das erstmals zur Anwendung in vivo geeignet war und sich somit von der limitierten Anwendung vorheriger Methoden deutlich abgehoben hat.

Eine 1990 von MÜLLER-GERBL et al. durchgeführte direkte Vergleichsstudie an Präparaten, die mittels der CT-OAM und der Röntgendensitometrie untersucht wurden, zeigte, dass die ermittelten Dichteverteilungen beider Verfahren nahezu identisch waren.

Einleitung

1.6 Fragestellung

Das menschliche Uncovertebralgelenk nimmt aufgrund morphologischer, anatomischer und auch funktioneller Besonderheiten eine Sonderstellung unter den Gelenken der Wirbelsäule ein.

Ziel dieser Arbeit ist es, die kontrovers diskutierte Bedeutung der Uncovertebralgelenke und ihre Rolle in der funktionellen Einheit der Halswirbelsäule zu untersuchen.

Die mittels der CT-OAM errechneten subchondralen Mineralisierungsverteilungen der Procc. uncinati und der angrenzenden Grund- und Deckplatten im Bereich der unteren Halswirbelsäule sollen flächenhaft dargestellt und quantitativ ausgewertet werden. Diese Daten sollen zur Interpretation der Funktion und Struktur der Procc. uncinati herangezogen werden.

Ergänzend wurden makroskopische und konventionell radiologische Untersuchungen durchgeführt, um morphologische Besonderheiten des Knochens und der Disci intervertebrales zu dokumentieren und auszuwerten. Besonderes Augenmerk galt hier der Deskription der Uncovertebralspalten und -gelenke.

Da keine Studien existieren, die sich mit den intra- und interindividuellen Verteilungsmustern der subchondralen Knochenschicht von Grund- und Deckplatten der unteren Halswirbelsäule auseinandersetzen, sollen die folgenden Fragen im Rahmen der vorliegenden Arbeit diskutiert und analysiert werden:

1. Lässt sich anhand der Dichtemaximaverteilung im subchondralen Bereich der Uncovertebralgelenke die vor langem aufgestellte, aber nicht wissenschaftlich belegte These, dass es im Laufe der Entwicklung des Menschen zu einem Umbau der Uncovertebralgelenke zu Stützgelenken kommt, bestätigen?
2. Wie gestaltet sich die Mineralisierungsverteilung in der angrenzenden Grund- bzw. Deckplatte? Lassen sich Zonen erhöhter Belastung anhand der Dichtemaximaverteilung nachweisen?

Einleitung

3. Gibt es im Vergleich der Gesamtmineralisierung der Grund- und Deckplatten signifikante Unterschiede?
4. Wie verhalten sich die Mineralisierungsmuster im intra- und interindividuellen Vergleich? Existieren signifikante Unterschiede in der Mineralisierung der rechten gegenüber der linken Hälfte einer Grund- bzw. Deckplatte, die unter Umständen auf eine einseitige Mehrbelastung schließen lassen?
5. Korrelieren die Mineralisierungsverteilungen innerhalb einer sog. korrespondierenden Gelenkeinheit?
6. Stehen die makroskopisch bzw. die nativ-radiologisch erhobenen Daten und Ergebnisse der Auswertungen mit der Mineralisierungsverteilung in Einklang?

2 Material

2.1 Materialauswahl

Für die vorliegende Studie wurden insgesamt 29 Feuchtpräparate (Gesamtkollektiv G1) der Halswirbelsäule untersucht.

Die Präparate entstammen dem Präparierkurs aus dem Jahr 2001, durchgeführt am Anatomischen Institut der Ludwig-Maximilians-Universität München unter der Leitung von Prof. Dr. med. Dr. h. c. R. Putz. Es handelt sich um eine zufällige Auswahl der Präparate. Die Halswirbelsäulen sind in 4 %iger Formalinlösung fixiert worden.

Für die Erstellung der Densitogramme wurden insgesamt 41 Halswirbelkörper bearbeitet. Diese wurden aus insgesamt neun Halswirbelsäulen (G2) entnommen, die aus dem Gesamtkollektiv (G1) ausgesucht wurden. Auswahlkriterien waren der Erhalt und die Vollständigkeit der gesamten Halswirbelsäule.

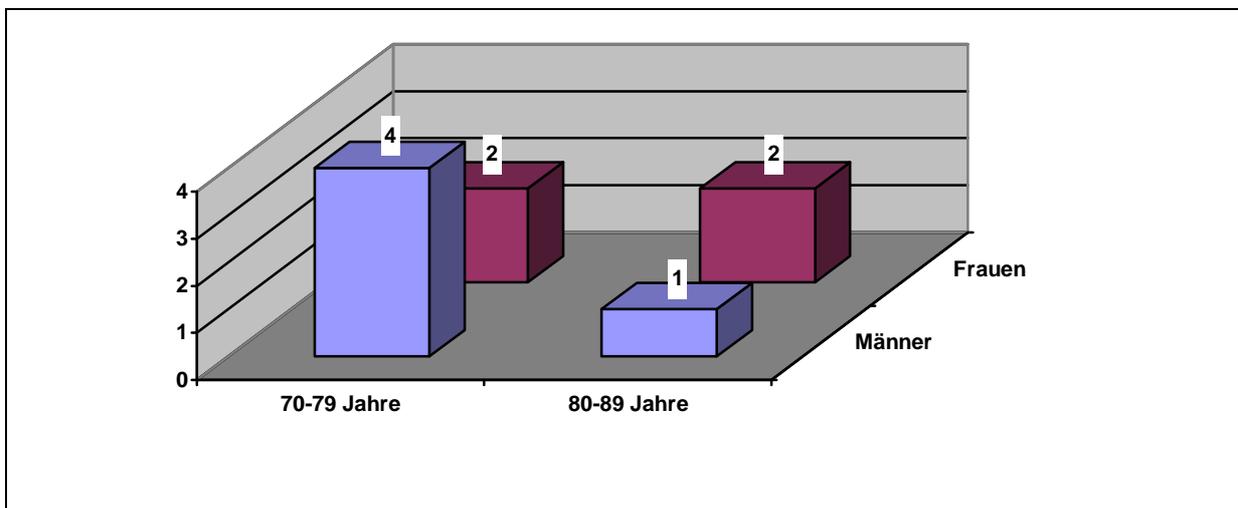


Abb. 4: Altersverteilung im Kollektiv 2 (G2)

Bei den Präparaten des Kollektivs G2 handelt sich um vier weibliche und fünf männliche Individuen. Das durchschnittliche Lebensalter betrug im weiblichen Kollektiv 80 Jahre, im Vergleich zu 79,3 Jahre im männlichen Kollektiv. Die genaue Altersverteilung ist der Abb. zu entnehmen.

Material

Die maximal zu entnehmende Anzahl von 63 Halswirbeln aus neun Halswirbelsäulen wurde durch drei Faktoren reduziert:

1. Der 1. und 2. Halswirbel nehmen im Verbund der Halswirbelsäule sowohl funktionell als auch anatomisch eine Sonderstellung ein. Aus diesem Grund waren sie nicht vergleichbar mit den Wirbeln der unteren HWS und wurden aus der Studie ausgeschlossen.
2. starker arthrotischer Verschleiß
3. Beschädigung eines Wirbels im Rahmen der Präparation

Für die makroskopischen und konventionell radiologischen Untersuchungen wurden insgesamt 20 Präparate verwendet. Diese stammten von neun männlichen und elf weiblichen Individuen und bezeichnen das Kollektiv 3.

Die Altersverteilung ist Abb. 5 zu entnehmen. Im Kollektiv befand sich ein männliches Individuum, dessen Alter unbekannt war.

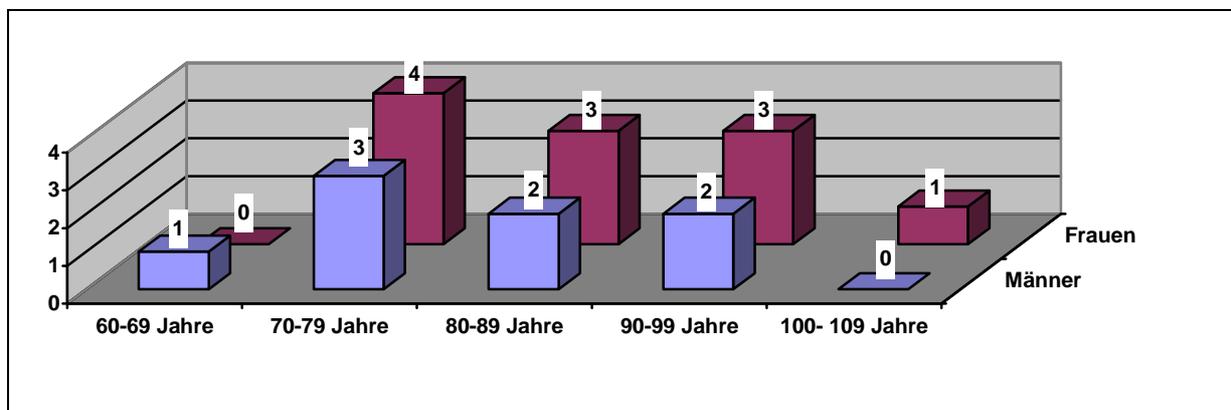


Abb. 5: Altersverteilung im Kollektiv 3 (G3)

Das durchschnittliche Alter im männlichen Kollektiv lag bei 80 Jahren und im weiblichen Kollektiv bei 85,6 Jahren.

Material

2.2 Darstellung aller Patientendaten

2.2.1 Mittels CT-OAM untersuchte Präparate

Lfd. Nr.	Registrierungsnummer	Geschlecht	Geburtsdatum	Sterbedatum	Alter
1	39/01	♂	27.03.1924	14.07.2001	77
2	41/01	♀	16.02.1923	16.01.2001	77
3	48/01	♂	14.09.1916	02.06.2001	84
4	63/01	♀	31.06.1919	07.11.2001	82
5	71/01	♀	21.11.1921	23.10.2001	79
6	85/01	♀	05.04.1919	09.04.2001	82
7	87/01	♂	27.10.1922	04.03.2001	78
8	93/01	♂	14.04.1926	30.12.2001	75
9	104/01	♂	19.02.1931	28.07.2001	70

2.2.2 Makroskopisch und nativ-radiologisch untersuchte Präparate

Lfd. Nr.	Registrierungsnummer	Geschlecht	Geburtsdatum	Sterbedatum	Alter
1	29/01	♀	07.10.1922	01.03.2001	78
2	32/01	♂	12.11.1923	09.03.2001	77
3	36/01	♀	06.06.1912	03.04.2001	88
4	37/01	♂	01.05.1919	04.04.2001	81
5	44/01	♀	20.01.1909	22.04.2001	92
6	47/01	♀	28.02.1916	04.05.2001	85
7	51/01	♀	27.04.1920	08.05.2001	81
8	73/01	♂	26.04.1928	11.07.2001	73
9	75/01	♂	21.05.1910	19.07.2001	91
10	76/01	♂	10.12.1922	20.07.2001	78
11	78/01	♀	10.12.1923	19.07.2001	77
12	80/01	♀	27.05.1900	25.07.2001	101
13	87/01	♀	07.04.1922	26.08.2001	79
14	91/01	♂	28.01.1905	06.09.2001	96
15	93/01	♀	06.02.1911	15.09.2001	90
16	96/01	♂	unbekannt	unbekannt	
17	97/01	♀	31.10.1924	02.10.2001	76

Material

Lfd. Nr.	Registrierungsnummer	Geschlecht	Geburtsdatum	Sterbedatum	Alter
18	108/01	♂	30.09.1940	01.11.2001	61
19	116/01	♂	20.05.1918	26.11.2001	83
20	121/01	♀	07.10.1906	11.12.2001	95

3 Methoden

3.1 Entnahme der Präparate

Insgesamt wurden im Rahmen des Präparierkurses, Sommersemester 2001, 29 Halswirbelsäulen entnommen. Bei der Entnahme der Präparate wurde auf den Erhalt der funktionalen Einheiten innerhalb der Bewegungssegmente geachtet, um diese der makroskopischen und radiologischen Untersuchung zugänglich zu machen.

Im Anschluss hieran wurden neun Halswirbelsäulen in Abhängigkeit von der Präparatbeschaffenheit ausgewählt, deren Wirbel sorgfältig aus dem Verbund der HWS herauspräpariert wurden, um sie für die Anfertigung der Densitogramme mittels CT- gesteuerter Osteoabsorptiometrie vorzubereiten.

Bei der Aufarbeitung der Präparate zeigte sich, dass zum Teil erhebliche degenerative Veränderungen vorlagen und sich daher eine Präparation der Wirbel mit anschließender Trennung nicht immer vornehmen ließ, ohne die Präparate zu beschädigen. In diesen Fällen wurden die Präparate aus dem Kollektiv entfernt, da sich keine reliablen Daten durch die CT-OAM erheben ließen. Schwankende Fallzahlen in den folgenden Statistiken sind darauf zurückzuführen.

3.2 CT-Osteoabsorptiometrie (CT-OAM)

Die Grundlage dieser Arbeit bilden die CT-Aufnahmen der einzelnen Halswirbel. Mit Hilfe der CT-OAM wurden für die Grund- und Deckplatten der Wirbelkörper Densitogramme erstellt, die nach abschließender Auswertung eine Beurteilung der subchondralen Mineralisierung ermöglichen.

3.2.1 Anfertigung der CT-Datensätze

Die CT-Schichtaufnahmen wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Radiologische Diagnostik der LMU München, Klinikum Großhadern, Direktor: Prof. Dr. med. h. c. M. Reiser, durchgeführt. Verwendet wurde ein Computertomograph der Firma Siemens, Typ *SOMATOM PLUS 4 (Siemens Medical Solutions, Erlangen, Deutschland)*.

Methoden

Die einzelnen Halswirbel wurden auf einer Phantomreferenzplatte (-7,4 HU) fixiert und mittels eines Laserstrahls sagittal zur Gantry auf der Unterlage ausgerichtet. Eine Veränderung der vorher festgelegten Position wurde so verhindert. Die Phantomreferenzplatte ist ein zweischichtiger Kunststoffblock, dessen erste Schicht in der CT dem HU-Wert von Wasser entspricht, während die zweite Schicht den HU-Wert einer bekannten Kalziumkonzentration (200mg Ca/ml) aufweist.

Die Schnittebene durch den Halswirbel wurde sagittal ausgerichtet und der Schnitt erfolgte nach oben beschriebener standardisierter Positionierung im Computertomographen in einer Schichtdicke von 1mm.

Diese Schichtdicke wurde gewählt, da vorausgegangene Untersuchungen gezeigt hatten, dass eine geringere Dicke zu keiner wesentlichen Verbesserung der Bildqualität bei der anschließenden dreidimensionalen Rekonstruktion führte. Als weiterer Parameter war neben der Schichtdicke ein zur Gelenkfläche möglichst senkrechter Strahlengang für den Erhalt einer bestmöglichen Bildqualität notwendig.

3.2.2 Erstellung der Densitogramme

Nachdem die CT-Datensätze angefertigt waren, erfolgte die Weiterbearbeitung mit Hilfe der Software *ANALYZE 8.0 (Biomedical Imaging Resource, Mayo Foundation, Rochester, USA)* auf einer *IBM Workstation (Risc system/6000, IBM Corporation, White Plains, USA)*.

In einem ersten Schritt wurden die bei der Computertomographie gewonnenen Daten in einen sog. „a-Datensatz“ umgewandelt. Durch das Editieren dieses Basisdatensatzes konnten die Abschlussplatten eines jeden Halswirbelkörpers isoliert und anschließend als eigener Datensatz bearbeitet werden. Hierdurch wurde eine selektive Darstellung der einzelnen Gelenkflächen ermöglicht.

In einem zweiten Bearbeitungsschritt erfolgte die dreidimensionale Rekonstruktion der Grund- bzw. Deckplatten unter Verwendung des Modus „Voxel Gradient Shading“. Resultat war das 3D-Bild eines Halswirbels, dessen Darstellung über einen weiteren Schritt im Editierprogramm in allen drei Ebenen des Raumes frei bewegt werden konnte. Hierdurch ergab sich die Möglichkeit, die Wirbelkörper unter Angabe bestimmter Koordinaten so auszurichten, dass man den *Corpus vertebrae* in der Aufsicht von kranial (Deckplatte) bzw. kaudal (Grundplatte) betrachten konnte.

Methoden

Im darauf folgenden Schritt wurde die subchondrale Knochenlamelle manuell markiert und isoliert, um sie mit Hilfe des Algorithmus „Maximum Intensity Projection“ bearbeiten zu können. Auf diese Weise wurde der Wert höchster Dichte innerhalb der subchondralen Lamelle an die Oberfläche projiziert und in der gleichen räumlichen Ausrichtung wie das Knochenbild dreidimensional dargestellt.

Abschließend erfolgte eine Falschfarbenbelegung, um die unterschiedlichen subchondralen Mineralisierungsverteilungen graphisch hervorzuheben. Wie der Abb. 6 zu entnehmen ist, erhielten jeweils 100 Hounsfield-Units (HU) die gleiche Farbe. Blau repräsentiert Dichtewerte unter 500 HU, woraufhin in aufsteigender Reihenfolge die Farben Grün, Gelb, Orange, Rot, Schwarz und Weiß folgen, welches einen Dichtewert von mehr als 1400 HU anzeigt.

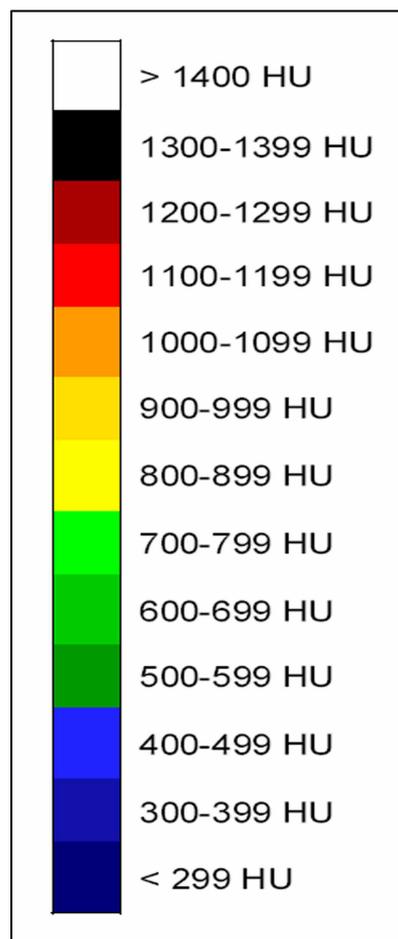


Abb. 6: Falschfarbenskala nach Hounsfield

Methoden

Falschfarbe	Grauwertstufe	Hounsfield–Einheiten (HE)
dunkelblau	104-111	200-299
mittelblau	112-121	300-399
hellblau	122-129	400-499
dunkelgrün	130-137	500-599
mittelgrün	138-147	600-699
hellgrün	148-154	700-799
hellgelb	155-163	800-899
dunkelgelb	164-171	900-999
orange	172-178	1000-1099
hellrot	179-188	1100-1199
hellbraun	189-196	1200-1299
schwarz	197-206	1300-1399
weiß	>207	>1400

Tab. 2: Zuordnung von Falschfarbenbelegung, Grauwertstufen und HE

In einem letzten Bearbeitungsschritt wurden die topographischen Ansichten der subchondralen Dichteverteilungen über das reguläre 3D-Bild des jeweiligen Wirbelkörpers projiziert, so dass die „Region of Interest“ und somit die subchondrale Dichteverteilung der Grund- und Deckplatten im anatomischen Kontext zur Darstellung kam.

Das Endprodukt, ein sog. Densitogramm, ist eine dreidimensionale Ansicht von kranial bzw. kaudal auf einen Halswirbel, dessen Grund- bzw. Deckplatte anhand einer definierten, farbig unterlegten Kartographie die subchondrale Dichteverteilung aufzeigt.

3.3 Auswertung der Densitogramme

3.3.1 Auswertung mittels quantitativer CT-OAM

Bei der quantitativen CT-OAM handelt es sich um ein von MÜLLER-GERBL et al. (1990) entwickeltes Verfahren zur Ermittlung der Gesamtmineralisierung einer Gelenkfläche.

Anhand eines für die Rekonstruktion erstellten Densitogrammes wurde eine Pixelmessung der zuvor virtuell markierten Gelenkfläche vorgenommen.

Im Editiermodus wurde mit Hilfe des Programms ANALYZE 8.0 die Gelenkfläche interaktiv umfahren und neben dem Volumen der subchondralen Knochenschicht auch die Anzahl der Pixel für jeden HE-Wert bestimmt.

Die Daten wurden von einem auf Microsoft Excel basierenden Algorithmus weiterbearbeitet, der speziell für diesen Zweck entwickelt und anhand eines Phantoms mit bekannter Kalziumkonzentration kalibriert wurde (Beschreibung der Phantomreferenzplatte in Kapitel 3.2.1). Da jeder Grauwert exakt 11,8 HE entsprach, konnte der prozentuale Anteil jedes Grauwertes bzw. der entsprechenden HE Stufe an der subchondralen Gelenkschicht bestimmt werden. Ein weiterer Algorithmus ermöglichte die Zuordnung eines Kalziumwertes zu einem bestimmten HE-Wert. Durch die Integration der Verteilungskurve aller Hounsfield-Werte wurde dann der absolute Kalziumgehalt der subchondralen Lamelle in Milligramm errechnet.

Abschließend wurde der absolute Kalziumgehalt durch das Volumen der Gelenkfläche dividiert. Man erhielt somit eine Angabe des Kalziumgehaltes pro Milliliter subchondraler Gelenkschicht in der Einheit mg Ca/ml, was in den folgenden Ausführungen mit dem Begriff der „Gesamtmineralisierung“ beschrieben wird.

Resultierend aus den dargestellten Berechnungen können somit die Mineralisierungswerte, unabhängig von der jeweiligen Gelenkflächengröße, direkt miteinander verglichen und ausgewertet werden.

Methoden

3.3.2 Bestimmung der Dichtemaximalokalisationen

Als Dichtemaximum wurden im Rahmen der vorliegenden Studie die beiden höchsten Mineralisierungsstufen pro Densitogramm definiert.

Um die Lokalisation der Dichtemaxima exakt bestimmen und beschreiben zu können, wurde auf eine erstmalig von GRIEBL (1998) angewandte Messmethode zurückgegriffen. Hiernach wurden an die anatomischen Grenzen der jeweiligen Gelenkfläche zwei horizontale und zwei vertikale Tangenten angelegt, wodurch das kleinstmögliche Rechteck um die entsprechende Gelenkfläche gebildet wurde. Durch Dritteln der Seitenlinien und Fünfteln der ventralen und dorsalen Begrenzungslinie entstand ein Raster aus 15 gleich großen Quadranten pro Grund- und Deckplatte. Jedes der fünfzehn Felder deckte durch die direkt proportionale Ausdehnung prozentual die gleiche Fläche der untersuchten Wirbelkörper ab. Die Verteilungsmuster der Dichtemaxima wurden hierdurch von der Größe der einzelnen Gelenkfläche unabhängig und konnten interindividuell verglichen werden. Die Bilder wurden anschließend nach der Lage der Hauptmaxima sortiert und in Gruppen eingeteilt.

Zunächst wurden für die Gruppeneinteilung die einzelnen Felder des Rasters entsprechend der folgenden Graphik nummeriert. Um die gleichen Bereiche der miteinander artikulierenden Grund- und Deckplatten zweier Wirbelkörper zu erfassen, erfolgte die Nummerierung spiegelbildlich.

Deckplatte					Grundplatte				
ventral					ventral				
5	4	3	2	1	1	2	3	4	5
10	9	8	7	6	6	7	8	9	10
15	14	13	12	11	11	12	13	14	15
dorsal					dorsal				
links				rechts	rechts				links

Tab. 3: Nummerierung des standardisierten Gitterrasters

Im Anschluss an die Fertigstellung des Gitterrasters wurde eine Zuordnung der Dichtemaxima in Haupt- und Nebengruppen vorgenommen. Zunächst wurden pro Abschlussplatte zwei Dichtemaxima bestimmt, die anschließend einer der vertikal

Methoden

verlaufenden Hauptgruppen zugeteilt wurden. Eine sechste Hauptgruppe erfasste hier alle Grund- bzw. Deckplatten, die eine diffuse Dichtemaximaverteilung aufwiesen und daher nicht eindeutig einer der fünf anderen Hauptgruppen zugeordnet werden konnten.

Gruppe	Beschreibung
I	links lateral
II	links medial
III	zentral
IV	rechts medial
V	rechts lateral
VI	diffus

Tab. 4: Lagebeschreibung der Hauptgruppen

Im Folgenden ist anhand eines exemplarisch ausgewählten Halswirbels die Einteilung in die fünf Hauptgruppen demonstriert.

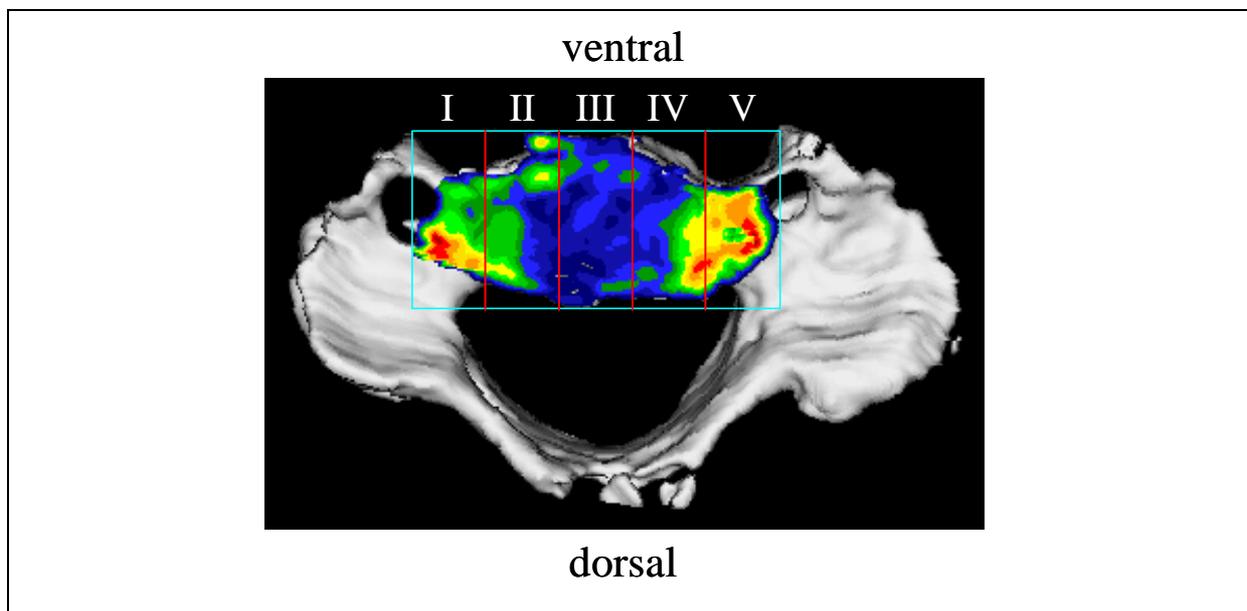


Abb. 9: Darstellung einer Grundplatte und der entsprechenden Unterteilung in HG

Mit Hilfe eines erstellten Gitterrasters wurde innerhalb der fünf vertikal verlaufenden Hauptgruppen eine weitere Einteilung in drei horizontal ausgerichtete Nebengruppen ermöglicht.

Auf diese Weise wurde die Lage eines jeden Dichtemaximums zusätzlich nach ventraler, zentraler oder dorsaler Positionierung beschrieben.

Methoden

Die exakte Lokalisierung der Dichtemaxima in der zweidimensionalen Darstellung eines Densitogrammes wurde so ermöglicht.

Nebengruppe (NG)	Hauptgruppe (HG)				
	I	II	III	IV	V
ventral					
zentral					
dorsal					

Tab. 5: Einteilung der Grund- bzw. Deckplatten in Haupt- und Nebengruppen

Um sicherzustellen, dass eine korrekte Zuordnung der identifizierten Dichtemaxima zu den entsprechenden Quadranten und damit zu den Haupt- und Nebengruppen erfolgt, wurde als Instrument der Qualitätssicherung zusätzlich ein standardisiertes Koordinatensystem mit 100 mal 60 Einheiten, ausgerichtet an den anatomischen Grenzen der Gelenkfläche, benutzt. Mit Hilfe dieses Features war es möglich, die Zuordnung der Dichtemaxima zu dem jeweiligen Quadranten zu überprüfen.

Generell wurde bei großflächigen Dichtemaxima der Flächenmittelpunkt des entsprechenden Maximums bestimmt, um von dort die exakte Position anhand des Koordinatensystems zu überprüfen. Zeigte ein Dichtemaximum eine Ausdehnung über mehrere Quadranten, so wurde die endgültige Zuordnung wie folgt vorgenommen.

Zunächst wurde das Maximum in seiner gesamten Ausdehnung anhand der Falschfarbenskala nach Hounsfield beurteilt. Dann wurde der Mittelpunkt des Areals größter Dichte bestimmt und in Abhängigkeit davon die Zuteilung des Maximums zu einem bestimmten Quadranten vorgenommen. Abb. 10 auf der folgenden Seite zeigt einen Halswirbel sowohl von kranial als auch von kaudal mit anliegendem Gitterraster und Koordinatensystem.

Nach Abschluss der Dichtemaximabestimmung wurden die gewonnenen Daten statistisch ausgewertet.

