

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Tierärztlichen
Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München

Mikrocomputertomographische Analyse der
knöchernen Architektur des caninen und felines
Carpus

Von

Leo Goldstein

aus Günzburg

München 2026

Aus dem Zentrum für Klinische Tiermedizin der Tierärztlichen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität München

Lehrstuhl für Chirurgie der Kleintiere

Arbeit angefertigt unter der Leitung von:

Univ.-Prof. Dr. Andrea Meyer-Lindenberg

Mitbetreuung durch:

Dr. A.-C. Waselau

Gedruckt mit Genehmigung der Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-
Maximilians-Universität München

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Reinhard K. Straubinger, Ph.D.
Berichterstatte(r)in: Univ.-Prof. Dr. Andrea Meyer-Lindenberg
Korreferent/en: Priv.-Doz. Dr. Sven Reese

Tag der Promotion: 7. Februar 2026

Allen meinen Lieben

Inhalte der Dissertation wurden auf folgenden nationalen Tagungen
vorgestellt:

DVG Vet-Congress 23.11.2023

Tagung der DVG-Fachgruppe Chirurgie

Referent: Leo Goldstein

Micro-Computertomographie Untersuchung der ossären Strukturen des
caninen Carpus

L. Goldstein, A.-C. Waselau, A. Meyer-Lindenberg

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Literaturübersicht	3
2.1 <i>Anatomie des Karpalgelenkes</i>	3
2.1.1 Knöcherne Strukturen	3
2.1.2 Weichteil Strukturen	4
2.1.3 Gelenke und Bewegungsumfang	6
2.2 <i>Erkrankungen des Karpalgelenkes</i>	8
2.2.1 Frakturen	8
2.2.2 Subluxationen und Luxationen	9
2.2.3 Hyperextensionsverletzungen	11
2.3 <i>Gelenkversteifungen</i>	12
2.3.1 Prinzipien	12
2.3.2 Pankarpale Arthrodese	14
2.3.3 Partielle Arthrodese	15
2.4 <i>Mikro-Computertomographie</i>	15
2.4.1 Aufbau und Funktion des Mikro-Computertomographen	15
2.4.2 Anwendung in Klinik und Forschung	16
2.4.3 Parameter der Strukturanalyse	18
3. Publikation 1	21
4. Publikation 2	30
5. Diskussion	46
6. Zusammenfassung	56
7. Summary	58
8. Literaturverzeichnis	60
9. Danksagung	72

Abkürzungsverzeichnis

Art.	Articulatio
Artt.	Articulationes
BS	Bone Surface
BS/BV	Bone Surface per Bone Volume, Oberflächenvolumenanteil
BV	Bone Volume
BV/TV	Bone Volume per Total Volume, Knochenvolumenanteil
Ca	Os carpi accessorium
Cir	Os carpi intermedioradiale
Cu	Os carpi ulnare
CI	Os carpale primum
CII	Os carpale secundum
CIII	Os carpale tertium
CIV	Os carpale quartum
Conn.D	Connectivity Density
DA	Degree of Anisotropy
Lig.	Ligamentum
Ligg.	Ligamenta
μ CT	Mikrocomputertomograph/Mikrocomputertomographie
ROI	Region of Interest
Tb.N	Trabecular Number
Tb.Th	Trabecular Thickness
Tb.Sp	Trabecular Separation
TV	Total Volume

1. Einleitung

Verletzungen des Karpalgelenks bei Hunden und Katzen sind vielgestaltig, bestehen meist aus einer Kombination von Weichteil- und Knochenverletzungen und sind häufig Folge von direkten Traumata (Beierer 2021). Die große Bandbreite an potenziellen Schwachstellen erklärt sich bei Betrachtung der Anatomie des Gelenkes, da dieses aus sieben Einzelknochen und einer Reihe von Bändern, Muskeln und Sehnen besteht. Die Komplexität des Gelenkes erlaubt zwar eine Vielzahl von Bewegungen (Nickel et al. 2004), aber auch eine große Zahl potenzieller Pathologien (Brinker et al. 2016; Johnston und Tobias 2017). Beschrieben sind unter anderem Subluxationen und Luxationen einer oder beider Gelenketagen mit erhöhter Prädisposition der antebrachiocarpalen Artikulation, Hyperextensionsverletzungen (bei der Katze als Teil des „feline High-Rise-Syndroms“), Frakturen von einzelnen Karpalknochen, sowie eine Vielzahl von Verletzungen des Bandapparates (Beierer 2021; Johnson 1987; Li et al. 2000; Tomlin et al. 2001; Vedrine 2013). Therapeutischer Ansatz dieser Verletzungen ist je nach Ausmaß ein überbrückender Bandersatz oder in schwerwiegenden Fällen eine Versteifung des Gelenkes mittels partieller oder totaler Arthrodese. Bei den partiellen Arthrodesen wird im Gegensatz zur vollständigen Arthrodese die antebrachiocarpale Artikulation nicht mit einbezogen, um die Motilität dieses Gelenkes, die etwa 70-80% der Gesamtbeweglichkeit des Carpus ausmacht, aufrecht zu erhalten und somit einen relativ physiologischen Gang zu ermöglichen (Beierer 2021; Burton et al. 2013). Für beide Versteifungen gibt es mehrere Möglichkeiten der chirurgischen Versorgung (Bristow et al. 2015; Buote et al. 2009; Burton et al. 2013; Guerrero und Montavon 2005; Pozzi et al. 2020; Viguier et al. 2001). Sowohl beim knöchern inserierten Bandersatz als auch bei fast allen Methoden der Gelenkversteifung, wird in mindestens einen Karpalknochen eine Schraube oder ein Pin eingebracht. In der aktuell zugänglichen Literatur wird der Unterscheidung zwischen den Spezies Hund und Katze meist nicht die nötige Aufmerksamkeit geschenkt und die Katze deshalb irrtümlicherweise häufig als kleiner Hund behandelt, obwohl es

Unterschiede in der Anatomie, Orthopädie und Chirurgie gibt, die beachtet werden müssen (Chandler und Beale 2002; Scott und McLaughlin 2006). Auch sind die Belastungen, die der feline Carpus aufgrund physiologischen Verhaltens erfährt, wie zum Beispiel klettern oder springen, anders als beim Hund (Basa und Johnson 2019). Bisher sind die anatomischen Besonderheiten von Hund und Katze nur für die Bandstrukturen des Carpus beschrieben (Basa et al. 2023; Voss et al. 2003) und nicht für die Karpalknochen selbst. Die chirurgische Versorgung von Karpalgelenkstraumata, sowohl beim Hund als auch bei der Katze, ist mit recht hohen Komplikationsraten von bis zu 50% verbunden (Arnott et al. 2008; Merbl et al. 2013; Michal et al. 2003), deshalb ist die genaue Kenntnis der Anatomie des Gelenkes und der Beschaffenheit der Knochen von Bedeutung. Da es in der zugänglichen Literatur keine detaillierten Untersuchungen über die knöchernen Strukturen der sieben verschiedenen Karpalknochen gibt, war es Ziel der vorliegenden Studie diese anatomischen Strukturen mittels mikrocomputertomographischer Untersuchungen bei beiden Spezies näher zu untersuchen und zu vergleichen. Bestimmt wurden die trabekulären Strukturparameter (Knochenvolumenanteil (BV/TV), Oberflächenvolumenanteil (BS/BV), Trabekelanzahl (Tb.N), Trabekeldicke (Tb.Th), Trabekelabstand (Tb.Sp), Konnektivität (Conn. D) und Grad der Anisotropie (DA)), die Kortikalis wurde mithilfe eines dreistufigen Scoringystems klassifiziert. Die Ergebnisse dieser Untersuchung könnten unter anderem für die zukünftige Verbesserung der aktuell angewendeten Arthrodeseimplantate oder die Versorgung von Frakturen herangezogen werden.

2. Literaturübersicht

2.1 Anatomie des Karpalgelenkes

2.1.1 Knöcherne Strukturen

Das Karpalgelenk der Fleischfresser ist ein zusammengesetztes Gelenk (*Articulatio composita*) und besteht aus sieben Einzelknochen, die in einer proximalen bzw. antebrachialen und einer distalen bzw. metakarpalen Reihe angeordnet sind, sie bilden das *Basipodium* der Vordergliedmaße (König und Liebich 2018; Nickel et al. 2004; Salomon et al. 2015).

Die Karpalknochen zählen zu den kurzen Knochen (*Ossa brevia*), entstehen durch enchondrale Ossifikation und bestehen aus Spongiosa umgeben von einem dünnen kortikalen Mantel. Ihrer Form nach sind sie vielgestaltig und kommen zahlreich vor, dadurch ermöglichen sie eine Vielzahl an Bewegungen (Liebich 2009; Nickel et al. 2004). Die *Substantia Spongiosa* kann anhand der trabekulären Morphologie in Spongiosa *tubulosa* (Röhrchen), *lamellosa* (Blättchen) und *trabeculosa* (Bälkchen) unterteilt werden (König und Liebich 2018; Nickel et al. 2004). Der schwammartig aufgebaute spongiöse Knochen erfährt vielfältige statische und dynamische Beanspruchungen, beispielsweise durch Zugbelastung durch die Sehnen und Bänder oder den auf ihm lastenden Druck durch das Körpergewicht. Durch diese Kräfte ordnen sich die Trabekel entlang der wirkenden Kraftlinien (Zug- und Drucktrajektorien) an. Dieser Prozess der Anpassung bleibt ein Leben lang bestehen und dient der idealen Assimilation des Knochens an die äußeren Bedingungen (König und Liebich 2018; Nickel et al. 2004; Wolff 1870).

Die proximale Etage des Gelenkes besteht aus drei Knochen, dem *Os carpi intermedioradiale*, dem *Os carpi ulnare* und dem *Os carpi accessorium*. Das *Os carpi intermedioradiale* entsteht durch Fusion des *Os carpi radiale*, *Os carpi intermedium* und *Os carpi centrale* und ist der größte der sieben Karpalknochen. Die Ossifikationszentren des *Os carpi intermedioradiale* fusionieren im Alter von drei bis vier Monaten (Gnudi et al. 2003). Es besitzt im medialen Bereich einen palmar gerichteten, knopfartigen Vorsprung und kommuniziert proximal mit dem Radius, lateral mit dem *Os carpi ulnare* und distal mit allen vier Knochen der distalen Gelenketage. Das *Os carpi ulnare* besitzt lateral einen distal gerichteten Fortsatz. Verbindungen hat es mit Radius, Ulna, *Os carpi intermedioradiale*, *Os carpi accessorium*, sowie distal mit dem *Os carpale quartum* und dem fünften Metakarpalknochen. Das zylinderförmige *Os carpi accessorium* ist nach palmar gerichtet und kommuniziert mit der Ulna und dem *Os carpi ulnare* (König und Liebich 2018; Salomon et al. 2015). Es besitzt zwei Ossifikationszentren, deren Fusion 14 Wochen nach der Geburt abgeschlossen ist (Nickel et al. 2004)

Die vier Knochen der distalen Etage sind von medial nach lateral nummeriert (*Ossa carpalia I-IV*), sie nehmen in Ihrem Verlauf an Größe zu und kommunizieren mit der proximalen Gelenketape sowie distal mit den *Ossa metacarpalia I-V* (König und Liebich 2018).

Die Karpalknochen können beim Haussäugetier und Mensch synonym bezeichnet werden (Salomon et al. 2015):

Os carpi intermedioradiale als *Os scapholunatum*, Kahn-Mondbein

Os carpi ulnare als *Os triquetrum*, Dreiecksbein

Os carpi accessorium als *Os pisiforme*, Erbsenbein

Os carpale primum als *Os trapezium*, großes Vieleckbein

Os carpale secundum als *Os trapezoideum*, kleines Vieleckbein

Os carpale tertium als *Os capitatum*, Kopfbein

Os carpale quartum als *Os hamatum*, Hakenbein

2.1.2 Weichteil Strukturen

Zur Stabilisierung des Karpalgelenks dienen sowohl Gelenkbänder als auch Verstärkungen der Faszien (König und Liebich 2018). Auf der Dorsalseite des Karpus befindet sich eine als *Retinaculum extensorum* bezeichnete Faszienerstärkung, diese dient der Führung der Strecksehnen (Nickel et al. 2004). Palmar findet sich ein *Retinaculum flexorum*, es stellt eine Verstärkung der tiefen Faszie dar und dient als Halteband für Sehnen, Nerven und Gefäße (Nickel et al. 2004; Salomon et al. 2015). Die Gelenkbänder des Karpalgelenks sind in der Regel kurz und überbrücken meist nur eine Gelenketape, keines überspannt das komplette Gelenk (Brinker et al. 2016).

Zu unterscheiden sind fünf verschiedene Gruppen von Bändern:

1. Seitenbänder – *Ligg. collateralia*
2. Unterarm-Fußwurzelbänder – *Ligg. antebrachioarpea*
3. Bänder des *Os carpi accessorium* – *Ligg. ossis carpi accessorii*
4. Fußwurzelbänder – *Ligg. intercarpea*
5. Fußwurzel-Mittelfußbänder – *Ligg. carpometacarpea*

Zu 1. Seitenbänder

Das *Ligamentum collaterale carpi laterale* und *mediale* überspannt jeweils nur die proximale Gelenketape (Nickel et al. 2004). Es zieht lateral vom *Processus styloideus ulnae* an das *Os carpi ulnare*. Medial hat es seinen Ursprung am *Processus styloideus radii* und zieht zum *Os carpi intermedioradiale*. Aufgrund der physiologischen leichten Valgusstellung des Karpus befindet sich das mediale Kollateralband stets unter Spannung (Brinker et al. 2016). Im Gegensatz zum Hund, bei dem das mediale Kollateralband aus einem oberflächlichen geraden und einem in der Tiefe gelegenen schrägen Ast besteht, fehlt bei der Katze der gerade, oberflächliche Anteil (Shales und Langley-Hobbs 2006; Voss et al. 2003).

Zu 2. Unterarm-Fußwurzelbänder

Das *Lig. radiocarpeum dorsale* verbindet den distalen Radius mit der Ulna und dem *Os carpi ulnare*, es ist eine dorsale Verdickung der Gelenkkapsel (König und Liebich 2018). Die palmaren Bänder des Carpus wirken einer Hyperextension entgegen. Es lassen sich das *Lig. ulnocarpeum palmare* und das *Lig. radiocarpeum palmare* unterscheiden. Das *Lig. ulnocarpeum* entspringt medial der Ulna und zieht an die Palmarfläche der *Ossa carpalia II-IV*. Das *Lig. radiocarpeum dorsale* entspringt am palmaromedialen Rand der Gelenkfläche des Radius und zieht lateral ans *Os carpi intermedioradiale* (Evans und de Lahunta 2012). Die palmare, das Gelenk überbrückende, Faserplatte wird als *Fibrocartilago carpometacarpeum palmare* oder als *Lig. carpi palmare profundum* bezeichnet (Salomon et al. 2015).

Zu 3. Bänder des *Os carpi accessorium*

Das *Os carpi accessorium* wird durch drei verschiedene Bänder stabilisiert, deren Ursprung jeweils an diesem gelegen ist. Das *Lig. accessorioulnare* zieht an die Ulna, das *Lig. accessoriocarpoulnare* zieht an das *Os carpi ulnare* und das *Lig. accessoriometacarpeum* an die Metakarpalknochen IV und V (König und Liebich 2018; Nickel et al. 2004; Salomon et al. 2015).

Zu 4. Fußwurzelbänder

Die Interkarpalbänder sind häufig mit den anderen Bändern des Karpalgelenkes und der Gelenkkapsel selbst verschmolzen (Nickel et al. 2004). Sie werden in dorsale, palmare und innere Fußwurzelbänder unterteilt (*Ligg. intercarpea dorsalia, palmaria et interossea*). Sie dienen der Verbindung der einzelnen Karpalknochen (König und Liebich 2018; Nickel et al. 2004).

Zu 5. Fußwurzel-Mittelfußbänder

Die *Ligg. carpometacarpea* verbinden dorsal bzw. palmar die Karpalknochen mit den Metakarpalknochen. Sie sind meist mit der Gelenkkapsel verbunden, überbrücken nur einen Gelenkspalt und werden ihrer Lage nach als *Ligg. carpometacarpea dorsalia* bzw. *palmaria* bezeichnet (Nickel et al. 2004).

Die Muskeln des Karpalgelenkes liegen am Unterarm, sie bilden lange, spindelförmige Muskelbäuche und sind zweigelenkig (Nickel et al. 2004). Die Muskelursprünge liegen jeweils proximal des Ellbogengelenkes medial oder lateral am distalen Humeruskondylus. Die Muskelansätze sind meist kurze, starke Sehnen, die am Karpus oder Metakarpus inserieren. Die Muskeln wirken primär als Strecker (*Extensoren*) oder Beuger (*Flexoren*) sowohl des Karpus als auch des Ellbogens. Die Extensoren liegen dorsolateral am Unterarm, die Beuger kaudal (König und Liebich 2018).

2.1.3 Gelenke und Bewegungsumfang

Der Karpus ist ein echtes synoviales Gelenk (*Art. synoviales*) und besteht somit aus folgenden Strukturen: den jeweiligen Gelenkenden, dem Gelenkknorpel (*Cartilago articularis*), der Gelenkkapsel (*Capsula articularis*), der Gelenkhöhle (*Cavum articulare*), der Gelenkflüssigkeit (*Synovia*), den Gelenkbändern (*Ligamenta*) sowie möglichen intraartikulären Strukturen wie ein *Meniscus articularis* (Salomon et al. 2015). Die Gelenkkapsel entspringt am osteochondralen Übergang aus dem Periost und umgibt die Gelenkhöhle von allen Seiten. Histologisch gesehen besteht die Gelenkkapsel aus einem äußeren *Stratum fibrosum* und einem inneren *Stratum synoviale* (Liebich 2009). Der Karpus besitzt zwei voneinander getrennte Gelenkhöhlen, die nicht miteinander kommunizieren. Die proximale Gelenkhöhle umfasst die *Art. antebrachioacarpea*, *Art. ossis carpi accessorium* sowie die distale *Art. radioulnaris*. Die distale Gelenkhöhle umfasst die *Art. mediocarpea* und die *Art. carpometacarpea* (Nickel et al. 2004).

Das Karpalgelenk (*Art. carpi*) ist ein zusammengesetztes Gelenk an dessen Bildung die Knochen des Unterarms, der Handwurzel und des Mittelfußes beteiligt sind. Es besteht insgesamt aus fünf Gelenken, die in drei Gelenkebenen mit jeweils einer separaten Kapsel angeordnet sind (Nickel et al. 2004).

Folgende Gelenke sind am Karpalgelenk beteiligt

1. *Articulatio antebrachioacarpea*
2. *Articulatio mediocarpea*
3. *Articulatio ossis carpi accessorium*
4. *Articolationes intercarpeae*
5. *Articulatio carpometacarpea*

Zu 1. Articulatio antebrachioacarpea

Die *Art. antebrachioacarpea* besitzt im Vergleich zu den anderen Gelenken den größten Bewegungsumfang, dieser liegt je nach Studie zwischen 70 und 80% (Beierer 2021; Burton et al. 2013). Beim Fleischfresser ist dieses Gelenk als nahezu freies Gelenk angelegt, dadurch sind in beträchtlichem Maße kreiselnde Bewegungen möglich, was insbesondere bei der Katze die vielseitige Bewegung der Vorderpfoten ermöglicht (Nickel et al. 2004). Die Gelenkkapsel ist weit und besitzt eine dorsale Ausstülpung.

Zu 2. Articulatio mediocarpea

Die *Art. mediocarpea* folgt nach distal, sie beschreibt die Verbindung zwischen der proximalen und distalen Knochenreihe und ist als Wechselgelenk funktionierendes Walzengelenk ausgebildet (König und Liebich 2018). Die Beweglichkeit der *Art. mediocarpea* beträgt ca. 10-15% der Gesamtbeweglichkeit des Karpus (Basa und Johnson 2019; Buote et al. 2009). Die Gelenkhöhle ist eng und kommuniziert mit der Gelenkhöhle der *Art. carpometacarpea* (Nickel et al. 2004).

Zu 3. Articulatio ossis carpi accessorium

Die *Art. ossis carpi accessorium* verbindet das *Os carpi accessorium* mit der *Ulna* und dem *Os carpi ulnare*, sie kann der *Art. mediocarpea* zugeordnet werden (König und Liebich 2018).

Zu 4. Articolationes intercarpeae

Die *Artt. intercarpeae* sind straffe Gelenke, die zwischen den Knochen derselben Reihe ausgebildet sind und wenig Bewegungsfreiheit besitzen (Nickel et al. 2004). Auch sie können der *Art. mediocarpea* zugeordnet werden (König und Liebich 2018).

Zu 5. Articulatio carpometacarpea

Die unterste Etage des Karpalgelenkes ist die *Art. carpometacarpea*, hier kommunizieren die Knochen der distalen Reihe mit den Metakarpalknochen, diese Verbindungen sind als sehr straffe Gelenke angelegt (Nickel et al. 2004).

2.2 Erkrankungen des Karpalgelenkes

Das Vorliegen von Frakturen, Bandläsionen oder einer Kombination aus beidem ist möglich (Beierer 2021). Die Komplexität des Gelenkes erlaubt zwar eine Vielzahl von Bewegungen, jedoch auch eine große Zahl potenzieller Pathologien (Johnston und Tobias 2017). Anhand der klinischen und palpatorischen Befunde kann häufig schon eine Eingrenzung des Gebietes der Verletzung erfolgen, für die genaue Lokalisierung und Diagnostik sind jedoch Röntgenaufnahmen nötig. Diese werden standardisiert im kraniokaudalen und mediolateralen Strahlengang durchgeführt, zusätzlich sind bei Instabilitäten Stressaufnahmen indiziert. Auch die Anwendung der Computertomographie ist von hohem Wert (Brinker et al. 2016).

2.2.1 Frakturen

Frakturen der Karpalknochen kommen im Vergleich zu anderen Frakturen seltener vor, die häufigste Ursache sind Autounfälle (Beierer 2021). Die Diagnostik von Frakturen kann herausfordernd sein, da die klinischen Befunde häufig gering sind und oftmals zusätzlich komplexe Bandverletzungen vorliegen. Deswegen sind qualitativ gute Röntgenaufnahmen sowie teilweise die Computertomographie notwendig (Woods und Perry 2018).

Frakturen des *Os carpi intermedioradiale* sind selten, sie treten bevorzugt bei aktiven Hunden auf und können sowohl traumatisch als auch atraumatisch sein (Li et al. 2000; Tomlin et al. 2001). Atraumatische Frakturen können beispielsweise durch eine avaskuläre Nekrose bedingt sein (Aiken et al. 2013). Es scheint eine Rasseprädisposition zu geben, vermehrt betroffen scheinen Boxer, Springer Spaniel, Setter und Pointer (Gnudi et al. 2003; Li et al. 2000; Tomlin et al. 2001). Die meisten der Frakturen des *Os carpi intermedioradiale* sind Absprengungen, diese entstehen als eine Kombination aus Kompressions- und Scherkräften (Brinker et al. 2016). Weiters beschrieben sind sagittale Frakturen und Frakturen in T-Form, hier wurde dargestellt, dass diese

Frakturen entlang der Grenzen der Ossifikationszentren auftreten und somit Ähnlichkeit mit der IOHC (incomplete ossification of the humeral condyle) des distalen Humerus besitzen (Gnudi et al. 2003). Klinisch ist die Lahmheit anfangs schwer, lässt aber nach einigen Wochen nach, sodass Beschwerden nur bei Belastung auftreten (Brinker et al. 2016).

Frakturen des *Os carpi accessorium* treten fast ausschließlich beim sportlich genutzten Greyhound auf, gelegentlich aber auch bei anderen Hunden großer Rassen (Johnson et al. 1988). Die Frakturen werden in fünf Typen unterteilt und können auch in Kombination auftreten (Johnson 1987).

1. Distal basilar
2. Proximal basilar
3. Distal apical
4. Proximal apical
5. Trümmerfrakturen

Klinisch sind die Hunde nach dem Rennen geringgradig lahm, was sich innerhalb der folgenden Tage verschlechtert. Das Karpalgelenk ist angeschwollen und Schmerz zeigt sich vor allem bei Druck lateral des *Os carpi accessorium* und bei Flexion (Brinker et al. 2016).

Frakturen des *Os carpi ulnare* und der Karpalknochen der distalen Gelenkreihe sind selten, es gibt bisher nur einzelne Fallberichte, die diese Erkrankungen beschreiben (Beierer 2021; Vedrine 2013). Klinisch zeigen die Tiere eine milde, intermittierende Lahmheit, Dolenz unterschiedlichen Grades und Gelenksschwellung (Johnston und Tobias 2017).

2.2.2 Subluxationen und Luxationen

(Sub-)Luxationen der *Articulatio Antebrachioacarpea*

Eine vollständige Luxation dieses Gelenkes ist selten (Vaughan 1985). Als Ursachen kommen Stürze, Autounfälle oder andere High-Energy Traumata in Frage, in diesem Zusammenhang kommt es meist zur Ruptur sämtlicher Bänder und häufig auch der Gelenkkapsel (Brinker et al. 2016; Johnston und Tobias 2017). Klinisch gesehen sind die betroffenen Tiere hochgradig lahm und deutlich dolent, die Diagnose ist durch Palpation und Röntgendiagnostik einfach zu stellen (Vaughan 1985).

Am häufigsten von einer Schädigung des Antebrachiokarpgelenks betroffen sind die medialen Kollateralbänder (Brinker et al. 2016; Vaughan 1985). Es kommt zu einer medialen Instabilität und

Valgusfehlstellung der Gliedmaße (Brinker et al. 2016). Verletzungen der lateralen Kollateralbänder sind weniger bedeutend, da sie aufgrund der physiologischen leichten Valgusstellung der Gliedmaße eine untergeordnete Bedeutung für die Stabilisierung des Gelenks haben (Brinker et al. 2016). Die Diagnose wird anhand von klinischem Bild und radiologischer Dokumentation gestellt (Standardaufnahmen in zwei Ebenen plus Seitenstressaufnahmen) (Johnston und Tobias 2017). Betroffene Patienten zeigen in der Regel eine hochgradige Lahmheit auf der jeweiligen Gliedmaße. Ist die Verletzung akut sind Schwellung, Schmerzhaftigkeit und Instabilität des Karpus festzustellen.

(Sub-)Luxationen der *Articulatio mediocarpea*

Eine Luxation der *Art. mediocarpea* kommt selten vor (Vaughan 1985). Subluxationen des mittleren Gelenkes in Kombination mit medialer Instabilität sind deutlich häufiger (Brinker et al. 2016). Klinisch äußern sich diese Verletzungen durch eine hochgradige Lahmheit zusammen mit Schwellung und Schmerzhaftigkeit des Karpus. Liegt eine Hyperextension vor, so wird diese erst nach einigen Tagen erkannt, wenn die betroffene Gliedmaße wieder mehr belastet wird (Vaughan 1985).

(Sub-)Luxationen der *Articulatio carpometacarpea*

Subluxationen und komplette Luxationen der *Art. carpometacarpea* sind ebenfalls selten (Vaughan 1985), auch sie äußern sich in Dolenz, Schwellung und deutlicher Lahmheit.

(Sub-)Luxationen der einzelnen Karpalknochen

Luxationen des *Os carpi intermedioradiale* sind recht selten und meist die Folge von Stürzen oder Sprüngen. Häufigste Luxationsrichtung ist nach mediopalmar. Der Knochen findet sich dann um 90° nach innen rotiert mediopalmar am distalen Rand des Radius liegend (Brinker et al. 2016). Die Tiere sind deutlich lahm und führen die Gliedmaße in Abduktion. Das Gelenk ist deutlich schmerzhaft und krepitiert bei Palpation, zusätzlich fällt eine Eindellung an der physiologischen Position des *Os carpi intermedioradiale* auf (Brinker et al. 2016).

Luxationen des *Os carpi accessorium* treten ebenfalls auf, jedoch seltener als Luxationen des *Os carpi intermedioradiale*. Es kommt infolge einer Ruptur des Ligamentum accessoriulnare zu einer isolierten Subluxation der Basis des *Os carpi accessorium*, eine einhergehende milde Hyperextension ist möglich (Harris et al. 2011), auch hier gibt es eine Beschreibung für einen sportlich genutzten Greyhound (Guilliard 2001).

Ebenfalls selten und bisher nicht suffizient beschrieben sind Subluxationen und Luxationen des *Os carpi ulnare* und der nummerierten Karpalknochen. Lediglich zwei Fallberichte beschreiben eine Luxation des *Os carpale secundum* (Guilliard und Mayo 2001; Horowitz und Wells 2007).

2.2.3 Hyperextensionsverletzungen

Hyperextensionsverletzungen gehören zu den häufigsten und schwerwiegendsten Verletzungen des Karpus, sie treten vor allem bei mittelgroßen bis großen Hunden sowie Katzen auf (Brinker et al. 2016; Johnston und Tobias 2017). Gründe für Verletzungen dieser Art sind Stürze aus großer Höhe und Sprünge (Merbl et al. 2013). Seltener gibt es auch nicht traumatisch bedingte Ursachen wie immunmedierte Arthropathien (Johnston und Tobias 2017). Die hieraus folgenden Schäden an den palmaren Bändern und dem *Fibrocartilago palmaris* führen zum klinischen Bild der Hyperextension. Gesunde Labrador Retriever haben einen physiologischen Standwinkel von $196^{\circ} \pm 2^{\circ}$ (Jaegger et al. 2002). Mehr als 10° über den physiologischen Standwinkel hinaus stellt eine carpal Hyperextension dar (Koestlin et al. 1986). Mit der Vermutung, dass es zu komplexen Kombinationen an Bandappartverletzungen kommen kann, wurde durch Slocum und Devine (1982) eine Kategorisierung der Hyperextensionsverletzung in 3 Gruppen vorgenommen.

Gruppe I: (Sub-)luxation des Art. antebrachioarpea mit vollständiger Entlastung der Gliedmaße.

Gruppe II: Ruptur des palmaren Bandapparat der Art. mediocarpea und der Art. carpometacarpea, Hochstand des Os carpi ulnare und des Os carpi accessorium, beginnende minimale Belastung der Gliedmaße.

Gruppe III: Ruptur der Bandstrukturen des Os carpi accessorium, des Fibrocartilago palmaris und der palmaren Bänder der Art. carpometacarpea, Subluxation der Art. carpometacarpea ohne Hochstand des Os carpi ulnare und Os carpi accessorium, beginnende Belastung der Gliedmaße (Beierer 2021; Haburjak et al. 2003).

Die Seitenbänder tragen zwar auch zur Stabilität bei, aber in viel geringerem Maße als die palmaren Strukturen (Milgram et al. 2012). Nicht selten werden Hyperextensionsverletzungen initial übersehen (Koestlin et al. 1986), nach 5-7 Tagen nehmen die Tiere wieder vorsichtig Gewicht auf, die Entzündungszeichen sind gering und die Schmerzhaftigkeit ist ebenfalls niedrig (Brinker et al. 2016). Je nach Zeitpunkt des Traumas und Abstand bis zur Vorstellung können variable Grade an Durchtrittigkeit bis hin zur plantigraden Fußung auftreten (Basa und Johnson 2019). Für die weitere Therapie der Hyperextensionsverletzungen ist es wichtig zu wissen, welche Gelenkreihe betroffen ist. Für eine exakte Lokalisation der Verletzung ist die röntgenologische Untersuchung im direktem Seitenvergleich essentiell (Brinker et al. 2016). Diese sollte im mediolateralen Strahlengang unter Hyperextensionsstress sowie im dorsopalmaren Strahlengang unter beidseitigem Seitenstress angefertigt werden (Beierer 2021; Johnston und Tobias 2017). Am häufigsten betroffen ist die Art. *carpometacarpea* mit 46%, gefolgt von der Art. *mediocarpea* mit 28% und der Art. *antebrachioarpea* mit 10%. Kombinierte Verletzungen zwischen Art.

mediocarpea und *carpometacarpea* treten in 16% der Fälle auf (Brinker et al. 2016). Hyperextensionsverletzungen bei der Katze sind häufiger als beim Hund und werden dem „feline highrise syndrome“ zugeordnet (Merbl et al. 2013; Vnuk et al. 2004).

2.3 Gelenkversteifungen

2.3.1 Prinzipien

Eine Gelenkversteifung ist ein chirurgischer Eingriff, bei dem ein Gelenk dauerhaft versteift wird. Dabei werden die Knochen, die das Gelenk bilden, operativ miteinander fusioniert, sodass keine Bewegung mehr im Gelenk möglich ist (Buote et al. 2009). Indikationen für eine Karpalgelenksversteifung sind unter anderem schwere Bandverletzungen, Hyperextensionsverletzungen, nicht reduzierbare Gelenkfrakturen, schwere degenerative Erkrankungen des Gelenkes mit nicht therapierbaren Schmerzen und immunmedierte Arthritiden, die zum Kollaps des Gelenkes führen (García et al. 2024; Johnston und Tobias 2017). Die folgenden allgemeinen Prinzipien für die Durchführung einer Arthrodesese müssen beachtet werden

1. Vollständige Entfernung des Gelenkknorpels
2. Spongiosatransplantation
3. Korrekter Winkel und Ausrichtung
4. Rigide interne Fixation
5. Ggf. zusätzliche externe Fixation

Zu 1. Vollständige Entfernung des Gelenkknorpels

Für die Entfernung des Gelenkknorpels sind verschiedene Methoden beschrieben, verfügbare Instrumente sind Rongeuere, Osteotome, Küretten und pneumatische Fräsen (Brinker et al. 2016; Buote et al. 2009). Es muss vor allem auf die komplette Entfernung des Knorpels geachtet werden, da verbliebene Reste die vollständige Fusion des Gelenkes verhindern können (Johnston und Tobias 2017). Während des Vorgangs sollte auch die subchondrale Knochenplatte durch mehrere kleine Bohrkanäle durchbrochen werden, da hierdurch eine Einwanderung von mesenchymalen Stammzellen und Blutgefäßen möglich ist (Buote et al. 2009; Johnson 1980).

Zu 2. Spongiosatransplantation

Die Einlagerung autogener Spongiosa dient der Beschleunigung des knöchernen Durchbaus der Arthrodesen. Der Spongiosa wird osteoinduktives, osteoproduktives und osteogenes Potenzial nachgesagt (Brinker et al. 2016; Johnson 1980). Durch das Einbringen der Spongiosa kann die Zeit bis zum Erreichen der Fusion um vier bis acht Wochen reduziert werden (Buote et al. 2009). Die Transplantatgewinnung sollte direkt vor der Gelenkversteifung erfolgen, häufigste Donorlokalisationen sind die proximale Humerusmetaphyse, die proximale Tibia und die Darmbeinflügel (Buote et al. 2009).