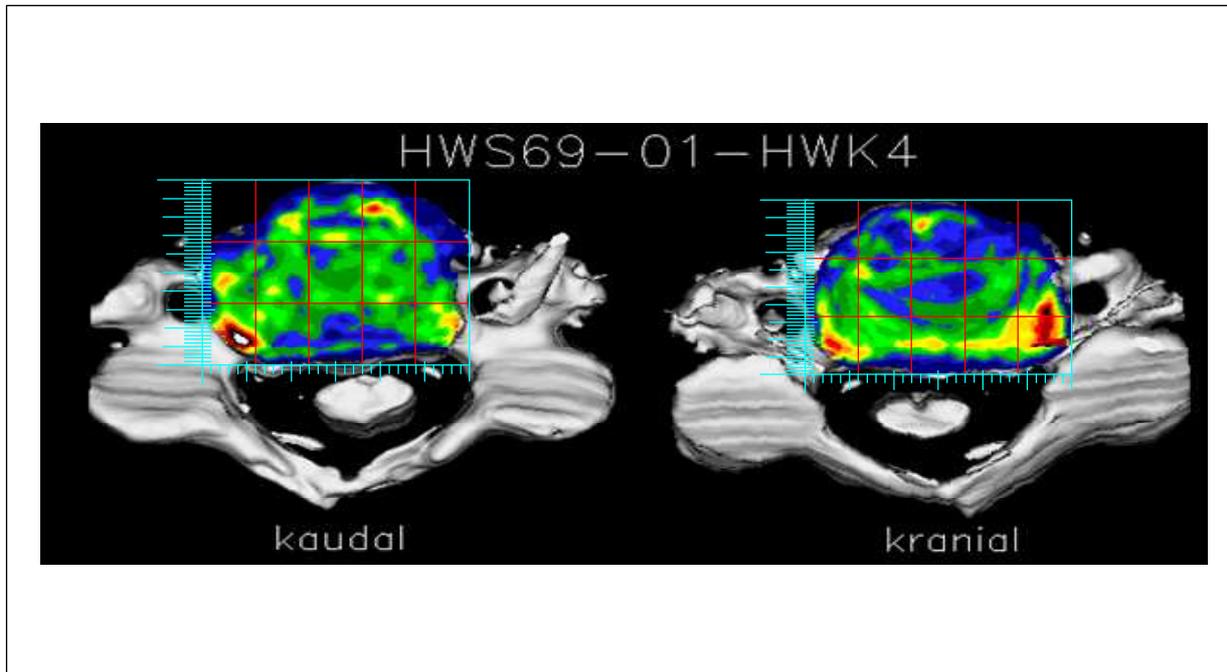


Abb. 10: Bestimmung der Dichtemaxima nach definierter Anlage eines Gitterrasters und Koordinatensystems

3.3.3 Berechnung der Mineralisierungsquotienten MQ1 und MQ2

Diese Quotienten vergleichen die Mineralisierung der Grund- bzw. Deckplatten einerseits und die einer sog. korrespondierenden Gelenkeinheit andererseits.

Im Hinblick auf die Fragestellung nach einer generell bestehenden Differenz in der Mineralisierung der SCBP von Grund- und Deckplatten wurde die Gesamtmineralisierung mittels eines eigens erstellten Algorithmus ermittelt und die Werte eines Wirbelkörpers direkt miteinander verglichen.

Beispiel:

Gesamtmineralisierung (in mg Ca/ml) HWS 14, HWK 6 kranial = 1200 mg Ca/ml

Gesamtmineralisierung (in mg Ca/ml) HWS 14, HWK 6 kaudal = 1000 mg Ca/ml

Mineralisierungsquotient MQ1: $1200 / 1000$ (mg Ca/ml) = 1,2

Ein Wert >1 bedeutet demnach, dass die Gesamtmineralisierung der Deckplatte im intraindividuellen Vergleich mit der Grundplatte des entsprechenden Wirbelkörpers

Methoden

höher ist. Ein Wert von <1 drückt eine erhöhte Mineralisierung im Bereich der Grundplatte des Corpus vertebrae aus.

Desweiteren wurde ermittelt, ob innerhalb einer sog. korrespondierenden Gelenkeinheit signifikante Unterschiede in der subchondralen Mineralisierung nachzuweisen waren.

Hierfür sind die Grund- und Deckplatten der Halswirbelkörper in eine rechte und eine linke Hälfte unterteilt worden. Die nun miteinander artikulierenden Gelenkflächen, beispielsweise der rechte Anteil einer Deckplatte und der rechte Anteil einer darüber gelegenen Grundplatte, wurden als korrespondierende Einheit definiert.

Diese Unterscheidung machte es möglich, nicht nur die Gesamtmineralisierung im Bereich der Grund- und Deckplatten eines Wirbelkörpers miteinander zu vergleichen, sondern auch die Kalziumkonzentration innerhalb einer funktionellen Einheit bezüglich des vorliegenden Mineralisierungsgrades in Korrelation zueinander zu setzen.

Beispiel:

Gesamtmineralisierung (in mg Ca/ml) HWS 14, HWK 6 kaudal re. = 600 mg Ca/ml

Gesamtmineralisierung (in mg Ca/ml) HWS 14, HWK 7 kranial re. = 400 mg Ca/ml

Mineralisierungsquotient MQ2: $600 / 400$ (mg Ca/ml) = 1,5

Ein Wert >1 bedeutet demnach, dass der rechte Anteil der kaudalen Gelenkfläche innerhalb des Bewegungssegmentes eine höhere Gesamtmineralisierung aufweist als die rechte Hälfte der kranialen Fläche des darunter gelegenen Wirbelkörpers.

Aufschluss gab diese Untersuchung über die Frage, inwiefern sich die morphologischen Veränderungen innerhalb des Uncovertebralgelenkes in der Mineralisierungsverteilung der Grund- bzw. Deckplatten widerspiegeln.

Methoden

3.4 Makroskopische Untersuchung der unteren Halswirbelsäule

3.4.1 Beurteilung der Disci intervertebrales

Einen weiteren Untersuchungsschwerpunkt im Hinblick auf die Beurteilung der Halswirbelsäule als funktionelle Einheit bildete die makroskopische Begutachtung der Wirbelkörper und der Zwischenwirbelscheiben.

Um eine Beurteilung aller Anteile der HWS zu gewährleisten und die entsprechenden morphologischen Veränderungen zu erfassen, wurden die Präparate zunächst bei minus 92 °C tiefgefroren. Anschließend wurden mittels einer schnell schwingenden, fest installierten Spezialsäge 5 mm dicke, planparallele Frontalschnitte der ausgewählten Halswirbelsäulen angefertigt.

Hierbei galt das besondere Interesse einerseits dem Verlauf der uncovertebralen Spalten und andererseits den Uncovertebralgelenken. Die Schnittführung in der Frontalebene wurde gewählt, da sich auf diese Weise sowohl der Verlauf und die Ausdehnung der Rissbildungen in den Zwischenwirbelscheiben als auch die Morphologie der Procc. uncinati von ventral nach dorsal exakt nachvollziehen ließ.

3.4.2 Dokumentation morphologischer Umbauprozesse

Mit Hilfe einer hoch auflösenden Digitalkamera wurden die morphologischen Veränderungen der Zwischenwirbelscheiben festgehalten und anhand des folgenden Auswertungsbogens analysiert und ausgewertet.

	Anzahl der untersuchten Präparate	Anzahl der betroffenen Präparate	Anzahl der betroffenen Präparate in %
Ausbildung uncovertebraler Spalten			
Ausbildung durchgehender Einrisse			
Ausbildung konfluierender Einrisse			
Vorhandensein eines meniskoiden Gewebekeils			

Methoden

	Anzahl der untersuchten Präparate	Anzahl der betroffenen Präparate	Anzahl der betroffenen Präparate in %
Umbau eines Uncovertebralgelenkes zum Stützgelenk			
Rissbildung C7/ Th1			
Affektion des Foramen intervertebrale			

Tab. 6: Auswertungsbogen - morphologische Umbauprozesse

3.5 Nativ-radiologische Bildgebung der unteren Halswirbelsäule

Um die Mineralisierungsverteilung der SCBP in Zusammenhang mit den makroskopisch vorgenommenen Beobachtungen abschließend beurteilen zu können, wurden konventionelle Röntgenaufnahmen der Halswirbelsäulenschnitte im antero-posterioren Strahlengang angefertigt.

3.5.1 Erstellung eines Untersuchungsbogens

Die Auswertung der nativ-radiologischen Aufnahmen erfasst den prozentualen Anteil des jeweils betrachteten Parameters in Bezug auf das Gesamtkollektiv.

	Parameter	Anzahl der untersuchten Präparate	Anzahl der betroffenen Präparate	Anzahl der betroffenen Präparate in %
Wirbelkörper	Spondylophyten (Randzacken, Spangen, Höcker)			
	Blockwirbelbildung			
	Morphologische Veränderungen des Foramen intervertebrale			
	Tumoröse Veränderungen			
	Traumatische Veränderungen			
Uncovertebralgelenke	Morphologische Veränderungen			
	Subchondrale Sklerosierung			
	Umbau des Uncovertebralgelenkes zum Stützgelenk			

Tab. 7: Auswertungsbogen nativ-radiologischer Aufnahmen

Methoden

3.5.2 Falschfarbenbelegung der Röntgenschichtaufnahmen

Im Anschluss an die Erstellung der konventionellen Röntgenschichtaufnahmen wurden diese in die *IBM Workstation (Risc system/6000, IBM Corporation, White Plains, USA)* eingelesen und mit Falschfarben belegt. Auf diese Weise konnten die intra- und interindividuellen morphologischen Besonderheiten in Bezug auf die Mineralisierung der SCBP akzentuiert dargestellt werden.

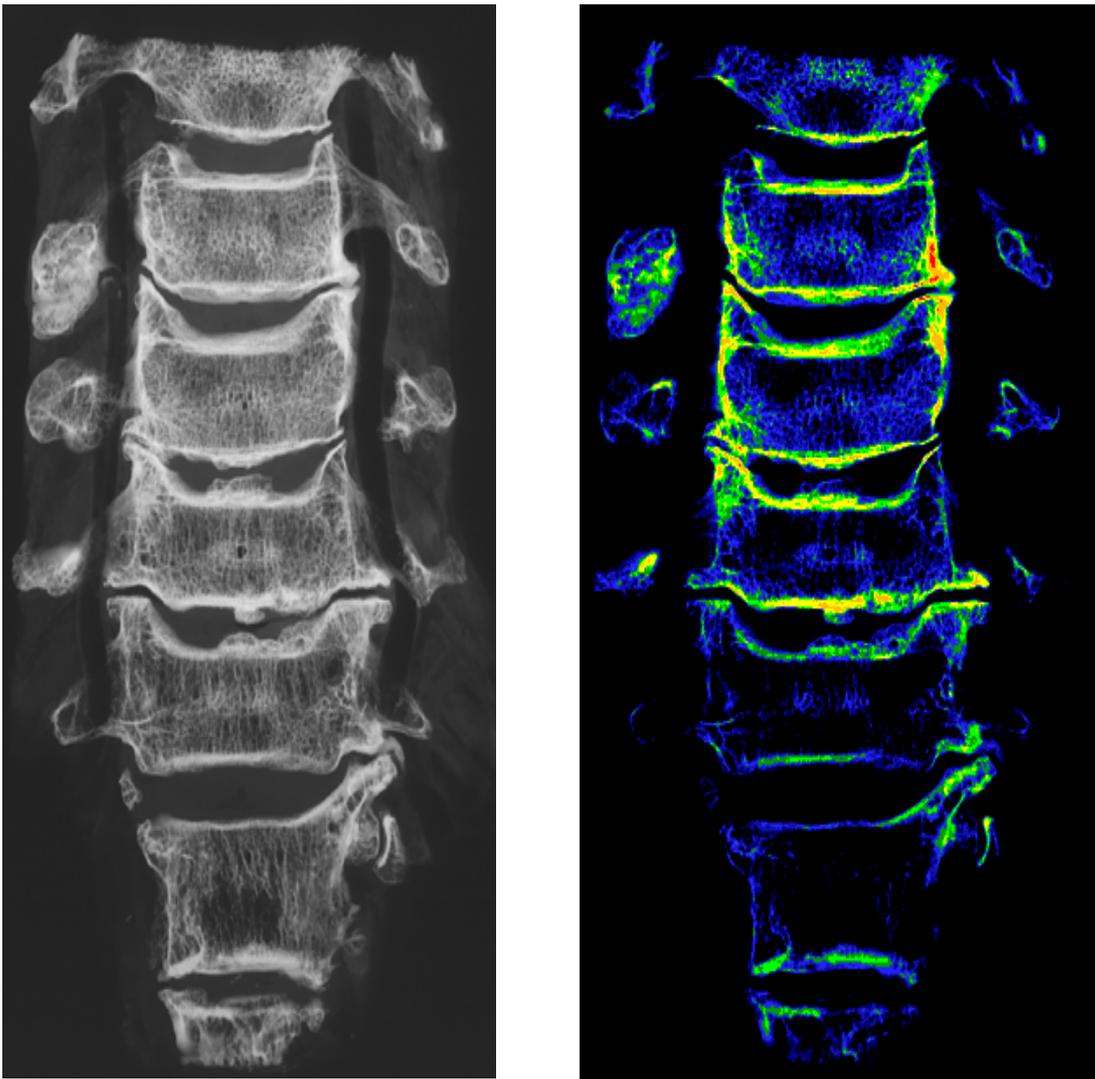


Abb. 11: Beispiel einer nativ-radiologischen Halswirbelsäulenschichtaufnahme und entsprechender Falschfarbenbelegung

3.6 Statistik

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte unter Zuhilfenahme des Computerprogrammes MINITAB, Version Minitab 15, Statistical Software für Windows (*Minitab Inc., Pennsylvania, USA*).

Für alle ermittelten Parameter wurden zunächst der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet.

Der Messfehler für die wiederholte Bestimmung und die intraindividuelle Varianz der Lage der Dichtemaxima wurde mit Hilfe des relativen Variationskoeffizienten in Prozent ($_{\text{rel}} \text{VK} = \text{VK}/n^{0,5} \times 100$; mit $\text{VK} = \text{Standardabweichung}/\text{Mittelwert}$, $n = \text{Anzahl der Messwiederholungen}$) berechnet.

Die Unterschiede beim Vergleich der Lage der Dichtemaxima durch zwei unabhängige Untersucher wurden mittels U-Test nach Mann und Whitney geprüft.

Ergebnisse

4 Ergebnisse

4.1 Auswertung der Dichtemuster

Um eine Auswertung der Dichtemaxima vornehmen zu können, wurden die untersuchten Halswirbelkörper, wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, zunächst in definierte Haupt- und Nebengruppen eingeteilt. Durch diese Unterteilung entstanden 15 Quadranten, die nummeriert wurden und den gleichen Anteil einer jeden Grund- bzw. Deckplatte charakterisieren.

Die Ergebnisse konnten dementsprechend direkt miteinander verglichen werden. Die Zuordnung der Dichtemaxima erfolgte in Abhängigkeit von der Projektion auf das angelegte Gitterraster und ergab folgende Verteilung.

4.1.1 Dichtemaximaverteilung innerhalb der GP

Die folgenden Darstellungen beziehen sich auf das Kollektiv 2 (G2), eine Unterscheidung nach dem Geschlecht wurde demnach nicht vorgenommen.

Gruppe	Lokalisation	Anzahl der Maxima
I	rechts lateral	28
II	rechts medial	8
III	zentral	7
IV	links medial	12
V	links lateral	21
VI	diffus	6 (3)

Tab. 8: Anzahl und Hauptgruppenzuordnung der Dichtemaxima im Bereich der GP

Aus Tab. 8 geht hervor, dass sich nach erfolgter Zuordnung der Dichtemaxima zu den Hauptgruppen eine signifikante Dominanz der Hauptgruppen HG I und HG V zeigte. Es fanden sich insgesamt 28 Maxima (36,96 %) in Hauptgruppe HG I und 21 Maxima (27,72 %) in Hauptgruppe HG V. Insgesamt entfielen somit 49 Maxima, also 64,68 %, auf diese beiden Hauptgruppen. Weiter zeigte sich zum Zentrum der Grundplatten hin eine Abnahme der Dichtemaxima. Fanden sich in der Hauptgruppe HG II noch 8 Maxima (10,56 %) und in der Hauptgruppe HG IV 12 Maxima (15,84 %), so wurden der HG III lediglich 7 Maxima (9,24 %) zugeteilt. Abb. 12 bringt die charakteristische Verteilung zum Ausdruck.

Ergebnisse

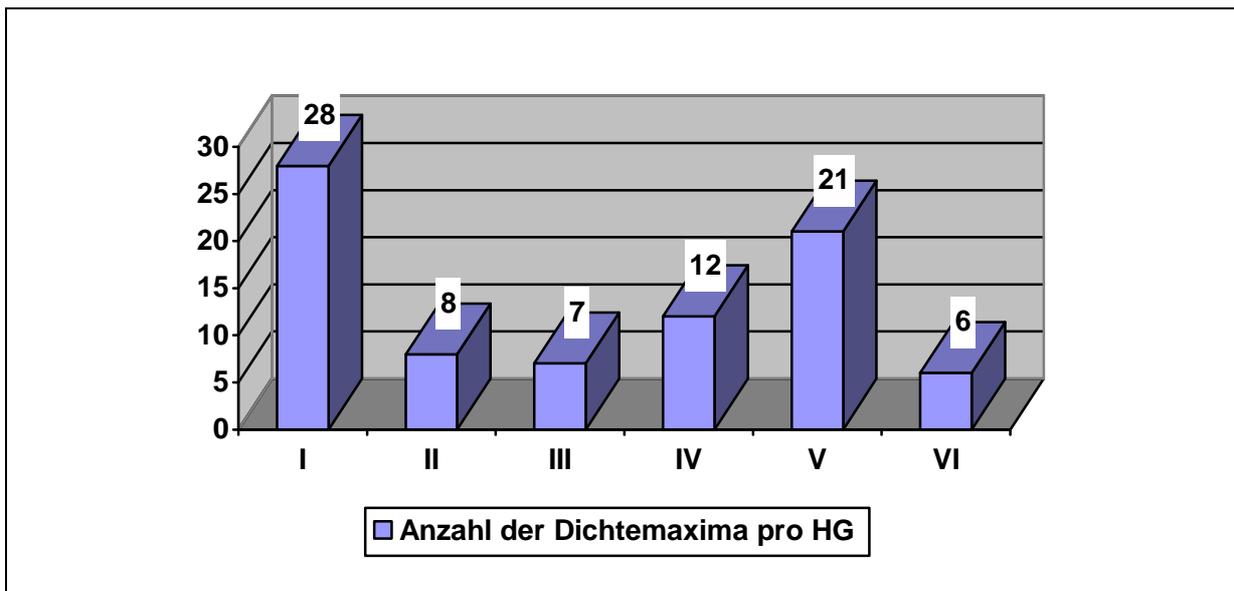


Abb. 12: Anzahl der Dichtemaxima pro Hauptgruppe der Grundplatten

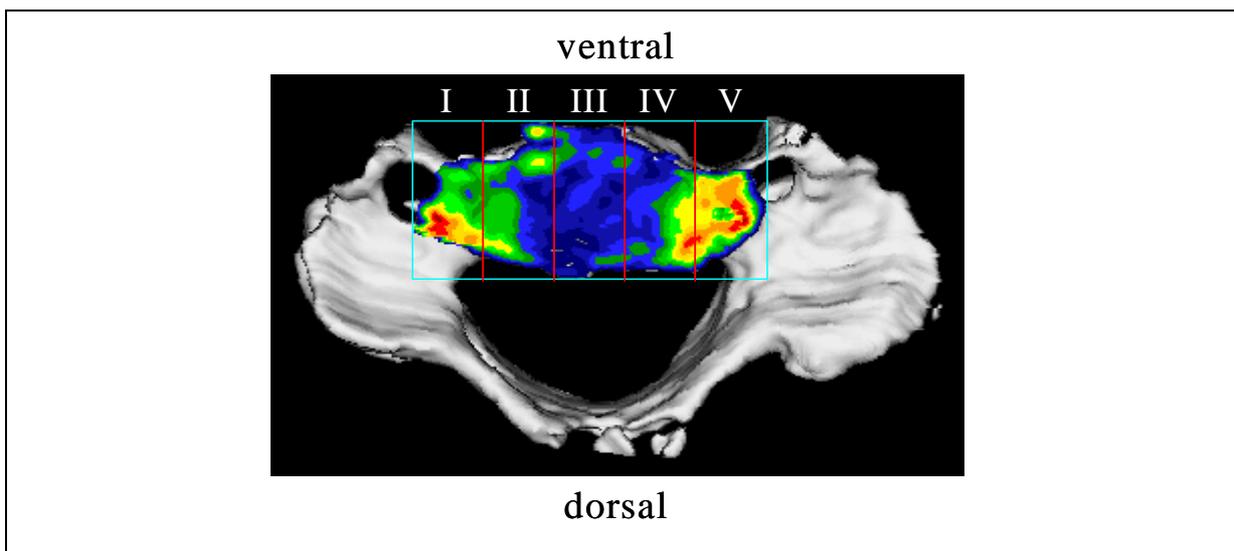


Abb. 13: Einteilung einer Grundplatte in Hauptgruppen

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass bei der Zuordnung der Dichtemaxima in die verschiedenen Gruppen mit der VI. Hauptgruppe die Präparate erfasst wurden, welche eine diffuse Verteilung der Dichtemaxima aufwiesen und daher eine Einteilung in Haupt- und Nebengruppen nicht vorgenommen werden konnte.

Im Bereich der Grundplatten zeigten insgesamt drei Präparate eine solche Dichtemaximaverteilung. Hierdurch erklärt sich, dass die Anzahl der Maxima in Hauptgruppe I – V in der Summe 76 betrug und nicht 82, was jeweils zwei Maxima pro Wirbelkörper bei einer Gesamtanzahl von 41 Wirbelkörpern entsprechen würde.

Ergebnisse

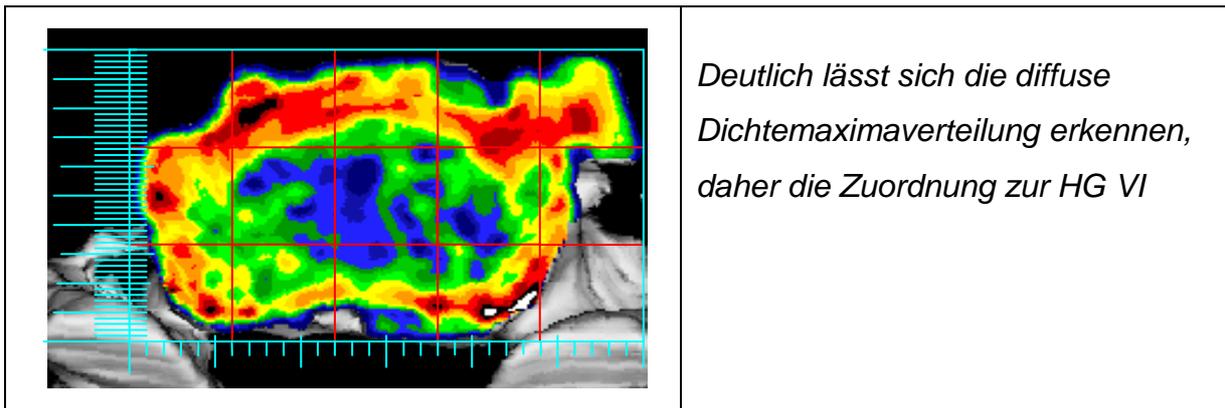


Abb. 14: Ansicht einer Grundplatte mit diffuser Dichtemaximaverteilung von kaudal

Entsprechend der Nummerierung des maßgeblichen Rasters (siehe Kapitel 3.3.2) konnte eine weitere Zuordnung der Dichtemaxima in Untergruppen erfolgen. Die Anzahl der im Bereich der Grundplatte liegenden Maxima pro Quadrant, entstanden aus der Einteilung in Haupt- und Untergruppen, ist der folgenden Tabelle zu entnehmen.

GRUNDPLATTEN		
Hauptgruppe	Nebengruppe/ Quadrant	Anzahl Maxima
I	ventral - Q1	3
I	zentral - Q6	3
I	dorsal - Q11	22
II	ventral - Q2	6
II	zentral - Q7	1
II	dorsal - Q12	1
III	ventral - Q3	5
III	zentral - Q8	0
III	dorsal - Q13	2
IV	ventral - Q4	9
IV	zentral - Q9	2
IV	dorsal - Q14	1
V	ventral - Q5	1
V	zentral - Q10	2
V	dorsal - Q15	18
VI	entfällt	3 Präparate á 2 Maxima

Tab. 9: Zuordnung der Dichtemaxima zu den Haupt- und Nebengruppen der GP

Ergebnisse

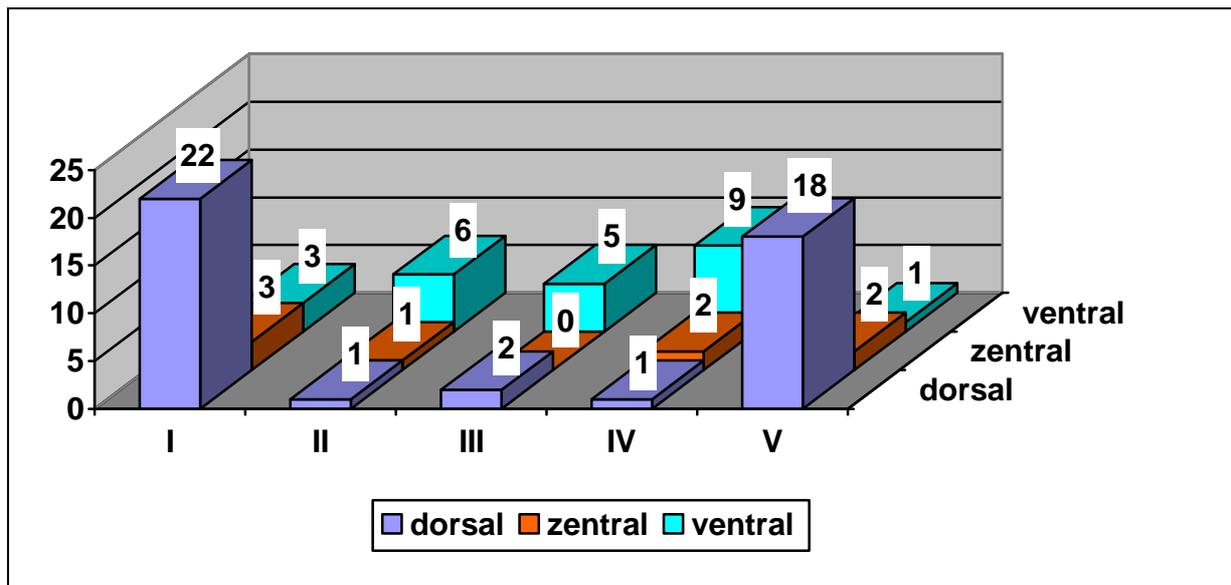


Abb. 15: Anzahl der Dichtemaxima pro Quadrant der Grundplatten

Quadranten GP	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14	Q15
Anzahl der Maxima (abs.)	3	6	5	9	1	3	1	0	2	2	22	1	2	1	18
Prozent. Verteilung GP	3,96	7,92	6,6	11,88	1,32	3,96	1,32	0	2,64	2,64	29,04	1,32	2,64	1,32	23,76

Tab. 10: Verteilung der Dichtemaxima innerhalb der Grundplatten

Im Bereich der Grundplatte fand sich die höchste Konzentration an Dichtemaxima in den Quadranten Q11 (29,04 %) und Q15 (23,76 %), gefolgt von den Quadranten Q4 (11,88 %), Q2 (7,92 %) und Q3 (6,6 %). Abb. 15 stellt die Aufteilung der Dichtemaximahäufigkeiten innerhalb der Grundplatten dar und unterstreicht graphisch die Dominanz des 11. und 15. Quadranten, in denen nahezu die Hälfte aller Dichtemaxima (48,79 %) nachgewiesen wurde.

Auffallend war im Bereich der Grundplatte die niedrige Konzentration von Dichtemaxima im zentralen Bereich, gebildet von den Quadranten Q7, Q8 und Q9. Hier fanden sich insgesamt 3 Dichtemaxima. Dies entspricht bei einer Summe von 76 Maxima, die über die gesamte Fläche der Grundplatte verteilt liegen, einem Anteil von 3,96 %. Die Quadranten Q2, Q3 und Q4 zählten zusammen 20 Dichtemaxima (26,4 %). Somit war ein knappes Viertel aller zugeordneten Dichtemaxima im ventro-zentralen Anteil der Grundplatten ausfindig zu machen.

Ergebnisse

Es bleibt festzuhalten, dass in der HG I insgesamt 28 und in der HG V 21 Dichtemaxima vorlagen. Innerhalb der genannten Hauptgruppen wiederum lag die absolute Mehrheit der Maxima im Bereich der dorsalen NG, nämlich in den Quadranten Q11 und Q15. Die Dichtemaxima innerhalb der HG II (8) und IV (12) hingegen zeigten nach Zuordnung zu den entsprechenden NG eine Dominanz der ventralen Quadranten Q2, Q3 und Q4.