Zu 3. Korrekter Winkel und Ausrichtung

Besonders bei einer Gelenkversteifung mittels Panarthrodesen ist der Versteifungswinkel ausschlaggebend, da er großen Einfluss auf die postoperative Gliedmaßenfunktion hat (Brinker et al. 2016; Johnson 1980). Zur Orientierung sollte der physiologische Winkel der kontralateralen Gliedmaßen im Stand dienen (Buote et al. 2009), in der zugänglichen Literatur wird ein Winkel von 10-12° empfohlen (Johnston und Tobias 2017).

Zu 4. Rigide interne Fixation

Bei der Stabilisierung des zu versteifenden Gelenkes sollte Kompression angestrebt werden (Brinker et al. 2016). Der Auswahl des eingesetzten Implantats kommt große Bedeutung zu, da es massiven Krafteinwirkungen ausgesetzt ist (Johnston und Tobias 2017). Am häufigsten werden Platten angewendet, da sie im Vergleich zu anderen Implantaten wie z.B. Bohrdrähten eine erhöhte Stabilität besitzen und ihre Applikation vergleichsweise einfach ist (Buote et al. 2009). Es gibt diverse Studien, die unterschiedliche Plattenkonfigurationen und Größen miteinander vergleichen (Bristow et al. 2015; Meeson et al. 2012). Bei der Auswahl der Implantatgröße spielt der Durchmesser des dritten Metakarpalknochens eine wichtige Rolle, denn die Schraubengröße sollte unterhalb 40% des Knochendurchmessers liegen (Buote et al. 2009). Gemäß Brinker et al. (2016) sollten der Schraubendurchmesser sogar nur 25-30% des Durchmessers des dritten Metakarpalknochens betragen.

Zu 5. Ggf. zusätzliche externe Fixation

Vor allem bei der Gelenkversteifung mittels Panarthrodesen sollte bis zum Erreichen eines zufriedenstellenden Grades an knöchernem Durchbau eine zusätzliche externe Stabilisation erfolgen (Brinker et al. 2016; Buote et al. 2009; Johnston und Tobias 2017). Dies ist insbesondere bei der typischerweise dorsal angebrachten Platte nötig, da diese aufgrund der biomechanisch unterlegenen Lokalisation auf der Kompressionsseite eine extreme mechanische Belastung

erfährt (Johnson 1980). Neuere Entwicklungen wie die „CastLess“-Platte machen eine postoperative externe Stabilisation unnötig und eliminieren so das Risiko von Verbandskomplifikationen wie Drucknekrosen (Meeson et al. 2012). Bei der CastLess-Platte erfolgt die Fixation des distalen Plattenabschnitts nicht allein im dritten Metakarpalknochen, sondern mit gewinkelten Schrauben im dritten und vierten Metakarpalknochen (Meeson et al. 2012).

2.3.2 Pankarpale Arthrodese

Eine Indikation für eine pankarpale Arthrodese liegt vor, wenn das Antebrachiocarpalgelenk durch die Verletzung betroffen ist (Brinker et al. 2016). Für die chirurgische Ausführung dieser Art der Versteifung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Bei der klassischen Technik wird die Platte auf der Dorsalseite des Karpus angebracht (Bristow et al. 2015), da dies die am häufigsten verwendete Technik ist, gibt es diverse Studien, die sich mit der Plattenkonfiguration beschäftigen (Bristow et al. 2015; Clarke et al. 2009; Diaz-Bertrana et al. 2009). Der Zugang zum Karpalgelenk erfolgt hierbei von dorsal, die Inzision beginnt am distalen Drittel des Radius und wird nach distal weitergeführt, sodass der dritte Metakarpalknochen freigelegt ist. Nach Entfernung des Knorpels, Penetration der subchondralen Knochenplatte und Einbringen von Spongiosatransplantaten wird die Platte aufgebracht. Die erste Schraube wird im *Os carpi intermedioradiale* verankert, gefolgt von den Schrauben in den Metakarpalknochen. Die Fixation im Radius erfolgt als letztes (Bokemeyer et al. 2011). Da das Karpalgelenk physiologisch in leichter Extensionsstellung ist, ist biomechanisch gesehen die Zugseite palmar und somit dort der bevorzugte Platz, um eine Platte anzubringen (Chambers und Bjorling 1982; García et al. 2024). Nachteil dieser Lokalisation ist die für den chirurgischen Zugang nötige massive Weichteildissektion (Johnston und Tobias 2017). Weiters beschrieben ist das Anbringen der Platte von medial (Guerrero und Montavon 2005), bei dieser Technik ist der Zugang zum Gelenk leichter zu erreichen als bei der palmaren Technik (Chambers und Bjorling 1982). Zusätzlich können die eingesetzten Schrauben in der proximalen Gelenkreihe sowohl das *Os carpi intermedioradiale* als auch das *Os carpi ulnare* penetrieren und eine Schraube in der distalen Gelenkreihe eingebracht werden, dadurch wird eine rigidere Fixation und stärkere Kompression ermöglicht. Auch die Fixation im Mittelfuß ist stabiler, da die Schrauben über 2-3 Metakarpalknochen hinweg platziert werden (Guerrero und Montavon 2005). Weiters beschrieben ist der Einsatz von externen Fixateur-Systemen, welche ebenfalls gute Ergebnisse erzielen (Brinker et al. 2016; Lotsikas und Radasch 2006).

2.3.3 Partielle Arthrodesese

Bei der partiellen Arthrodesese des Karpalgelenks wird die Versteifung der *Articulatio mediocarpea* und *carpometacarpea* durchgeführt (Buote et al. 2009). Aufgrund der Tatsache, dass sich 70 bis 80 % des Bewegungsumfanges des Karpalgelenks im Bereich der *Art. antebrachiocarpea* abspielen (Beierer 2021; Burton et al. 2013), bleibt die normale Beweglichkeit des Karpalgelenkes weitestgehend erhalten (Andreoni et al. 2010) und ein durchaus physiologischer Gang wird ermöglicht. Lediglich eine Einschränkung der Beugung und eine verminderte Anpassungsfähigkeit beim Laufen auf harten Untergrund sind zu erwarten (Slocum und Devine 1982). Genau wie bei der Panarthrodesese gibt es für die partielle Versteifung verschiedene erfolgreich beschriebene Möglichkeiten. Am häufigsten wird mit einer dorsal angebrachten Platte gearbeitet (Johnston und Tobias 2017). Vor allem eine T-Platte wird häufig verwendet. Hier wird der horizontale Teil der Platte mit zwei Schrauben im *Os carpi intermedioradiale* fixiert, der vertikale Teil im dritten Metakarpalknochen, aufgrund der oftmals geringen Größe des *Os carpi intermedioradiale* muss beachtet werden, dass es nicht zum Impingement der Platte mit dem distalen Radius kommt. Burton et al. (2013) beschrieben ein neues Implantat, welches zusätzlich zur Fixation im *Os carpi intermedioradiale* noch eine zusätzliche Schraube im *Os carpi ulnare* vorsieht, hierdurch können Mikrobewegungen reduziert werden und es kommt zu einer rigideren Fixation. Weiters beschrieben sind auch hier der Einsatz von einer medial angebrachten Platte bei der Katze (Mathis und Voss 2015) und sich überkreuzende Pins beim Hund und der Katze (Haburjak et al. 2003), beide Techniken liefern gute Ergebnisse.

2.4 Mikro-Computertomographie

2.4.1 Aufbau und Funktion des Mikro-Computertomographen

Mikro-Computertomographen (μ CT) können, je nach Anwendung, unterschiedlich aufgebaut sein. Die initial entwickelten μ CT-Geräte wurden zunächst ausschließlich präklinisch eingesetzt. Die Apparatur bestand aus einem um die eigene Achse rotierenden Objektstisch und einer stationären Multifokusröntgenröhre mit Fächerstrahl (Burstein et al. 1984). Der heute immer noch häufig angewendete Kegelstrahl-Algorithmus zur Erzeugung von dreidimensionalen Bildern wurde von Feldkamp et al. (1989) entwickelt und wurde initial eingesetzt um Risse in Keramik zu detektieren. Der Aufbau der μ CT-Geräte, die für die Anwendung in vivo herangezogen werden, ist dem der klinischen Computertomographen der dritten Generation ähnlich. Auch hier rotiert das

Röhren-Detektor System um den zu untersuchenden Körper (Kalender 2011). Der Durchbruch für die verbreitete Anwendung der μ CT gelang Rüeggsegger et al. (1996) mit dem ersten automatisierten Desktop-Tomographen. Die Ortsauflösung der μ CT ist deutlich höher als beim klinischen CT, mit typisch erreichbaren Werten zwischen 5 und 50 μm . Der Begriff μ CT wird in der Regel bei Auflösungen unter 100 μm verwendet. Geräte, die eine noch höhere Ortsauflösung von weniger als 1 μm besitzen, werden als Nano-CT bezeichnet (Stock 2008). Um die Auflösung der Geräte zu verbessern, wurde der Aufbau verändert, indem spezielle Fein- oder Mikrofokusröntgenröhren mit Reflektions- und Transmissionsanoden oder Synchrotronstrahlungsquellen herangezogen wurden (Engelke et al. 1999). Die maximale Auflösung wird durch die Größe des Fokus bestimmt, die zudem von den Detektoren abhängt (Engelke et al. 1999). Aufgrund des unterschiedlichen Aufbaus der Röntgenröhren ergeben sich drei verschiedene Geometrien mit jeweils anderem Strahlungsverlauf. Man unterscheidet dabei zwischen der Fächerstrahl- und der Kegelstrahlgeometrie bei Fein- oder Mikrofokusröntgenröhren sowie der Parallelstrahlgeometrie bei Synchrotronstrahlung (Engelke et al. 1999).

2.4.2 Anwendung in Klinik und Forschung

Nichtmedizinische Anwendung

Die Mikro-Computertomographie ist ein variabel einsetzbares Verfahren mit der Möglichkeit einer nicht-destruktiven Analyse von Materialien aller Art in sehr hoher Auflösung. Aufgrund dessen wird die μ CT neben medizinischen Bereichen auch in einer Großzahl nicht-medizinischer Gebiete angewendet. Unter anderem wurde die Anwendung in der *Geologie* beschrieben. De Graef et al. (2005) untersuchten die bakteriell bedingte biologische Verwitterung von Gestein und De Kock et al. (2015) untersuchten die Auswirkung von Gefrierzyklen ebenfalls auf Gestein, dies ist im Kontext des Klimawandels von großem Interesse. Weitere Anwendung fand die μ CT in der *Dendrologie* (Lehre des Holzes), hier wurde die Mikrostruktur von Eichen und Buchenholz untersucht, es konnte festgestellt werden, dass die mikrocomputertomographisch gewonnenen Ergebnisse denen der bisher üblichen Mikroskopie in nichts nachstehen (Steppe et al. 2004). In der *Archäologie* wurde die μ CT bei Fossilien angewandt, hier liegt der Vorteil darin, dass konventionelle Computertomographen keine ausreichend guten Bilder liefern, da die Dichte der Fossilien sehr hoch ist und die Hounsfield-Skala übertreffen (Tate und Cann 1982). Wang et al. (2018) untersuchten die Mikrostruktur von Lebensmitteln, mithilfe der gewonnenen Informationen können Produktionsprozesse und Produkte optimiert werden und auch die

Sicherung der Qualität gesteigert werden. Im Bereich der *Botanik* wurden die Reifung und Germination von Samen der Lotospflanze untersucht (Yamauchi et al. 2013).

Bio-/Medizinische Anwendung

Die Anwendungsmöglichkeiten der Mikro-Computertomographie in der Bio-/Medizinischen Forschung sind nahezu unbegrenzt, im Folgenden soll ein Überblick über mögliche Nutzungsgebiete gegeben werden.

In der Zahnmedizin und hier gerade in der Implantologie ist die Anwendung der μ CT in der Forschung bereits sehr gut etabliert, es gibt zahlreiche Studien, die sich unter anderem mit der Morphologie des Zahnwurzelkanals und potenziellen Füllungen beschäftigen (Keleş et al. 2014; Swain und Xue 2009). Weiters wurden beispielsweise die Zahnschmelzdicke und die Entwicklung des craniofazialen Skelettes ex vivo untersucht (Swain und Xue 2009). Hsu et al. (2013) befassten sich mit der Stabilität von dentalen Implantaten.

Ein weiteres Gebiet, dem eine große Bedeutung zukommt, ist die Forschung über Knochenersatzstoffe. Studien an Versuchstieren konnten zeigen, dass die Mikro-Computertomographie sehr gut geeignet ist um die Osteoneogenese, Osseointegration und in-vivo-Degradation von Knochenersatzstoffen zu untersuchen (Kleer-Reiter et al. 2021; Kowalewicz et al. 2021). In diesen Studien wurde die in-vivo Degradation und Osseointegration von Magnesiumscaffolds im Kaninchenmodell untersucht.

Eines der wahrscheinlich größten Einsatzgebiete ist die Osteoporose Forschung, es konnte gezeigt werden, dass die Mikro-Computertomographie einen deutlichen Mehrwert im Vergleich zur bisher eingesetzten Histomorphometrie bietet (Ulrich et al. 1999). Um die knöchernen Veränderungen im osteoporotischen Knochen zu quantifizieren, wurden verschiedene Knochenproben untersucht mit dem Ergebnis, dass sich die Stabilität und die Integrität des trabekulären Netzwerkes mit zunehmendem Alter senken (Arlot et al. 2008; Ding et al. 2002). Außerdem konnte gezeigt werden, dass sich die mechanischen Eigenschaften des Knochens sowie die Struktur der Knochentrabekel nach Gabe von Alendronsäure verbesserten (Day et al. 2004; Hu et al. 2002).

Tiermedizinische Anwendung

Neben vielen Studien, die Mäuse und andere Nagetiere als Versuchsobjekte untersuchten (Bouxsein et al. 2010; Kapadia et al. 1998), gibt es inzwischen auch zahlreiche Untersuchungen, die gezielt die physiologische und pathologische Mikroanatomie der Haustiere untersuchen. Diese Untersuchungen finden ex vivo statt, eine klinische Anwendung der μ CT ist bisher bei Hund und Katze nicht beschrieben. Fitzpatrick et al. (2016), Lau et al. (2013) und Glück et al. (2024)

untersuchten das mediale Coronoid von Hunden die an einer medialen Coronoiderkrankung (medial coronoid disease - MCD) erkrankt waren und die Auswirkungen auf das trabekuläre Netzwerk. Boyd et al. (2005) untersuchten die knöchernen Veränderungen der proximalen Tibia nach Riss des cranialen Kreuzbandes bei der Katze im Langzeitvergleich. Scherzer et al. (2009) untersuchten die Femurköpfe von Hunden, die an Legg-Calve-Perthes erkrankt waren und die daraus resultierenden Veränderungen im Femurkopf. All diese Studien konnten zeigen, dass sich die trabekuläre Struktur bei pathologischen Prozessen ändert. Im Gegensatz zu diesen Studien, die sich mit Erkrankungen befassten, untersuchten Planner et al. (2021b) die Unterarme von gesunden Toy-Hunderassen und anderen kleinen Hunden im Vergleich, um Unterschiede herauszuarbeiten, die mit der erhöhten Prädisposition für Frakturen in diesem Bereich zusammenhängen könnten. Ein ähnliches Studiendesign nutzten Frei et al. (2025). Sie untersuchten die Hüftgelenke und Femurköpfe von Katzen und kleinen Hunden im Vergleich, um Unterschiede festzustellen, die bei Hüftgelenksendoprothesen eine Rolle spielen könnten. Auch Mason und Lewis (2024) verglichen Hunde unterschiedlicher Größe im μ CT und konzentrierten sich dabei auf das Hörsystem. Eine weitere Studie veröffentlichten Kostenko et al. (2023). Die Autoren untersuchten, ob Hündinnen nach der Kastration anfällig für Osteoporose waren.

2.4.3 Parameter der Strukturanalyse

Um das trabekuläre Netzwerk, dessen strukturelle Anordnung, Form und Größenverhältnisse zu quantifizieren, wurden verschiedene Parameter definiert, die dabei helfen eine zuverlässige Aussage über die Mikroarchitektur des Knochens zu treffen (Bouxsein et al. 2010).

Knochenvolumenanteil (BV/TV)

Der Knochenvolumenanteil (BV/TV) ist der volumetrische Anteil des trabekulären Knochens (BV) am Gesamtvolumen der untersuchten Probe (TV) (Goulet et al. 1994). Er kann die mechanischen Eigenschaften von spongiösem Knochen stark beeinflussen und gilt als einer der primären Determinanten für die Versagenslast von Knochen (Ding et al. 2002; Pothuaud et al. 2002). Außerdem korreliert er mit anderen Strukturparametern wie der Trabekelanzahl (Tb.N), der Trabekeldicke (Tb.Th) und der Konnektivität (Conn.D) (Goulet et al. 1994; Hildebrand et al. 1999). Der BV/TV wurde aus der Histomorphometrie übernommen und wird in Prozent angegeben (Hildebrand et al. 1999; Parfitt et al. 1983).

Oberflächenvolumenanteil (BS/BV)

Der Oberflächenvolumenanteil (BS/BV) beschreibt das Verhältnis der trabekulären Oberfläche (BS) zum Volumen des trabekulären Knochens (BV) im untersuchten Bereich (Goulet et al. 1994). Dieser Wert ist abhängig von der Trabekelanzahl und korreliert negativ mit dem BV/TV (Scherzer et al. 2009). Daraus folgt, dass niedrige Werte auf eine kompaktere Struktur hindeuten und somit für eine erhöhte Stabilität des Knochens sprechen. Der BS/BV hat die Einheit mm^{-1} (Goulet et al. 1994).

Mean Trabecular Number (Tb.N)

Die Trabecular Number (Tb.N) gibt an, wie viele Trabekel in der untersuchten Probe vorhanden sind. Genauer gesagt ist der Tb.N definiert als die Anzahl der Trabekel pro Längeneinheit und kann folgendermaßen berechnet werden $\text{Tb.N} = 0,5 \times \text{BS/TV}$, die Einheit ist mm^{-1} (Goulet et al. 1994; Hildebrand et al. 1999).

Mean Trabecular Thickness (Tb.Th)

Die Trabekeldicke gibt die durchschnittliche Dicke der Trabekel innerhalb der untersuchten Probe an. Für die Berechnung wird für jeden Punkt der Durchmesser eines maximalen Kreises, der noch innerhalb der Struktur liegt und den Punkt einschließt, ermittelt (Hildebrand et al. 1999). Der Durchmesser stellt die lokale Dicke an diesem Punkt dar. Dieser Parameter wird in mm angegeben (Goulet et al. 1994).

Mean Trabecular Separation (Tb.Sp)

Unter dem Trabekelabstand (Tb.Sp) versteht man den durchschnittlichen Abstand der Trabekel in einer Probe zueinander. Bei der Berechnung wird gleich vorgegangen wie bei der Trabekeldicke, nur dass hier die nicht knöchernen Voxel herangezogen werden (Scherzer et al. 2009). Hierdurch ergibt sich, dass der Trabekelabstand mit der Breite der Markräume gleichgesetzt werden kann (Hildebrand et al. 1999). Die Einheit, mit der der Abstand angegeben wird, ist mm (Goulet et al. 1994).

Connectivity Density (Conn.D)

Der Vernetzungsgrad des trabekulären Knochens (Conn.D) ist ein Maß für den Grad der Vernetzung des trabekulären Systems. Sie stellt die maximale Anzahl der Verbindungen dar, die durchtrennt werden können, ohne dass das Geflecht in zwei Teile zerbricht (Engelke et al. 1999; Feldkamp et al. 1989). Die Konnektivität ist folglich ein Maß für die Quantität der Knochenverbindungen, erlaubt aber keine Aussage über die Qualität selbiger (Feldkamp et al. 1989). Die Einheit, mit der die Konnektivität angegeben wird, ist mm^{-3} (Goulet et al. 1994).

Degree of Anisotropy (DA)

Die räumliche Orientierung der Trabekel innerhalb des Knochens wird als Grad der Anisotropie (DA) bezeichnet, der Wert ist umso höher, je mehr Trabekel in dieselbe Richtung orientiert sind. Rechnerisch wird die Anzahl der Unterbrechungen innerhalb eines angelegten linearen Netzes zwischen Knochen und Mark gezählt (Odgaard 1997). Der DA hat keine Einheit, er ist dimensionslos (Ding et al. 2002).

3. Publikation 1

Folgende Publikation wurde am 26.02.2025 im Journal „Research in Veterinary Science“ eingereicht und am 26.05.2025 zur Veröffentlichung akzeptiert. Der Originalartikel wurde am 27.05.2025 online publiziert.

Microcomputed tomographic examination of the osseous structures of the canine carpus

L. Goldstein¹, A.-C. Waselau², Y. Zablotzki², A. Meyer-Lindenberg¹

1 Clinic for Small Animal Surgery and Reproduction, LMU, Munich, Germany

2 Clinic for Small Animal Medicine, LMU, Munich, Germany

Corresponding Author: L. Goldstein, A. Meyer-Lindenberg



Contents lists available at ScienceDirect

Research in Veterinary Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/rvsc

Microcomputed tomographic examination of the osseous structures of the canine carpus

L. Goldstein^{a,*}, A.-C. Waselau^b, Y. Zablotski^b, A. Meyer-Lindenberg^{a,*}

^a Clinic for Small Animal Surgery and Reproduction, LMU, Munich, Germany

^b Clinic for Small Animal Medicine, LMU, Munich, Germany

ARTICLE INFO

Keywords:

Microcomputed tomography
Trabecular bone
Bone parameters
Dog
Carpus

ABSTRACT

The surgical treatment of carpal joint injuries is associated with a high implant-based complication rate of up to 50 %. For this reason, the aim of the study was to create a database on the bony microarchitecture of the cancellous and cortical structures of the carpus. A total of 80 carpal joints from 20 medium-sized dogs and 20 toy breeds were examined and compared with each other using microcomputed tomography. The parameters bone volume (BV/TV), bone surface (BS/BV), trabecular thickness (Tb.Th), number of trabeculae (Tb.N), trabecular spacing (Tb.Sp), degree of anisotropy (DA) and connectivity density (Conn. D) were measured and compared. In addition, the cortical structure was classified using a three-staged scoring system. It was shown that all carpal bones have a cancellous structure, that differs clearly between the groups, without one group being mechanically superior. The evaluation implies, that the second carpal bone appears to be very stable. The formation of the cortex differs massively between the groups, with the toy breeds having only a very thin, partially interrupted bone lamella, whereas the medium-sized dogs have a normal cortex. Within the toy breed group inhomogeneous results were observed, whereby the values of the Chihuahuas deviated. This breed had significantly fewer (Tb.N) and thinner trabeculae (Tb.Th) with a greater trabecular separation (Tb.Sp), lower bone volume fraction (BV/TV) and higher bone surface (BS/BV). This indicates a decreased stability of the Chihuahua's carpal bones. The results of this study could potentially improve the development of new implants and thus reduce the complication rate.

1. Introduction

Injuries to the carpal joint in dogs are multifaceted, usually consisting of a combination of soft tissue and bone injuries and are often the result of direct trauma (Beierer, 2021). The wide range of potential weak points can be explained by looking at the anatomy of the joint, as it consists of seven individual bones and a number of ligaments, muscles and tendons. The complexity of the joint allows for a wide range of movements (Nickel et al., 2003) but also a large number of potential pathologies (Johnston and Tobias, 2017). Subluxations and dislocations of one or both joint levels have been described, with an increased predisposition to the antebrachio-carpal articulation, hyperextension injuries, fractures of individual carpal bones and a variety of injuries to the ligamentous apparatus are also common (Beierer, 2021; Earley, 1978; Li et al., 2000; Tomlin et al., 2001; Vedrine, 2013). The treatments for these injuries are varied and, depending on the type of injury, consist of a bridging ligament replacement or, in the case of extensive ligament

injuries, a complete (panarthrosis) or partial fusion (partial arthrodesis). In contrast to complete arthrodesis, partial arthrodesis does not involve the antebrachio-carpal articulation in order to maintain the motility of this joint, which accounts for around 70–80 % of the total mobility of the carpus and thus enables a relatively physiological gait (Beierer, 2021; Burton et al., 2013). There are several surgical treatment options for both types of fusions (Bristow et al., 2015; Buote et al., 2009; Burton et al., 2013; Guerrero and Montavon, 2005; Pozzi et al., 2020; Viguier et al., 2001). A screw or pin is inserted into at least one carpal bone (intermediocarpal carpal bone +/- ulnar carpal bone) in a ligament replacement, which is usually inserted into the bone with or without an anchor, but also in almost every form of carpal joint arthrodesis. Precise knowledge of the anatomy of the joint and the condition of the bones is therefore important. As there are no detailed studies of the bony structures of the seven different carpal bones in the available literature, the aim of the present study was to investigate the anatomical structures in more detail using microcomputed tomography.

* Corresponding authors at: Untere Maierhofstraße 1a, 89343, Jettingen-Scheppach, Germany.

E-mail addresses: leo.goldstein@gmx.de (L. Goldstein), ameylin@lmu.de (A. Meyer-Lindenberg).

<https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2025.105725>

Received 26 February 2025; Received in revised form 19 May 2025; Accepted 26 May 2025

Available online 27 May 2025

0034-5288/© 2025 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

2. Material and methods

The carpal joints examined in the study came from deceased dogs or dogs which had been euthanised for reasons other than carpal joint disease and were given to the Clinic for Small Animal Surgery and Reproduction at the LMU by the patient owners for scientific purposes. The study was approved by the Ethics Committee of the Faculty of Veterinary Medicine at the LMU (Approval Number: 344-12-12-2022). Care was taken to achieve a balanced ratio of neutered and unneutered animals and only adult animals were included in the study. Diseases that could lead to a reduction in bony integrity, such as chronic renal insufficiency (CNI) or hyperadrenocorticism (HAC), were excluded as far as the preliminary report allowed. For the study, the joints were divided into two groups (Table 1): toy breeds (up to 6.5 kg) and medium-sized dogs (15–35 kg). Both groups consisted of 20 dogs each (40 joints). The carcasses, initially frozen at –20 °C, were thawed at room temperature and the carpi were separated proximally in radius/ulna and distal in the metacarpus. The carpal joint was examined radiographically in 2 planes to rule out pathological bony changes. The soft tissue was then dissected, with exception of the ligaments in the immediate vicinity of the joint, to keep it in its anatomic position. X-ray examinations were performed with the X-ray unit Siemens Luminos dRF, Siemens Healthcare AG (Erlangen), with the settings 50kv/1.6mAs in the toy dogs and 50kv/2mAs in the medium-sized dogs. They were then stored in 4 % formalin until microcomputed tomography examination.

2.1. Microcomputed tomography

The individual carpal joints (n = 80) were fixed vertically in the sample container of the Micro-CT 80 before the scan in order to prevent artefacts caused by rotational movements. The measurement parameters of the micro-computed tomograph used (µCT-80, Scanco Medical, Zurich, Switzerland) were set at 70 kV, 114 µA, an integration time of 550 ms, a native voxel size of 10 µm and 1000 projections/180°. The scan included the intermediodistal carpal bone (Cir), ulnar carpal bone (Cu), accessory carpal bone (Ca), first carpal bone(CI), second carpal bone (CII), third carpal bone (CIII) and fourth carpal bone (CIV) from the proximal to the distal end of the joint. The abbreviated naming of the carpal bones (Cir, Ca, Cu, ...) was based on Nickel et al. (2003). The subsequent evaluations were carried out using the µCT evaluation programme V6.6 (Scanco Medical, Zurich, Switzerland).

2.2. Analysis of the trabecular bone of the seven carpal bones

In order to include as much cancellous bone as possible in the analysis, each scan was analysed individually and the most proximal and distal cross-section of the cancellous bone was determined. The trabecular structures within this range were defined as a region of interest (ROI) and then outlined by hand in each individual section on the monitor (Fig. 1), according to Kim et al. (2021). This was done individually for each carpal bone. For each of the two weight groups, a

threshold was determined by three independent reviewers and used for the analyses of the structural parameters bone volume fraction (BV/TV (%)), bone surface to volume ratio of bone (BS/BV (mm⁻¹)), trabecular thickness (Tb.Th (mm)), trabecular number (Tb.N (mm⁻¹)), trabecular separation (Tb.Sp (mm)), degree of anisotropy (DA) and connectivity density (Conn. D (mm⁻³)). The Chihuahua was considered separately again within the group of toy breeds, as this breed showed significant deviations in a comparable study by Planner et al. (2021).

2.3. Analysis of the cortical structures

A three-stage scoring system was introduced to categorise the cortical structures (Fig. 2). The scans of all examined carpal joints (n = 80) were evaluated and the cortical bone was assessed for each of the seven bones in the transverse section; for this purpose, each bone was subdivided into a proximal, middle and distal third and the section in the centre was used for evaluation. The intermediodistal carpal bone was again divided into three parts based on its size: the dorsal surface, the palmar surface and the articulating surface communicating with the ulnar carpal bone. The accessory carpal bone was also subdivided into joint-participating and non-joint-participating. The remaining 5 bones were assessed in their entirety.

2.4. Statistical analysis

Generalised linear models were used to study the differences between group 1 and 2 for every particular carpal bone for following parameters: BS/BV, BV/TV, Conn.D, Corticalis, DA, Tb.N, Tb.Sp and Tb.Th. Furthermore, the Chihuahua was then explicitly compared to the two groups independent of location. The following model assumptions were always checked: (1) the normality of residuals was checked by the Shapiro-Wilk normality test, (2) the homogeneity of variances between groups was checked with Bartlett test, and (3) the heteroscedasticity (constancy of error variance) was checked with Breusch-Pagan test. In case the assumptions were not satisfied, data were log-transformed and linear models were applied again. All contrasts (differences) between particular groups (i.e. toy breeds vs medium sized dogs) were assessed after model-fitting by the estimated marginal means (R package - emmeans) with Tukey p-value correction for multiple comparisons. Results with a P-value <0.05 were considered statistically significant. Data analysis was performed using R 4.2.1 (2022-06-23).

3. Results

All 80 carpal joints examined in both groups were included in the analysis.

The comparison of the right and left sides showed no significant difference for both groups on all seven bones in the trabecular and cortical analyses (p > 0.58); the values were almost completely similar, which is why they were not analysed separately.

3.1. Trabecular analysis

All carpal bones of all breeds had a trabecular portion. The results of the measurements for the individual carpal bones and groups are listed in Table 2.

The bone volume percentage (BV/TV) of the toy breeds was only insignificantly higher in 6 of the 7 bones than in the group of medium-sized dogs. Only in the accessory carpal bone it was significantly higher in the toy breeds (p = 0.001). Across groups, it was noticeable that the bone volume percentage of the second carpal bone was significantly higher than in the other 6 bones (p < 0.001).

The values for the surface volume fraction (BS/BV) of the toy breeds were higher in six of the seven carpal bones than in the medium-sized dogs. This difference was significant in the bones of the proximal joint row (Cir: p = 0.0325, Ca: p = 0.0006, Cu: p = 0.0028). Only in the first

Table 1
Layout of both groups including breed and body weight.

Group	Toy breed dogs	Medium sized dogs
Body Weight	2–6.5 kg	15–35 kg
	Chihuahua (n = 5)	Labrador (n = 2)
	Maltese (n = 3)	Labrador mix (n = 1)
	Yorkshire Terrier(n = 7)	German-Shepherd mix (n = 3)
	Papillon (n = 1)	White Shepherd (n = 1)
	Mini Poodle (n = 1)	Australian Shepherd (n = 1)
	Pomeranian (n = 1)	Border Collie (n = 1)
	Bolonka (n = 1)	Blood Hound (n = 1)
	Deer Finscher (n = 1)	Schnauzer mix (n = 1)
		Bearded Collie (n = 1)
		Sheepdog (n = 1)
		Mixed breed (n = 7)

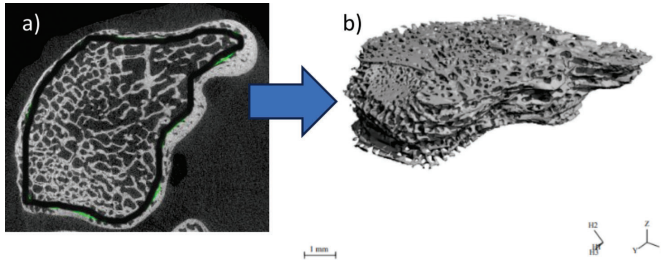


Fig. 1. a) Plotted region of interest (ROI) of the trabecular bone at the thickest part of a intermedioradial carpal bone b) 3D reconstruction of the trabecular bone, shown as an example for the intermedioradial carpal bone of a Yorkshire Terrier from group 1.

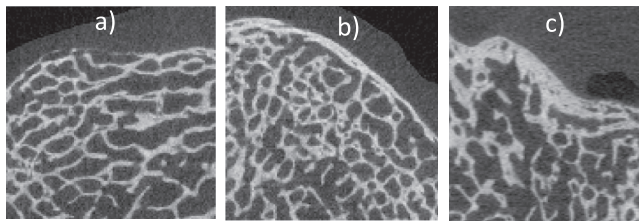


Fig. 2. Scoring system for cortical development a) Score 1: interrupted bone lamella b) Score 2: thin bone lamella c) Score 3: normal bone lamella.

Table 2

Mean value and standard deviation of both groups for all observed parameters at all locations, the group of medium sized dogs (n = 20) is referred to as “Dog”, the group of toy breeds (n = 20) as “Toy”.