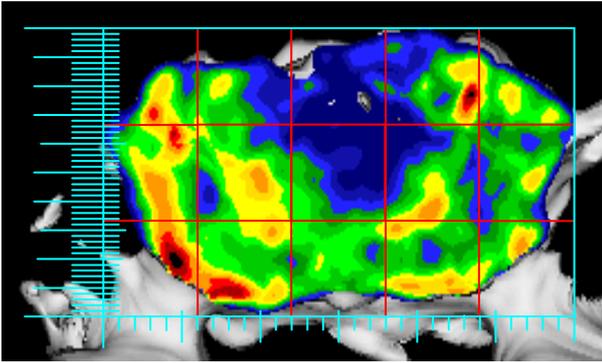
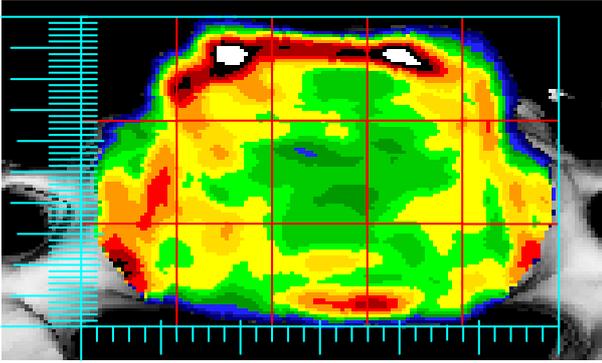
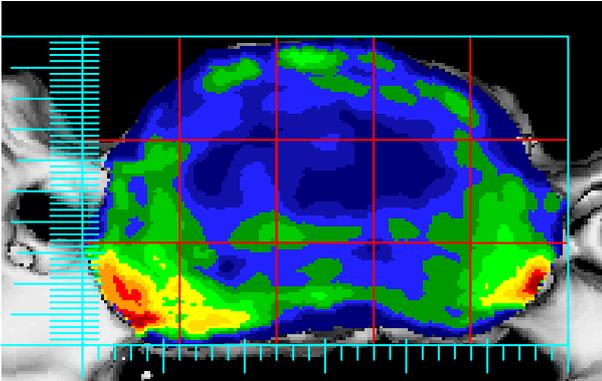
 Densitometrische Grundplatte von HWS103-01-HWK6. Die Abbildung zeigt eine Draufsicht auf die Grundplatte mit einer Gitterstruktur. Die Dichtemaxima sind in den dorsalen Quadranten (Q11) und den ventralen Quadranten (Q4) konzentriert.	<p>HWS103-01-HWK6</p> <p><i>Dichtemaximum im ventralen Quadranten von HG IV (Q4) und im dorsalen Quadranten von HG I (Q11)</i></p>
 Densitometrische Grundplatte von HWS83-01-HWK4. Die Abbildung zeigt eine Draufsicht auf die Grundplatte mit einer Gitterstruktur. Die Dichtemaxima sind in den ventralen Quadranten (Q2/Q4) konzentriert.	<p>HWS83-01-HWK4</p> <p><i>Dichtemaxima in den ventralen Quadranten der HG II und HG IV (Q2/ Q4)</i></p>
 Densitometrische Grundplatte von HWS69-01-HWK5. Die Abbildung zeigt eine Draufsicht auf die Grundplatte mit einer Gitterstruktur. Die Dichtemaxima sind in den dorsalen Quadranten (Q11/Q15) konzentriert.	<p>HWS69-01-HWK5</p> <p><i>Dichtemaxima in den dorsalen Quadranten der HG I und HG V (Q11/ Q15)</i></p>

Abb. 16: Lage der Dichtemaxima in den verschiedenen Quadranten der Grundplatte

Ergebnisse

Es zeigte sich eine Abnahme der Anzahl der Dichtemaxima in den HG I und V von dorsal nach ventral, wohingegen die Anzahl der Dichtemaxima innerhalb der HG II und IV von dorsal nach ventral zunahm.

4.1.2 Dichtemaximaverteilung innerhalb der DP

Gruppe	Lokalisation	Anzahl der Maxima
I	links lateral	27
II	links medial	8
III	zentral	7
IV	rechts medial	8
V	rechts lateral	28
VI	diffus	4 (2)

Tab. 11: Anzahl und Hauptgruppenzuordnung der Dichtemaxima im Bereich der DP

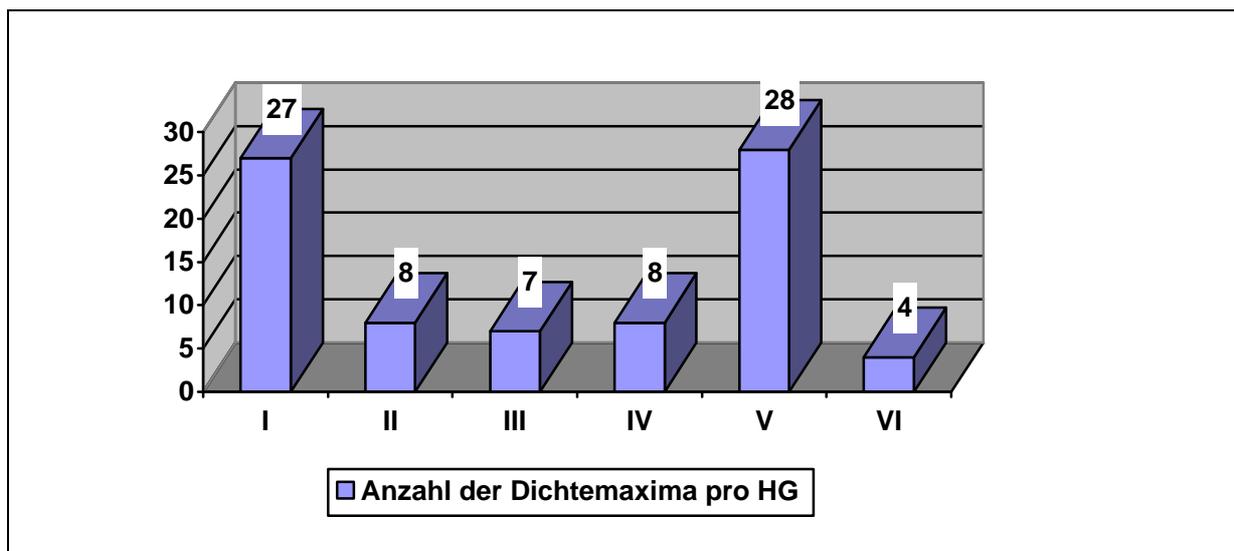


Abb. 17: Anzahl der Dichtemaxima pro Hauptgruppe der Deckplatten

Der VI. Hauptgruppe wurden im Bereich der Deckplatten zwei Präparate zugeordnet (s. Abb. 17). Dementsprechend beträgt die Summe der aufgeführten Dichtemaxima in den folgenden Berechnungen, die sich primär auf die HG I – V beziehen, 78 und nicht 82.

Aus der graphischen Darstellung in Abb. 17 geht hervor, dass auch im Bereich der Deckplatten eine signifikante Dominanz der HG I und V vorlag. Die Auswertung der Dichtemaximaverteilung anhand der Zuordnung zu den NG ergab folgendes:

Ergebnisse

DECKPLATTEN		
Hauptgruppe	Nebengruppe/ Quadrant	Anzahl Maxima
I	ventral - Q5	5
I	zentral - Q10	3
I	dorsal - Q15	19
II	ventral - Q4	6
II	zentral - Q9	0
II	dorsal - Q14	2
III	ventral - Q3	2
III	zentral - Q8	0
III	dorsal - Q13	5
IV	ventral - Q2	6
IV	zentral - Q7	0
IV	dorsal - Q12	2
V	ventral - Q1	3
V	zentral - Q6	3
V	dorsal - Q11	22
VI	Entfällt	2 Präparate à 2 Maxima

Tab. 12: Zuordnung der Dichtemaxima zu den Haupt- und Nebengruppen der DP

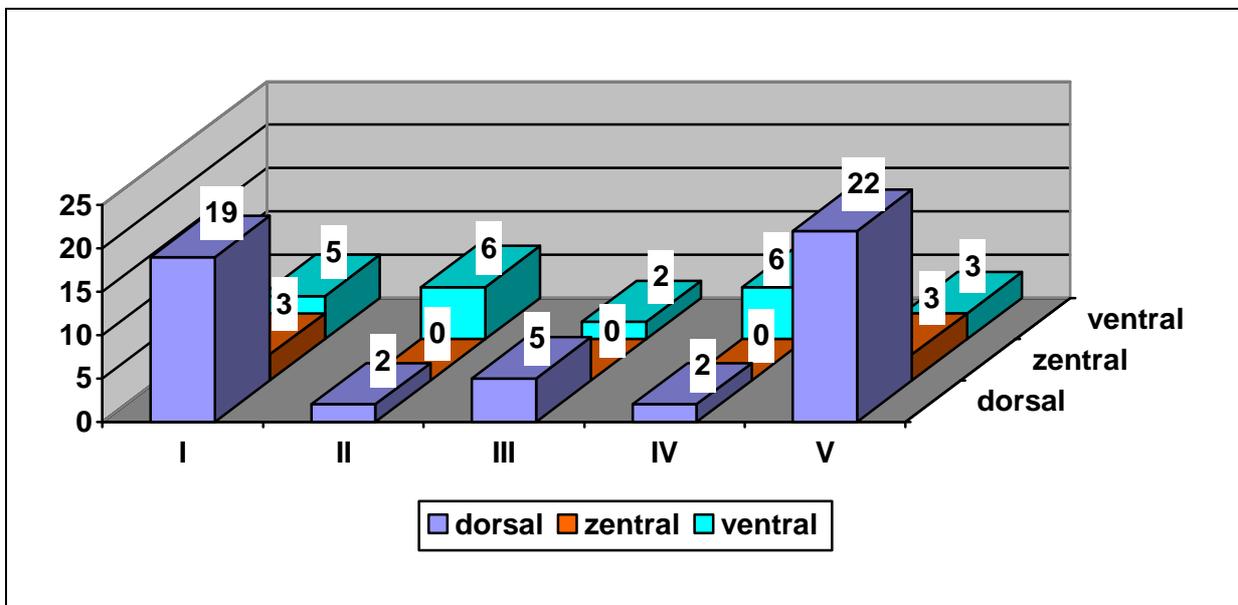


Abb. 18: Anzahl der Dichtemaxima pro Quadrant der Deckplatten

In Abb. 18 wurde erneut bewusst auf die graphische Darstellung der VI. Hauptgruppe verzichtet.

Ergebnisse

Quadranten GP	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14	Q15
Anzahl der Maxima (abs.)	3	6	2	6	5	3	0	0	0	3	22	2	5	2	19
Prozentuale Verteilung GP	3,84	7,68	2,56	7,68	6,4	3,84	0	0	0	3,84	28,16	2,56	6,4	2,56	24,32

Tab. 13: Verteilung der Dichtemaxima innerhalb der Deckplatten

Die Deckplatten zeigten, ebenso wie die Grundplatten, die höchste Anzahl an Dichtemaxima in den Quadranten Q11 (28,16 %) und Q15 (24,32 %). Summiert lagen in diesen beiden, am dorsolateralen Rand des Corpus vertebrae befindlichen Bereichen genau 52,48 % und somit mehr als die Hälfte aller Dichtemaxima im Bereich der Deckplatte.

In den zentralen Quadranten Q7, Q8 und Q9 fand sich nicht ein einziges Dichtemaximum. Diese Beobachtung gleicht der im Bereich der Grundplatte vorgefundenen Dichteverteilung.

In den ventralen Quadranten Q2, Q4 und Q5 finden sich insgesamt 17 Dichtemaxima, was einem Gesamtanteil von 21,76 % entspricht. Es zeigte sich tendenziell eine Dichteverteilung ähnlich der Verteilung im Bereich der Grundplatten, da auch die kraniale Abschlussplatte eine signifikante Dominanz der dorsalen Quadranten (Q11/ Q15) von HG I und HG V aufweist. Demgegenüber steht die Zunahme der Dichtemaxima von dorsal nach ventral in den HG II und IV. Hier finden sich in den ventralen Quadranten (Q2/ Q4) jeweils 6 Dichtemaxima (7,68 %).

Anhand der Dichtemaximaverteilung und deren Auswertung zeigt sich sowohl bei den Deck- als auch bei den Grundplatten eine Dominanz der HG I und V, aber auch ein signifikant gehäuftes Vorkommen von Dichtemaxima in den ventralen NG.

Bei isolierter Betrachtung der Hauptgruppe HG I und V für die Grund- und die Deckplatten belegte die vollzogene Unterteilung in Untergruppen die Dominanz der Gruppe I/Q11 und V/Q15.

Ergebnisse

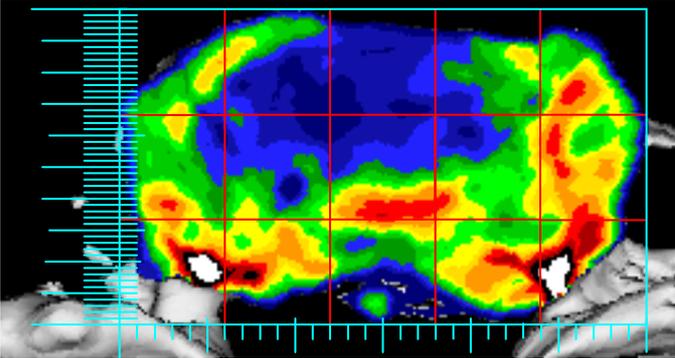
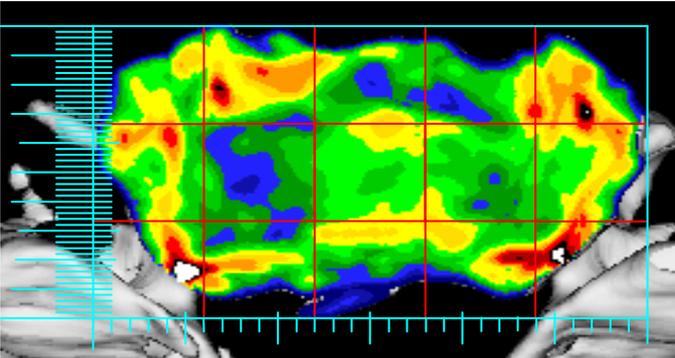
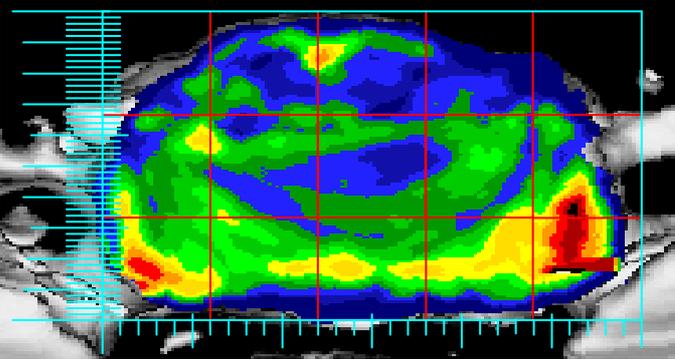
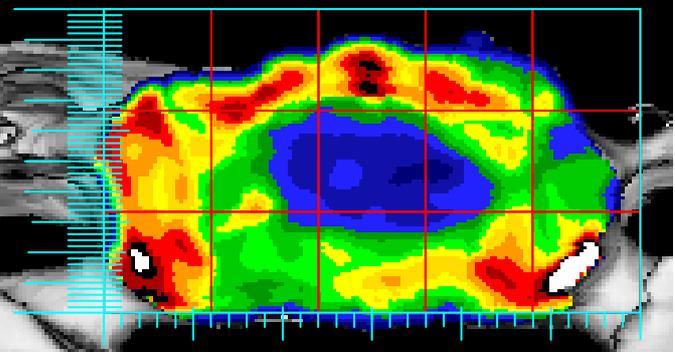
	<p>HWS103-01-HWK7</p> <p><i>Dichtemaxima in den dorsalen Quadranten der HG I und V (Q11/ Q15)</i></p>
	<p>HWS103-01-HWK6</p> <p><i>Dichtemaxima in Q11/ Q15. Deutlich ist die vermehrte subchondrale Mineralisierung in der gesamten HG I und V zu erkennen.</i></p>
	<p>HWS69-01-HWK4</p> <p><i>Dichtemaxima in Q11 /Q15</i></p>
	<p>HWS53-01-HWK5</p> <p><i>Dichtemaxima in Q11/ Q15 Man erkennt die vermehrte Mineralisierung in den ventralen Quadranten Q2, Q3, Q4.</i></p>

Abb. 19: Lage der Dichtemaxima in den verschiedenen Quadranten der Deckplatte

Ergebnisse

4.2 Auswertung der Mineralisierungsverteilungen

In Abb. 20 ist die Gesamtmineralisierung aller untersuchten Halswirbelsäulen dargestellt. Hierfür wurden die Mineralisierungswerte der einzelnen Halswirbel pro Wirbelsäule addiert und anschließend durch die Anzahl der erhaltenen Wirbelkörper dividiert. Die Abbildung macht deutlich, dass die durchschnittliche Mineralisierung innerhalb der einzelnen Wirbelsäulen stark schwankt und, bezogen auf das Kollektiv 2 (G2), eine breite Streuung innerhalb des ersten und dritten Quartils vorliegt.

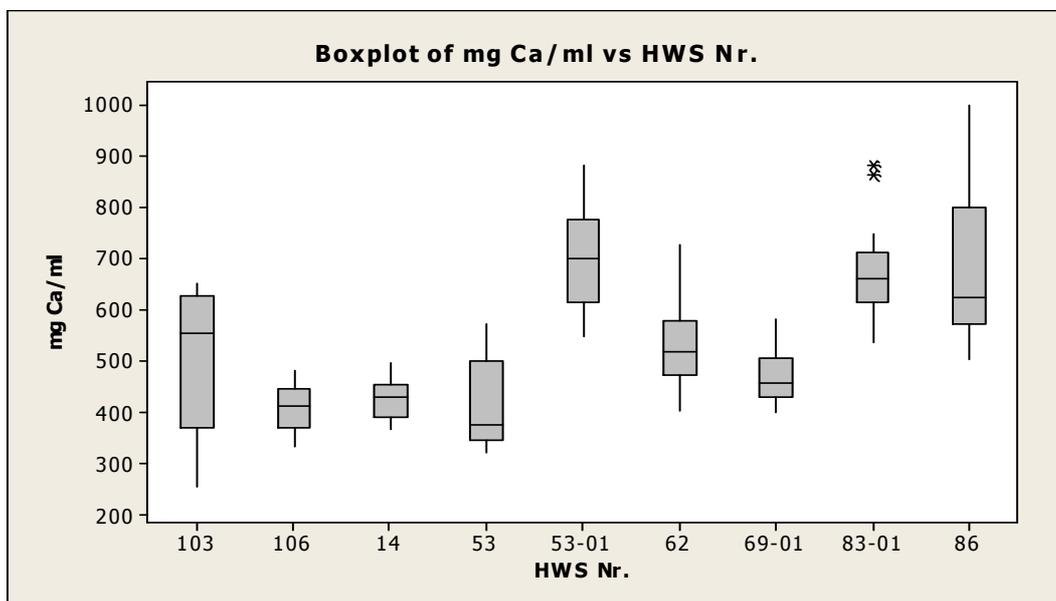


Abb. 20: Gesamtmineralisierung der einzelnen HWS im Vergleich

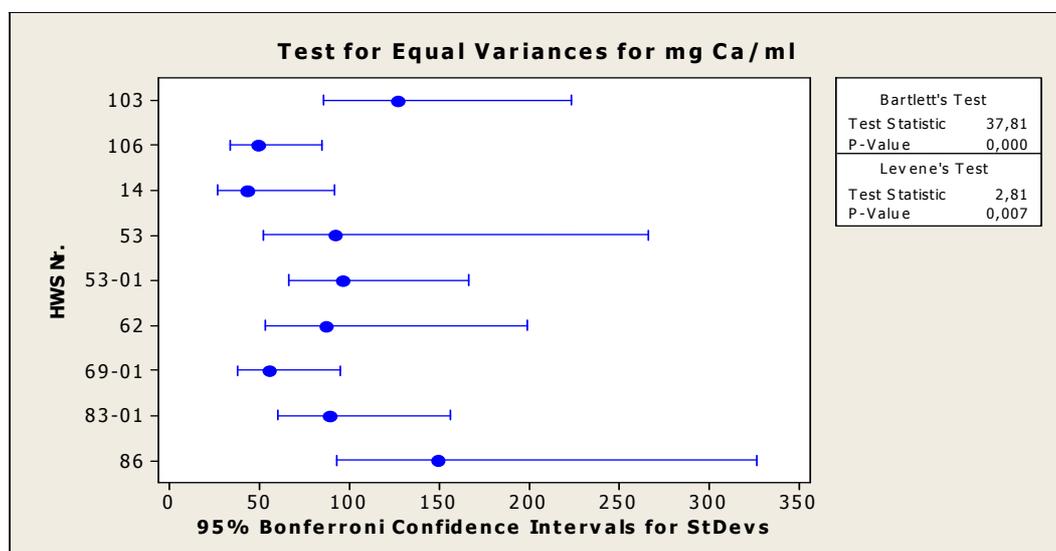


Abb. 21: Test auf gleiche Varianz der Mineralisierung des Gesamtkollektivs

Ergebnisse

Der Test auf gleiche Varianz bestätigte, dass die verschiedenen Halswirbelsäulen keine gleiche Streuung aufwiesen, da P-Value < 0,05.

Betrachtet man das Gesamtkollektiv der untersuchten Halswirbelsäulen, dargestellt in Abb. 21, so ließen sich allerdings innerhalb des Kollektivs zwei Gruppen mit jeweils gleicher Varianz bei P-Value > 0,05 bilden.

Im Folgenden wurde daher bei verschiedenen Analysen und Untersuchungen zwischen Gruppe 1 (G1) und Gruppe 2 (G2) unterschieden.

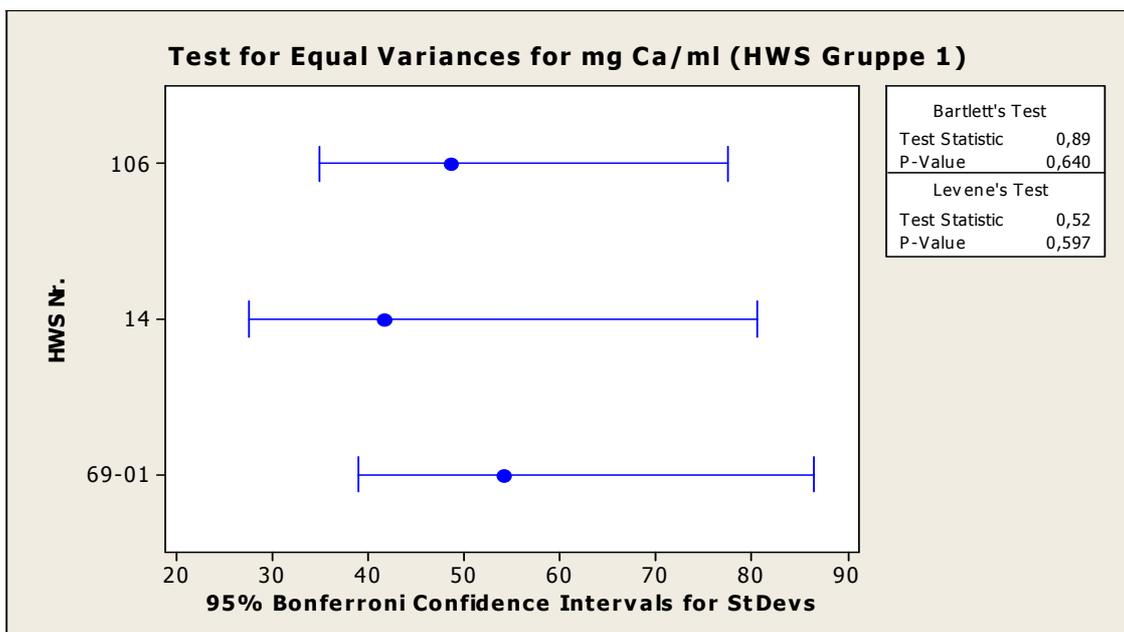


Abb. 22: Test auf gleiche Varianz der Gesamtmineralisierung in Gruppe 1 (G1)

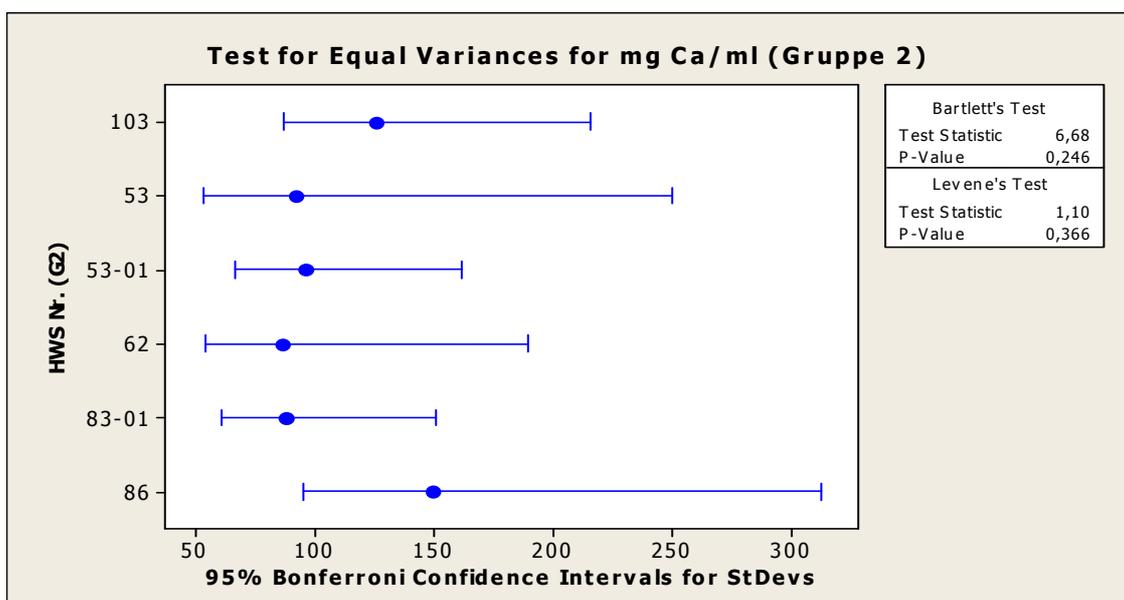


Abb. 23: Test auf gleiche Varianz der Gesamtmineralisierung in Gruppe 2 (G2)

Ergebnisse

4.2.1 Vergleich der Gesamtmineralisierung von GP und DP

Die Gesamtmineralisierung im subchondralen Knochen der Grundplatten betrug im Mittel 521,98 mg Ca/ml. Die Werte befanden sich zwischen minimal 295,35 mg Ca/ml und maximal 873,5 mg Ca/ml.

Die Messung der Gesamtkalziumkonzentration in der SCBP der Deckplatte betrug durchschnittlich 532,91 mg Ca/ml. Der niedrigste Wert betrug hier 331,25 mg Ca/ml bei einem Maximum von 936,0 mg Ca/ml.

Weder im Gesamtkollektiv noch im intra- bzw. interindividuellen Vergleich von G1 gegen G2 zeigte sich eine signifikant unterschiedliche Streuung.

4.2.2 Vergleich des Mineralisierungsquotienten MQ1 von GP und DP

Der kaudo-kraniale Mineralisierungsquotient (MQ1), berechnet nach der in Kapitel 3.3.3 erläuterten Formel, betrug im Mittel 1,01. Die Werte lagen zwischen dem Minimalwert von 0,61 und dem Maximalwert von 1,38 (s. Abb. 24).

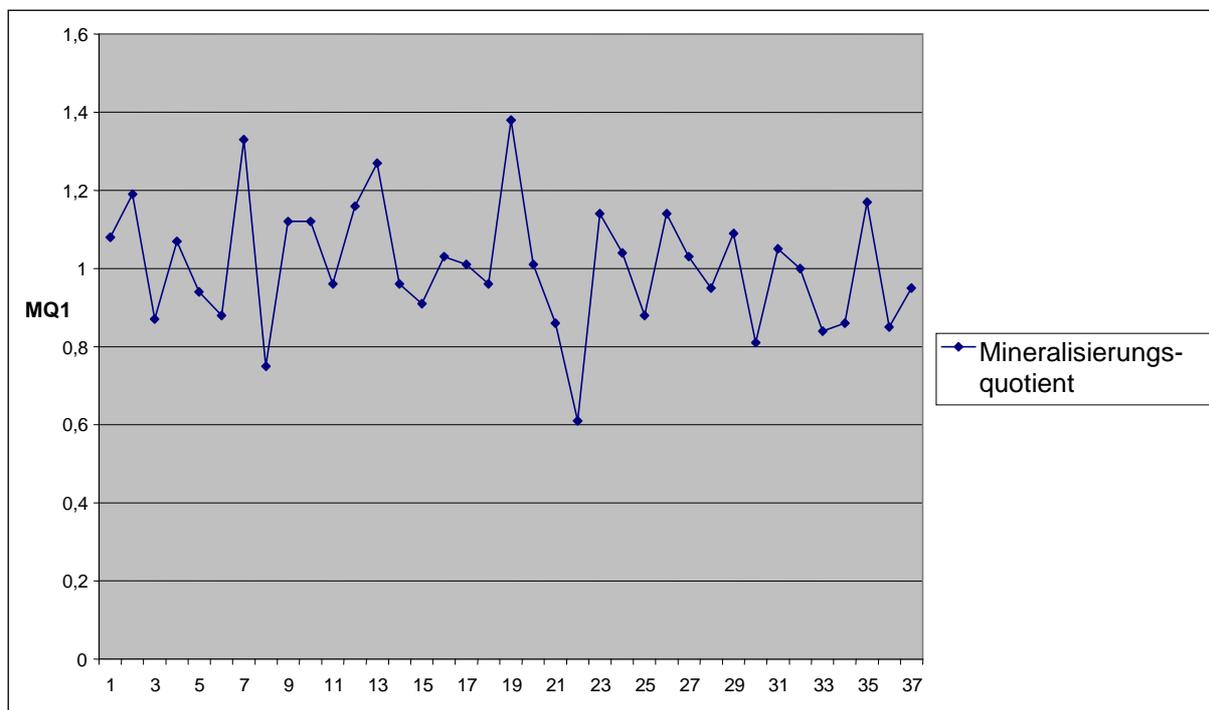


Abb. 24: Darstellung des Mineralisierungsquotienten MQ1

Von den insgesamt 37 errechneten Mineralisierungsquotienten zeigten 19 (51,35 %) einen Wert > 1 und 18 (48,65 %) ein Wert < 1 an. Daraus geht hervor, dass sich kein

Ergebnisse

signifikanter Unterschied im intraindividuellen Vergleich der Gesamtmineralisierung der Grund- bzw. Deckplatte eines Wirbelkörpers fand.