Species	Parameters	Cir	Cu	Ca	CI	CII	CIII	CIV
Dog	BV/TV	0.39 ± 0.07	0.38 ± 0.07	0.36 ± 0.08	0.45 ± 0.08	0.5 ± 0.08	0.4 ± 0.07	0.42 ± 0.08
Toy	(%)	0.4 ± 0.06	0.4 ± 0.06	0.43 ± 0.07	0.46 ± 0.09	0.5 ± 0.08	0.4 ± 0.07	0.43 ± 0.07
Dog	BS/BV	22.25 ± 3.42	23.94 ± 3.59	21.05 ± 4.25	18.83 ± 4.3	18.29 ± 3.68	22.75 ± 3.93	21.15 ± 5.55
Toy	(mm ⁻¹)	20.37 ± 3.73	21.3 ± 3.58	18 ± 3.09	19.86 ± 4.07	17.81 ± 3.83	21.41 ± 3.92	19.64 ± 3.39
Dog	Tb.N	4.2 ± 0.36	4.45 ± 0.33	3.67 ± 0.33	4.06 ± 0.52	4.48 ± 0.56	4.43 ± 0.6	4.21 ± 0.34
Toy	(mm ⁻¹)	4 ± 0.34	4.18 ± 0.35	3.76 ± 0.4	4.35 ± 0.41	4.3 ± 0.39	4.11 ± 0.38	4.13 ± 0.43
Dog	Tb.Th	0.09 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.1 ± 0.02	0.11 ± 0.02	0.14 ± 0.16	0.09 ± 0.02	0.1 ± 0.02
Toy	(mm)	0.1 ± 0.02	0.1 ± 0.02	0.11 ± 0.02	0.1 ± 0.02	0.12 ± 0.02	0.1 ± 0.02	0.1 ± 0.02
Dog	Tb.Sp	0.15 ± 0.02	0.14 ± 0.02	0.18 ± 0.03	0.14 ± 0.02	0.11 ± 0.02	0.14 ± 0.02	0.14 ± 0.02
Toy	(mm)	0.15 ± 0.02	0.14 ± 0.02	0.16 ± 0.04	0.13 ± 0.03	0.12 ± 0.03	0.15 ± 0.03	0.14 ± 0.03
Dog	Conn.D	167.85 ± 55.7	167.69 ± 59.71	131.84 ± 46.77	119.5 ± 89.4	140.08 ± 78.91	191.04 ± 98.76	164.57 ± 72.97
Toy	(mm ⁻³)	58.11 ± 22.12	60.26 ± 20.75	43.81 ± 15.52	56.95 ± 19.14	57.73 ± 23.13	59.29 ± 21.58	60.33 ± 24.24
Dog	DA	1.15 ± 0.04	1.18 ± 0.05	1.4 ± 0.08	1.34 ± 0.11	1.23 ± 0.07	1.2 ± 0.07	1.35 ± 0.07
Toy		1.27 ± 0.05	1.23 ± 0.04	1.5 ± 0.12	1.44 ± 0.09	1.21 ± 0.06	1.21 ± 0.05	1.35 ± 0.07

carpal bone did the medium-sized dogs show higher values, but without significance ($p = 0.24$). It was noticeable in both groups that the second carpal bone had the lowest values for BS/BV, but without being significant ($p = 0.371$).

The group of toy breeds had significantly fewer trabeculae (Tb.N) in all carpal bones than the group of medium-sized dogs ($p = 0.007$). In addition, the accessory carpal bone of both groups had significantly fewer trabeculae than the other carpal bones ($p < 0.001$) and the second carpal bone had the most trabeculae, but this was not significant ($p = 0.941$).

A comparison of the two groups showed that the group of toy breeds had significantly thicker trabeculae (Tb.Th) on all carpal bones than the group of medium-sized dogs. These differences were most pronounced in the bones of the proximal joint row (Cir: $p = 0.0314$, Cu: $p = 0.0114$, Ca: $p = 0.0007$). Looking at the bones independent of the group, it was

also noticeable that the second carpal bone had the thickest trabeculae ($p = 0.05$).

The trabecular distance (Tb.Sp) did not differ significantly between the toy breeds and medium-sized dogs in all carpal bones ($p = 0.615$). However, it was striking that the trabeculae of the accessory carpal bone were significantly further apart in both groups than the other six carpal bones ($p = 0.003$). The second carpal bone had the narrowest trabecular distance across all groups ($p = 0.001$).

The connectivity (Conn.D) was significantly higher in the medium-sized dogs at all seven carpal bones than in the toy breeds ($p < 0.001$). In addition, it was found that the values in the group of toy breeds were quite similar at all localisations, while the medium-sized dogs showed a significantly wider spread of values (Table 2). The lowest values were found in the accessory carpal bone.

The geometric degree of anisotropy (DA) was significantly higher in

the toy breed group than in the medium-sized dogs ($p < 0.001$). Again, the differences were most pronounced in the three bones of the proximal joint level (Cir: $p < 0.0001$, Cu: $p = 0.002$, Ca: $p < 0.0001$). The values for the other four bones differed only insignificantly between the groups. Here too, the accessory carpal bone had the significantly highest values in the group-independent comparison of the bones ($p < 0.001$).

3.2. Differences within the groups

Within the group of toy breeds, it was noticeable that the carpal joints of the Chihuahuas differed significantly from the rest of the toy breeds at all carpal bones.

The Chihuahuas had significantly lower values for bone volume percentage (BV/TV) than the other toy breeds ($p < 0.0001$) and also the medium-sized dogs ($p = 0.0005$) (Fig. 3b).

The Chihuahuas showed significantly higher values for surface volume fraction (BS/BV) than the other toy breeds ($p < 0.001$) and also the medium-sized dogs ($p = 0.0243$) (Fig. 3a).

The Chihuahuas had fewer trabeculae (Tb.N) than the other toy breeds or the medium-sized dogs, but only significantly compared to the medium-sized dogs ($p = 0.0051$), not the toys ($p = 0.0862$) (Fig. 3c).

The trabecular distance (Tb.Sp) of the Chihuahuas was significantly higher than in the other toy breeds ($p < 0.0001$) and the medium-sized dogs ($p < 0.0001$), and the Chihuahuas also had significantly thinner trabeculae (Tb.Th) than the other toy breeds ($p < 0.0001$) and the medium-sized dogs ($p = 0.0286$) (Fig. 3d,e).

3.3. Analysis of the cortical structures

In the semi-quantitative evaluation of the cortical development of the individual carpal bones between the two groups, it was noticeable that the cortical bone was very marginally developed in the toy breeds and in some cases consisted only of an interrupted bone lamella (score 1). This was mainly noticeable on the dorsal surface of the intermedioradial carpal bone and on the numbered carpal bones. In the proximal joint row, with the exception of the dorsal surface of the intermedioradial carpal bone, the cortical bone was slightly more developed and consisted of a continuous bone lamella (score 2). In contrast, the cortical bone in the medium-sized dogs was significantly stronger and continuous (score 3). This difference was observed in all seven carpal bones. In both groups, the cortical bone was most pronounced on the palmar surface of the intermedioradial carpal bone, where it was always normal (score 3). The accessory carpal bone also showed a clearly pronounced cortex at the attachment point of the soft tissue structures (score 3). The development of the cortical structures did not differ between the toy breeds, with the Chihuahuas showing no special features.

4. Discussion

The exact trabecular and cortical structure of the bones of the canine carpal joint has not yet been described in the available veterinary literature. Knowledge of this is important and could be of significance for the development of implants or the treatment of injuries to these bones. Therefore, the aim of the present study was to close this gap. Healthy dogs were examined for this purpose, and the aim of the work was to gain better knowledge of the anatomical structures and breed differences.

Micro-computed tomography was chosen to analyse the osseous structures of the carpal joint, as it is considered the gold standard for 3-dimensional imaging of bone morphology (Kim et al., 2021; Scherzer et al., 2009). The advantages of this method include the non-destructive examination of the bone and its three-dimensional reconstruction (David et al., 2003; Ito et al., 1998; Müller et al., 1998; Nägele et al., 2004; Scherzer et al., 2009). It has been shown in humans that increased knowledge of the microstructure allows improved prediction of the

mechanical competence of the bone (Arlot et al., 2008; Goulet et al., 1994; Pistola et al., 2002; Ulrich et al., 1997; Ulrich et al., 1999; Van Rietbergen et al., 1998). In this study, the aim was also to utilise the advantages of micro-computed tomography, but not to demonstrate the mechanical superiority of one group over the other.

This knowledge led to microcomputed tomography also being used in veterinary medicine. Most studies have focussed on animals with orthopaedic conditions. Fitzpatrick et al. (2016) investigated the bony changes in dogs suffering from medial coronoid disease (MCD). Scherzer et al. (2009) looked at dogs suffering from Legg-Calve-Perthes and the resulting changes in the femoral head. Boyd et al. (2005) investigated the bony changes in the proximal tibia after rupture of the cranial cruciate ligament in cats in a long-term comparison. These studies showed that the trabecular structure of the bone changes during pathological processes. The trabecular structure of the antebrachium in toy dogs and small dogs was compared by Planner et al. (2021) to investigate the increased predisposition of antebrachial fractures in toy breeds. The authors only examined healthy dogs, which is why a comparison with our own study is possible; clear differences between the two groups were also found here and the separate position of the Chihuahuas could also be reproduced. In another study, the first and second lumbar vertebrae of spayed female dogs were analysed to investigate whether female dogs are also potentially susceptible to osteoporosis after spaying (Kostenko et al., 2023). However, due to the small study population ($n = 5$), no meaningful data could be obtained and further investigations are necessary. These studies show that there is also great interest in this examination method in dogs with regard to the quality and changes in the bone. Our own study also showed clear differences between the groups. This shows clearly that in addition to the already complex anatomy of the carpal joint, the differences in cortical and trabecular bone structure and breed differences must also be taken into account in the surgical treatment of carpal joint trauma.

In human medicine, there are studies that have investigated the changes in the trabecular structure of the carpal joint in order to gain a better understanding of osteoarthritis in the thumb saddle joint (Lee et al., 2013; Nufer et al., 2008). The authors investigated the Os trapezium, which corresponds to the first carpal bone in dogs. In humans, this communicates with the thumb and therefore experiences a completely different load than in dogs. It should also be noted that, unlike humans, dogs need their carpus to walk and that it is loaded with 30 % of the body weight during exercise (Budsberg et al., 1987). Lee et al. (2013) were able to show in humans that the structural parameters within a bone differ according to the force applied. The structural parameters BV/TV and Tb.N were highest at sites with high mechanical stress. If this assumption is transferred to the present study, it is noticeable that it is not the intermedioradial carpal bone as the largest carpal bone, as assumed, but the underlying second carpal bone that has the highest values for BV/TV and Tb.N. This suggests that in dogs the force transmission of the intermedioradial carpal bone is concentrated on the second carpal bone.

The bone volume fraction (BV/TV) can strongly influence the mechanical properties of cancellous bone and can be used as one of the primary determinants for the failure load of bone (Ding et al., 2002; Pothuaud et al., 2002). It also correlates with other structural parameters such as trabecular number (Tb.N), trabecular thickness (Tb.Th) and connectivity (CONN-D) (Goulet et al., 1994; Hildebrand et al., 1999). According to Arlot et al. (2008) bony microdamage is associated with low values for BV/TV. In the present study, the values of toy breeds and medium-sized dogs differed only slightly. Kang et al. (2016) were able to show in their study that high values for BV/TV are good determinants for the primary stability of implants.

The surface volume fraction (BV/BV) describes the ratio of the trabecular surface to the volume of the trabecular bone (Goulet et al., 1994). This value is dependent on the number of trabeculae and correlates negatively with the BV/TV (Scherzer et al., 2009). It follows that low values indicate a more compact structure and thus increased

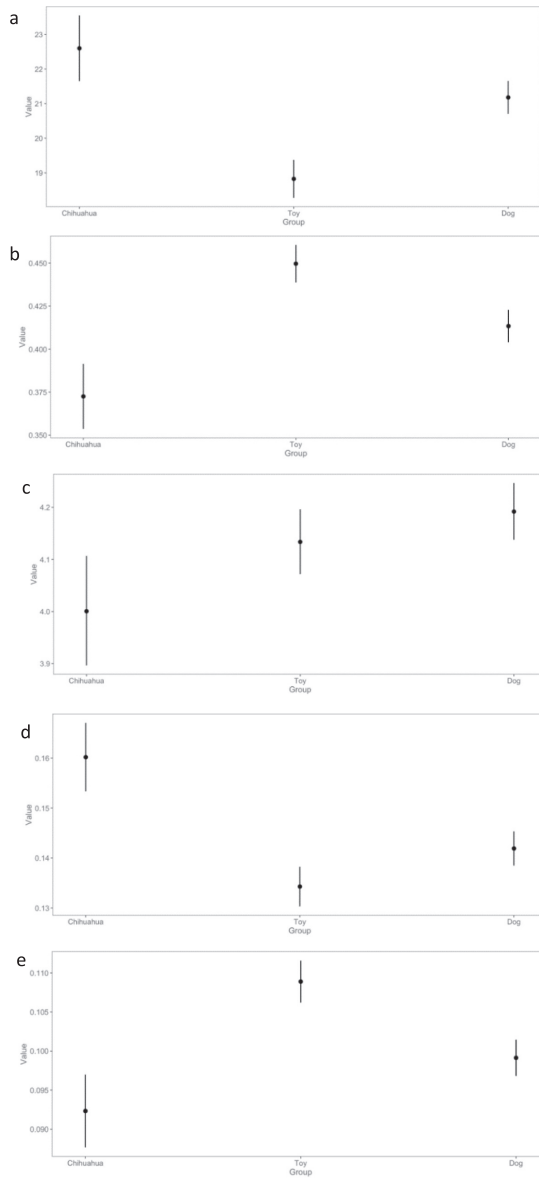


Fig. 3. Comparison between the Chihuahuas ($n = 5$), the toy dogs of other breeds (Toy Group, $n = 15$) and the group of medium-sized dogs (Dog, $n = 20$) for the parameters BS/BV (a), BV/TV (b), Tb.N (c), Tb.Sp (d) and Tb.Th (e).

stability of the bone. In the present study, the toy breeds had significantly lower values than the medium-sized dogs. The fact that the second carpal bone also had the lowest values in both groups supports the hypothesis that it is particularly stable.

Looking at the number of trabeculae, the trabecular thickness and the trabecular spacing, these are also strongly correlated with the stability of the bones. A low number and thickness, as well as wide spacing, are considered negative for bone stability and the primary retention force of implants (Arlot et al., 2008; Boyd et al., 2005; Ito et al., 1998; Kang et al., 2016). In the present study, the medium-sized dogs had significantly more trabeculae in each bone than the toy dogs, but these were significantly thinner. The distance between the trabeculae did not show any major difference between the two groups. The second carpal bone also had the highest values for trabecular thickness and trabecular number and the lowest values for trabecular distance of all seven bones. This also speaks in favour of the increased stability of this bone.

The degree of connectivity of the trabecular bone (Conn.D) makes it possible to make a statement about the quantity of trabecular connections, but not about the quality (Goulet et al., 1994). Furthermore, connectivity is negatively related to the mechanical failure load of the bone (Ding et al., 2002). In our own study, the medium-sized dogs had significantly higher values for Conn.D on all bones than the toy breeds. In addition, the medium-sized dogs showed a much higher dispersion of values compared to the toy breeds. This can be explained by the fact that the weight difference between the individual dogs in this group was significantly greater than in the toy breed group.

The spatial orientation of the trabeculae within the bone is referred to as the degree of anisotropy (DA). High values have a negative influence on the mechanical properties and fragility of the bone (Ding et al., 2002; van Eijden et al., 2006). In our own study, the toy breeds presented significantly higher values compared to the group of medium-sized dogs. Looking at the lower values of the toy breeds for the degree of cross-linking (Conn.D) and the higher values for the degree of anisotropy (DA), it is noticeable that the trabeculae of the toy breeds have fewer cross-links and are arranged more in one direction, which suggests a lack of formative stimulation of the bones due to less strain.

The accessory carpal bone should be considered separately again, as it is an apophysis that is orientated towards tensile loads and therefore has a different function in the carpal joint than the other 6 bones (Evans and de Lahunta, 2012). Compared to the other bones, it has the lowest number of trabeculae with the widest spacing, and they also have fewer branches than the trabeculae of the other bones (Conn.D). This can be explained by the fact that it participates only slightly in the transmission of force along the longitudinal axis of the thoracic limb and therefore does not have to be equally stable in all directions. In this context, however, it is striking that it has the highest degree of anisotropy, which means that the trabeculae are predominantly arranged in one direction in order to best withstand the tensile loads.

The thickness of the cortex did not differ within a bone in our own study. This applied to all bones in both groups. However, there was a clear difference between the groups. The medium-sized dog group had a significantly thicker cortex than the toy breed group. In the toy breed group, the cortex was very weakly developed on all bones and in some cases consisted only of an interrupted bone lamella. According to various studies, the development of the cortical bone has a major influence on the stability and failure load of bones (Eckstein et al., 2004; Lochmüller et al., 2002; Lochmüller et al., 2008). In particular, the thickness is also of importance for the stability (Fonseca et al., 2014) and the retention force of implants (Seebeck et al., 2005). Since the characteristics differ so greatly between the groups, it can be assumed that the higher weight, the associated higher load and also the increased agility in larger dogs have a significant influence on the characteristics. It should again be emphasised that the accessory carpal bone has a strongly developed cortex at the attachment area of the soft tissue structures in order to provide sufficient attachment surface and also to be able to withstand the tensile forces. The reason for the strongly

developed cortex on the palmar surface of the intermedioradial carpal bone is probably caused by the increased load from the neighbouring tendons of the long digit muscles.

Among the toy breeds in our study, the Chihuahua was the breed that stood out. The Chihuahua differed from the other toy breeds in five of the seven measured structural parameters on all seven carpal bones. In addition to a reduced BV/TV and increased BS/BV, this breed had fewer, thinner trabeculae with wider spacing. This indicates a reduced stability of the carpal bones of this breed compared to the rest of the group. In their study Planner et al. (2021), were also able to demonstrate altered parameters for the Chihuahua compared to other small dogs and toy breeds. Why the Chihuahua exhibits these peculiarities could not be clarified in this study. It can be speculated that the Chihuahua, which is listed by the FCI as the smallest dog breed in the world, has acquired these abnormalities because it is often carried by its owners and the formative stimulus acting on the bones is therefore low.

Surgical treatment of carpal joint injuries, especially fusion, is associated with increased complication rates of up to 50 % (Arnott et al., 2008; Michal et al., 2003). Most of these complications occur due to the implants used (Buote et al., 2009). The present study shows that the bony architecture of dogs of different sizes does differ. In addition to the above-mentioned importance of the cortical bone on the holding force of implants, the trabecular network also has an influence (Wirth et al., 2011). Here, the stability of the implants depends on the contact surface to the trabecular bone, which is usually quite small (Joffre et al., 2017). As a result, extremely precise selection of the implants used is required (Chapman et al., 1996). The data from the present study show that all 7 carpal bones have a cancellous structure and can therefore potentially be included in a fusion. The second carpal bone, which appears to be particularly stable, could be included in a joint fusion in order to have an additional screw in the distal joint row and thus achieve a more rigid fixation. At present, there is only one study investigating the use of an implant that includes the ulnar carpal bone in addition to the intermedioradial carpal bone (Burton et al., 2013). In this study, it was shown that this reduces intercarpal and carpometacarpal micromovements and enables a more distal positioning of the plate, which means a lower risk of soft tissue impingement. Further possibilities should be evaluated in future studies.

A primary limitation of the present study is the partial lack of age of the animals. Age-related influences were found for the number of trabeculae and trabecular thickness (Bergot et al., 1988). In our studies, animals were examined whose age was between 8 and 12 years in order to minimise age-related influences. The age range is due to the fact that only euthanised or deceased animals were included for animal welfare reasons.

5. Summary

In this study, trabecular structural parameters and the cortical architecture of the seven carpal bones were analysed using micro-computed tomography to evaluate the anatomy and possible differences between toy breeds and medium-sized dogs, as well as within the toy breed group. It was shown that all carpal bones, no matter how small, have the classic cancellous structure and can therefore potentially be used for the surgical treatment of carpal joint trauma. The second carpal bone in particular should be investigated in further studies, as it appears to be very stable. With an additional fixation option, the complication rate of joint fusion could be reduced. It could also be shown that the Chihuahua differs significantly from the other toy breeds and that there is definitely reduced stability here.

6. Explanations

The manuscript of this study was written by LG with contributions from all co-authors. The authors had no conflict of interest, and this research was not financially supported.

CRedit authorship contribution statement

L. Goldstein: Writing – original draft, Visualization, Validation, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation. **A.-C. Waselau:** Writing – review & editing, Validation, Supervision, Resources. **Y. Zablotski:** Writing – review & editing, Visualization, Validation, Methodology, Formal analysis. **A. Meyer-Lindenberg:** Writing – review & editing, Validation, Resources, Project administration.

Declaration of generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this work the author(s) used DeepL in order to translate the original draft of the paper from German into English. After using this tool, the author(s) reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the publication.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no conflict of interest. The research was not financially supported.

Acknowledgements

We would like to thank the research team at the Faculty of Veterinary Medicine of the Ludwig-Maximilians-University Munich. They supported the first author and guided him in his work with the μ CT.

References

Arlot, M.E., Burt-Pichat, B., Roux, J.P., Vashishth, D., Bouxsein, M.L., Delmas, P.D., 2008. Microarchitecture influences microdamage accumulation in human vertebral trabecular bone. *J. Bone Miner. Res.* 23, 1613–1618.

Arnott, J.L., Bailey, R., Shields, A., Bennett, D., 2008. An in vitro comparison of a 2.7/3.5 mm hybrid plate alone and combined with crossed K-wires for canine pancarpal arthrodesis. *Vet. Comp. Orthop. Traumatol.* 21, 307–311.

Beierer, L.H., 2021. Canine carpal injuries: from fractures to hyperextension injuries. *Vet. Clin. North Am. Small Anim. Pract.* 51, 285–303.

Bergot, C., Laval-Jeanet, A.M., Prêtreux, F., Meunier, A., 1988. Measurement of anisotropic vertebral trabecular bone loss during aging by quantitative image analysis. *Calcif. Tissue Int.* 43, 143–149.

Boyd, S.K., Müller, R., Leonard, T., Herzog, W., 2005. Long-term periarticular bone adaptation in a feline knee injury model for post-traumatic experimental osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartil.* 13, 235–242.

Bristow, P.C., Meeson, R.L., Thorne, R.M., Butterworth, S.J., Rutherford, S., Renwick, A. I., Wustefeld-Janssens, B., Witte, P.G., Woods, S., Parsons, K.J., Keeley, B.J., Owen, M.R., Li, A., Arthurs, G.I., 2015. Clinical comparison of the hybrid dynamic compression plate and the castless plate for pancarpal arthrodesis in 219 dogs. *Vet. Surg.* 44, 70–77.

Budberg, S.C., Verstraete, M.C., Soutas-Little, R.W., 1987. Force plate analysis of the walking gait in healthy dogs. *Am. J. Vet. Res.* 48, 915–918.

Buote, N.A., McDonald, D., Radasch, R., 2009. Pancarpal and partial carpal arthrodesis. *Compend. Contin. Educ. Vet.* 31, 180–191 quiz 92.

Burton, N.J., Miles, A.W., Pollintine, P., 2013. Biomechanical comparison of a novel castless arthrodesis plate with T-plate and cross pin techniques for canine partial carpal arthrodesis. *Vet. Comp. Orthop. Traumatol.* 26, 165–171.

Chapman, J.R., Harrington, R.M., Lee, K.M., Anderson, P.A., Tencer, A.F., Kowalski, D., 1996. Factors affecting the pullout strength of cancellous bone screws. *J. Biomech. Eng.* 118, 391–398.

David, Valentin, Laroche, Norbert, Boudignon, Benjamin, Lafage-Proust, Marie-Hélène, Alexandre, Christian, Ruesgesser, Peter, Vico, Laurence, 2003. Noninvasive in vivo monitoring of bone architecture alterations in Hindlimb-unloaded female rats using novel three-dimensional microcomputed tomography. *J. Bone Miner. Res.* 18, 1622–1631.

Ding, M., Odgaard, A., Danielsen, C.C., Hvid, I., 2002. Mutual associations among microstructural, physical and mechanical properties of human cancellous bone. *J. Bone Joint Surg. (Br.)* 84, 900–907.

Earley, T., 1978. Canine carpal ligament injuries. *Vet. Clin. North Am.* 8, 183–199.

Eckstein, F., Fischbeck, M., Kuhn, V., Link, T.M., Priemel, M., Lochmüller, E.M., 2004. Determinants and heterogeneity of mechanical competence throughout the thoracolumbar spine of elderly women and men. *Bone* 35, 364–374.

Evans, H.E., de Lahunta, A., 2012. *Miller's Anatomy of the Dog - E-Book: Miller's Anatomy of the Dog - E-Book* (Saunders).

Fitzpatrick, N., García, T.C., Daryani, A., Bertran, J., Watari, S., Hayashi, K., 2016. Micro-CT structural analysis of the canine medial coronoid disease. *Vet. Surg.* 45, 336–346.

Fonseca, H., Moreira-Gonçalves, D., Coriolano, H.J., Duarte, J.A., 2014. Bone quality: the determinants of bone strength and fragility. *Sports Med.* 44, 37–53.

Goulet, R.W., Goldstein, S.A., Ciarelli, M.J., Kuhn, J.L., Brown, M.B., Feldkamp, L.A., 1994. The relationship between the structural and orthogonal compressive properties of trabecular bone. *J. Biomech.* 27, 375–389.

Guerrero, T.G., Montavon, P.M., 2005. Medial plating for carpal panarthrodesis. *Vet. Surg.* 34, 153–158.

Hildebrand, T., Laib, A., Müller, R., Dequeker, J., Ruesgesser, P., 1999. Direct three-dimensional morphometric analysis of human cancellous bone: microstructural data from spine, femur, iliac crest, and calcaneus. *J. Bone Miner. Res.* 14, 1167–1174.

Ito, M., Nakamura, T., Matsumoto, T., Tsurusaki, K., Hayashi, K., 1998. Analysis of trabecular microarchitecture of human iliac bone using microcomputed tomography in patients with hip arthrosts with or without vertebral fracture. *Bone* 23, 163–169.

Joffre, T., Isaksson, P., Procter, P., Persson, C., 2017. Trabecular deformations during screw pull-out: a micro-CT study of lapine bone. *Biomech. Model. Mechanobiol.* 16, 1349–1359.

Johnston, S.A., Tobias, K.M., 2017. *Veterinary Surgery: Small Animal*. Elsevier.

Kang, S.R., Bok, S.C., Choi, S.C., Lee, S.S., Heo, M.S., Huh, K.H., Kim, T.I., Yi, W.J., 2016. The relationship between dental implant stability and trabecular bone structure using cone-beam computed tomography. *J. Periodontol. Implant. Sci.* 46, 116–127.

Kim, Y., Brodt, M.D., Tang, S.Y., Silva, M.J., 2021. MicroCT for scanning and analysis of mouse bones. *Methods Mol. Biol.* 2230, 169–198.

Kostenko, E., Pockevicius, A., Maknickas, A., 2023. Histomorphometry and μ CT scan analysis of osteoporosis in spayed female dogs. *Open Vet. J.* 13, 1–10.

Lee, A.T., Williams, A.A., Lee, J., Cheng, R., Lindsey, D.P., Ladd, A.L., 2013. Trapezium trabecular morphology in carpalometacarpal arthritis. *J. Hand. Surg. (Am.)* 38, 309–315.

Li, A., Bennett, D., Gibbs, C., Carmichael, S., Gibson, N., Owen, M., Butterworth, S.J., Denny, H.R., 2000. Radial carpal bone fractures in 15 dogs. *J. Small Anim. Pract.* 41, 74–79.

Lochmüller, E.M., Bürklein, D., Kuhn, V., Glaser, C., Müller, R., Glüer, C.C., Eckstein, F., 2002. Mechanical strength of the thoracolumbar spine in the elderly: prediction from in situ dual-energy X-ray absorptiometry, quantitative computed tomography (QCT), upper and lower limb peripheral QCT, and quantitative ultrasound. *Bone* 31, 77–84.

Lochmüller, E.M., Pöschl, K., Würstlin, L., Matsura, M., Müller, R., Link, T.M., Eckstein, F., 2008. Does thoracic or lumbar spine bone architecture predict vertebral failure strength more accurately than density? *Osteoporos. Int.* 19, 537–545.

Michal, U., Flückiger, M., Schmökkel, H., 2003. Healing of dorsal pancarpal arthrodesis in the dog. *J. Small Anim. Pract.* 44, 109–112.

Müller, R., Van Campenhout, H., Van Damme, B., Van Der Perre, G., Dequeker, J., Hildebrand, T., Ruesgesser, P., 1998. Morphometric analysis of human bone biopsies: a quantitative structural comparison of histological sections and micro-computed tomography. *Bone* 23, 59–66.

Nägele, E., Kuhn, V., Vogt, H., Link, T.M., Müller, R., Lochmüller, E.M., Eckstein, F., 2004. Technical considerations for microstructural analysis of human trabecular bone from specimens excised from various skeletal sites. *Calcif. Tissue Int.* 75, 15–22.

Nickel, R., Schummer, A., Seiferle, E., 2003. *Lehrbuch der Anatomie der Haustiere, Band 1 Bewegungsapparat* (Enke).

Nufer, P., Goldhahn, J., Kohler, T., Kuhn, V., Müller, R., Herren, D.B., 2008. Microstructural adaptation in trapezial bone due to subluxation of the thumb. *J. Orthop. Res.* 26, 208–216.

Pistoia, W., van Rietbergen, B., Lochmüller, E.M., Lill, C.A., Eckstein, F., Ruesgesser, P., 2002. Estimation of distal radius failure load with micro-finite element analysis models based on three-dimensional peripheral quantitative computed tomography images. *Bone* 30, 842–848.

Planner, F., Feichtner, F., Meyer-Lindenberg, A., 2021. Comparative microcomputed tomographic structural analysis of the trabecular and cortical bone architecture of radius and ulna in toy dog breeds. *Res. Vet. Sci.* 136, 324–335.

Pothuaud, L., Van Rietbergen, B., Moskilde, L., Beuf, O., Levitz, P., Benhamou, C.L., Majumdar, S., 2002. Combination of topological parameters and bone volume fraction better predicts the mechanical properties of trabecular bone. *J. Biomech.* 35, 1091–1099.

Pozzi, A., Lewis, D.D., Hudson, C.C., Kim, S.E., Castelli, E., 2020. Percutaneous plate arthrodesis. *Vet. Clin. North Am. Small Anim. Pract.* 50, 241–261.

Scherzer, C., Windhagen, H., Nellesen, J., Crostach, H.A., Rohm, K., Witte, F., Thorey, F., Fehr, M., Hauschild, G., 2009. Comparative structural analysis of the canine femoral head in Legg-Calvé-Perthes disease. *Vet. Radiol. Ultrasound* 50, 404–411.

Seebeck, J., Goldhahn, J., Morlock, M.M., Schneider, E., 2005. Mechanical behavior of screws in normal and osteoporotic bone. *Osteoporos. Int.* 16 (Suppl. 2), S107–S111.

Tomlin, J.L., Pead, M.J., Langley-Hobbs, S.J., Muir, P., 2001. Radial carpal bone fracture in dogs. *J. Am. Anim. Hosp. Assoc.* 37, 173–178.

Ulrich, D., Hildebrand, T., Van Rietbergen, B., Müller, R., Ruesgesser, P., 1997. The quality of trabecular bone evaluated with micro-computed tomography, FEA and mechanical testing. *Stud. Health Technol. Inform.* 40, 97–112.

Ulrich, D., van Rietbergen, B., Laib, A., Ruesgesser, P., 1999. The ability of three-dimensional structural indices to reflect mechanical aspects of trabecular bone. *Bone* 25, 55–60.

van Eijden, T.M., van der Helm, P.N., van Ruijven, L.J., Mulder, L., 2006. Structural and mechanical properties of mandibular condylar bone. *J. Dent. Res.* 85, 33–37.

Van Rietbergen, B., Odgaard, A., Kabel, J., Huiskes, R., 1998. Relationships between bone morphology and bone elastic properties can be accurately quantified using high-resolution computer reconstructions. *J. Orthop. Res.* 16, 23–28.

L. Goldstein et al.

Research in Veterinary Science 192 (2025) 105725

Vedrine, B., 2013. Comminuted fracture of the ulnar carpal bone in a Labrador retriever dog. *Can. Vet. J.* 54, 1067–1070.

Viguiet, E., Znaty, D., Medelci, M., Degueurce, C., 2001. In vitro comparison between a DCP and external fixator for pancarpal arthrodesis in the dog. *Equine Vet. J. Suppl.* 32–35.

Wirth, A.J., Goldbahn, J., Flaig, C., Arbenz, P., Müller, R., van Lenthe, G.H., 2011. Implant stability is affected by local bone microstructural quality. *Bone* 49, 473–478.

4. Publikation 2

Folgende Publikation wurde im Journal „Acta Veterinaria Scandinavica“ am 29.08.2025 eingereicht und befindet sich aktuell im Review-Prozess.

Microcomputed tomographic comparison of the bony structure of the canine and feline carpus

L. Goldstein¹, A.-C. Waselau², Y. Zablotzki², A. Meyer-Lindenberg¹

1 Clinic for Small Animal Surgery and Reproduction, LMU, Munich, Germany

2 Clinic for Small Animal Medicine, LMU, Munich, Germany

Corresponding Author: L. Goldstein, A. Meyer-Lindenberg

Microcomputed tomographic comparison of the bony structure of the canine and feline carpus

Leo Goldstein¹, Anja-Christina Waselau², Yury Zablotski², Andrea Meyer-Lindenberg¹

¹ Clinic for Small Animal Surgery and Reproduction, LMU, Veterinärstraße 13, Munich, Germany

² Clinic for Small Animal Medicine, LMU, Veterinärstraße 13, Munich, Germany

*Corresponding author

Abstract

Background

Feline carpal joint injuries are challenging to treat and have a rather high implant-based complication rate. We therefore aimed to create a database on the bony microarchitecture of the cancellous and cortical structures of the carpus. A total of 80 carpal joints from 20 cats and 20 toy breed dogs were examined and compared using microcomputed tomography. The parameters bone volume (BV/TV), bone surface (BS/BV), trabecular thickness (Tb.Th), number of trabeculae (Tb.N), trabecular spacing (Tb.Sp), degree of anisotropy (DA) and connectivity density (Conn. D) were measured and compared. To classify the cortical structure, a three-staged scoring system was established.

Results:

It was shown that all carpal bones have a cancellous structure, which differs clearly between the groups. Overall, cats had fewer but thicker trabeculae than the toy-dogs in the analysed areas of the carpus, which resulted in a greater trabecular distance in cats. The cats also presented with higher bone volume (BV/TV) and a thicker cortex.

Conclusions:

Based on the results, it could be determined that cats have a more stable bone architecture in the measured areas than toy breed dogs and thus have to be treated differently.