4.2.3 Seitenvergleich der Gesamtmineralisierung von GP und DP

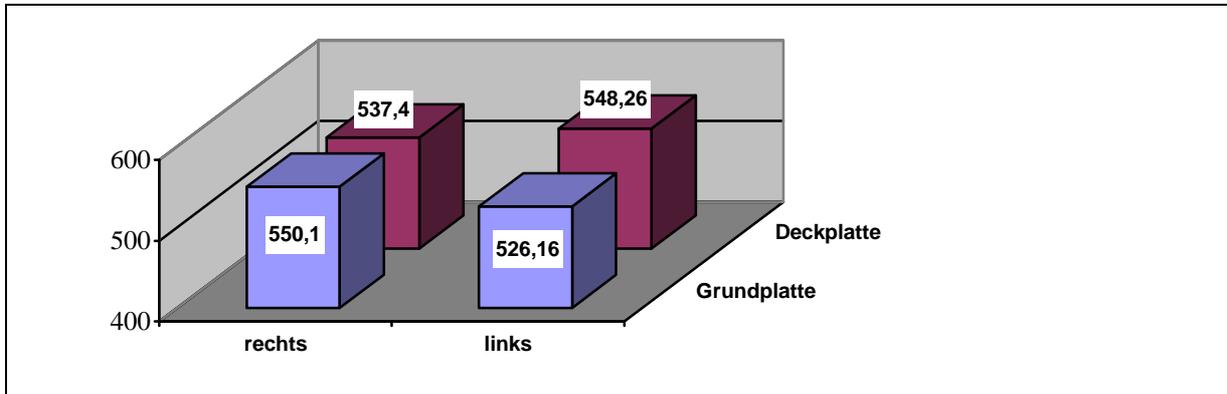


Abb. 25: Mittlere Gesamtmineralisierung in mg Ca/ml nach Unterteilung der Grund- und Deckplatten

Der intraindividuelle Vergleich der Gesamtmineralisierung von Grund- und Deckplatten nach deren Unterteilung in eine rechte und eine linke Hälfte zeigte weder für Gruppe 1 noch für Gruppe 2 eine signifikant unterschiedliche Streuung bei $P\text{-Value} > 0,05$. Dementsprechend zeigte sich in keiner Gruppe ein signifikant unterschiedlicher Mittelwert bezüglich der Gesamtmineralisierung in mg Ca/ml der rechten und linken Seite.

Innerhalb der jeweiligen kaudalen bzw. kranialen Abschlussplatte traten demnach keine signifikanten Unterschiede in der Gesamtmineralisierung einer Hälfte auf.

Die folgenden Abb. 26 und 27 betonen graphisch die eng beieinander liegenden Mineralisierungswerte, sowohl innerhalb der Grund- als auch der Deckplatten. Fehlende Werte in den genannten Abbildungen sind auf Präparate zurückzuführen, deren Gelenkflächen wegen starker arthrotischer Veränderungen nicht analysiert werden konnten und daher ausgeschlossen wurden.

Ergebnisse

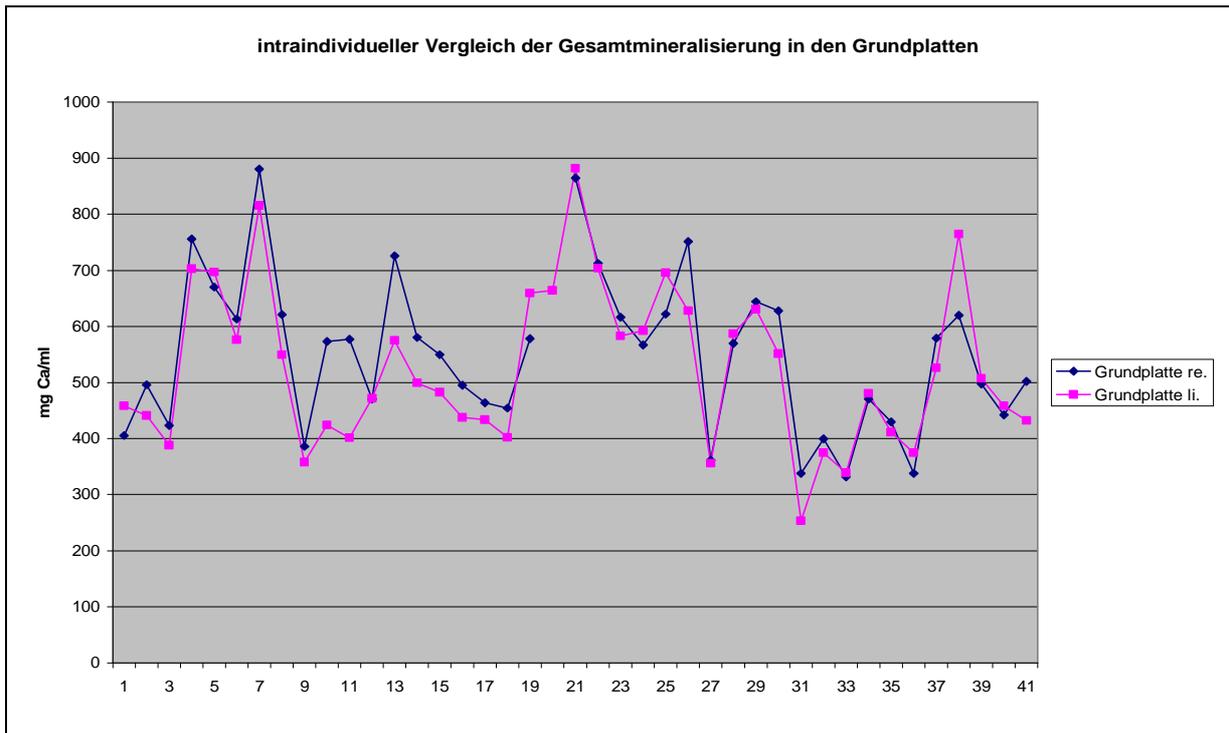


Abb. 26: Seitenvergleich der Gesamtmineralisierung für die Grundplatten

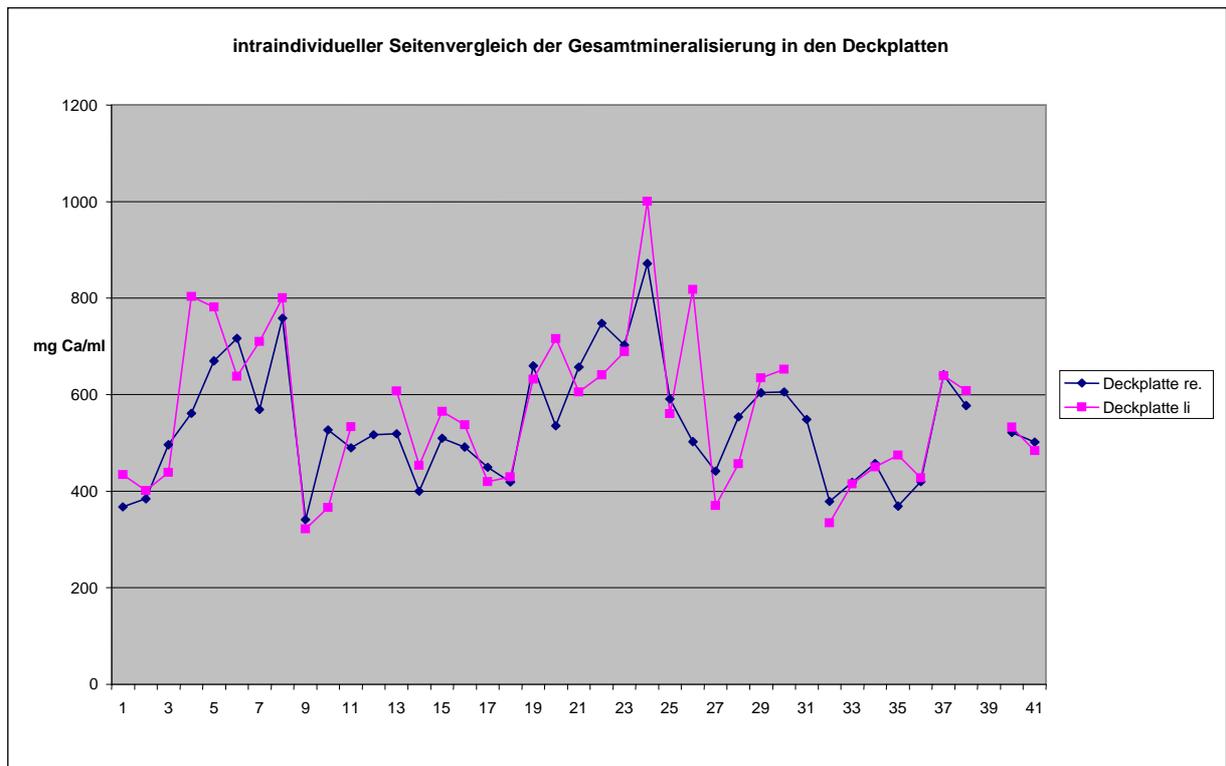


Abb. 27: Vergleich der Gesamtmineralisierung für die Deckplatten

Ergebnisse

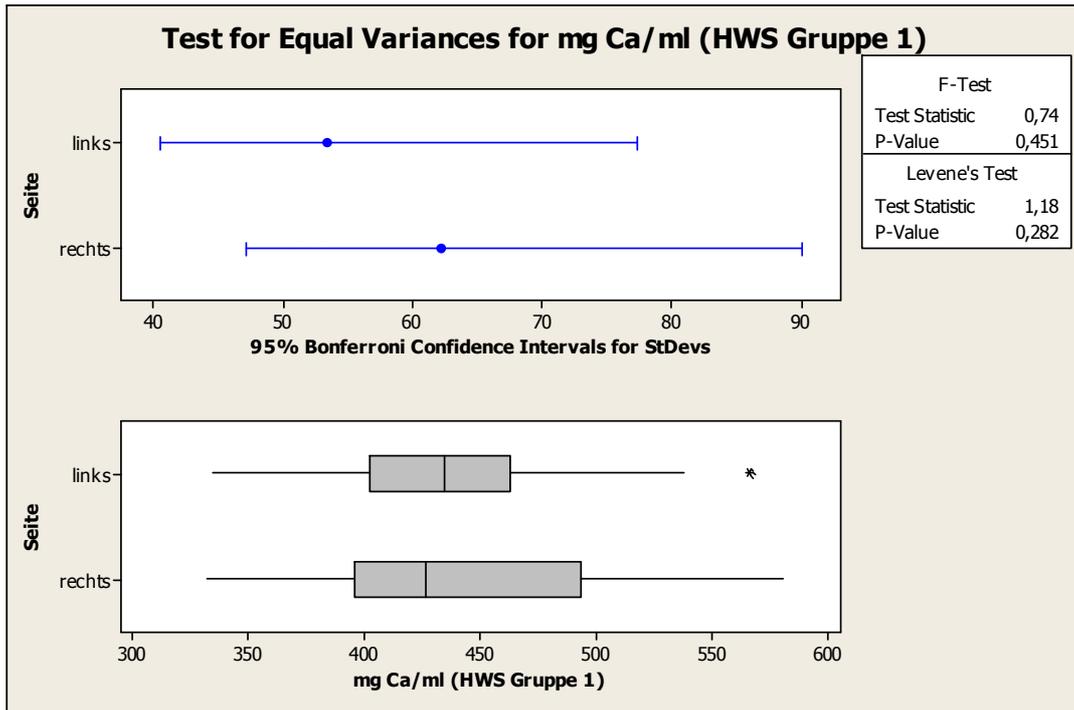


Abb. 28: Seitenvergleich der Gesamtmineralisierung in mg Ca/ml für G1

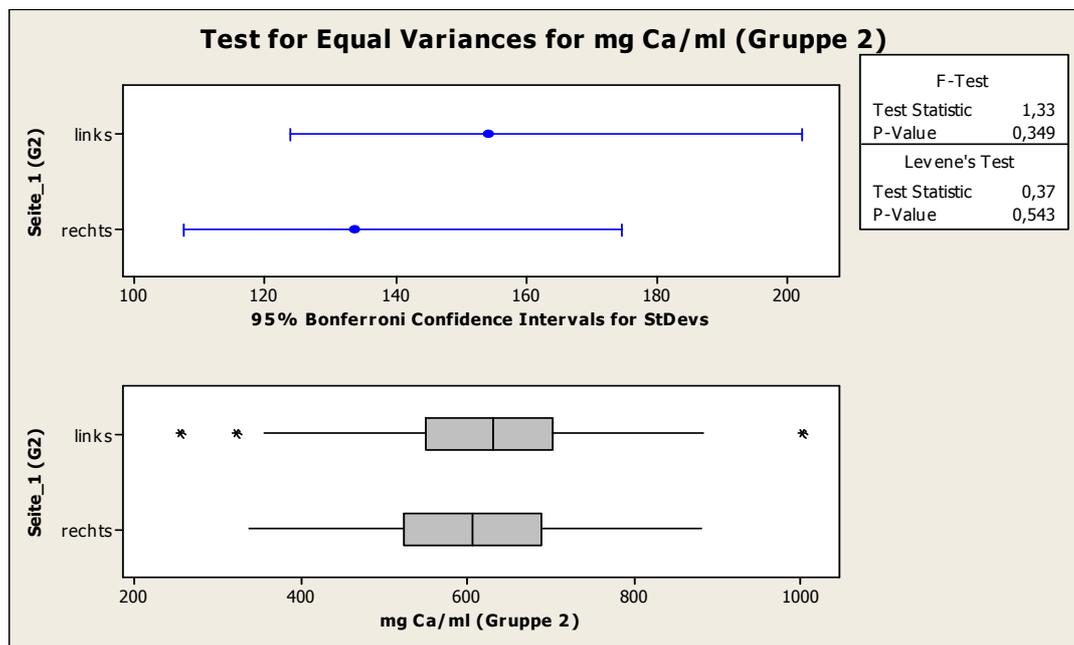


Abb. 29: Seitenvergleich der Gesamtmineralisierung in mg Ca/ml für G2

Die Abb. 28 und 29 zeigen sowohl die Standardabweichung als auch den Test auf gleiche Varianz innerhalb der Gruppe 1 bzw. Gruppe 2 an. Hierbei ist zu beachten, dass keine Unterteilung in Grund- bzw. Deckplatten vorgenommen wurde, da ein signifikanter Unterschied bezüglich der Gesamtmineralisierung dieser Gruppierung bereits zuvor ausgeschlossen wurde.

Ergebnisse

Abb. 28 ist zu entnehmen, dass es in der Gesamtmineralisierung der linken Hälfte innerhalb der Gruppe 1 einen Wert gibt, dessen Mineralisierung im Vergleich mit dem restlichen Kollektiv deutlich nach oben abweicht. Der Wert wurde der Grundplatte von HWS83-HWK5 zugeordnet. Abb. 29 zeigt betreffend Gruppe 2 einen abweichenden Wert in der Gesamtmineralisierung der linken Seite nach oben und zwei abweichende Werte nach unten.

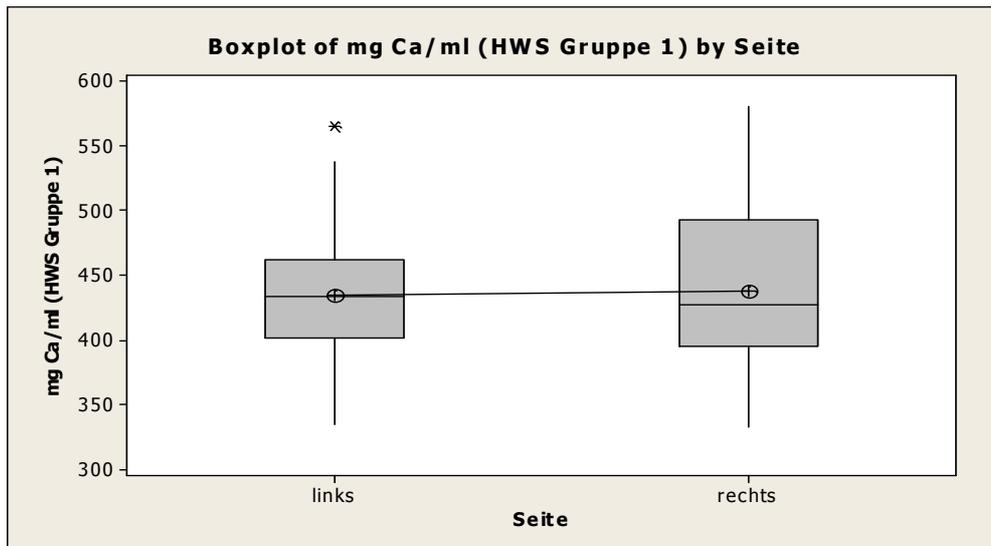


Abb. 30: Boxplot Gesamtmineralisierung im Seitenvergleich G1

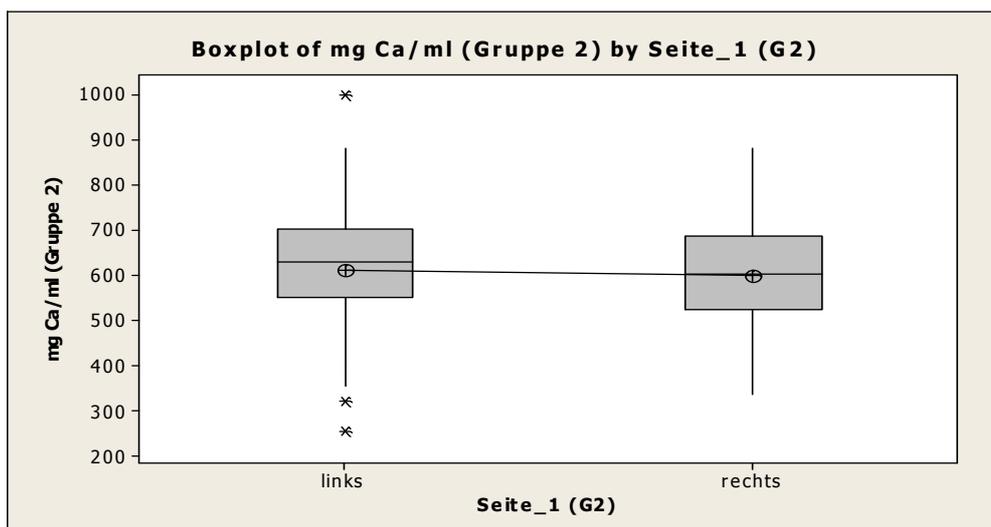


Abb. 31: Boxplot Gesamtmineralisierung im Seitenvergleich G2

Die Boxplots in den Abb. 30 und 31 lassen erkennen, dass weder in Gruppe 1 noch in Gruppe 2 signifikant unterschiedliche Mittelwerte bezüglich der entsprechenden rechts- oder linksseitigen Mineralisierung vorliegen.

Ergebnisse

Die statistische Auswertung der Gesamtmineralisierung, bezogen auf den intraindividuellen Vergleich der Differenzen zwischen der rechten und der linken Hälfte einer Grund- bzw. Deckplatte, zeigte bei Betrachtung des prozentualen Verhältnisses normalverteilte Werte (s. Anhang Abb. 4).

4.2.4 Vergleich der Gesamtmineralisierung korrespondierender GF

Die statistische Auswertung der Gesamtmineralisierung im Bereich der korrespondierenden Gelenkflächen ergab innerhalb der Gruppen 1 und 2 keine signifikant unterschiedliche Streuung. Hinsichtlich des vorliegenden Mittelwertes zeigte sich ebenfalls keine signifikant unterschiedliche Verteilung.

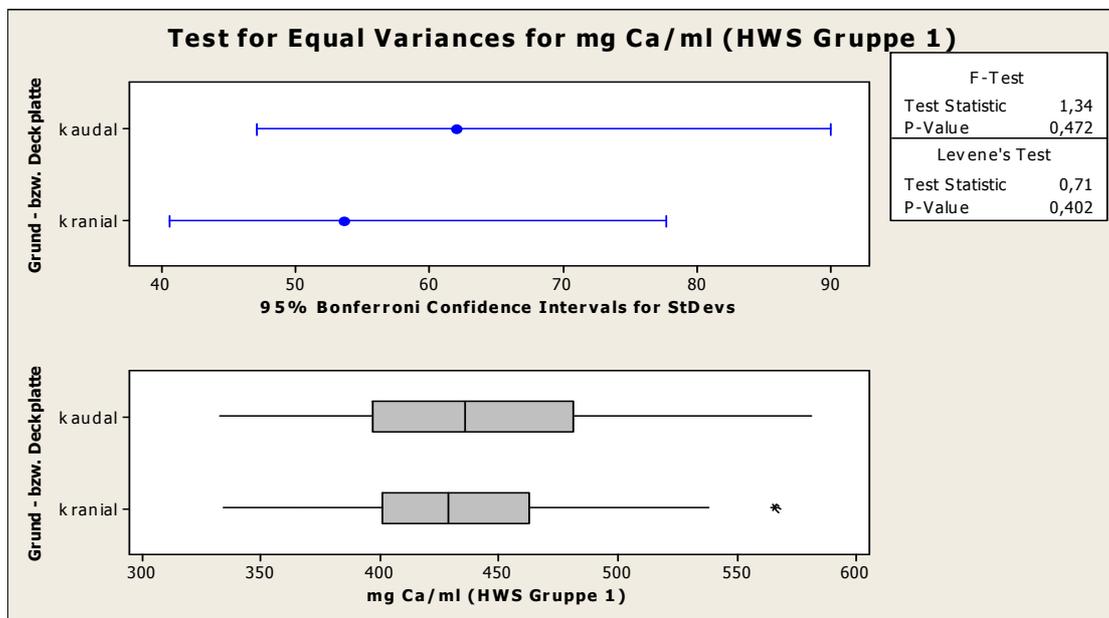


Abb. 32: Gesamtmineralisierung und StDevs korrespondierender GF in G1

Ergebnisse

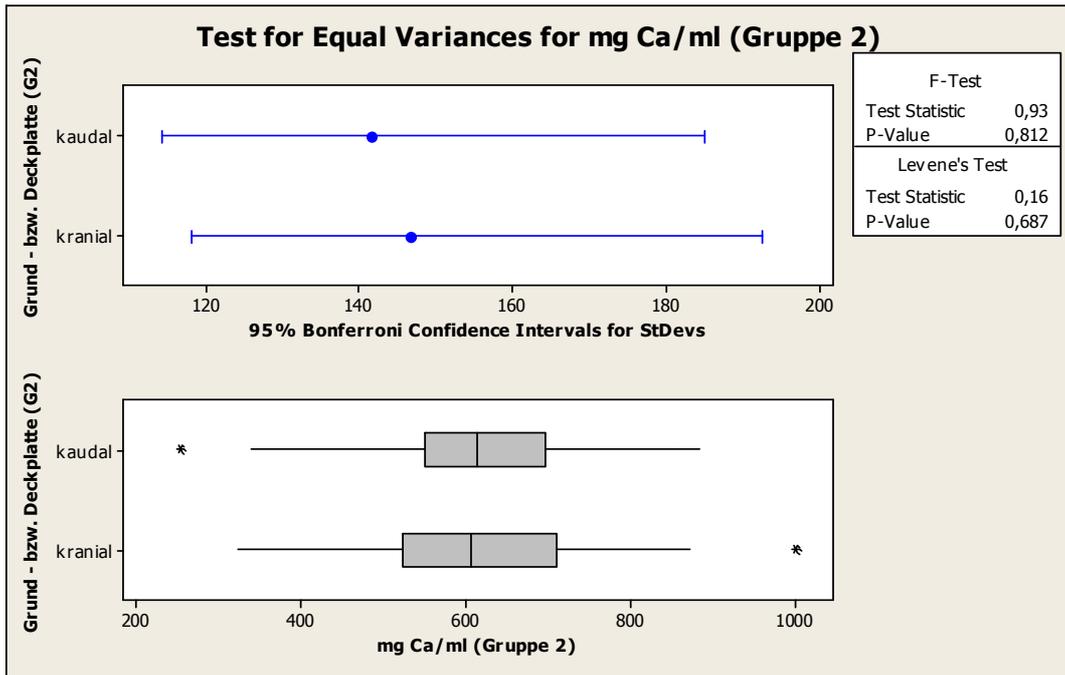


Abb. 33: Gesamtmineralisierung und StDevs korrespondierender GF in G2

Die statistische Auswertung der Mineralisierung korrespondierender Gelenkflächen zeigte weder in Gruppe 1 noch in Gruppe 2 eine signifikant unterschiedliche Varianz. In Gruppe 2 zeigt HWS 103-01 mit $P < 0,011$ keine Normalverteilung der Werte in mg Ca/ml.

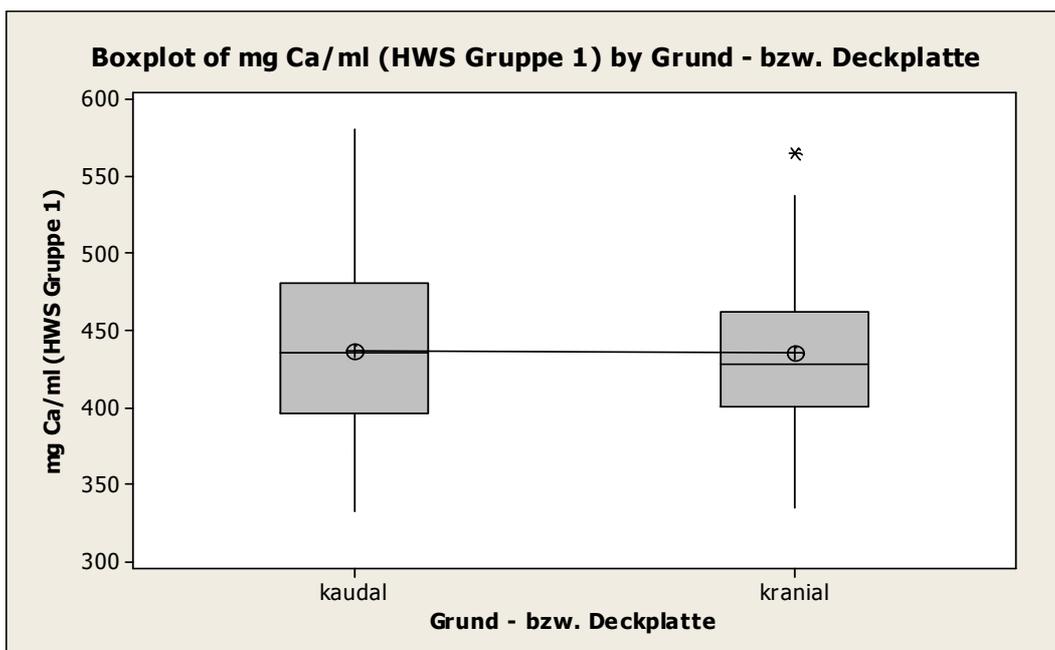


Abb. 34: Boxplot Mineralisierung korrespondierender GF in mg Ca/ml für G1

Ergebnisse

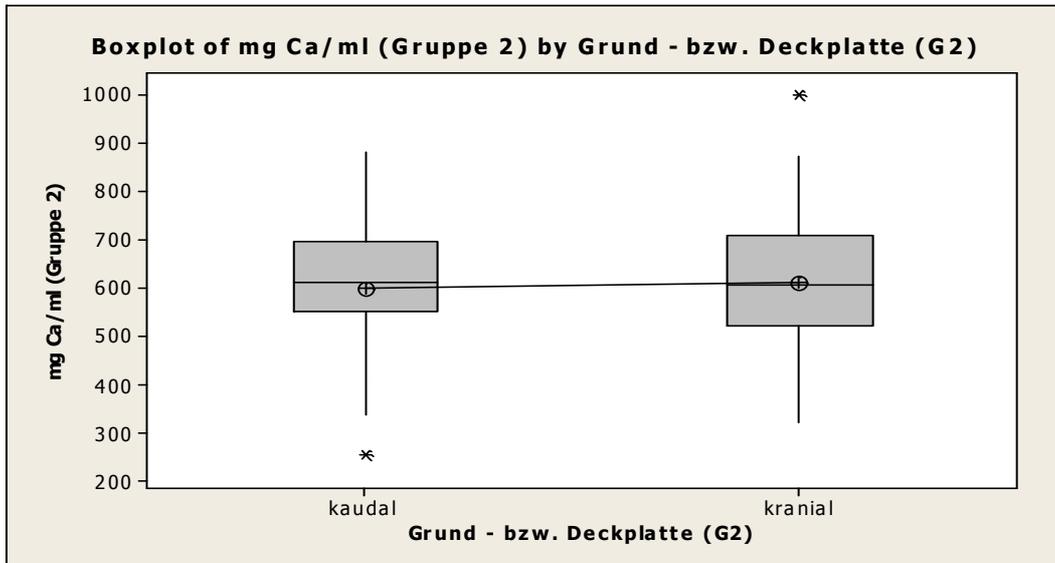


Abb. 35: Boxplot Mineralisierung korrespondierender GF in mg Ca/ml für G2

Die anschließend durchgeführte Regressionsanalyse zeigt keinen Zusammenhang zwischen der Gesamtmineralisierung in mg Ca/ml und der jeweiligen Nummer des Halswirbels (s. Anhang Abb. 1-3).

4.2.5 Vergleich des Mineralisierungsquotienten MQ2 korrespondierender GF

Die Auswertung des Mineralisierungsquotienten MQ2 zeigte bei 31 von insgesamt 52 untersuchten korrespondierenden Gelenkflächen einen Wert > 1 und bei 21 Gelenkflächen einen Wert < 1 . Demnach lag bei insgesamt 59,62 % des untersuchten Kollektivs eine höhere Gesamtmineralisierung der Grundplatten vor. Von diesen 31 Mineralisierungsquotienten ließen sich 18 (34,62 %) der rechten Hälfte und 13 (25 %) der linken Hälfte der Grundplatte zuordnen.

Von den 21 Gelenkflächen, deren Gesamtmineralisierung im Bereich der Deckplatte höher war als in der Grundplatte, entfielen 13 (25 %) auf die linke und 8 (15,38 %) auf die rechte Hälfte der Gelenkfläche. Die statistische Auswertung zeigte eine Normalverteilung der Gesamtmineralisierung innerhalb der korrespondierenden Gelenkflächen (Anhang Abb. 5).