Key words:

Trabecular architecture, Bone parameters, Cat, Dog, Carpus

Background

The carpal joint of carnivores consists of seven carpal bones and a large number of ligamentous structures [1]. However, this complexity which on the one hand allows variable movements, also offers various number of potential pathologies for injuries, which are often the result of direct trauma and usually consist of a combination of bony and ligamentous damage [2]. Depending on their extent, the therapeutic approach to these injuries is a bridging ligament replacement or, in severe cases, fusion of the joint by means of partial or total arthrodesis. In both bony ligament replacement and almost all methods of joint fusion, a screw or pin is inserted into at least one carpal bone [3, 4]. Whether there are differences in the bony texture between dogs and cats is usually not given the necessary attention in the current literature. Accordingly, the cat is often mistakenly seen as a small dog, but there are differences in anatomy, orthopaedics and surgery that must be taken into account [5, 6]. The stresses experienced by the feline carpus due to physiological behaviour, such as climbing or jumping, are also different from those experienced by dogs [2]. So far, these anatomical peculiarities of dogs and cats have only been described for the ligamentous structures of the carpus [7, 8]. A detailed study of the bony architecture of the seven carpal bones is not available in the current literature. Therefore, in the present study, microcomputed tomographic examinations of feline and canine carpal joints were performed. The primary aim of this study was to evaluate differences in the bony structure between dogs and cats. In addition to recording the anatomical structures, a further aim of this study was to create a database on the trabecular and cortical structure of the carpal bones, which could lead to further development or adaptation of the arthrodesis implants currently used. Furthermore, this data could also be helpful for the surgical treatment of carpal fractures. For this purpose, the trabecular structural parameters were determined using microcomputed tomography, the corticalis was classified and a comparison was made between toy dogs and cats.

Methods

Study design

The study population consisted of two groups of 20 animals each (Table 1), group one were the cats (n=20), group two the toy dogs (n=20). All carpal joints included were from euthanised or deceased animals, care was taken to select middle-aged animals and to ensure a balanced ratio of neutered and unneutered animals. The condition for inclusion in the study was the absence of carpal joint pathologies such as fractures or arthrosis. This was verified radiographically in 2 planes. The radiological examinations were carried out using the Siemens Luminos dRF X-ray unit,

Siemens Healthcare AG (Erlangen) with a setting of 50kV and 1.6 mAs. Before preparation of the joints, the cadavers, which had been stored frozen at -21°C, were thawed at room temperature for 2 days. The carpal joints were exposed by removing the soft tissue; only the ligaments, which are important for anatomically correct shaping, were left in place. For better handling, the specimens were separated 2 cm above and below the joint in the antebrachium and metacarpus and stored in 4% formalin until examination in the microcomputed tomograph.

Table 1

Group layout		
Group	Toy breed Dogs	Cats
Body weight	2-7kg	1,7-6,2kg
Breeds	Chihuahua (n=5) Maltese (n=3) Yorkshire Terrier (n=7) Papillon (n=1) Miniature Poodle (n=1) Pomeranian (n=1) Bolonka (n=1) Deer Pinscher (n=1)	European Shorthair (n=17) European Longhair (n=1) British Shorthair (n=1) Maine Coon (n=1)

Micro CT

The joints fixed vertically in the sample container were scanned with 70kV, 114µA, 550ms, a native voxel size of 10µm and 1000 projections/180° using the microcomputed tomography scanner (µCT-80, Scanco Medical, Zurich, Switzerland). The scan area was chosen to include all seven carpal bones (intermediocarpal bone (C_{ir}), ulnar carpal bone (C_u), accessory carpal bone (C_a), first carpal bone (C_I), second carpal bone (C_{II}), third carpal bone (C_{III}) and fourth carpal bone (C_{IV})). The bones were named according to Nickel, Schummer and Seiferte [1]. The evaluations performed after the scan were carried out using the µCT evaluation programme V6.6 (Scanco Medical, Zurich, Switzerland).

Analysis of the trabecular bone

To examine the cancellous bone as completely as possible, each scan was reviewed and the most proximal and distal section that still contained cancellous bone was determined. The cancellous bone between these two sections was defined as a region of interest (ROI) for each of the carpal bones (Fig 1) and subsequently marked by hand in each section, according to Kim, Brodt, Tang and Silva [9]. Subsequently, a threshold was determined for each of the two groups by independent analysis of three reviewers and the structural parameters bone volume fraction (BV/TV (%)), bone surface to volume ration of bone (BS/BV (mm^{-1})), trabecular number (Tb.N (mm^{-1})), trabecular thickness (Tb.Th (mm)), trabecular separation (Tb.Sp (mm)), connectivity density (Conn. D (mm^{-3})) and degree of anisotropy (DA) were evaluated.

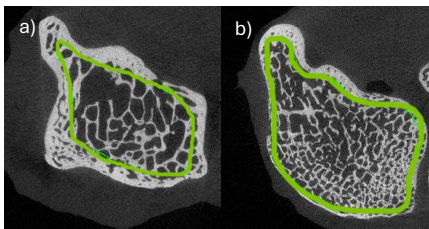


Figure 1) Plotted region of interest (ROI) of the trabecular bone at the thickest part of an intermedioradial carpal bone
a) European Shorthair Cat
b) Yorkshire Terrier

Analysis of the cortical bone

An evaluation scheme with three scores was introduced to analyse the cortical portion of the carpal bones. (Fig. 2) For the evaluation, each bone was divided into a proximal, middle and distal third and the middle section was used for the assessment. The intermedioradial carpal bone was subdivided into three parts according to size: the dorsal surface, the palmar surface and the joint-participating surface towards the ulnar carpal bone. The accessory carpal bone was also subdivided into joint-participating and non-joint-participating. The other five bones forming the carpal joint were assessed in their entirety and not subdivided.

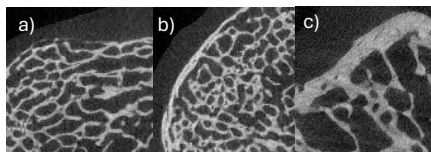


Figure 2) Scoring system for cortical development

a) Score 1: interrupted bone lamella

b) Score 2: continuous bone lamella

c) Score 3: normal bone lamella

Generalised linear models were used to study the differences between toy breeds and cats for every particular carpal bone for the following parameters: BS/BV, BV/TV, Conn.D, Coritcalis, DA, Tb.N, Tb.Sp and Tb.Th. The following model assumptions were always checked: (1) the normality of residuals was checked by the Shapiro-Wilk normality test, (2) the homogeneity of variances between groups was checked with the Bartlett test, and (3) the heteroscedasticity (constancy of error variance) was checked with the Breusch-Pagan test. In case the assumptions were not satisfied, data were log-transformed and linear models were applied again. All differences between particular groups were assessed after model-fitting by the estimated marginal means (R package - emmeans) with Tukey p-value correction for multiple comparisons. Results with a P-value < 0.05 were considered statistically significant. Data analysis was performed using R 4.2.1 (2022-06-23).

Results

All included carpal joints could be used for the evaluation. There were no significant differences between the left and right side for all seven parameters at all seven localisations and for the formation of the cortical bone ($p > 0.63$), which is why this was not considered separately.

Trabecular analysis

All carpal bones analysed in both groups had a trabecular portion. The results of the measurements for the individual carpal bones and groups are listed in Table 2.

When looking at the results for the bone volume fraction (BV/TV), it was noticeable that the values of the cats significantly ($p < 0.0097$) exceeded those of the toy dogs on all seven carpal bones. In contrast, the toy dogs showed significantly higher values for surface volume fraction (BS/BV) on all seven carpal bones ($p < 0.001$). It was also striking that within the group of cats, the ulnar carpal bone had the highest values for BV/TV and the lowest values for BS/BV, both of which were significant.

The group of toy dogs had significantly more trabeculae (Tb.N) at all seven localisations than the group of cats ($p < 0.001$). The accessory carpal bone had fewer trabeculae than the other 6 carpal bones in both the cats and the toy dogs. The ulnar carpal bone of the cats showed significantly more trabeculae than the other two bones of the proximal joint row ($p = 0.02$)

The trabecular thickness (Tb.Th) was significantly higher in all seven bones in the group of cats ($p < 0.001$) than in the toy dogs. Within the cat group, the ulnar carpal bone had the thickest trabeculae.

The trabecular distance (Tb.Sp) in the cats was significantly higher in all bones than in the toy dogs, with the accessory carpal bone showing the highest values. The ulnar carpal bone of the cats showed the narrowest distances compared to the other two bones of the proximal joint row.

The connectivity values (Conn.D) of the toy dogs were significantly higher than those of the cats at all seven bones ($p < 0.001$). The accessory carpal bone showed the lowest values in both groups.

The geometric degree of anisotropy (DA) was significantly higher at the accessory carpal bone in the cats compared to the toy dogs ($p < 0.001$), and this was also shown with the highest values for the DA (Table 2). For the other six bones, the difference was only slight.

Cortical analysis

The scoring of the cortical bone revealed that the cat had a significantly more developed cortical bone (score 3) on all seven carpal bones ($p < 0.001$). It was evenly developed on each bone. In the toy dogs, on the other hand, the cortical bone was only very marginally developed in some cases and sometimes only consisted of an interrupted bone lamella (score 1). This was particularly noticeable on the dorsal surface of the intermedioradial carpal bone and on the carpal bones of the distal joint row. In the proximal joint row, with the exception of the dorsal surface of the intermedioradial carpal bone, the cortical bone was slightly more developed and consisted of a continuous bone lamella (score 2). This difference was observed in all seven carpal bones. The cortical bone was most clearly developed in both groups on the palmar surface of the intermedioradial carpal bone, where it was always normal (score 3). The accessory carpal bone also showed a clearly pronounced cortex at the attachment point of the soft tissue structures (score 3).

Table 2 Mean values and their standard deviation of bone structure parameters for both groups at all evaluated locations

Species	Parameters	Cir	Cu	Ca	CI	CII	CIII	CIV
Toy	BS/BV	20.37 ± 3.73	21.3 ± 3.58	18 ± 3.09	19.86 ± 4.07	17.81 ± 3.83	21.41 ± 3.92	19.64 ± 3.39
Cat	(mm-1)	14.6 ± 2.87	12.33 ± 2.21	13.62 ± 2.31	13.79 ± 2.27	14.49 ± 2.7	13.79 ± 2.28	13.61 ± 2.4
Toy	BV/TV	0.4 ± 0.06	0.4 ± 0.06	0.43 ± 0.07	0.46 ± 0.09	0.5 ± 0.08	0.4 ± 0.07	0.43 ± 0.07
Cat	(%)	0.46 ± 0.09	0.63 ± 0.09	0.48 ± 0.1	0.58 ± 0.12	0.55 ± 0.11	0.57 ± 0.1	0.5 ± 0.08
Toy	Conn.D	58.11 ± 22.12	60.26 ± 20.75	43.81 ± 15.52	56.95 ± 19.14	57.73 ± 23.13	59.29 ± 21.58	60.33 ± 24.24
Cat	(mm-3)	34.38 ± 19.94	32.92 ± 17.99	27.37 ± 15.35	37.16 ± 16.19	37.94 ± 14.57	36.93 ± 15.94	27.01 ± 9.24
Toy	DA	1.27 ± 0.05	1.23 ± 0.04	1.5 ± 0.12	1.44 ± 0.09	1.21 ± 0.06	1.21 ± 0.05	1.35 ± 0.07
Cat		1.22 ± 0.06	1.3 ± 0.17	1.79 ± 0.17	1.42 ± 0.14	1.31 ± 0.16	1.48 ± 0.17	1.35 ± 0.09
Toy	Tb.N	4 ± 0.34	4.18 ± 0.35	3.76 ± 0.4	4.35 ± 0.41	4.3 ± 0.39	4.11 ± 0.38	4.13 ± 0.43
Cat	(mm-1)	3.21 ± 0.34	3.78 ± 0.75	3.18 ± 0.35	3.92 ± 0.48	3.86 ± 0.47	3.82 ± 0.38	3.33 ± 0.26
Toy	Tb.Sp	0.15 ± 0.02	0.13 ± 0.02	0.16 ± 0.04	0.12 ± 0.03	0.12 ± 0.03	0.12 ± 0.03	0.14 ± 0.03
Cat	(mm)	0.17 ± 0.04	0.15 ± 0.03	0.17 ± 0.04	0.14 ± 0.04	0.13 ± 0.04	0.14 ± 0.03	0.15 ± 0.03
Toy	Tb.Th	0.1 ± 0.02	0.1 ± 0.02	0.11 ± 0.02	0.1 ± 0.02	0.12 ± 0.02	0.1 ± 0.02	0.1 ± 0.02
Cat	(mm)	0.14 ± 0.03	0.17 ± 0.03	0.15 ± 0.03	0.15 ± 0.03	0.14 ± 0.03	0.15 ± 0.02	0.15 ± 0.03

Discussion

The aim of this study was the microcomputed tomographic visualisation and evaluation of the carpal bones, as there are no descriptions of the exact trabecular and cortical structure in the currently available literature. In addition, the bony differences between canine and feline carpal bones should be worked out in order to determine whether the cat can be seen and treated as a small dog. Injuries to the carpal joint are relatively rare [10], in the cat the incidence is between 0.26% and 0.29% [11, 12]. Even though the injury rate appears to be very low, the complication rate for surgical treatment is quite high at approximately 23% to 35% [2, 13]. For this reason, the present study serves as a basic data collection, which could possibly lead to an adaptation or further development of the implants or surgical techniques currently used.

Microcomputed tomography (μ CT) was chosen as the method to determine the bony microarchitecture, which enables non-invasive three-dimensional imaging of tissue samples, while histomorphometry is based on the analysis of two-dimensional histological sections. As a result, microcomputed tomography provides a more detailed representation of the tissue structure and enables a more precise quantification of morphological parameters, which can be used to predict the mechanical competence of bones [14-17].

Due to these advantages, microcomputed tomography is not only used in bio- and human medical research, but also in veterinary medicine. Studies of the medial coronoid process of dogs suffering from medial coronoid disease (MCD) have been carried out [18-20]. Furthermore, the femoral head of dogs suffering from Legg-Calve-Perthes was examined [21]. For cats, there is a study that deals with the bony changes of the stifle joint after rupture of the cranial cruciate ligament [22]. A species comparison between dogs and cats has only been described in two studies to date. Planner, Feichtner and Meyer-Lindenberg [23] compared the antebrachium of toy breeds and cats to investigate the increased tendency of toy dogs to fracture in this area. Frei, Feichtner and Meyer-Lindenberg [24] examined acetabuli and femora of small dogs and cats to determine differences that may play a role in total hip arthroplasty. In these two studies, as in the present study, only orthopaedically healthy animals were examined, which is why a comparison with these studies is possible. In both studies, it was found that the cats had fewer trabeculae, but these were thicker and further apart than in the small dog. The values for connectivity (Conn.D) were also lower than in dogs. These characteristics were also observed in the carpus in the present study. Planner, Feichtner and Meyer-Lindenberg [23] also found higher values for the bone volume fraction and lower values for the surface volume fraction in cats, just as in the present study. These parallels between the studies show that the cat differs from dogs of the same weight class at different localisations and underline fact that the cat should not be seen as a "small dog".

The bone volume fraction (BV/TV) is a measure of the percentage of the analysed sample that is actually bone tissue. High values therefore indicate high bone density and high stability. The BV/TV is therefore one of the primary determinants of the mechanical competence of bone [25, 26]. High BV/TV values also have a good influence on primary implant stability [27]. In the present study, the cats showed significantly higher values for the BV/TV at all seven bones, with the highest values at the ulnar carpal bone.

The BS/BV describes the ratio between bone surface area and bone volume [28]. Low values indicate a lower ratio and therefore a more compact bone structure. In addition, the value is dependent on the number of trabeculae and correlates negatively with the BV/TV [21]. In the

present study, the group of cats showed significantly lower values for the BS/BV at all seven bones, again with the lowest values for the ulnar carpal bone.

The number of trabeculae (Tb.N) is an important parameter in describing the bony microarchitecture and correlates strongly with the BV/TV [28]. The number of trabeculae decreases with ageing and the occurrence of microdamage, as is the case in osteoarthritis [29, 30]. In the present study, the toy dogs had significantly more trabeculae on all seven bones than the cats. The lowest values across groups were found for the accessory carpal bone. In the cat group, it was noticeable that the ulnar carpal bone had higher values than the other two bones of the proximal joint row.

Tb.Th stands for the thickness of the trabeculae, which is directly related to the BV/TV, as this is used for the calculation [30]. The thinner the trabeculae are, the worse this is for stability [22, 25]. In our study, the cats had significantly thicker trabeculae at all locations, with the highest values at the ulnar carpal bone.

The Tb.Sp is a measure of the distance between the trabeculae in the bone tissue and correlates strongly with the stability of the bone [31]. Various diseases lead to a widening of this distance and thus to reduced stability [15, 22, 32]. The cats in this study had significantly wider trabecular distances than the toy dogs, and it was again noticeable that the ulnar carpal bone has much narrower trabecular distances than the other two bones of the proximal row.

The connectivity (Conn.D) of a bone is a measure to quantify the cross-linking of the trabeculae, but it does not allow any conclusions to be drawn about the quality of these connections [28]. Connectivity is negatively correlated with bone stability and should not be considered one of the primary determinants of bone stability [25]. In our own study, the cats showed significantly lower values at all localisations. The lowest values in both groups were localised at the accessory carpal bone.