Mineralisierungsquotient MQ2			
MQ2 > 1		MQ2 < 1	
re.	li.	re.	li.
18 (34,62 %)	13 (25 %)	8 (15,38 %)	13 (25 %)

Tab. 14: Mineralisierungsquotient korrespondierender GF (MQ2)

Ergebnisse

4.3 Auswertung makroskopischer Untersuchungen

4.3.1 Die Disci intervertebrales

Die Begutachtung der Disci intervertebrales und der entsprechenden morphologischen Veränderungen ergab nach Anfertigung der planparallelen Schnittebenen folgende Resultate.

	Anzahl der untersuchten Präparate	Anzahl der betroffenen Präparate	Anzahl der betroffenen Präparate in %
Ausbildung uncovertebraler Spalten	20	2	10 %
Ausbildung durchgehender Einrisse	20	20	100 %
Ausbildung konfluierender Einrisse	20	6	30 %
Vorhandensein eines meniskoiden Gewebekeils	20	6	30 %
Umbau eines Uncovertebralgelenkes zum Stützgelenk	20	20	100 %
Rissbildung C7/Th1	12	2	16,67 %
Affektion des Foramen intervertebrale	20	9	45 %

Tab. 15: Ergebnisse makroskopischer Untersuchungen an den Disci intervertebrales

Tab. 15 ist zu entnehmen, dass 100 % der 20 makroskopisch untersuchten Halswirbelsäulen Rissbildungen innerhalb der Disci intervertebrales aufwiesen. Diese Spaltbildungen unterschieden sich jedoch zum Teil erheblich.

Hervorzuheben ist, dass mindestens zwei Zwischenwirbelscheiben pro Halswirbelsäulenpräparat eine vollständig durch den Discus intervertebralis hindurch laufende Spaltbildung zeigten. Es konnten in Abhängigkeit von der Morphologie zwei Subtypen der Rissbildungen unterschieden werden.

Diese und andere maßgebliche Beobachtungen werden im folgenden Abschnitt anhand der angefertigten Digitalfotographien demonstriert.

Ergebnisse

Jedes der insgesamt 20 untersuchten Präparate zeigte isolierte, also weder aufgefaserter, noch aus mehreren Zuläufen bestehende Einrisse, die die betroffenen Disci intervertebrales in einen kranialen und einen kaudalen Anteil trennten.

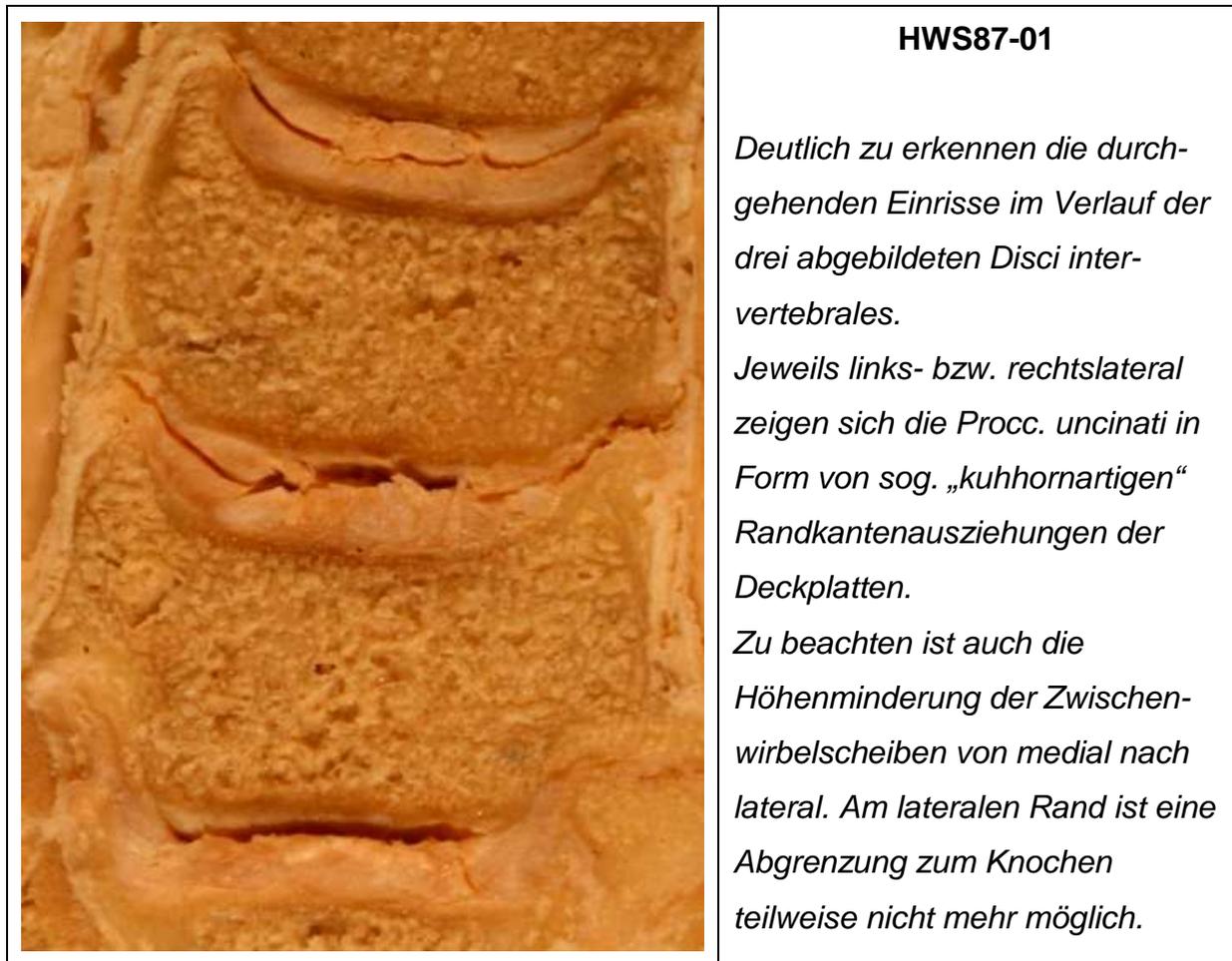


Abb. 36: Darstellung vollständiger Einrisse durch die Zwischenwirbelscheiben im Frontalschnitt einer HWS

Im Gegensatz zu den in Abb. 36 dargestellten vollständigen Einrissen ließen sich bei zwei Halswirbelsäulenpräparaten (10 %) innerhalb eines Segmentes laterale Spaltbildungen im Randbereich der Bandscheibe nachweisen. Diese Uncovertebralspalten waren dadurch gekennzeichnet, dass die seitlichen Spalten nicht auf Höhe des Gallertkernes miteinander verschmolzen und somit die Bandscheibe nicht vollständig in zwei Hälften geteilt wurde. Abb. 37 stellt eines der beiden betroffenen Segmente dar.

Es zeigte sich, dass die Zwischenwirbelscheibe eine deutliche Höhenminderung aufwies und sowohl im Bereich der Grund- als auch der Deckplatte deutliche

Ergebnisse

knöcherner Unregelmäßigkeiten als Ausdruck eines fortschreitenden Verschleißes vorlagen. Ferner bleibt festzuhalten, dass die seitlichen Rissbildungen in beiden Fällen bilateral auftraten und sich von der Form und Ausdehnung ähnelten.

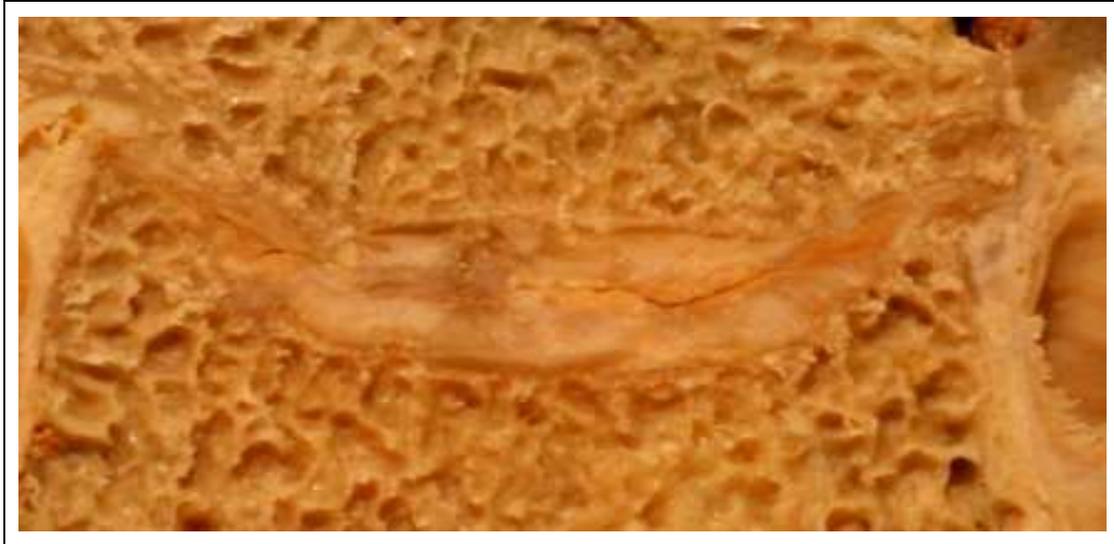


Abb. 37: Uncovertebrale Spalten ohne vollständige Teilung der ZWS

Bei insgesamt 12 (60 %) der 20 untersuchten Halswirbelsäulen befand sich der erste Brustwirbelkörper noch im Verbund des entnommenen Präparates. Hierdurch wurde eine Beurteilung des Discus intervertebralis zwischen dem 7. Halswirbel und dem 1. Brustwirbel möglich. Es fand sich bei keiner der acht Zwischenwirbelscheiben ein vollständig durch den Discus intervertebralis ziehender Einriss. Lediglich zwei (16,67 %) der acht Disci zeigten am lateralen Rand Einrisse, die den Uncovertebralspalten von der morphologischen Beschaffenheit ähnelten (Abb. 38).

Im Rahmen der makroskopischen Auswertung konnten bei insgesamt sechs Präparaten (30 %) zentrale Rissbildungen im Bandscheibengewebe nachgewiesen werden, die keine Ausläufer nach lateral erkennen ließen. Diese, demnach im Bereich des Gallertkerns vorzufindenden Rissbildungen fielen durch die vergleichsweise diffuse Ausdehnung auf. Waren die durchgehenden Spalten durch einen annähernd geradlinigen Verlauf charakterisiert, so waren die zentralen Spaltbildungen durch eine Konfluenz aus mehreren zusammenfließenden Rissen gekennzeichnet.

Ergebnisse

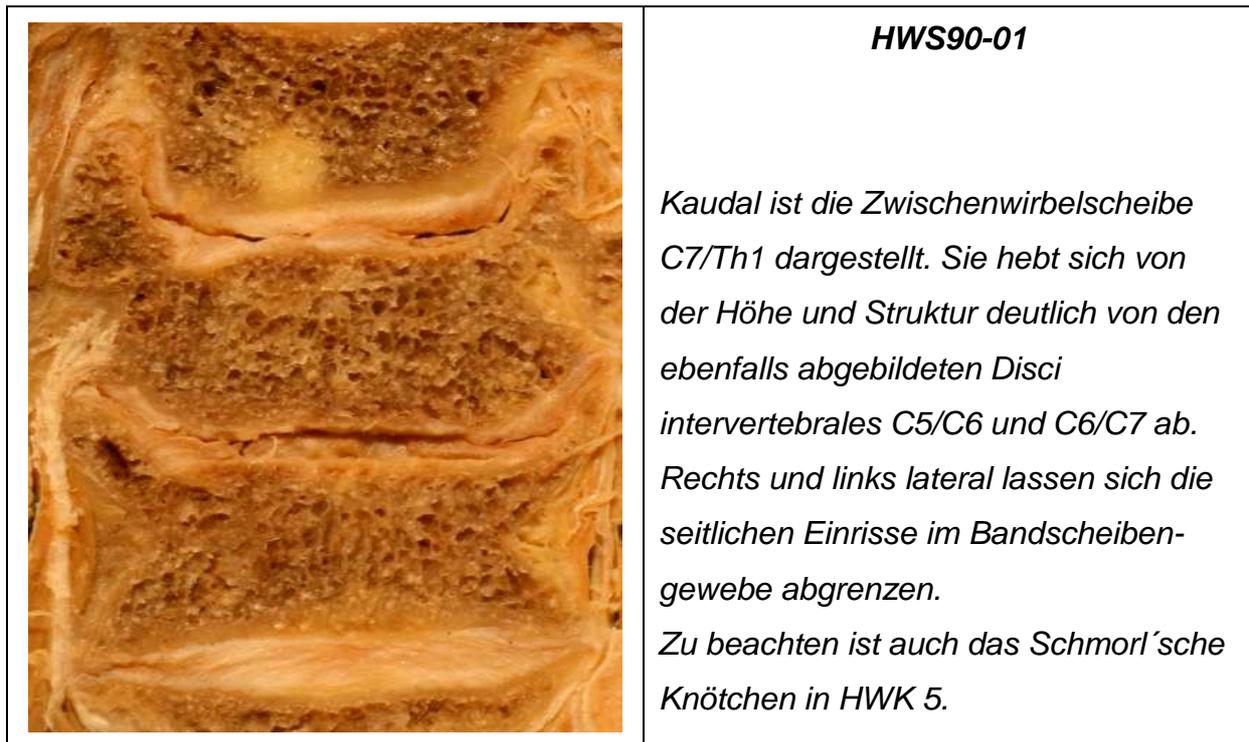


Abb. 38: Frontalschnitt einer HWS mit erhaltenem Discus intervertebralis C7/Th1

Es zeigte sich bei zwei der sechs Präparate, dass einzelne Ausläufer an den lateralen Rand der Zwischenwirbelscheibe angrenzten, den Anulus fibrosus jedoch nicht vollständig teilten (Abb. 39).

Weiter wurde bei insgesamt sechs (30 %) von 20 untersuchten Halswirbelsäulen das Vorhandensein eines meniskoiden Gewebekeils am seitlichen Rand der Zwischenwirbelscheiben beobachtet. Diese Bindegewebskeile ließen sich in jedem der sechs Fälle beidseitig nachweisen, nie lagen sie einseitig vor (Abb. 40).



Abb. 39: Zentrale Einrisse des Gallertkerns ohne Beteiligung des Anulus fibrosus

Ergebnisse

Pro betroffenem Präparat fanden sich diese „Menisci“ immer innerhalb eines Bewegungssegmentes. Auffallend hingegen war, dass die gefundenen meniskoiden Strukturen hauptsächlich in den unteren Segmenten der Halswirbelsäule vorkamen. Die genaue Verteilung ist der Tab. 16 zu entnehmen.

Anzahl der meniskoiden Gewebekeile / cervikale Segmenthöhe				
C 3/4	C4/5	C5/6	C6/7	C7/Th1
-	1	1	4	-

Tab. 16: Zuordnung der meniskoiden Gewebekeile zur jeweiligen Segmenthöhe

Die Gewebskeile ähnelten morphologisch den von den Facettengelenken bekannten Synovialfalten. Die Keile fanden sich an den lateralen Rändern der Zwischenwirbelscheiben und waren über die Basis mit dem angrenzenden Bindegewebe verbunden.



Abb. 40: Meniskoider Gewebekeil im Bereich eines Uncovertebralgelenkes

Die Untersuchung und Begutachtung der 20 Halswirbelsäulen ergab weiter, dass es im Verbund von 16 HWS mindestens in drei Bewegungssegmenten zu einem Umbau der Uncovertebralgelenke gekommen war. Es zeigten sich steil gestellte Procc. uncinati, die zur Spitze hin deutlich abgeflacht und elefantenfußähnlich verbreitert waren. Sowohl Abb. 40 als auch Abb. 41 zeigen Präparate an denen sich bereits makroskopisch die vermehrte subchondrale Sklerosierung im Bereich der Uncovertebralgelenke nachvollziehen lässt. Abb. 41 lässt weiter erkennen, dass die

Ergebnisse

morphologischen Umbauprozesse der Uncovertebralgelenke zu Stenosen im Bereich der A. vertebralis führen können.



Abb. 41: Morphologische Umbauprozesse des Uncovertebralgelenkes

4.3.2 Morphologie der knöchernen Halswirbelsäule

Die Untersuchung und anschließende Begutachtung der konventionellen Röntgenbilder zeigte, dass bei jeder der 20 Halswirbelsäulen (100 %) degenerative Veränderungen des knöchernen Skeletts vorlagen.

An 90 % der Präparate ließen sich osteophytäre Randausziehungen feststellen, sog. Spondylophyten. Es fanden sich verschiedene Stadien des Gelenkverschleißes von der beginnenden Gelenkspaltverschmälerung über die nativ-radiologisch vermehrte subchondrale Sklerosierung bis hin zur Entstehung von Syndesmophyten. Von den 20 untersuchten Halswirbelsäulen fand sich bei vier Präparaten (20 %) eine Blockwirbelbildung mit vollständiger Fusion zweier Halswirbelkörper.

Der 7. HWK von Präparat HWS 106-01 wies eine frische Wirbelkörperfraktur mit vertikal verlaufendem, knöchern nicht konsolidiertem Bruchspalt auf (Typ A nach Aebi und Nazarian).

90 % aller dargestellten Uncovertebralgelenke wiesen einen fortgeschrittenen Verschleiß im Sinne einer Uncovertebralarthrose auf. Die Procc. uncinati waren nach kranial kolbenförmig aufgetrieben, zum Teil erheblich deformiert und zeigten im subchondralen Bereich eine makroskopisch deutlich zu erkennende, erhöhte Sklerosierung im Vergleich mit nicht betroffenen Präparaten.

Ergebnisse

Auffallend war, dass sich scheinbar mit einem fortschreitenden morphologischen Umbau der Uncovertebralgelenke auch der Winkel der Processus, gemessen an der Geraden, die an der jeweiligen Deckplatte angelegt wurde, zunehmend abflachte. Diese Lateralisation, im Sinne einer fortschreitenden morphologischen Veränderung der Ursprungsform eines Halswirbelkörpers, führte bei acht (40 %) von 20 untersuchten Präparaten mindestens auf Höhe eines Segmentes zu einer Affektion des Foramen intervertebrale.

	Parameter	Anzahl der untersuchten Präparate	Anzahl der betroffenen Präparate	Anzahl der betroffenen Präparate in %
Wirbelkörper	Spondylophyten (Randzacken, Spangen, Höcker)	20	18	90 %
	Blockwirbelbildung	20	4	20 %
	Morphologische Veränderungen des Foramen intervertebrale	20	8	40 %
	Tumoröse Veränderungen	20	2	10 %
	Traumatische Veränderungen	20	1	5 %
Uncovertebralgelenke	Morphologische Veränderungen	20	18	90 %
	Subchondrale Sklerosierung	20	18	90 %
	Umbau des Uncovertebralgelenkes zum Stützgelenk	20	16	80 %

Tab. 17: Ergebnisse der nativ-radiologischen Untersuchungen

An zwei Präparaten ließ sich eine signifikante Stenosierung der A. vertebralis nachweisen, über deren klinische Relevanz sich retrospektiv keine Aussage treffen lässt. Als signifikante Stenose galt eine Verengung des Foramen transversarium von > 50 %.

Ergebnisse

An acht Präparaten ließen sich in mindestens einem Corpus vertebrae sog. Schmorl'sche Knötchen nachweisen. Hierbei handelt es sich um knorpelig umgewandelte Bandscheibeneinbrüche in die Grund- und Deckplatten der Wirbelsäule, die häufig mit der Scheuermann-Krankheit assoziiert sind. Pathogenetisch kommt es durch eine Überbelastung bzw. verminderte Resistenz der Ringapophysen von Grund- oder Deckplatten zu einem Einbruch von Bandscheibengewebe in den Wirbelkörper.

Ergebnisse

4.4 Auswertung der nativ-radiologischen Bildgebung

4.4.1 Darstellung der Röntgenschichtaufnahmen nach Falschfarbenbelegung

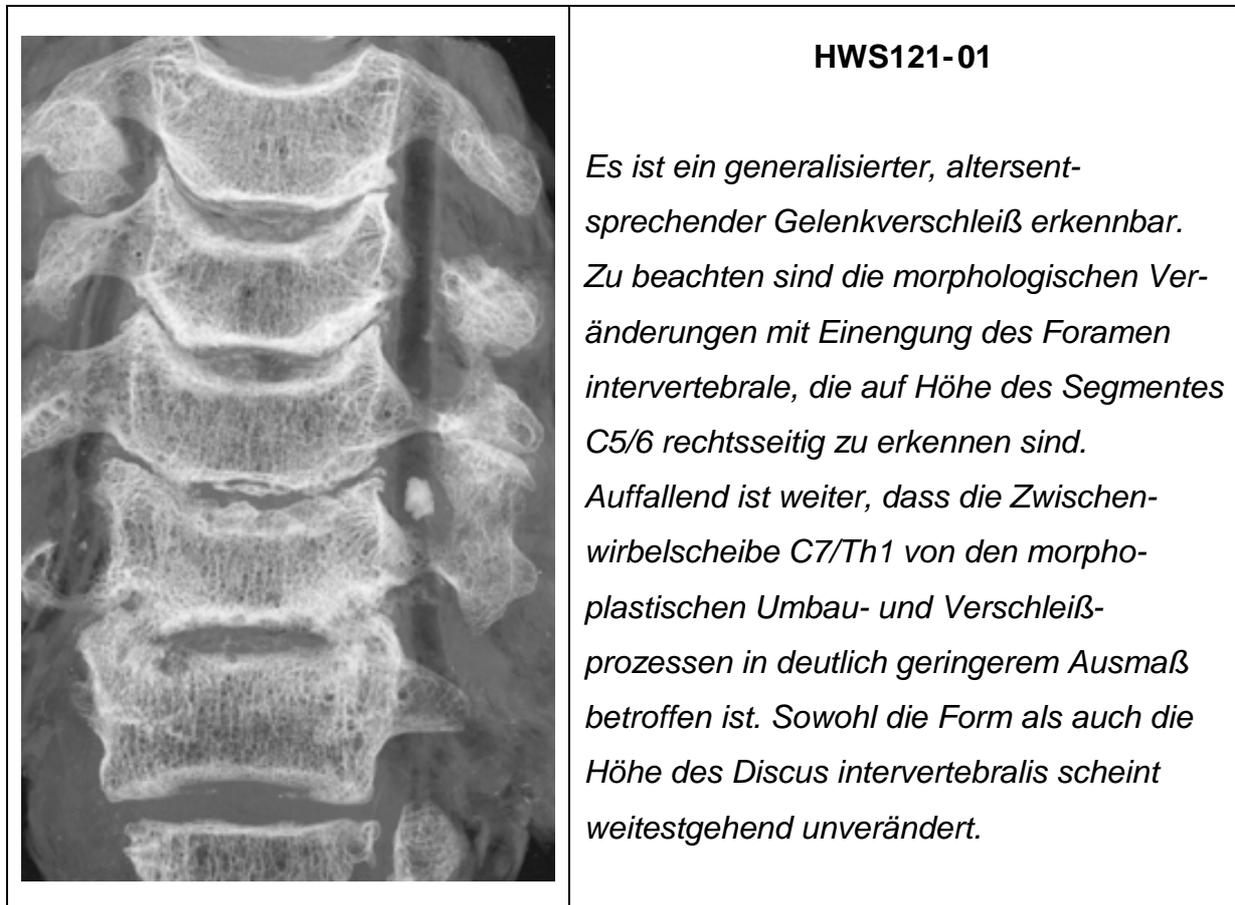


Abb. 42: Röntgenaufnahme eines planparallelen Schnittes von HWS121-01

Abb. 42 verdeutlicht die stattfindenden morphologischen Umbauprozesse im Bereich der unteren Halswirbelsäule. Anhand dieser einen Aufnahme, die stellvertretend für alle angefertigten Röntgenaufnahmen ausgesucht wurde, lassen sich einige Rückschlüsse im Hinblick auf die Pathomorphologie der HWS ziehen.

Die Betrachtung der Nativaufnahme zeigt, dass im Bereich der abgebildeten Uncovertebralgelenke deutlich zu erkennende Verschleißerscheinungen vorliegen. Spondylophytäre Randkantenausziehungen sind in allen dargestellten Bewegungssegmenten zu finden. Im Bereich der Procc. uncinati kommt die vermehrte subchondrale Sklerosierung zur Darstellung. Im Segment C6/7 zeigt sich eine isoliert das Uncovertebralgelenk betreffende Blockwirbelbildung mit Verschmelzung der korrespondierenden Gelenkflächen.

Ergebnisse

Die röntgendensitometrischen Untersuchungen der angefertigten planparallelen Schnittpräparate unterstrichen die nativ-radiologisch gemachten Beobachtungen. Die Falschfarbenbelegung führte zu einer Akzentuierung der erhöhten subchondralen Mineralisierung im Bereich der Uncovertebralgelenke.

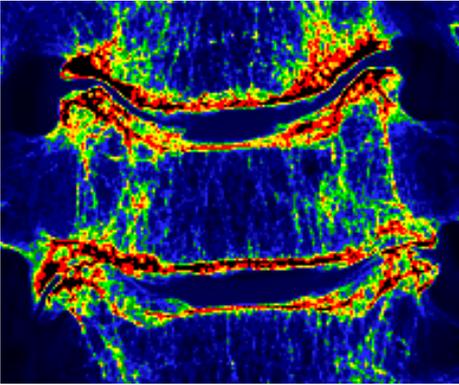
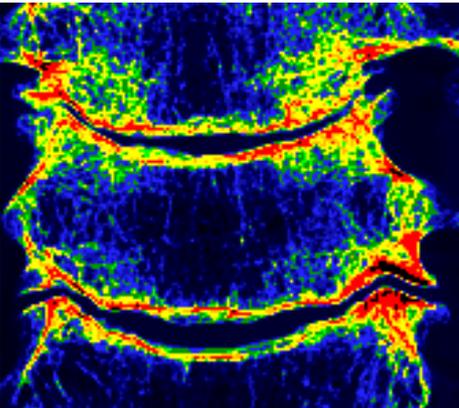
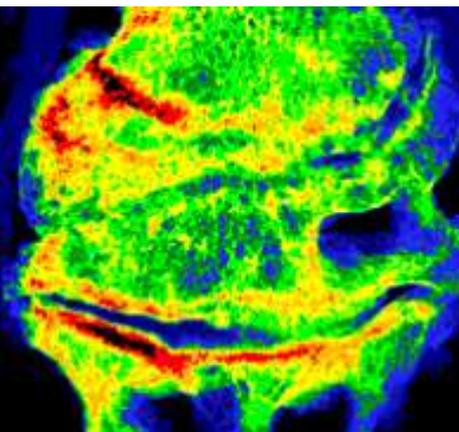
	<p>HWS80-01</p> <p><i>Beide Bewegungssegmente zeigen eine erhöhte subchondrale Mineralisierung der Uncovertebralgelenke mit HU > 1300. Im Bereich des kaudalen Segmentes erkennt man eine isoliert das Uncovertebralgelenk betreffende Blockwirbelbildung.</i></p>
	<p>HWS78-01</p> <p><i>Besonders im kaudalen Bewegungssegment erkennt man die kolbenartige Auftreibung der Procc. uncinati in Kombination mit einer Lateralisation als Ausdruck der erhöhten mechanischen Belastung.</i></p>
	<p>HWS96-01</p> <p><i>Es zeigt sich eine Blockwirbelbildung mit ausgeprägter Spondylophyten- und Syndesmophytenbildung. Auch nach der stattgefundenen Wirbelkörperverschmelzung ist zum Teil eine erhöhte Gesamtmineralisierung im Bereich der Uncovertebralgelenke zu erkennen.</i></p>

Abb. 43: Beispiele einiger Röntgensichtaufnahmen nach Falschfarbenbelegung

5 Diskussion

5.1 Diskussion des Materials

Die im Rahmen des Präparierkurses 2001 an der Ludwig-Maximilians-Universität München entnommenen 29 Halswirbelsäulen entstammen einem Patientengut, das ein durchschnittliches Sterbealter von 82 Jahren aufwies. Die Auswahl der Präparate erfolgte unabhängig von der Alters- und Geschlechterverteilung.

Die Regulation der Knochendichte und somit auch der Gesamtmineralisierung der subchondralen Knochenplatte wird von einer Vielzahl verschiedener Faktoren beeinflusst. Es lässt sich eine ätiologische Unterteilung in zwei Gruppen vornehmen. Die erste Gruppe erfasst direkt durch das jeweilige Individuum zu beeinflussende Faktoren, wie Ernährung und sportliche Aktivität. Die zweite Gruppe erfasst die Summe aller indirekten Einflüsse, die sich auf die Gesamtmineralisierung des knöchernen Skeletts auswirken. Hierunter fallen einerseits die verschiedenen Stoffwechselerkrankungen, wie z.B. die Osteoporose, andererseits werden Umstände wie das Lebensalter mit einbezogen.

Im Rahmen der vorliegenden Studie konnten retrospektiv keine Daten über die Lebensumstände der Personen, deren Präparate als Teil des Gesamtkollektivs untersucht und analysiert wurden, ermittelt werden. Somit war keine Aussage über den Zusammenhang etwaig vorliegender besonderer Beanspruchungen und einem stattgefundenen Umbauprozess des Knochens im Sinne einer Adaptation an die jeweiligen Lebensumstände möglich. Von Interesse wäre beispielsweise gewesen, ob vor dem Ableben der untersuchten Individuen eine Bettlägrigkeit bestanden hat oder die entsprechende Person noch mobil gewesen ist. Detaillierte Kenntnisse über die Lebensumstände und Krankenvorgeschichte hätten es ermöglicht, ursächlich zwischen einer unspezifischen, altersbedingten Abnahme der Knochensubstanz und einer sog. Inaktivitätsatrophie zu unterscheiden. DONALDSON et al. (1970) und ISSEKUTZ et al. (1966) haben nachgewiesen, dass bereits eine kurzzeitige Immobilisierung nachhaltige Auswirkungen auf die Beschaffenheit der Knochenmatrix hat und zu einer Reduktion der Gesamtmineralisierung führt.

Daher ist für nachfolgende Studien zu empfehlen, diese Daten zu eruieren und in die Auswertung mit einfließen zu lassen.

Diskussion

Das beschriebene Material ist von der Anzahl der untersuchten Präparate und der Altersverteilung mit anderen Kollektiven zu vergleichen, da es sich im Rahmen von retrospektiv durchgeführten anatomischen Studien um eine typische Problematik handelt.

5.2 Diskussion der Methode

5.2.1 Bewertung der CT-OAM

Die physikalischen Grundlagen der CT gesteuerten Osteoabsorptiometrie sind erstmals von MÜLLER-GERBL et al. (1990) beschrieben und angewandt worden. Es konnte eine hohe Reliabilität sowie Validität der erzielten Ergebnisse belegt werden. Es handelt sich um eine etablierte Methode zur Darstellung der subchondralen Mineralisierungsverteilung und Messung des Kalziumgehaltes in mg Ca/ml in der subchondralen Knochenlamelle. Die CT-OAM unterscheidet sich von zuvor angewandten Techniken wie der Röntgendensitometrie durch die Möglichkeit einer in vivo Anwendung zur Messung der subchondralen Mineralisierungsverteilung.

War es im Rahmen der von KNIEF (1967) entwickelten Röntgendensitometrie noch notwendig anatomische Schnittpräparate herzustellen, konnten mittels der CT-OAM erstmals Erkenntnisse über die Gesamtkalzifizierung und Mineralisierungsverteilung in der subchondralen Lamelle verschiedener Gelenke eines lebenden Organismus gewonnen werden.

Im Bereich der Wirbelsäule wurde die Methode erstmals von WAGNER (2004) angewandt. Es wurden die Veränderungen der subchondralen Mineralisierung nach durchgeführter dorsaler Spondylodese im Bereich der Lendenwirbelsäule untersucht. Die Halswirbelsäule betreffend wurden morphologische Funktionsanalysen des oberen und unteren Kopfgelenkes von POCHERT (2007) und BARTSCH (2007) durchgeführt.

Im Hinblick auf die Messung und Charakterisierung der subchondralen Mineralisierungsverteilung von Grund- und Deckplatten der unteren Halswirbelkörper ist als potenzielle Fehlerquelle die Anfertigung des sog. a-Datensatzes in Erwägung zu ziehen (siehe Kapitel 3.2.2). Es wird hier nach erfolgter Rekonstruktion der coronaren Schnittbilder der subchondrale Bereich manuell, unter nicht

Diskussion

standardisierten Verhältnissen, in der Frontalebene markiert und anschließend editiert. Die exakte Kennzeichnung der subchondralen Schicht ist von übergeordneter Bedeutung, da durch unpräzises Arbeiten Überlagerungen mit nicht zum subchondralen Bereich zählenden Knochenschichten zustande kommen. Auf diese Weise würde das Ergebnis im Hinblick auf die Messung der Kalziumkonzentration, der Gesamtmineralisierung und somit der Dichtemaximaverteilung verfälscht.

Zum Ausschluss dieser Fehlerquelle wurden die bearbeiteten Datensätze bezüglich der angewandten Präzision von zwei unabhängigen Personen begutachtet.

Eine weitere potenzielle Fehlerquelle stellen apparative Messungenauigkeiten des verwendeten Computertomographen dar. Diese wurden durch Verwendung eines hochmodernen Gerätetyps (Somatom Plus, SIEMENS) minimiert. MÜLLER-GERBL (1998) konnte zudem nachweisen, dass gerätebedingte Messungenauigkeiten max. +/- 4 HU betragen und daher bei mangelnder Relevanz zu vernachlässigen sind, sofern die gemessenen Unterschiede in der Gesamtmineralisierung mehrere 100 HU betragen. Dies trifft auf die vorliegende Studie zu.

Die Methode der CT-OAM ist durch den erhöhten Zeitaufwand bei der Erstellung und Bearbeitung der komplexen Datensätze in der Anwendung sehr aufwendig.

EIMANNSBERGER (2007) hat ein weiterentwickeltes Programm zur 3D Rekonstruktion mittels CT-OAM vorgestellt, das die Bearbeitung der CT-Datensätze auf intelbasierten Rechnersystemen ermöglicht. Das sog. AnaTom-Programm verkürzt die Bearbeitungszeit bei gleicher Qualität der gewonnenen Daten. Der Nachweis wurde anhand von Untersuchungen der subchondralen Mineralisierung an Grund- und Deckplatten der Brustwirbelsäule geführt.

Die Weiterentwicklung und hierdurch optimierte Anwendung bzw. Effizienzsteigerung erschließt der CT-OAM sowohl klinisch, in der präventiven und präoperativen Diagnostik, als auch in der experimentellen Forschung ein breites Anwendungsgebiet.

Es bleibt allerdings zu beachten, dass bei in vivo Anwendung der CT-OAM eine erhöhte Strahlenbelastung des Patienten vorliegt. Hier lässt sich eine Reduktion nur

Diskussion

durch eine Weiterentwicklung der Computertomographie bzw. durch die Einhaltung allgemein zu beachtender Strahlenschutzrichtlinien erzielen.

5.2.2 Bewertung zur Bestimmung der Dichtemaximalokalisationen

Die Lokalisation der Dichtemaxima im Bereich der Grund- und Deckplatten erfolgte anhand eines Gitterrasters, bestehend aus insgesamt fünfzehn Quadranten. GRIEBL (1998) hatte ein solches Modell erstmals im Zusammenhang mit einer Studie über die subchondrale Mineralisierung des Tibiaplateaus nach erfolgter Umstellungsosteotomie angewandt und etabliert.

Das der vorliegenden Arbeit zugrunde gelegte Raster setzt sich aus drei Zeilen und fünf Spalten zusammen und hat sich als adäquates Mittel zur Erfassung und statistischen Auswertung der Dichtemaximaverteilung erwiesen. Anhand einer definierten Anzahl von Quadranten war es möglich, die genaue Position des entsprechenden Maximums wiederzugeben und gleichzeitig Verschiebungen in allen vier Richtungen innerhalb der zweidimensionalen Darstellung eines Densitogrammes zu folgen. Diese Einteilung ermöglichte neben der Zuordnung eines Dichtemaximums zu einem bestimmten Quadranten auch die Definition umschriebener Areale, in denen eine Häufung der Dichtemaxima vorlag. Es konnten so die spezifischen Verteilungsmuster exakt analysiert werden.

Von der Verwendung eines feinmaschigeren Rasters wurde bewusst Abstand genommen, da einerseits das Risiko eines Messfehlers erhöht und andererseits die Übersichtlichkeit reduziert wird. Die Verwendung eines grobmaschigeren Rasters kam umgekehrt nicht in Betracht, da eine differenzierte Auswertung nicht möglich gewesen wäre. Die Einteilung in sechs Haupt- und drei Nebengruppen schuf eine Klassifizierung der Abschlussplattenoberflächen, die das benötigte Maß an Genauigkeit gewährleistete.

Die standardisierte Anlage des Gitterrasters an die jeweilige Gelenkfläche ließ den direkten Vergleich aller untersuchten Halswirbelkörper zu, da jeder Quadrant des Rasters prozentual die gleiche Flächeneinheit einer Grund- bzw. Deckplatte abbildete.

Bei der Bestimmung der Dichtemaxima zeigte sich, dass einige Präparate eine diffuse Dichtemaximaverteilung aufwiesen und eine eindeutige Zuordnung zu der

Diskussion

entsprechenden Haupt- bzw. Nebengruppe daher nicht immer vorgenommen werden konnte. Diese Präparate wurden der VI. Hauptgruppe zugeteilt und entsprechend in der statistischen Auswertung berücksichtigt. Die kausalen Zusammenhänge und Pathomechanismen des Zustandekommens dieser spezifischen Verteilung werden in Kapitel 5.3.1 erläutert.

Die Dichtemaxima zeigten eine beachtliche Variation bezüglich der Form und Ausdehnung, weshalb die Zuteilung zu einem bestimmten Quadranten bewusst in Abhängigkeit von der Lage des Bereiches höchster Mineralisierung erfolgte. Auf diese Weise wurde die individuelle Varianz der Form vernachlässigt, in Bezug auf das Gesamtkollektiv jedoch eine Akzentuierung vorgenommen.

5.2.3 Bewertung der makroskopischen und nativ-radiologischen Auswertung

Für die makroskopischen und nativ-radiologischen Untersuchungen wurden insgesamt 20 Präparate des Präparierkurses, Sommersemester 2001, der Ludwig-Maximilians- Universität München, entnommen.

Da im Rahmen der Studie kein Geschlechtervergleich durchgeführt wurde, spielte die Geschlechterverteilung bei der Entnahme eine untergeordnete Rolle.

Großer Wert wurde hingegen auf die sorgfältige Präparatentnahme gelegt. Hierdurch konnte gewährleistet werden, dass jedes Präparat zu Beginn der Untersuchungen ebenso wie nach Anfertigung der planparallelen Schnittebenen im funktionellen Verbund der Halswirbelsäule beurteilt werden konnte.

Technisch erwies es sich als äußerst nützlich, die Präparate vor der Fertigung der Schnitte bei minus 92 °C einzufrieren, da sich so eine deutlich bessere Schnittqualität erzielen ließ. Die Schnittflächen zeigten eine glatte Oberfläche ohne Anzeichen einer traumatischen Gewebeschädigung. Verbrennungen der Präparate durch die Hochfrequenzsäge konnten auf diese Weise ebenfalls vermieden werden.

5.3 Diskussion der Ergebnisse

5.3.1 Bewertung der Dichtemaximaverteilung

Die Auswertung der Dichtemaximalokalisationen ergab sowohl für die Grund- als auch für die Deckplatten eine charakteristische Verteilung. Für die mittels CT-OAM untersuchten Abschlussplatten konnten Areale ermittelt werden, die sich durch eine gesteigerte Anzahl an nachgewiesenen Dichtemaxima hervorhoben und somit als Hauptbelastungszonen identifiziert wurden. Es handelte sich primär um die seitlichen Anteile der Wirbelkörper. Dort, wo die Procc. uncinati bzw. die Uncovertebralgelenke vorzufinden sind, fanden sich durchgehend höhere Dichtemaximaanzahlen als in den übrigen, zentral gelegenen Gelenkflächenanteilen.

Die Unterteilung der Abschlussplatten in Hauptgruppen unterstrich die Dominanz der Dichtemaxima in den lateralen Bereichen der Gelenkflächen (HG I und HG V). Diese Beobachtung traf sowohl auf die Grund- als auch auf die Deckplatten zu. Im Bereich der Grundplatten entfielen 64,68 % der Dichtemaxima auf diese beiden Areale, während innerhalb der Deckplatten 70,4 % der Maxima in den entsprechenden Hauptgruppen angesiedelt waren. Zur weiteren Analyse des Verteilungsmusters wurden die Hauptgruppen in Nebengruppen unterteilt, wodurch insgesamt 15 Quadranten entstanden. Bezogen auf die lateralen Wirbelkörperanteile (HG I und HG V) zeigte sich eine Dominanz der Quadranten Q11 und Q15. Innerhalb dieser Quadranten, die dem dorsalen Drittel der genannten Hauptgruppen entsprachen, fanden sich sowohl bei den Deck- als auch bei den Grundplatten mehr als 80 % der Dichtemaxima. Dieses Ergebnis verdeutlicht den ventro-dorsalen Shift der Dichtemaximalokalisationen, nämlich die Zunahme der Maxima innerhalb der genannten Hauptgruppen von ventral nach dorsal, mit der absoluten Mehrheit in den Quadranten Q11 und Q15. Hieraus ließ sich unmittelbar ableiten, dass innerhalb der HG I und HG V, die bezogen auf die Gesamtfläche der Abschlussplatten bereits eine Hauptbelastungszone darstellen, eine weitere Unterteilung vorgenommen werden konnte. Die Quadranten Q11 und Q15, sprich die dorso-lateralen Bereiche des Wirbelkörpers am Übergang der Uncovertebralgelenke zu den Pediculi arcus vertebrae, stellen demnach die eigentliche Hauptbelastungszone dar. Funktionell kann man von einer dorsalen 2-Punkt Abstützung sprechen.

Diskussion

Zur Beurteilung der Mineralisierungsverteilung der gesamten Grund- und Deckplatten wurden im Folgenden die zentralen Hauptgruppen (HG II, HG III, HG IV) bezüglich der spezifischen Dichtemaximaverteilung analysiert. Die Ergebnisse hatten bereits gezeigt, dass in diesem zentralen Bereich die Anzahl der ermittelten Maxima deutlich unter der in den Hauptgruppen HG I und HG V lag. Die Auswertung der Dichtemaximaverteilung innerhalb der Hauptgruppen HG II bis HG IV zeigte allerdings ebenfalls eine charakteristische Verteilung. Konnte in den lateral gelegenen Hauptgruppen ein ventro-dorsaler Shift bezüglich der Anzahl nachgewiesener Dichtemaxima belegt werden, so zeigte sich hier eine genau gegenläufige Verteilung.

In den Deckplatten der Wirbelkörper ließen sich in den ventralen Dritteln der jeweiligen Hauptgruppe, entsprechend den Quadranten Q2, Q3 und Q4, insgesamt 14 Dichtemaxima nachweisen. Das entsprach einem Anteil von 17,94 % aller im Bereich der Deckplatten festgestellten Dichtemaxima. Innerhalb der Grundplatten konnten den aufgeführten Quadranten 20 Dichtemaxima zugeordnet werden, was einem Anteil von 26,4 % der Dichtemaxima gleichkam. Die übrigen Quadranten der Hauptgruppen HG II bis HG IV wiesen lediglich ein bis zwei Dichtemaxima auf. Eine Ausnahme stellt hier Quadrant Q13 der Deckplatten dar, hier fanden sich insgesamt fünf Dichtemaxima (6,4 %).

Bezogen auf die zentralen Hauptgruppen (HG II, HG III, HG IV) wurde somit belegt, dass ein dorso-ventraler Shift der Dichtemaximaverteilung vorliegt, denn die Anzahl der Maxima in den dorsalen Quadranten lag deutlich unter denen der ventralen Abschnitte. Weiter fiel auf, dass sich um den Mittelpunkt der Abschlussplatten (Quadrant Q6, Q7, Q8) nur eine zu vernachlässigende Anzahl von Dichtemaxima fand. Insgesamt, also für Grund- und Deckplatten, wurden hier lediglich drei Maxima nachgewiesen.

Fasst man die Ergebnisse der Dichtemaximaverteilung zusammen, so bleibt festzuhalten, dass in den lateralen Anteilen beider Abschlussplatten eines Wirbelkörpers die signifikante Mehrzahl der Dichtemaxima vorlag. Innerhalb dieser am stärksten mineralisierten Anteile konnte eine Dominanz der dorsalen Quadranten nachgewiesen werden. In den zentralen Hauptgruppen ließ sich dagegen eine Zunahme der Mineralisierung von dorsal nach ventral feststellen, während die Mineralisierung um den Mittelpunkt herum nur vereinzelte Dichtemaxima zeigte.

Diskussion

Dieses charakteristische Verteilungsmuster ermöglicht es, Rückschlüsse auf die Zusammenhänge zwischen Mineralisierungsverteilung und Biomechanik der unteren Halswirbelsäule zu ziehen.

Betrachtet man eine erhöhte subchondrale Mineralisierung als Ausdruck einer langfristigen Beanspruchung, so lässt sich aus den gewonnenen Erkenntnissen ableiten, dass die biomechanische Tragachse im Bereich der Halswirbelsäule auf drei Säulen aufgebaut ist. Diese bestehen aus den beiden dorsalen Pfeilern (Q11 und Q15) sowie einem ventralen Pfeiler, der von den Quadranten Q3, Q4 und Q5 gebildet wird. Verbindet man die beiden dorsalen Belastungsschwerpunkte mit dem ventralen Bereich der höchsten Mineralisierung, so erhält man ein Trapezoid mit einer breiten dorsalen Basis und einer stumpfen Spitze, die als ventrale Abstützung fungiert.

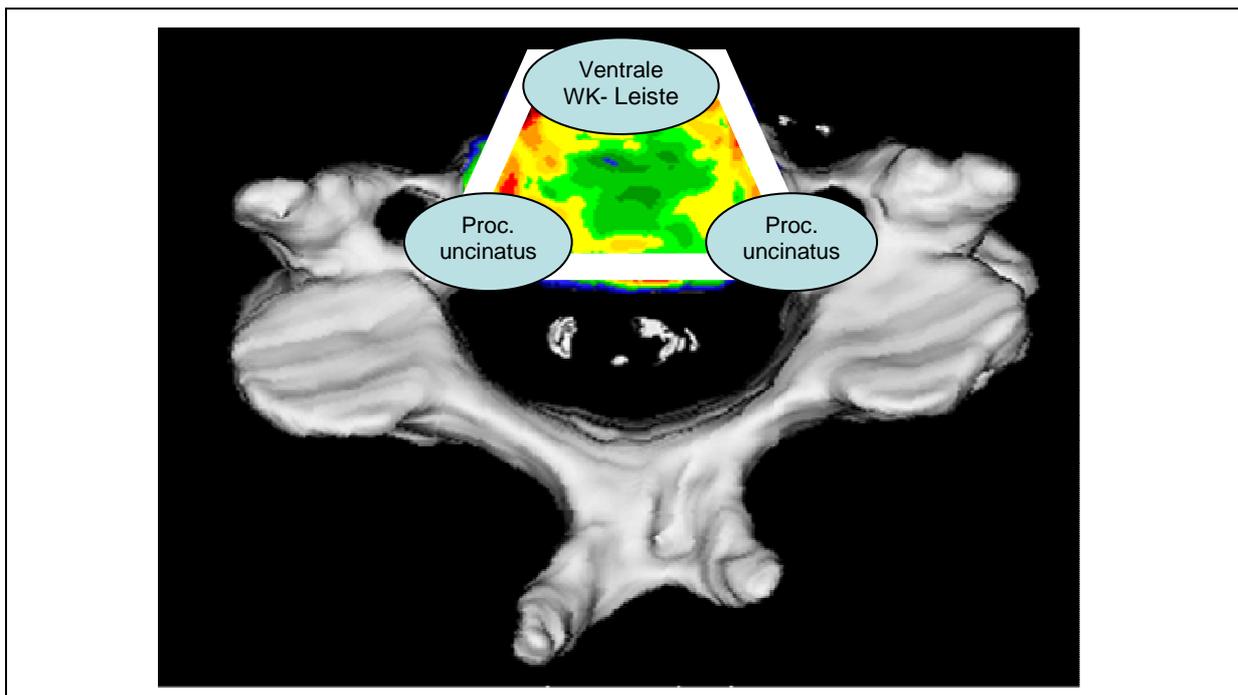


Abb. 44: Die 3-Pfeiler-Abstützung in den Wirbelkörpern der unteren Halswirbelsäule

Das 3-Säulenmodell von Danis und Weber besagt, dass die biomechanische Tragachse der Wirbelsäule vom 2. HWK bis zum Kreuzbein von einer ventralen und zwei dorsalen Säulen gebildet wird. Die beiden dorsalen Säulen werden von den Facettengelenken der HWS gebildet, die Wirbelkörper dienen als ventrale Säule. Überträgt man nun die anhand der Dichtemaximaanalyse gewonnenen Ergebnisse auf eben dieses 3-Säulenmodell, so wird offensichtlich, dass es innerhalb der ventralen

Diskussion

Säule keinesfalls zu einer flächendeckenden, gleichmäßigen Druck- bzw. Belastungsverteilung kommt. Vielmehr zeigt sich innerhalb der Wirbelkörper der HWS eine 3-Punkt-Abstützung, deren Pfeiler die dorso-lateralen und die ventro-zentralen Anteilen der Abschlussplatten bilden. Demzufolge werden die auf die HWS einwirkenden Kräfte zum Großteil in den Uncovertebralgelenken und den ventralen, an das Lig. longitudinale anterius angrenzenden Wirbelkörperanteilen abgestützt. Es wurde daraufhin der Begriff der „3-Pfeiler-Abstützung in den Wirbelkörpern der unteren HWS“ eingeführt.

Biomechanisch spielen diese Areale eine übergeordnete Rolle, während die zentralen Bereiche, die durchgehend eine sehr niedrige Anzahl an Dichtemaxima aufwiesen, hinsichtlich ihrer biomechanischen Funktion innerhalb dieses Systems vernachlässigt werden können.

Die beschriebene Dichtemaximaverteilung ließ sich sowohl für die Grund- als auch für die Deckplatten nachweisen.

Die hohe Gesamtmineralisierung im Bereich der Procc. uncinati der Deckplatten und auch der korrespondierenden Gelenkflächen der Grundplatten, die als funktionelles Gegenlager zu betrachten sind, belegt die von LUSCHKA (1858) aufgestellte These, dass es sich bei den Uncovertebralgelenken zweckmäßig um Stützgelenke handelt.

Darüber hinaus wird anhand der charakteristischen Dichtemaximaverteilung erkennbar, welche überragende Rolle die Uncovertebralgelenke für die strukturelle und funktionelle Einheit der Bewegungssegmente im Bereich der unteren Halswirbelsäule spielen, denn die Tragachse, das biomechanische Belastungszentrum im Bereich der unteren HWS, wird im Wesentlichen von eben diesen Uncovertebralgelenken gebildet.

Die Tatsache, dass im ventralen Bereich des Corpus vertebrae eine Zone erhöhter Mineralisierung nachgewiesen wurde, korreliert mit Ergebnissen von KROGDAHL et al. (1940). Sie hatten ein gehäuftes Vorkommen von Osteochondrosen, Spondylosis deformans und auch von Bandscheibenvorfällen mit Schwerpunkt im vorderen Bereich des Wirbelkörpers festgestellt. Zurückgeführt wurde dieser Aspekt auf die vermehrte Belastung durch eine im Laufe des Lebens exponentiell häufiger durchgeführte Flexion als Extension und eine damit einhergehende erhöhte

Diskussion

mechanische Belastung, die sich in der dargestellten Mineralisierungsverteilung widerspiegelt.

Der geführte Nachweis der charakteristischen Dichtemaximaverteilung belegt die „morphoplastische Kompetenz der Funktion“ nach GUTMANN et al. (1984). Demnach entfaltet eine funktionelle Beanspruchung durch die biomechanischen Kräfte eine formprägende Wirkung.

In diesem Zusammenhang sind auch die Präparate zu betrachten, deren Dichtemaximaverteilung innerhalb der Grund- und Deckplatten ein diffuses Verteilungsmuster gezeigt hatten. Die betroffenen Präparate wurden zunächst zum Ausschluss eines methodischen Fehlers nochmals einer eingehenden Untersuchung und erneuten Zuordnung der Dichtemaxima unterzogen. Nachdem hier kein Fehler festgestellt wurde, stellte sich heraus, dass allen Präparaten der besagten HG VI eines gemeinsam war. Es fand sich, verglichen mit dem Rest des Kollektivs, sowohl makroskopisch als auch nativ-radiologisch ein ausgeprägter Gelenkverschleiß, der weit über das übliche Maß einer altersentsprechenden Degeneration hinausging. Der Verschleiß, entstanden aus einer jahrelangen Überbelastung, ist pathogenetisch als Ursache für dieses spezielle Verteilungsmuster zu sehen. Ätiologisch lässt sich folgender Zusammenhang herstellen:

Die spezielle Anatomie der unteren Halswirbelsäule ermöglicht einerseits ein außergewöhnliches Bewegungsausmaß und verursacht andererseits das Auftreten von enormen Kräften innerhalb dieses komplexen Systems. Neben den dynamisch wirkenden Kräften, hervorgerufen durch die Flexions- und Extensionsbewegung ebenso wie durch die Beteiligung an der Rotationsbewegung, sind die statischen Kräfte nicht zu vernachlässigen. Primär kommt es an anatomisch exponierten Stellen, in diesem Fall den Uncovertebralgelenken, zu einer besonderen Beanspruchung. Der menschliche Körper reagiert zunächst im Sinne des Wolff'schen Transformationsgesetzes mit einer Verstärkung dieser „tragenden“ Elemente, sprich mit einer Zunahme der subchondralen Mineralisierung. Die vorliegende Studie konnte das nachweisen.

Kommt es jedoch zu einer fortwährenden mechanischen Belastung über das physiologische Maß hinaus, beginnen die Anpassungsmechanismen zu versagen. Das System dekompenziert. Das Resultat besteht aus einem Formverlust, hier zu erkennen an einem einsetzenden „Abkippen“ der schon kolbenförmig umgebauten

Diskussion

Procc. uncinati nach lateral. Mit dem Wegfall der zuvor gewährleisteten Stützfunktion kommt es zu einer massiven Mehrbelastung der gesamten Grund- bzw. Deckplatte. Die zuvor punktuelle Abstützung ist damit verloren gegangen und die axial einwirkenden Kräfte verteilen sich auf die Gesamtfläche der Abschlussplatten. Als Folge dessen kommt es zu einer Zunahme der Dichtemaxima, die, dementsprechend unregelmäßig verteilt, das diffuse Dichteverteilungsmuster hervorrufen.

5.3.2. Bewertung der Mineralisierungsverteilung im intra- und interindividuellen Vergleich

Die statistische Auswertung der Gesamtmineralisierung der subchondralen Lamelle in mg Ca/ml zeigte eine breite Streuung der Werte innerhalb des untersuchten Kollektivs. In Anbetracht des hohen durchschnittlichen Lebensalters der Individuen ist diese Tatsache erwartungsgemäß. Schließlich spiegeln sich in der gemessenen Mineralisierung im subchondralen Bereich der Grund- und Deckplatten verschiedene pathogenetische Zusammenhänge wider. Direkt auf die Mineralisierung wirkt sich der Grad der bis zum Ableben erhaltenden Mobilität ebenso aus wie die Manifestation verschiedener Erkrankungen, z.B. Osteoporose, Morbus Paget oder ein Hyperparathyroidismus.

Innerhalb des untersuchten Kollektivs ließen sich zwei Gruppen mit jeweils gleicher Varianz in der intraindividuellen Streuung unterscheiden. Für die statistische Auswertung erfolgte daher die Einteilung in Gruppe G1 und G2. Die Auswertung erfolgte sowohl getrennt für die beiden gebildeten Gruppen als auch für das gesamte Kollektiv.

Zunächst wurde die Gesamtmineralisierung (mg Ca/ml) der Grund- und Deckplatten im intraindividuellen Vergleich untersucht. Es fanden sich hier keine signifikanten Unterschiede. Ebenso ergab der interindividuelle Vergleich der Gesamtmineralisierung keine signifikanten Differenzen. Demnach lagen keine statistisch bedeutsamen Abweichungen in der Kalzifizierung der Grund- im Vergleich mit den Deckplatten vor.

Die Berechnung des Mineralisierungsquotienten MQ1, entsprechend dem direkten intraindividuellen Vergleich der Mineralisierung in mg Ca/ml von Grund- und Deckplatten (siehe Kapitel 3.3.3), belegte die Ergebnisse der statistischen Berechnung. Demnach lässt sich ableiten, dass die Grund- und die Deckplatten

Diskussion

gleichermaßen mechanisch belastet werden und es bezogen auf die Gesamtfläche der Abschlussplatten keine Mehrbelastung der kranialen oder kaudalen Gelenkfläche gibt.

Im Anschluss daran wurde die Mineralisierung (mg Ca/ml) der Grund- und Deckplatten im Bereich der Uncovertebralgelenke einem intraindividuellen Vergleich unterzogen. Hierfür waren zuvor die Abschlussplatten in eine rechte und eine linke Hälfte unterteilt worden. Die statistisch ausgewerteten Daten zeigten keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit von der Unterteilung in eine rechte bzw. linke Hälfte. Hiermit konnte die Frage geklärt werden, ob sich Erkenntnisse wie die von JIROUT (1980) auch auf die untere HWS übertragen lassen. Dieser hatte in einer Studie über Asymmetrien der Halswirbelsäule mit 600 Probanden ein Überwiegen der Linksrotationsstellung in der oberen HWS nachweisen können. Er begründete seine Beobachtung mit der linkshemisphärischen Dominanz der Rechtshänder, die wiederum zu einer rechtsseitig stärker ausgeprägten Halsmuskulatur führt und so die Linksrotationsstellung in der oberen HWS verursacht.

Die im Rahmen der vorliegenden Studie erhobenen Mineralisierungswerte in mg Ca/ml weisen keine charakteristische Seitendifferenz auf, weder im direkten intra- noch im interindividuellen Vergleich. Eine einseitige Mehrbelastung im Bereich der unteren HWS wurde somit im Rahmen der vorliegenden Studie nicht nachgewiesen. GUTMANN et al. (1984) haben das gehäufte Auftreten einer Uncovertebralarthrose nach anhaltender Wirbelfixation in Fehlstellung beschrieben. Demnach kommt es auf der konvergierenden Seite der Grund- und Deckplatten in dem Bereich, in dem das Bewegungssegment in der Frontalebene am stärksten belastet ist, zu einem fortschreitenden Gelenkverschleiß.

Die vorliegende Studie konnte in der statistischen Auswertung der korrespondierenden Gelenkflächen weder eine signifikant unterschiedliche Streuung noch eine maßgeblich abweichende Varianz nachweisen. Eine einseitig ausgeprägte Uncovertebralarthrose lag innerhalb des untersuchten Kollektivs demnach nicht vor.

Das Gesamtkollektiv zeigt bezüglich der einzelnen HWK keine signifikant unterschiedliche Mineralisierung im Seitenvergleich. Demzufolge wird innerhalb des Uncovertebralgelenkes der entsprechende Anteil der Grund- bzw. Deckplatte in

Diskussion

gleichem Maße belastet. Es liegt ein äquivalentes Verhältnis bezüglich der biomechanischen Funktion innerhalb dieses sekundären Gelenkes vor.

5.3.3 Bewertung der makroskopischen Untersuchungen

Die Ergebnisse der makroskopischen Untersuchung sind neben der Auswertung der Dichtemaximaverteilung und der Analyse der intra- und interindividuellen Unterschiede der Mineralisierungsverteilung und Kalziumkonzentration in mg Ca/ml der abschließende Bestandteil einer Einzelbetrachtung von verschiedenen Systemkomponenten. Im Anschluss werden die Ergebnisse miteinander korreliert und auf das Gesamtkonstrukt der unteren HWS angewandt.

Die Morphologie der Halswirbelsäule zeichnet sich durch zahlreiche Besonderheiten aus. Nicht nur der Bau der oberen beiden Halswirbel unterscheidet sich maßgeblich von den Übrigen, sondern auch die Konstruktion der unteren Halswirbel HWK 3 bis HWK 7 weist eine spezielle Anatomie auf. Im Fokus der vorliegenden Studie stand die Untersuchung und Analyse der Procc. uncinati ebenso wie die der Zwischenwirbelscheiben, bzw. der Uncovertebralspalten.

Die Betrachtung der angefertigten Schnittpräparate in der Frontalebene ließ bereits die typische Form der Halswirbel erkennen. Diese sind insgesamt zierlicher konstruiert als die Wirbel der Brust- bzw. Lendenwirbelsäule. BIGGEMANN et al. (1989) konnten zeigen, dass die Spongiosa eines unteren Halswirbelkörpers trotz des schwächeren Erscheinungsbildes die gleiche Festigkeit aufweist wie ein Lendenwirbelkörper.

Charakteristisch für die Deckplatten zeigten sich nach lateral auslaufende, kuhhornartige Erhebungen, die Procc. uncinati. Im Bereich der entsprechenden Grundplatten fanden sich Auswüchungen, die den Processus offensichtlich als Gegenlager dienten und somit als Teil eines Stützgelenkes gesehen werden müssen. Zwischen den Wirbelkörpern erschienen die Disci intervertebrales insgesamt verschmälert, besonders jedoch nach lateral zeigte sich eine deutliche Höhenminderung. Die makroskopischen Untersuchungen der Zwischenwirbelscheiben zeigten morphologische Veränderungen in jedem Präparat. Aufgrund des hohen Durchschnittsalters im Patientenkollektiv ist diese Tatsache

Diskussion

erwartungsgemäß und deckt sich mit Beobachtungen, die bereits TÖNDURY (1958) und PUTZ (1981) angestellt hatten.

Bezüglich des Ausmaßes der vorliegenden Veränderungen bzw. Schädigungen wurden erhebliche Unterschiede festgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass von kranial nach kaudal, bezogen auf die untere HWS, eine zunehmende Zerreißen der Zwischenwirbelscheiben vorlag. Während sich an vier Präparaten in den Segmenten C3/4 und C4/5 isolierte seitliche Einrisse, sog. Uncovertebralspalten, ohne Verbindung zum Gallertkern nachweisen ließen, fanden wir in den unteren Segmenten C5/6 und C6/7 ausschließlich durchgehende Risse der Disci intervertebrales. Diese teilten die Zwischenwirbelscheiben horizontal in zwei Hälften. In der Literatur finden sich zahlreiche Textstellen, die regressive Veränderungen im Bereich der Zwischenwirbelscheiben in Abhängigkeit vom Lebensalter und dem Flüssigkeitshaushalt der Disci intervertebrales beschreiben (TÖNDURY 1958).

Anhand der vorliegenden Ergebnisse bestätigt sich, dass man pathophysiologisch zwei Entstehungsmechanismen von Einrissen in der Zwischenwirbelscheibe generell unterscheiden muss. Das ist zum einen die aus dem Inneren der Bandscheibe heraus entstehende Rissbildung als Ausdruck einer altersbedingten Degeneration und zum anderen die durch aktiv wirkende Rotations-, Scher- und Kompressionskräfte traumatisch getriggerte Zerreißen der Bandscheibe.

Betrachtet man den Flüssigkeitshaushalt der Bandscheibe, so gilt als erwiesen (PUTZ 1981), dass hier sowohl mechanische als auch ernährungsphysiologische Aspekte eine Rolle spielen. Auf die Funktion der Disci intervertebrales als mechanischer Puffer wurde bereits zuvor in Kapitel 1.3.1 eingegangen, weshalb im Folgenden der ernährungsphysiologische Hintergrund erläutert werden soll.

Mit zunehmendem Lebensalter kommt es zu einer Reduktion des Wasseraufnahmevermögens der Zwischenwirbelscheiben, was auf eine qualitative und quantitative Veränderung der Extrazellulärmatrix zurückgeführt wird (PUTZ 1981). Entwicklungsgeschichtlich bilden sich mit Beginn des zweiten Lebensjahres die vom Knochen in den Anulus fibrosus reichenden Blutgefäße zurück, so dass keine Gefäße mehr vom Wirbelkörper in den Discus intervertebralis einstrahlen. Dieser Zeitpunkt stellt den Beginn der altersbedingten Veränderungen des Zwischenwirbelscheibengewebes dar. Trotz Ernährung und Regulation des Wasserhaushaltes durch Diffusion beginnt die langsam fortschreitende Dehydrierung des Discus intervertebralis, woraus eine Abnahme des sog. Quellungsdruckes im

Diskussion

Nucleus pulposus resultiert. Als Folge dessen schrumpft der Gallertkern und verliert durch das gleichzeitige Einlagern von Knorpelnestern und Kalksalzen an Elastizität. Es kommt zu einem Höhenverlust der Bandscheibe, wodurch die Stabilität im Bewegungssegment herabgesetzt und auftretende Belastungen schlechter kompensiert werden. Folglich kommt es zur Ausbildung von Einrissen im Bereich des Nucleus pulposus.

Davon abzugrenzen sind die durch biomechanische Krafteinwirkung hervorgerufenen, lateral beginnenden Einrisse der Zwischenwirbelscheiben, die als Uncovertebralspalten bezeichnet werden. Mit fortschreitendem Lebensalter kommt es häufig zu einer vollständigen Zerreißung der Zwischenwirbelscheiben.

Das hohe Maß an zulässiger Beweglichkeit, besonders im Bereich der unteren HWS, bedingt das Zustandekommen extremer Scherkräfte. Als Ausdruck der hier wirkenden Kräfte entstehen die Uncovertebralspalten, deren Ausprägung individuell variiert. Sie sind sicherlich einerseits Ausdruck eines stattfindenden Materialverschleies, bedingen andererseits aber eine zunächst physiologische Zunahme der Gesamtbeweglichkeit für die HWS. Erst im weiteren Verlauf kommt es durch das erhöhte Maß an Beweglichkeit in allen Ebenen zu einer zunehmenden Gefügestörung im Sinne einer Hypermobilität und den damit verbundenen Erkrankungen wie z.B. einer Spondylosis deformans oder einer Osteochondrose (KUHLEND AHL et al. 1953).

5.3.4 Bewertung der radiologischen Bildgebung und Falschfarbenbelegung

Erwartungsgemäß zeigte sich bei einem Durchschnittsalter des Gesamtkollektivs von 82 Jahren in 90 % der Präparate ein ausgedehnter degenerativer Verschleiß.

Auffallend war, dass das Ausmaß der arthrotischen Veränderungen in 16 von 20 Präparaten von kranial nach kaudal zunahm. Während die Bewegungssegmente C3/C4 und C4/C5 meist nur geringfügige Verschleißerscheinungen offenbarten, lag auf Höhe des Segmentes C5/6 bzw. C6/7 ein weit fortgeschrittener Verschleiß mit vermehrter subchondraler Sklerosierung, Spondylophytenbildung, Verschmälerung des Bandscheibenraumes und zum Teil auch beginnender knöcherner Verschmelzung vor (Abb. 43). Diese Beobachtungen korrelieren mit Ergebnissen von JIROUT (1980), der 600 Erwachsene auf anatomische, haltungsbedingte

Diskussion

Asymmetrien und Verschleißerscheinungen der Halswirbelsäule untersuchte und bei 94 % der Probanden in den unteren Segmenten der HWS fündig wurde.

Schon PAUWELS (1965) und WOLFF (1892) stellten fest, dass die Größe der lokal einwirkenden Belastung als wesentlicher Faktor an der Regulation der Knochendichte beteiligt ist.

Diese Erkenntnis beruht auf den biomechanischen Grundlagen des Knochens, die wiederum den Gesetzen der Mechanik folgen. Die auf den Knochen einwirkenden Kräfte und Spannungen beeinflussen seine Widerstandsfähigkeit maßgeblich. Die entscheidende Kraft ist hierbei die Schwerkraft. Dieser permanent auf das Skelettsystem einwirkenden Kraft verdankt der humane Organismus sein differenziertes und äußerst stabiles Skelettsystem. Der aufrechte Gang und die unter ständiger Bewegung stark schwankenden Belastungen des Skelett- und auch des Muskelsystems führen zu einem kurzfristigen Wechsel zwischen Zug-, Druck-, Schub- und Torsionsspannungen. Diesen extremen Belastungen standzuhalten, meistert der menschliche Organismus in seiner Gesamtheit durch differenzierte Kompensationsmöglichkeiten. Auftretende Biegespannungen werden beispielsweise durch das Prinzip der Spannungsreduktion abgefangen. Hierbei macht sich der Körper die sog. Zuggurtung zu Nutze. Beispielhaft sei hier die Funktion des Tractus iliotibialis am Femur, aber auch die Zuggurtungswirkung des Musculus biceps brachii und des Musculus brachioradialis auf das Skelett des Armes erwähnt. Hier wird die jeweils auftretende Biegebeanspruchung durch die Zuggurtungswirkung der genannten Muskeln herabgesetzt.

Die angesprochenen Wirkmechanismen stehen mit der Form und der Konstruktion des Knochens eng in Verbindung. Die funktionelle Einheit von Muskeln, Bändern, Sehnen und Knochen ermöglicht die Leichtbauweise des Skelettsystems. Die Stabilität bzw. Widerstandsfähigkeit des Skeletts eines jeden Lebewesens hängt im Wesentlichen von der geometrischen Struktur des Knochens, den mechanischen Eigenschaften und der Größe und Richtung der einwirkenden Kräfte ab (PAUWELS 1976, BENNINGHOFF 2002).

Dass die Art der Beanspruchung zweifellos die Bauweise eines Knochens sowohl in seiner äußeren Form als auch in seiner inneren Struktur bestimmt, wird beim Betrachten des Funktionsprinzips eines Röhrenknochens ebenso deutlich wie beim Studium der subchondralen Mineralisierung der Uncovertebralgelenke.

Diskussion

Die Fähigkeit des Knochens, die verschiedenen mechanischen Kräfte zu kompensieren, liegt unter anderem darin begründet, dass Knochen kombinierte Eigenschaften wie Elastizität und Härte aufweisen. Diese sog. „Kompositbauweise“ wird durch das Vorhandensein von organischem und anorganischem Material umgesetzt.

Die vorliegende Studie konnte bei 18 von 20 Präparaten ausgedehnte morphologische Veränderungen der Uncovertebralgelenke im Sinne eines fortgeschrittenen arthrotischen Umbauprozesses nachweisen. Die enge topographische Beziehung der Procc. uncinati zum Foramen intervertebrale und der A. vertebralis bedingt die häufig mit einer Uncovertebralarthrose in Zusammenhang stehende Pathologie, wie z.B. cerebrale Durchblutungsstörungen oder neurologische Ausfälle durch Kompression einer Spinalwurzel (HADLEY et al. 1993).

Der direkte Vergleich der makroskopischen bzw. nativ-radiologisch erhobenen Daten mit den Ergebnissen der CT-OAM der Uncovertebralgelenke ermöglichte es im Rahmen dieser Studie, die komplexen Verhältnisse zwischen Material, Mechanik und Statik in den Gesamtkontext der Halswirbelsäule einzuordnen.

6 Zusammenfassung

Erkrankungen der Halswirbelsäule nehmen im klinischen Alltag der verschiedensten Fachbereiche eine herausragende Rolle ein.

Ziel der vorliegenden Studie, die sich sowohl mit der subchondralen Mineralisierungsverteilung in den Grund- und Deckplatten der unteren HWS als auch mit der makroskopischen Untersuchung der Zwischenwirbelscheiben beschäftigte, war es, mehr über die Beziehung von Form und Funktion innerhalb dieses Wirbelsäulenabschnittes zu erfahren.

Ein im klinischen Alltag häufig auftretendes Krankheitsbild ist die Uncovertebralarthrose. Aufgrund der besonderen morphologischen und funktionellen Eigenschaften der unteren HWS wurde die subchondrale Mineralisierung von insgesamt 41 Halswirbelkörpern der unteren HWS analysiert. Es galt, die mittels CT-OAM gewonnenen Daten über die Mineralisierung und den Kalziumgehalt in mg Ca/ml mit makroskopisch und nativ-radiologisch erhobenen Beobachtungen zu korrelieren. Die Ergebnisse brachten neue Erkenntnisse über die funktionelle und biomechanische Bedeutung dieses Wirbelsäulenabschnittes.

Laut herrschender Lehrmeinung entsteht Arthrose durch ein Missverhältnis zwischen der strukturellen Leistungsfähigkeit der einzelnen Komponenten und der tatsächlichen Beanspruchung. PAUWELS (1976), KUMMER (1978) und MÜLLER-GERBL et al. (1993) bewiesen anhand zahlreicher Studien, dass die Mineralisierungsverteilung im Bereich der subchondralen Knochenplatte (SCBP) als Korrelat der langfristigen Beanspruchungsverteilung einer Gelenkfläche zu sehen ist und eine Änderung der Mineralisierungsverteilung von der entsprechenden „loading history“ bestimmt wird. Die Darstellung der subchondralen Mineralisierung als Ausdruck der stattgehabten Langzeitbeanspruchung mittels CT-OAM wurde durch MÜLLER-GERBL et al. (1990) entwickelt und gilt in der Forschung als etablierte Methode zur Durchführung klinischer und experimenteller in vivo und in vitro Studien.

Die Analyse der Dichtemaximaverteilung innerhalb der Grund- und Deckplatten zeigte eine spezifische Mineralisierungsverteilung. Bezüglich beider Abschlussplatten

Zusammenfassung

konnte eine signifikante Häufung der Dichtemaxima innerhalb der seitlichen Gelenkflächenanteile nachgewiesen werden (Quadrant Q11, Q15). Anatomisch entspricht dieses Areal dem dorso-lateralen Bereich der Uncovertebralgelenke.

Darüber hinaus fand sich eine weitere Zone erhöhter subchondraler Mineralisierung im vorderen, zentralen Anteil des Wirbelkörpers, am Übergang zur ventralen Randleiste (Quadrant Q2, Q3, Q4). Die Auswertung der Dichtemaximaverteilung hatte ergeben, dass innerhalb der Hauptgruppen HG I und HG V von dorsal nach ventral eine Abnahme der Maxima vorlag, während die Anzahl der Dichtemaxima im Bereich der Hauptgruppen HG II, III und IV von dorsal nach ventral zunahm.

Die Analyse der Dichtemaximaverteilung führte zur Erstbeschreibung der Langzeitbelastung innerhalb der Grund- und Deckplatten der unteren HWS. Basierend auf diesem spezifischen Verteilungsmuster der Dichtemaxima wurde der Begriff der „3-Pfeiler-Abstützung“ eingeführt. Es wurde nachgewiesen, dass es unter biomechanischen Gesichtspunkten keinesfalls zu einer gleichmäßigen Belastung über die Gesamtfläche von Grund- und Deckplatten kommt. Vielmehr ließ sich eine beidseitige dorsale Abstützung und eine vordere, zentral gelegene Hauptbelastungszone ermitteln. Der Begriff der „3-Pfeiler-Abstützung“ beschreibt die Zusammenhänge zwischen Morphologie und Funktion innerhalb der unteren Halswirbelkörper, hier zu sehen als Ausdruck der stattgefundenen Langzeitbeanspruchung innerhalb des Systems Halswirbelsäule.

Die statistische Auswertung des Kalziumgehaltes in mg Ca/ml (Gesamtmineralisierung) ergab keine signifikanten Unterschiede im Hinblick auf die Mineralisierung der Grund- verglichen mit den Deckplatten. Es ließen sich keine spezifischen Differenzen bezüglich der Mineralisierung im intra- bzw. interindividuellen Seitenvergleich erheben. Die Analyse der korrespondierenden Gelenkflächen zeigte, dass sowohl der entsprechende Anteil der Grund- als auch der Deckplatte die gleiche Varianz und Streuung aufwiesen. Eine Mehrbelastung eines Gelenkanteiles liegt demnach nicht vor.

Die Auswertung der makroskopischen und nativ-radiologischen Untersuchung an 20 fixierten Halswirbelsäulenpräparaten hatte gezeigt, dass es bei einem Anteil von mehr als 90 % zur Ausbildung von die Zwischenwirbelscheibe vollständig durchtrennenden Uncovertebralspalten gekommen war. Es bleibt festzuhalten, dass eben diese Entstehung durchgehender Rissbildungen als physiologischer Prozess

Zusammenfassung

gewertet wird. Die spezielle Anatomie in Kombination mit den wirkenden Rotations-, Scher- und Kompressionskräften in der unteren HWS führt zwangsläufig zu einer zunächst lateral beginnenden Spaltbildung. Getriggert durch die fortwährende Belastung kommt es bei jedem Individuum schließlich zur vollständigen, horizontalen Durchtrennung einzelner Zwischenwirbelscheiben. Einen pathologischen Wert erfährt dieser Prozess lediglich in Abhängigkeit vom Manifestationsalter. Ist der Gallertkern in jungen Lebensjahren noch elastisch, sind die wässrigen Anteile hoch, erhöht sich durch die frühzeitige Zerreißung der Bandscheibe das Risiko, einen Discusprolaps zu erleiden.

Bezüglich der angewandten Methode der CT-OAM gilt, dass durch die allgegenwärtige Verfügbarkeit eines Computertomographen, dessen Bilder den benötigten Datensatz zur Erstellung der Densitogramme liefern, zahlreiche weitere Anwendungsmöglichkeiten vorstellbar sind. Die Nutzung der Messung der subchondralen Mineralisierung als prognostisches Kriterium in der Orthopädie und Unfallchirurgie erscheint nahe liegend. Der Einsatz im Sinne der Qualitätssicherung und zur Prüfung der Überlegenheitsfrage, z.B. vor Markteinführung neuer Endoprothesenmodelle, wäre ebenso denkbar wie die retrospektive Beurteilung von Langzeitergebnissen verschiedener OP-Verfahren. Die in vivo Anwendung und die erleichterte Benutzung des Analyse Programms erhöhen den wissenschaftlichen Anreiz.

Abschließend sei der Architekt, Konstrukteur und Philosoph Richard Buckminster Fuller erwähnt, dessen Zeugnis „form follows function“ in den Ergebnissen der Studie widergespiegelt wird. Auf eindrückliche Weise unterstreicht diese Aussage einmal mehr ihre Legitimation im Hinblick auf den menschlichen Körper.

7 Literaturverzeichnis

1. Anetzberger H., Metak G., Scherer MA., Putz R., Müller-Gerbl M.:
Anpassung der subchondralen Knochenplatte nach Menishektomie als Folge einer Änderung der Spannungsverteilung.
Osteologie 1995; 4:224-32
2. Anetzberger H., Müller-Gerbl M., Scherer MA., Metak G., Blumel G., Putz R.:
Veränderungen der subchondralen Mineralisierung nach Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes beim Schaf.
Unfallchirurg 1994; 97:655-60
3. Anetzberger H., Schulz C., Pfahler M., Refior HJ., Müller-Gerbl M.:
Subchondral mineralization patterns of the glenoid after tear of the supraspinatus.
Clin Orthop Relat Res. 2002; 404:263-68
4. Anetzberger H., Thein E., Walli AK., Messmer K.:
Determination of regional bone blood flow by means of fluorescent microspheres using an automated sample-processing procedure.
Eur Surg Res. 2003; 35:337-45
5. Baertschi-Rochaix W.:
Migraine cervicale.
Bern: Hans Huber 1949
6. Bartsch C.:
Morphologische Funktionsanalyse des oberen Kopfgelenkes mittels CT-Osteoabsorptiometrie.
Dissertation; LMU München: Medizinische Fakultät 2007
7. Benninghoff A.:
Makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie.
München: Elsevier, Urban & Fischer 2002

Literaturverzeichnis

8. Biggemann M., Hilweg D., Brinckmann P.:
Prediction of the compressive strength of vertebral bodies of the lumbar spine by quantitative computed tomography.
Skeletal Radiol. 1989; 17:264-69
9. Böhringer ME., Beyer WF., Weseloh G.:
Vergleichende Histomorphometrie der subchondralen Knochendichte und Gelenkknorpeldicke im Tibiakopf bei humanen Früharthrosen.
Z Orthop Ihre Grenzgeb. 1995; 133:291-302
10. Carter DR.:
Mechanical loading histories and cortical bone remodelling.
Calcif Tissue Int. 1984; 36:19-24
11. Clausen JD., Goel VK., Traynelis VC., Scifert J.:
Uncinate processes and Luschka joints influence the biomechanics of the cervical spine: quantification using a finite element model of the C5-C6 segment.
J Orthop Res. 1997; 15:342-47.
12. Clark JM., Huber JD.:
The structure of the human subchondral plate.
J Bone Joint Surg Br. 1990; 72(5):866-73
13. Dedrick DK., Goldstein SA., Brandt KD., O'Conner BL., Goulet RW.:
A longitudinal study of subchondral plate and trabecular bone in cruciate deficient dogs with osteoarthritis followed up for 54 months.
Arthritis Rheum. 1993; 36:1460-67
14. Doerr W.:
Über die Anatomie der Wirbelbogengelenke.
Arch Orthop Unfallchir. 1977; 50:222-34
15. Donaldson C., Hulley S., Vogel J., Hattner R., Bayers J., Millan MC.:
Effects of prolonged bed rest on bone mineral metabolism.
Metabolism 1970; 3:1071-84

Literaturverzeichnis

16. Duncan H., Jundt J., Riddle JM., Pitchford W., Christophersen T.:
The tibial subchondral plate. A scanning electron microscopic study.
J Bone Joint Surg Am. 1987; 69(8):1212-20
17. Ebraheim NA., Lu J., Biyani A., Brown JA., Yeasting RA.:
Anatomic considerations for uncovertebral involvement in cervical spondylosis.
Clin Orthop. 1997; 334:200-06
18. Ecklin U.:
Die Altersveränderungen der Halswirbelsäule.
New York: Springer 1960
19. Eckstein F., Jacobs CR., Merz R.:
Mechanobiological adaptation of subchondral bone as a function of joint
incongruity and loading.
Med Eng Phys. 1997; 19(8):720-28
20. Eckstein F., Merz B., Schön M., Jacobs C.R., Putz R.:
Tension and bending, but not compression alone determine the functional
adaptation of subchondral bone in incongruous joints.
Anat Embryol. 1999; 199(1):85-97
21. Eckstein F., Müller-Gerbl M., Steinlechner M., Kierse R., Putz R.:
Subchondral bone density of the human elbow assessed by computed
tomography osteoabsorptiometry - a reflection of the loading history of the joint
surfaces.
J Orthop Res. 1995; 13:268-78
22. Eimannsberger A.:
Ein neues Programm zur 3D-Rekonstruktion mit CT-OAM aus CT-
Datensätzen auf intelbasierten Rechnersystemen.
Surg Radiol Anat. 2007; 29(6):489-510
23. Eisenhardt-Rothe von R., Eckstein F., Müller-Gerbl M., Landgraf J., Rock C.,
Putz R.:
Direct comparison of contact areas, contact stress and subchondral
mineralization in human hip-joint specimens.
Anat Embryol. 1997; 195:279-88

Literaturverzeichnis

24. Eisenhardt-Rothe von R., Witte H., Steinlechner M., Müller-Gerbl M., Putz R., Eckstein F.:
Quantitative Bestimmung der Druckverteilung im Hüftgelenk während des Gangzyklus.
Unfallchirurg 1999; 102:625-31
25. Exner G.:
Variationen und Fehlbildungen der Wirbelsäule.
Handbuch Orthopädie, Band II
Stuttgart: Thieme 1958
26. Fick R.:
Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke.
Jena: Gustav Fischer Verlag 1904
27. Finkelstein SI., Machkovskaia GK.:
Radiological morphology of uncovertebral joints in normal state and in arthrosis.
Vestn Rentgenol Radiol. 1976; 3:18-24
28. François RJ., Bywaters EG., Aufdermaur M.:
Illustrated glossary for spinal anatomy.
Rheumatol Int. 1985; 5(6):241-45
29. Giraudi G.:
L'artrosi deformante unco-vertebrale.
Radiol Med. 1931; 8:1457-75
30. Griehl A.:
Quantifizierende Darstellung der subchondralen Mineralisierung des Tibiaplateaus bei Genu varum vor und nach Tibiaumstellungsosteotomie.
Dissertation; LMU München: Medizinische Fakultät 1998
31. Grignon B., Roland J.:
Can the human intervertebral disc be compared to a diarthrodial joint?
Surg Radiol Anat. 2000; 22(2):101-05

Literaturverzeichnis

32. Gryn timer MD., Alpert B., Katz I., Liebermann I., Pritzker KP.:
Subchondral bone in osteoarthritis.
Calcif Tissue Int. 1991; 49:20-26
33. Gutmann G., Biedermann H.:
Funktionelle Pathologie und Klinik der Wirbelsäule.
Stuttgart: Fischer 1984
34. Hackenbroch MH., Refior HJ., Jäger M.:
Biomechanik der Wirbelsäule.
Stuttgart: Thieme 1983
35. Hadley MN., Sonntag VK.:
Cervical disc herniations. The anterior approach to symptomatic interspace pathology.
Neurosurg Clin. 1993; 4(1):45-52
36. Hall DA.:
Structure and function of the aging intervertebral disc. The aging spine.
Manchester: University Press 1987
37. Hirsch C., Schajowicz R., Galante J.:
Structural changes in the cervical spine. A study of autopsy specimens in different age groups.
Acta Orthop Scand Suppl. 1976; 109:7-77
38. Hofer H.:
Über den Bewegungsumfang der Daumengelenke.
Dtsch Med Wochenschr. 1957; 107:1035-38
39. Holder J.:
Degenerative changes of the cervical spine.
Der Orthopäde 1996; 25(6):512-18
40. Issekutz B., Blizzard N., Birkhead K.:
Effect of prolonged bed rest on urinary calcium output.
J appl Physiol. 1966; 21:1013-20

Literaturverzeichnis

41. Jacobs C., Eckstein F.:
Computer simulation of subchondral bone adaptation to mechanical loading in an incongruous joint.
Anat Rec. 1997; 249:317-26
42. Jirout J.:
Einfluss der einseitigen Großhirndominanz auf das Röntgenbild der Halswirbelsäule.
Radiologe 1980; 20:466-69
43. Jones H., Priest J., Hayes W., Trichenor C., Nagel D.:
Humeral hypertrophy in response to exercise.
J Bone Joint Surg. 1977; 59:204-08
44. Junghanns H.:
Pathologie der Wirbelsäule.
Handbuch der speziellen pathologischen Anatomie, Band IX/4
Berlin: Uehlinger 1939
45. Junghanns H.:
Die Wirbelsäule in der Arbeitsmedizin.
Stuttgart: Hippokrates 1979
46. Junghanns H.:
Die Wirbelsäule unter den Einflüssen des täglichen Lebens, der Freizeit, des Sportes.
Stuttgart: Hippokrates 1986
47. Junghanns H.:
Anatomical bases for the x-ray diagnosis of intervertebral chondrosis and osteochondrosis.
Acta Radiol. 1954; 116:276-83
48. Junghanns H.:
Functional roentgen examination of the spine.
Radiology 1963; 146:209-10

Literaturverzeichnis

49. Klein P., Sommerfeld P.:
Biomechanik der menschlichen Gelenke I, 1. Auflage
München: Elsevier, Urban und Fischer 2004
50. Knief JJ.:
Quantitative Untersuchung der Verteilung der Hartschubstanz im Knochen in
ihrer Beziehung zur lokalen mechanischen Beanspruchung.
Z Anat Entwicklungsgesch. 1967; 126:55-80
51. Konermann H.:
Density distribution in the x-ray image of skeleton.
Naturwissenschaften 1970; 57:244
52. Konermann H.:
Quantitative determination of the density distribution in x-ray pictures of bone
by a new photographic method.
Z Anat Entwicklungsgesch. 1971; 134:13-48
53. Kotani Y., McNulty PS., Abumi K., Cunningham BW., Kaneda K., McAfee PC.:
The role of anteromedial foraminotomy and the uncovertebral joints in the
stability of the cervical spine. A biomechanical study.
Spine 1998; 23(14):1559- 65
54. Kremer K., Lierse W., Platzer W., Schreiber HW., Weller S.:
Chirurgische Operationslehre: spezielle Anatomie, Indikationen, Technik,
Komplikationen, Band VIII
Stuttgart: Thieme 1997
55. Krogh T., Torgersen O.:
Die Uncovertebralgelenke und die Arthrosis deformans uncovertebralis, eine
pathologisch anatomische und röntgenologische Studie.
Acta Radiol. 1940; 21:231
56. Kuhlendahl H., Lindemann K.:
Die Erkrankungen der Wirbelsäule.
Stuttgart: Enke 1953

Literaturverzeichnis

57. Kumaresan S., Yoganandan N., Pintar FA., Macias M., Cusick JF.:
Morphology of young and old cervical spine intervertebral disc tissues.
Biomed Sci Instrum. 2000; 36:141-46
58. Kumaresan S., Yoganandan N., Pintar FA., Maiman DJ.:
Finite element modelling of the cervical spine: role of intervertebral disc under
axial and eccentric loads.
Med Eng Phys. 1999; 21(10):689-700.
59. Kummer B.:
Funktioneller Bau und funktionelle Anpassung des Knochens.
Anat Anz. 1962; 110:261-93
60. Kummer B.:
Morphologie und Biomechanik der Halswirbelsäule.
Z Orthop. 1981; 119:554-58
61. Kummer B.:
Mechanische Beanspruchung und funktionelle Anpassung des Knochens.
Verh Anat Ges. 1978; 21-45
62. Kummer B.:
Grundlagen der Pauwels Theorie der funktionellen Anpassung des Knochens.
Orthopäde 1995; 24:387-93
63. Lanz T. von, Wachsmuth W.:
Praktische Anatomie, Band II/VII
New York: Springer 1982
64. Layton MW., Goldstein SA., Goulet RW., Feldkamp LA., Kubinski DJ.:
Examination of subchondral bone architecture in experimental osteoarthritis by
microscopic computed axial tomography.
Arthritis Rheum. 1988; 31:1400-05
65. Lippert H.:
Lehrbuch Anatomie, Band II
München: Urban und Schwarzenberg 1990

Literaturverzeichnis

66. Luschka H.:
Die Anatomie des Menschen in Rücksicht auf die Bedürfnisse der praktischen Heilkunde, Band I und II
Tübingen: Laupp 1865
67. Luschka H.:
Die Halbgelenke des menschlichen Körpers.
Berlin: Reimer 1858
68. Meyer H.:
Die Architektur der Spongiosa.
Reichert und Du Bois-Reymond's Arch. 1867; 615-28
69. Milne N.:
The role of zygapophysial joint orientation and uncinat processes in controlling motion in the cervical spine.
J Anat. 1991; 178:189-201
70. Milz S., Putz R.:
Quantitative morphology of the subchondral bone plate of the tibial plateau.
J Anat. 1994; 185:103-10
71. Mueller W.:
Spaltbildungen an Gelenk- und Dornfortsätzen der Wirbelsäule auf der Basis von Umbauzonen.
Fortschr Roentgenstr. 44:644-48
72. Müller-Gerbl M.:
The subchondral bone plate.
Adv Anat Embryol Cell Biol. 1998; 141:130-34
73. Müller-Gerbl M., Putz R., Hodapp N., Schulte E., Wimmer B.:
Die Darstellung der subchondralen Dichtemuster mittels der CT-Osteoabsorptiometrie (CT-OAM) zur Beurteilung der individuellen Gelenkbeanspruchung am Lebenden.
Z Orthop Ihre Grenzgeb. 1990; 128:128-33

Literaturverzeichnis

74. Müller-Gerbl M., Putz R., Kenn R.:
Demonstration of subchondral bone density patterns by three-dimensional CT osteoabsorptiometry as a non-invasive method for in-vivo assessment of individual long-term stresses in joints.
J Bone Miner Res. 1992; 7 Suppl 2:411-18
75. Müller-Gerbl M., Putz R., Kenn R.:
Verteilungsmuster der subchondralen Mineralisierung in der cavitas glenoidalis bei Normalpersonen, Sportlern und Patienten.
Z Orthop Ihre Grenzgeb. 1993; 131:10-13
76. Nilsson B., Westlin N.:
Bone density in athletes.
Clin Orthop. 1971; 77:179-82
77. Noble J., Alexander K.:
Studies of tibial subchondral bone density and its significance.
J Bone Joint Surg Am. 1985; 67:295-302
78. Overton LM., Grossmann JW.:
Anatomical variations in the articulation between the second and the third cervical vertebrae.
J Bone Joint Surg Am. 1934; 34:155-61
79. Pauwels F.:
Developmental effects of the functional adaption of bone.
Anat Anz. 1976; 139:213-20
80. Pauwels F.:
Gesammelte Abhandlungen zur funktionellen Anatomie des Bewegungsapparates.
Berlin, Springer 1965
81. Penning L., Wilmsink JT.:
Rotation of the cervical spine. A CT study in normal subjects.
Spine 1987; 12(8):732-38

Literaturverzeichnis

82. Pochert M.:
Morphologische Funktionsanalyse des unteren Kopfgelenkes (C1-C2) und des Bewegungssegmentes C2-C3 mittels CT-Osteoabsorptiometrie.
Dissertation, LMU München: Medizinische Fakultät 2007
83. Prescher A.:
Anatomy and pathology of the aging spine.
Eur J Radiol 1998; 27(3):181-95
84. Putz R.:
Funktionelle Anatomie der Wirbelgelenke. Normale und pathologische Anatomie.
Stuttgart: Thieme 1981
85. Putz R.:
Function-related morphology of the intervertebral discs.
Radiologie 1993; 33(10):563-66
86. Rathke L.:
Zur normalen und pathologischen Anatomie der Wirbelsäule.
Dtsch Z Chir. 1933; 242:122-37
87. Reinhardt K.:
Die Anatomie und Pathologie der kleinen Wirbelgelenke im Röntgenbild.
Acta Radiol. 1963; 4:665-700
88. Saternus KS., Bornscheuer HH.:
Comparative radiologic and pathologic-anatomic studies on the value of discography in the diagnosis of acute intravertebral disk injuries in the cervical spine.
Rofo 1983; 139(6):651-57
89. Schleicher A., Tillmann B., Zilles K.:
Quantitative analysis of x-ray images with a television image analyser.
Microsc Acta 1980; 83:189-96

Literaturverzeichnis

90. Schmorl G., Junghanns H.:
Die gesunde und die kranke Wirbelsäule in Röntgenbild und Klinik,
pathologische und anatomische Untersuchungen, 3. Auflage
Stuttgart: Thieme 1953
91. Schünke M., Schulte E., Schuhmacher U.:
Prometheus: Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem.
Stuttgart: Thieme 2005
92. Schünke M., Tillmann B., Schleicher A., Pointner H.:
Biomechanische und histochemische Untersuchungen am Tibiaplateau des
Menschen.
Verh Anat Ges. 1987; 81:451-53
93. Stahl C., Huth F.:
Morphological evidence of synovial spaces in the uncovertebral region of
cervical discs.
Z Orthop Ihre Grenzgeb. 1980; 118(5):721-28
94. Taylor JR., Twomey LT.:
Acute injuries to cervical joints. An autopsy study of neck sprain.
Spine 1993; 18(9):1115-22
95. Thomas W.:
The uncus exostoses syndrome and its treatment by means of the
decompression operation of the vertebral artery.
Z Orthop Ihre Grenzgeb. 1979; 117(6):983-87
96. Tillmann B., Töndury G.:
Lehrbuch und Atlas der Anatomie des Menschen.
Rauber-Kopsch, Band I - Bewegungsapparat - 20. Auflage
Stuttgart: Thieme 1968
97. Töndury G.:
Entwicklungsgeschichte und Fehlbildungen der Wirbelsäule.
Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis – Band VII
Stuttgart: Hippokrates 1958

Literaturverzeichnis

98. Töndury G.:
Der Wirbelsäulerrheumatismus.
Diagnose und Differentialdiagnose rheumatischer Krankheiten.
Stuttgart: Huber 1967
99. Töndury G.:
Lehrbuch und Atlas der Anatomie des Menschen.
Rauber-Kopsch, Band I – Bewegungsapparat - 20. Auflage
Stuttgart: Thieme 1968
100. Töndury G.:
Morphology of cervical spine. The cervical spine.
Bern: Huber 1974
101. Töndury G.:
Angewandte und topographische Anatomie - 5. Auflage
Stuttgart: Thieme 1961
102. Torklus D. von, Gehle W.:
Die obere Halswirbelsäule: Regionale Morphologie; Pathologie und
Traumatologie.
Prakt. Röntgenatlas und Systematik - 3. Auflage
Stuttgart: Thieme 1987
103. Trolard A.:
Les articulation de la tête avec la colonne vertébrale. Étude sur quelques
points de ces articulations.
J Anat Physiol. 1897; 33:105-28
104. Wagner S.:
Einfluss der dorsalen Instrumentierung auf angrenzende und transfixierte
Facettengelenke bei Patienten mit thorakolumalen Wirbelsäulenverletzungen,
eine morphologische in vivo Untersuchung mit der CT-Osteoabsorptiometrie.
Dissertation, LMU München: Medizinische Fakultät 2004
105. Whedon D.:
Tissue osteoporosis: physiologic aspects.
Calcif Tissue Int. 1984; 36:146-50

Literaturverzeichnis

106. Whitehouse RW., Economou G., Adams JE.:
Influence of temperature on QCT: implications for mineral densitometry.
J Comput Assist Tomogr. 1993; 17(6):945-51
107. Wolff J.:
Das Gesetz der Transformation der Knochen.
Berlin: Hirschwald 1892
108. Wu DD., Burr DB., Boyd RD., Radin EL.:
Bone and cartilage changes following experimental varus or valgus tibial
angulation.
J Orthop Res. 1990; 8:572-585
109. Yoganandan N., Kumaresan S., Pintar FA.:
Biomechanics of the cervical spine, Part 2. Cervical spine soft tissue
responses and biomechanical modelling.
Clin Biomech (Bristol, Avon). 2001; 16(1):1-27.

Abbildungsverzeichnis

8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Spannungsoptisches Modell und der daraus abgeleitete theoretische Trajektorienverlauf nach PAUWELS (1965).....	22
Abb. 2: Schematische Darstellung des Gelenkknorpels mit der angrenzenden subchondralen Knochenplatte (MÜLLER-GERBL 1998)	24
Abb. 3: Spannungsverteilung direkt an der Gelenkfläche in Abhängigkeit von drei Faktoren: Höhe und Positionierung der Gelenkresultierenden sowie Größe und Lage der Kontaktflächen (ANETZBERGER et al. 1994)	26
Abb. 4: Altersverteilung im Kollektiv 2 (G2).....	32
Abb. 5: Altersverteilung im Kollektiv 3 (G3).....	33
Abb. 6: Falschfarbenskala nach Hounsfield	38
Abb. 7: Ansicht eines Halswirbels von kaudal.....	40
Abb. 8: Ansicht eines Halswirbels von kranial.....	40
Abb. 9: Darstellung einer Grundplatte und der entsprechenden Unterteilung in HG.....	43
Abb. 10: Bestimmung der Dichtemaxima nach definierter Anlage eines Gitterrasters und Koordinatensystems	45
Abb. 11: Beispiel einer nativ-radiologischen Halswirbelsäulenschichtaufnahme und entsprechender Falschfarbenbelegung.....	50
Abb. 12: Anzahl der Dichtemaxima pro Hauptgruppe der Grundplatten.....	53
Abb. 13: Einteilung einer Grundplatte in Hauptgruppen	53
Abb. 14: Ansicht einer Grundplatte mit diffuser Dichtemaximaverteilung von kaudal	54
Abb. 15: Anzahl der Dichtemaxima pro Quadrant der Grundplatten.....	55
Abb. 16: Lage der Dichtemaxima in den verschiedenen Quadranten der Grundplatte	56
Abb. 17: Anzahl der Dichtemaxima pro Hauptgruppe der Deckplatten.....	57

Abbildungsverzeichnis

Abb. 18: Anzahl der Dichtemaxima pro Quadrant der Deckplatten	58
Abb. 19: Lage der Dichtemaxima in den verschiedenen Quadranten der Deckplatte.....	60
Abb. 20: Gesamtmineralisierung der einzelnen HWS im Vergleich.....	61
Abb. 21: Test auf gleiche Varianz der Mineralisierung des Gesamtkollektivs	61
Abb. 22: Test auf gleiche Varianz der Gesamtmineralisierung in Gruppe 1 (G1)	62
Abb. 23: Test auf gleiche Varianz der Gesamtmineralisierung in Gruppe 2 (G2)	62
Abb. 24: Darstellung des Mineralisierungsquotienten MQ1	63
Abb. 25: Mittlere Gesamtmineralisierung in mg Ca/ml nach Unterteilung der Grund- und Deckplatten.....	64
Abb. 26: Seitenvergleich der Gesamtmineralisierung für die Grundplatten	65
Abb. 27: Vergleich der Gesamtmineralisierung für die Deckplatten	65
Abb. 28: Seitenvergleich der Gesamtmineralisierung in mg Ca/ml für G1	66
Abb. 29: Seitenvergleich der Gesamtmineralisierung in mg Ca/ml für G2.....	66
Abb. 30: Boxplot Gesamtmineralisierung im Seitenvergleich G1	67
Abb. 31: Boxplot Gesamtmineralisierung im Seitenvergleich G2	67
Abb. 32: Gesamtmineralisierung und StDevs korrespondierender GF in G1.....	68
Abb. 33: Gesamtmineralisierung und StDevs korrespondierender GF in G2.....	69
Abb. 34: Boxplot Mineralisierung korrespondierender GF in mg Ca/ml für G1	69
Abb. 35: Boxplot Mineralisierung korrespondierender GF in mg Ca/ml für G2	70
Abb. 36: Darstellung vollständiger Einrisse durch die Zwischenwirbelscheiben im Frontalschnitt einer HWS	72
Abb. 37: Uncovertebrale Spalten ohne vollständige Teilung der ZWS	73
Abb. 38: Frontalschnitt einer HWS mit erhaltenem Discus intervertebralis C7/Th1	74

Abbildungsverzeichnis

Abb. 39: Zentrale Einrisse des Gallertkerns ohne Beteiligung des Anulus fibrosus.....	74
Abb. 40: Meniskoider Gewebekeil im Bereich eines Uncovertebralgelenkes	75
Abb. 41: Morphologische Umbauprozesse des Uncovertebralgelenkes.....	76
Abb. 42: Röntgenaufnahme eines planparallelen Schnittes von HWS121-01	79
Abb. 43: Beispiele einiger Röntgenschichtaufnahmen nach Falschfarbenbelegung.....	80
Abb. 44: Die 3-Pfeiler-Abstützung in den Wirbelkörpern der unteren Halswirbelsäule	88

Tabellenverzeichnis

9 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Zuordnung von HE zu bestimmten Substanzen/ Stoffen	29
Tab. 2: Zuordnung von Falschfarbenbelegung, Grauwertstufen und HE	39
Tab. 3: Nummerierung des standardisierten Gitterrasters	42
Tab. 4: Lagebeschreibung der Hauptgruppen	43
Tab. 5: Einteilung der Grund- bzw. Deckplatten in Haupt- und Nebengruppen.....	44
Tab. 6: Auswertungsbogen - morphologische Umbauprozesse.....	48
Tab. 7: Auswertungsbogen nativ-radiologischer Aufnahmen.....	49
Tab. 8: Anzahl und Hauptgruppenzuordnung der Dichtemaxima im Bereich der GP.....	52
Tab. 9: Zuordnung der Dichtemaxima zu den Haupt- und Nebengruppen der GP.....	54
Tab. 10: Verteilung der Dichtemaxima innerhalb der Grundplatten	55
Tab. 11: Anzahl und Hauptgruppenzuordnung der Dichtemaxima im Bereich der DP	57
Tab. 12: Zuordnung der Dichtemaxima zu den Haupt- und Nebengruppen der DP.....	58
Tab. 13: Verteilung der Dichtemaxima innerhalb der Deckplatten	59
Tab. 14: Mineralisierungsquotient korrespondierender GF (MQ2).....	70
Tab. 15: Ergebnisse makroskopischer Untersuchungen an den Disci intervertebrales.....	71
Tab. 16: Zuordnung der meniskoiden Gewebekeile zur jeweiligen Segmenthöhe	75
Tab. 17: Ergebnisse der nativ-radiologischen Untersuchungen	77

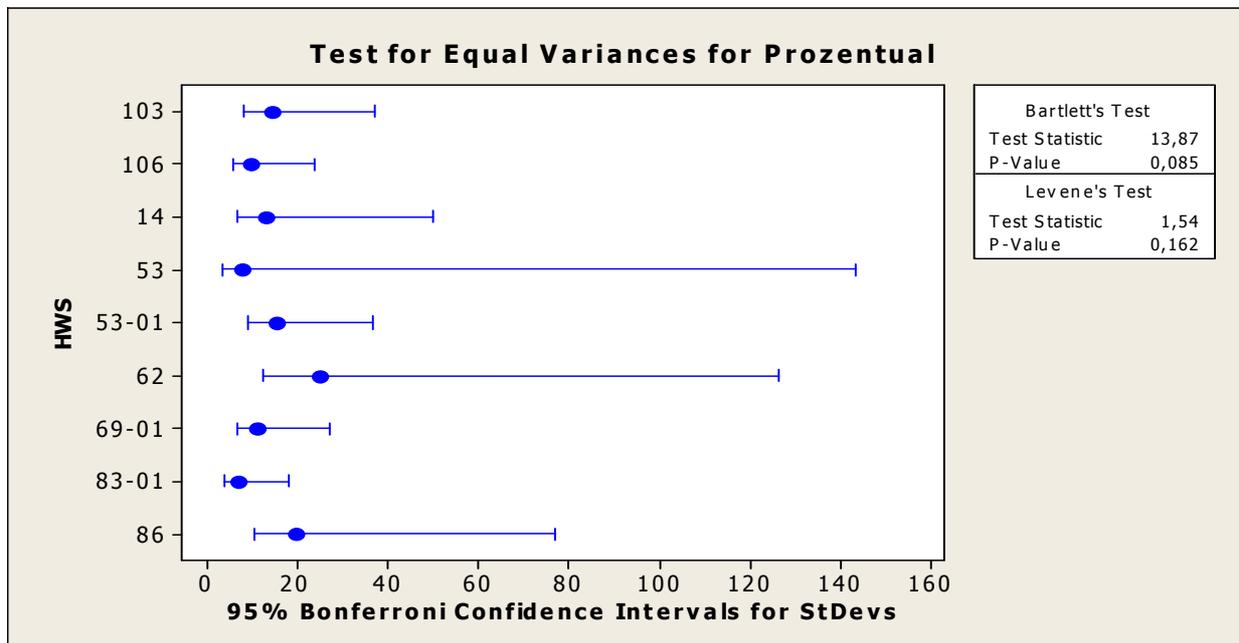
Abkürzungsverzeichnis

10 Abkürzungsverzeichnis

1. CT	Computertomographie
2. DP	Deckplatte
3. DG	Densitogramm
4. GF	Gelenkfläche
5. GP	Grundplatte
6. GW	Grauwerte
7. HE	Hounsfield-Einheiten
8. HG	Hauptgruppe
9. HU	Hounsfield-Units
10. HWK	Halswirbelkörper
11. HWS	Halswirbelsäule
12. LWK	Lendenwirbelkörper
13. Lig.	Ligamentum
14. mg	Milligramm
15. MQ	Mineralisierungsquotient
16. n	Fallzahl
17. NG	Nebengruppe
18. OAM	Osteoabsorptiometrie
19. Proc.	Processus (Singular)
20. Procc.	Processus (Plural)
21. SCBP	subchondral bone plate
22. StDevs	Standarddeviation
23. ZWS	Zwischenwirbelscheibe

Anhang

11 Anhang



Anhang Abb. 1: Das prozentuale Verhältnis der links-rechts Differenzen für die HWS von Gruppe 1 und 2

Regression Analysis: mg Ca/ml (HWS Gruppe 1) versus HWK Nr.

The regression equation is
 mg Ca/ml (HWS Gruppe 1) = 459 - 4,43 HWK Nr.

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	458,72	31,71	14,47	0,000
HWK Nr.	-4,428	6,138	-0,72	0,474

S = 57,5751 R-Sq = 1,0% R-Sq(adj) = 0,0%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	1726	1726	0,52	0,474
Residual Error	50	165744	3315		
Total	51	167470			

Unusual Observations

Obs	HWK Nr.	mg Ca/ml (HWS Gruppe 1)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
16	4,00	565,29	441,00	10,07	124,29	2,19R
17	3,00	580,24	445,43	14,64	134,81	2,42R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Anhang Abb. 2: Die Regressionsanalyse zeigt keinen Zusammenhang zwischen mg Ca/ml und der Nummer des Halswirbels bei Gruppe 1.

Anhang

Regression Analysis: mg Ca/ml (Gruppe 2) versus HWK Nr. (G2)

The regression equation is
 mg Ca/ml (Gruppe 2) = 557 + 10,2 HWK Nr. (G2)

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	557,47	56,62	9,85	0,000
HWK Nr. (G2)	10,24	11,56	0,89	0,378

S = 143,420 R-Sq = 0,9% R-Sq(adj) = 0,0%

Analysis of Variance

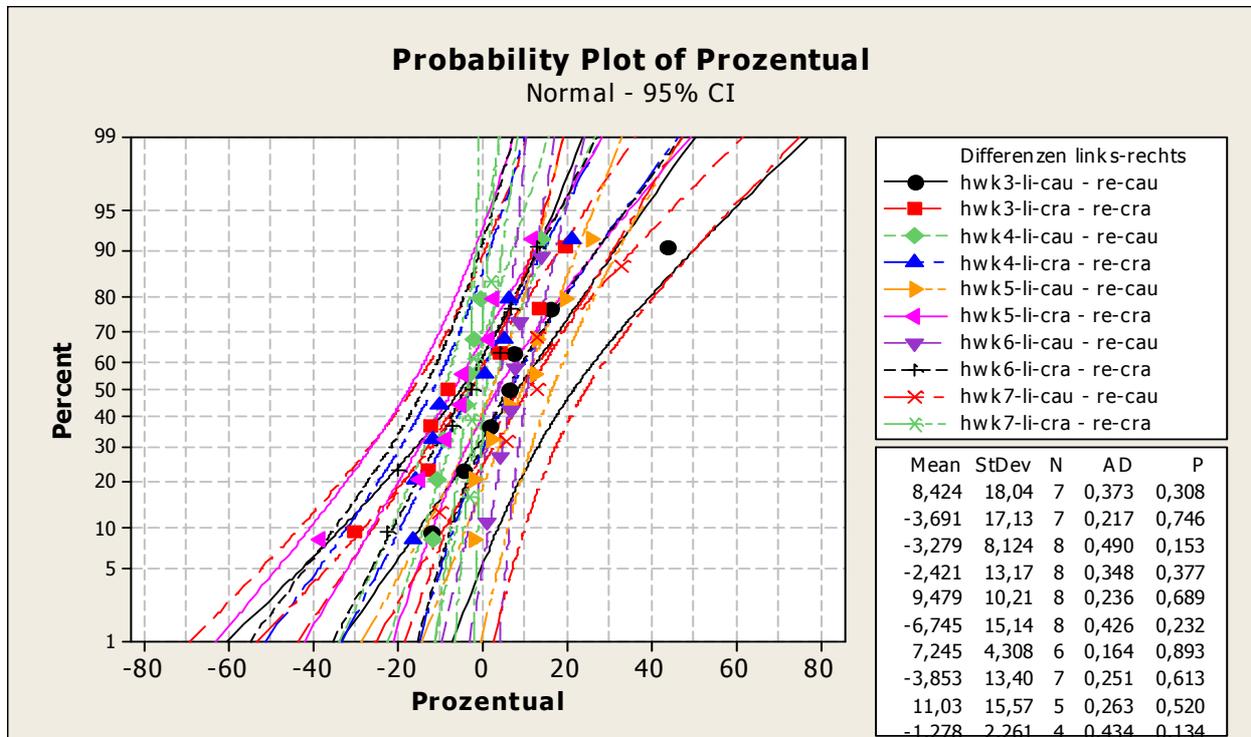
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	16151	16151	0,79	0,378
Residual Error	87	1789517	20569		
Total	88	1805668			

Unusual Observations

Obs	HWK Nr. (G2)	mg Ca/ml (Gruppe 2)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
9	3,00	1000,2	588,2	25,0	412,0	2,92R
10	3,00	871,8	588,2	25,0	283,6	2,01R
38	7,00	253,2	629,2	30,4	-376,0	-2,68R
39	7,00	337,5	629,2	30,4	-291,6	-2,08R

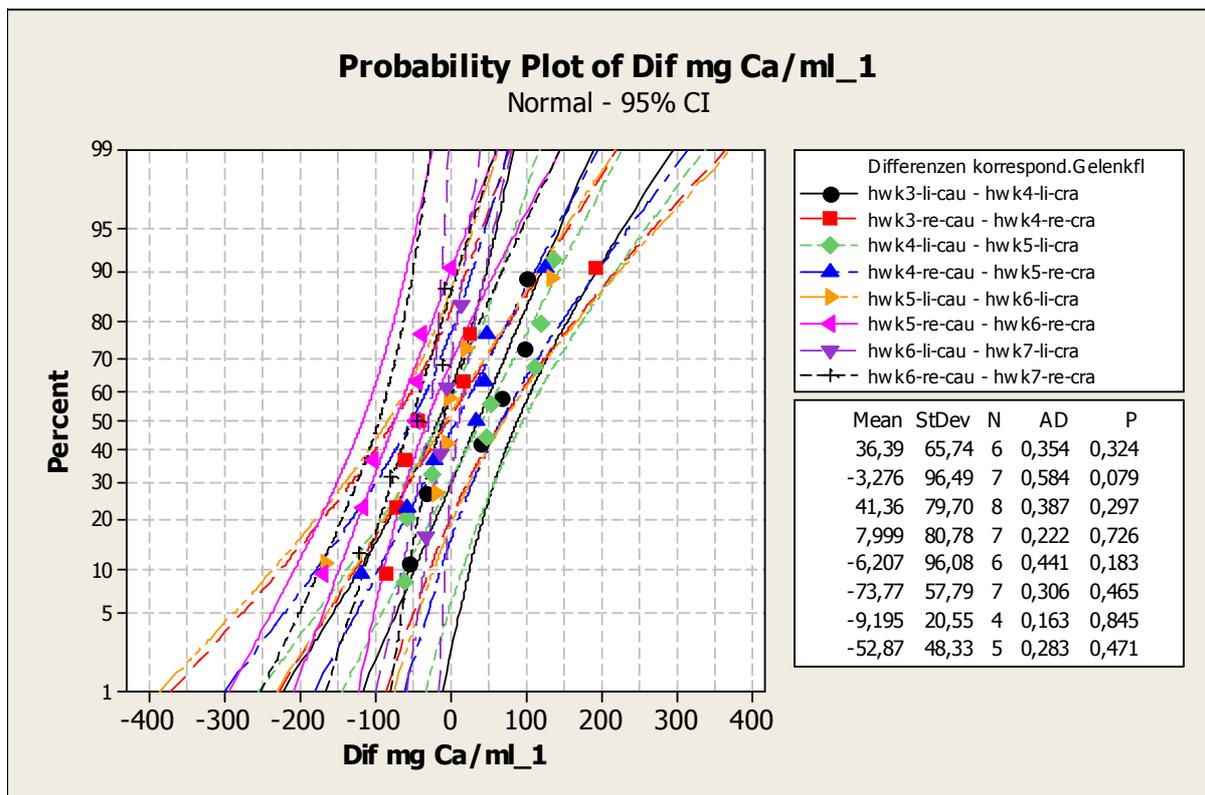
R denotes an observation with a large standardized residual.

Anhang Abb. 3: Die Regressionsanalyse zeigt keinen Zusammenhang zwischen mg Ca/ml und der Nummer des Halswirbels bei Gruppe 2.



Anhang Abb. 4: Die Differenzen im intraindividuellen Seitenvergleich der HWK sind bei Betrachtung des prozentualen Verhältnisses normalverteilt.

Anhang



Anhang Abb. 5: Die Differenzen im Vergleich der korrespondierenden Gelenkflächen sind bei Betrachtung der Gesamtmineralisierung in mg Ca/ml normalverteilt.

Danksagung

12 Danksagung

Mein besonderer Dank gebührt Frau Prof. Dr. med. M. Müller-Gerbl für die Überlassung des Themas und Ihre professionelle, unermüdliche und stets zielgerichtete Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr. med. Dr. h. c. R. Putz, Anatomische Anstalt der LMU München und bei Herrn Prof. Dr. med. Dr. h. c. M. Reiser, Institut für klinische Radiologie der LMU München, für die Unterstützung und Bereitstellung der benötigten Infrastruktur bedanken.

Frau Lippelt bin ich zu besonderem Dank verpflichtet, da sie mich mit so viel Geduld und Gelassenheit in die Geheimnisse des Analyse Programmes eingearbeitet hat und stets als Ansprechpartnerin zur Verfügung stand.

Danken möchte ich meinem langjährigen Freund David Schäfer, der mir bei der statistischen Auswertung und der grafischen Gestaltung eine große Hilfe war und in einigen abendlichen Sitzungen dazu beigetragen hat, dass diese Arbeit realisiert werden konnte.

Darüber hinaus gilt mein besonderer Dank meiner Familie und meiner Freundin Saskia Wolter, die mich während der gesamten Zeit liebevoll motiviert und unterstützt haben.

Curriculum vitae

13 Curriculum vitae

PERSÖNLICHE DATEN:

Geburtsdatum: 13.02.1978
Geburtsort: Bielefeld
Familienstand: ledig

SCHULBILDUNG:

08/84 - 07/88 Grundschule Bovert, Meerbusch
08/88 - 07/94 Städt. Meerbusch Gymnasium, Meerbusch
08/94 - 06/97 Max-Planck Gymnasium, Bielefeld

ZIVILDIENTST:

07/97 - 07/98 Verein Lebensräume e.V., Bielefeld

STUDIUM:

11/98 – 12/05 Studium der Humanmedizin an der LMU München

PRAKTISCHES JAHR:

10/04 - 01/05 Chirurgische Klinik und Poliklinik der Innenstadt
Ludwig-Maximilians-Universität München
02/05 - 05/05 Klinik für orthopädische Chirurgie und Traumatologie
Kantonsspital Bruderholz, Basel, *Schweiz*
06/05 - 07/05 Klinik für Endokrinologie/ Klinik für Intensivmedizin
University of Otago, Wellington, *Neuseeland*
08/05 - 09/05 Klinik für Gastroenterologie/ Klinik für Nephrologie
University of Sydney, Sydney, *Australien*

ÄRZTLICHE TÄTIGKEIT:

Seit 01/06 Assistenzarzt für Unfallchirurgie und Orthopädie
Berufsgenossenschaftliches Universitätsklinikum
Bergmannsheil GmbH Bochum
Direktor: Prof. Dr. med. G. Muhr