The degree of anisotropy (DA) is a measure of the spatial arrangement of the trabeculae within the bone. According to studies by Ding, Odgaard, Danielsen and Hvid [25] and van Eijden, van der Helm, van Ruijven and Mulder [33], high values are negatively associated with the mechanical properties and fragility of bone. In this study, the cats showed higher values compared to the toy dogs, with the highest values being found at the accessory carpal bone.

The accessory carpal bone should be considered separately, as it has a different function in the carpus than the other 6 bones. As an apophysis, it is primarily orientated towards tensile loads [34]. It therefore takes only a small part in the transmission of force along the longitudinal axis of

the foreleg and therefore does not need to be as stable in all directions as the other carpal bones. Compared to the other bones, it has the fewest trabeculae (Tb.N), which are also less connected to each other (Conn.D), but arranged in one direction (DA) to withstand the tensile loads.

The ulnar carpal bone of cats should also be considered more closely. It has the highest BV/TV, correspondingly the lowest BS/BV, has the narrowest trabeculae (Tb. Sp) and the thickest trabeculae (Tb.Th) and also significantly more trabeculae than the other two bones of the proximal joint row, so it appears to be more stable than the other carpal bones. These peculiarities can be explained by the fact that the carpal joint of the cat, at approx. 115°, has a significantly greater range of pro- and supination than the dog with only approx. 50° [2, 35]. This leads to more movement and thus a greater load on the ulnar carpal bone and, according to Wolff's law [36], to functional adaptation of the bone. Because the feline carpus not only acts as a ginglymus, but also allows movement in other planes, this also has an effect on the future treatment of injuries to the carpus [37].

As mentioned above, injuries to the carpus are rare in cats, most of these injuries are the result of falls, the so-called "feline high rise syndrome" [12]. Since surgical treatment in particular is associated with increased complication rates [11], a precise selection of implants is necessary [38]. In addition to the complex anatomy, the even more complex biomechanics due to pro- and supination must also be taken into account in the cat [37]. In the present study, it was shown that all seven carpal bones have the classic cancellous structure and could therefore be included in a joint fusion. In particular, the ulnar carpal bone has been shown to be particularly stable, and should it be possible to include this bone, the rotational forces could also be counteracted. These theoretical considerations are offset by the small size of the feline carpal bones and further studies must be carried out in the future to confirm the assumptions made here.

The formation of the cortical bone has a major influence on the stability and mechanical properties of bone [39-42], and the holding force of implants is also influenced by it [43]. It can be assumed that cats need their cortical bone to be significantly stronger due to their physiological behaviour (jumping, climbing). Conversely, this also explains why the cortical bone of toy dogs is sometimes so poorly developed, as these animals are often carried by their owners and thus lack the formative stimulus on the bones. In their studies, Planner, Feichtner and Meyer-Lindenberg [23] and Frei, Feichtner and Meyer-Lindenberg [24] were also able to show that the cortical bone of the antebrachium and femora in cats is more stable than that of toy breeds.

The limitations of this study are primarily due to the partial lack of the animals' history. Primarily the age should be mentioned here, since for ethical reasons only euthanised or deceased animals

were used, it can be assumed that these were middle-aged to older. An attempt was made to examine animals between 8 and 12 years of age to minimise age-related influences, as this can have an effect on the number and thickness of trabeculae [29, 44].

Conclusions

The present study focussed on the microarchitecture of the canine and feline carpus to perform a basic anatomical evaluation and, in particular, to demonstrate differences between the two species. It could be shown that each carpal bone has the classic cancellous structure. Furthermore, the hypothesis that the bony architecture of cats and dogs of the same weight category differs was confirmed. These results should be considered in the future development of implants, especially the ulnar carpal bone, which seems to be promising due to its stability.

Declarations

Authors' contributions

L. Goldstein: Writing – original draft, Visualization, Validation, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation. A.-C. Waselau: Writing – review & editing, Validation, Supervision, Resources. Y. Zablotski: Writing – review & editing, Visualization, Validation, Methodology, Formal analysis. A. Meyer-Lindenberg: Writing – review & editing, Validation, Supervision, Resources, Project administration.

All authors have read and approved the final version of the manuscript

Acknowledgements

We would like to thank the research team at the Faculty of Veterinary Medicine of the Ludwig-Maximilians-University Munich. They supported the first author and guided him in his work with the μ CT.

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

Availability of data and materials

The datasets used and/or analysed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Consent for publication

Not applicable

Ethics approval

The Ethics Committee of the Faculty of Veterinary Medicine of the LMU reviewed and approved this study. (AZ 344-12-12-2022)

Prior publication

Data have not been published previously.

Funding

This study was funded by the Clinic for Small Animal Surgery and Reproduction, LMU, Munich

References

- [1] Nickel R, Schummer A, Seiferle E. Lehrbuch der Anatomie der Haustiere, Band 1 Bewegungsapparat. 4th ed. Parey; 2003.
- [2] Basa RM, Johnson KA. Management of feline carpal injuries: What are the options and when is arthrodesis indicated?. *J Feline Med Surg.* 2019;21:809-823.
- [3] Buote NJ, McDonald D, Radasch R. Pancarpal and partial carpal arthrodesis. *Compend Contin Educ Vet.* 2009;31:180-91.
- [4] Renner C, Medl N. Multi-ligamentous injury of the carpus with dislocation of the ulnar styloid in a dog. *Vet Rec Case Rep.* 2021;9:154.
- [5] Chandler JC, Beale BS. Feline orthopedics. *Clin Tech Small Anim Pract.* 2002;17:190-203.
- [6] Scott H, McLaughlin R. Feline orthopedics. CRC Press. 2006.
- [7] Basa RM, Canfield PJ, Walsh WR, Johnson KA. Anatomy of the distal radioulnar ligament in cats. *J Feline Med Surg.* 2023;25; doi: [10.1177/1098612X221149382](https://doi.org/10.1177/1098612X221149382)
- [8] Voss K, Geyer H, Montavon PM. Antebrachiocarpal luxation in a cat. *VCOT.* 2003;16:266 - 70.
- [9] Kim Y, Brodt MD, Tang SY, Silva MJ. MicroCT for Scanning and Analysis of Mouse Bones. *Methods Mol Biol.* 2021;2230:169-198.
- [10] Campbell JR. Carpal injuries. *J Small Anim Pract.* 1976;17:179-82.
- [11] Merbl Y, Milgram J, Moed Y, Bibring U, Peery D, Aroch I. Epidemiological, Clinical and Hematological Findings in Feline High Rise Syndrome in Israel: A Retrospective Case-Controlled Study of 107 Cats. *Isr J Vet Med.* 2013;68:28-37.
- [12] Nakladal B, vom Hagen F, Brunenberg M, Gross M, Nietz H, Brunenberg L. Carpal joint injuries in cats - an epidemiological study. *VCOT.* 2013;26:333-9.

- [13] Clarke SP, Ferguson JF, Miller A. Clinical evaluation of pancarpal arthrodesis using a CastLess plate in 11 dogs. *Vet Surg.* 2009;38:852-60.
- [14] David V, Laroche N, Boudignon B, Lafage-Proust MH, Alexandre C, Ruegsegger P, et al. Noninvasive In Vivo Monitoring of Bone Architecture Alterations in Hindlimb-Unloaded Female Rats Using Novel Three-Dimensional Microcomputed Tomography. *JBMR.* 2003;18:1622-1631.
- [15] Ito M, Nakamura T, Matsumoto T, Tsurusaki K, Hayashi K. Analysis of trabecular microarchitecture of human iliac bone using microcomputed tomography in patients with hip arthrosis with or without vertebral fracture. *Bone.* 1998;23:163-9.
- [16] Ulrich D, Hildebrand T, Van Rietbergen B, Müller R, Rügsegger P. The quality of trabecular bone evaluated with micro-computed tomography, FEA and mechanical testing. *Stud Health Technol Inform.* 1997;40:97-112.
- [17] Van Rietbergen B, Odgaard A, Kabel J, Huiskes R. Relationships between bone morphology and bone elastic properties can be accurately quantified using high-resolution computer reconstructions. *J Orthop Res.* 1998;16:23-8.
- [18] Lau SF, Wolschrijn CF, Siebelt M, Vernooij JC, Voorhout G, Hazewinkel HA. Assessment of articular cartilage and subchondral bone using EPIC-microCT in Labrador retrievers with incipient medial coronoid disease. *Vet J.* 2013;198:116-21.
- [19] Fitzpatrick N, Garcia TV, Daryani A, Bertran J, Watari S, Hayashi K. Micro-CT Structural Analysis of the Canine Medial Coronoid Disease. *Vet Surg.* 2016;45:336-46.
- [20] Glück T, Zablotski Y, Meyer-Lindenberg A. Microcomputed tomographic analysis of the ulnar trochlear notch in medium- and large-breed canine cadavers with and without medial coronoid disease. *Res Vet Sci.* 2024;166:105108.
- [21] Scherzer C, Windhagen H, Nellesen J, Crostack HA, Rohn K, Witte F, et al. Comparative structural analysis of the canine femoral head in Legg-Calvé-Perthes disease. *Vet Radiol Ultrasound.* 2009;50:404-11.
- [22] Boyd SK, Müller R, Leonard T, Herzog W. Long-term periarticular bone adaptation in a feline knee injury model for post-traumatic experimental osteoarthritis. *Osteoarthr Cartil.* 2005;13:235-42.
- [23] Planner F, Feichtner F, Meyer-Lindenberg A. The cat as a small dog?-Comparison of trabecular and cortical bone microarchitecture of radius and ulna in cats and small dogs using microcomputed tomography. *Vet Med Sci.* 2021;7:2113-2119.
- [24] Frei J, Feichtner F, Meyer-Lindenberg A. Microcomputed tomographic analysis of the trabecular and cortical architecture of the proximal femur and hip bone of cats and small breed dogs *Res Vet Sci.* 2025;185:105531.

- [25] Ding M, Odgaard A, Danielsen CC, Hvid I. Mutual associations among microstructural, physical and mechanical properties of human cancellous bone. *J Bone Joint Surg Br.* 2002;84:900-7.
- [26] Pothuau L, Van Rietbergen B, Mosekilde L, Beuf O, Levitz P, Benhamou CL, et al. Combination of topological parameters and bone volume fraction better predicts the mechanical properties of trabecular bone. *J Biomech.* 2002;35:1091-9.
- [27] Kang SR, Bok SC, Choi SC, Lee SS, Heo MS, Huh KH, et al. The relationship between dental implant stability and trabecular bone structure using cone-beam computed tomography. *J Periodontal Implant Sci.* 2016;46:116-27.
- [28] Goulet RW, Goldstein SA, Ciarelli MJ, Kuhn JL, Brown MB, Feldkamp LA. The relationship between the structural and orthogonal compressive properties of trabecular bone. *J Biomech.* 1994;27:375-89.
- [29] Parfitt AM, Mathews CH, Villanueva AR, Kleerekoper M, Frame B, Rao DS. Relationships between surface, volume, and thickness of iliac trabecular bone in aging and in osteoporosis. Implications for the microanatomic and cellular mechanisms of bone loss. *J Clin Invest.* 1983;72:1396-409.
- [30] Hildebrand T, Laib A, Müller R, Dequeker J, Rügsegger P. Direct three-dimensional morphometric analysis of human cancellous bone: microstructural data from spine, femur, iliac crest, and calcaneus. *J Bone Miner Res.* 1999;14:1167-74.
- [31] Ito M, Ohki M, Hayashi K, Yamada M, Uetani M, Nakamura T. Trabecular texture analysis of CT images in the relationship with spinal fracture. *Radiology.* 1995;194:55-9.
- [32] Arlot ME, Burt-Pichat B, Roux JP, Vashishth D, Bouxsein ML, Delmas PD. Microarchitecture influences microdamage accumulation in human vertebral trabecular bone. *J Bone Miner Res.* 2008;23:1613-8.
- [33] van Eijden TM, van der Helm PN, van Ruijven LJ, Mulder L. Structural and mechanical properties of mandibular condylar bone. *J Dent Res.* 2006;85:33-7.
- [34] Evans HE, de Lahunta A. *Miller's Anatomy of the Dog.* 4th ed. Saunders;2012.
- [35] Roos H, Brugger S, Rauscher T. The biological valence of the motion in the radioulnar joints of the cat and dog. *Anat Histol Embryol.* 1992;21:199-205.
- [36] Wolff J. Ueber die innere Architectur der Knochen und ihre Bedeutung für die Frage vom Knochenwachstum. *Archiv für pathologische Anatomie und Physiologie und für klinische Medicin.* 1870; 50:389-450.
- [37] Basa RM, Parr WCH, Tan CJ, Walsh WR, Johnson KA. Kinematics of the Feline Antebrachiocarpal Joint from Supination to Pronation. *VCOT.* 2021;34:115-123.

- [38] Chapman JR, Harrington RM, Lee KM, Anderson PA, Tencer AF, Kowalski D. Factors affecting the pullout strength of cancellous bone screws. *J Biomech Eng.* 1996;118:391-8.
- [39] Lochmüller EM, Bürklein D, Kuhn V, Glaser C, Müller R, Glüer CC, et al. Mechanical strength of the thoracolumbar spine in the elderly: prediction from in situ dual-energy X-ray absorptiometry, quantitative computed tomography (QCT), upper and lower limb peripheral QCT, and quantitative ultrasound. *Bone.* 2002;31:77-84.
- [40] Lochmüller EM, Pöschl K, Würstlin L, Matsuura M, Müller R, Link TM, et al. Does thoracic or lumbar spine bone architecture predict vertebral failure strength more accurately than density?. *Osteoporos Int.* 2008;19:537-45.
- [41] Eckstein F, Fischbeck M, Kuhn V, Link TM, Priemel M, Lochmüller EM. Determinants and heterogeneity of mechanical competence throughout the thoracolumbar spine of elderly women and men. *Bone.* 2004;35:364-74.
- [42] Fonseca H, Moreira-Gonçalves D, Coriolano HJ, Duarte JA. Bone quality: the determinants of bone strength and fragility. *Sports Med.* 2014;44:37-53.
- [43] Seebeck J, Goldhahn J, Morlock MM, Schneider E. Mechanical behavior of screws in normal and osteoporotic bone. *Osteoporos Int.* 2005;16 Suppl 2:107-11.
- [44] Bergot C, Laval-Jeantet AM, Prêteux F, Meunier A. Measurement of anisotropic vertebral trabecular bone loss during aging by quantitative image analysis. *Calcif Tissue Int.* 1988;43:143-9.

5. Diskussion

In der bislang verfügbaren veterinärmedizinischen Fachliteratur finden sich keine detaillierten Untersuchungen zur trabekulären und kortikalen Struktur der Karpalgelenksknochen bei Hund und Katze. Ein fundiertes Verständnis der Mikroarchitektur ist jedoch von großer Bedeutung, insbesondere im Hinblick auf die Entwicklung geeigneter Implantate sowie die chirurgische Versorgung von Verletzungen in diesem Bereich. Ziel der vorliegenden Studie war es daher, die Mikrostruktur der Karpalknochen systematisch zu analysieren und somit eine bestehende Wissenslücke zu schließen. Es wurden Karpalgelenke gesunder Hunde und Katzen verwendet, um neben den anatomischen Strukturen auch eventuelle Rasseunterschiede, sowie Unterschiede zwischen den beiden Spezies Hund und Katze zu detektieren. Dies wird in der gängigen Literatur häufig vernachlässigt (Chandler und Beale 2002; Scott und McLaughlin 2006). Insgesamt wurden in der vorliegenden Untersuchung die Karpalgelenke von 120 Tieren untersucht, dies ist im Vergleich zu den vorwiegend in der Humanmedizin durchgeführten Studien eine sehr hohe Probenzahl und liefert somit eine verlässliche Datengrundlage.

Für die Analyse der ossären Strukturen der Karpalgelenksknochen wurde die Mikro-Computertomographie gewählt, da sie als Goldstandard zur drei-dimensionalen Darstellung der knöchernen Morphologie gilt (Kim et al. 2021; Scherzer et al. 2009). Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass es nicht destruktiv ist und zudem eine drei-dimensionale Rekonstruktion der untersuchten Probe erlaubt (David et al. 2003; Ito et al. 1998; Müller et al. 1998; Nägele et al. 2004; Scherzer et al. 2009), was bei der klassisch angewandten Histomorphometrie nicht möglich ist. Hierdurch lässt sich eine sehr präzise Quantifizierung der morphologischen Parameter erzielen, was für die Vorhersage der mechanischen Kompetenz von großer Bedeutung ist (Ulrich et al. 1999; Van Rietbergen et al. 1998). Beim Menschen wurde nachgewiesen, dass die Mikrostruktur des Knochens die Vorhersage seiner mechanischen Kompetenz deutlich verbessert (Arlot et al. 2008;

Goulet et al. 1994; Pistoia et al. 2002; Ulrich et al. 1997; Ulrich et al. 1999; Van Rietbergen et al. 1998).

Die Erkenntnisse aus der Humanmedizin führten dazu, dass die Mikro-Computertomographie auch Anwendung in der Veterinärmedizin gefunden hat. Fitzpatrick et al. (2016) untersuchten die knöchernen Veränderungen am Processus coronoideus medialis bei Hunden mit medial-coronoid disease (MCD). Scherzer et al. (2009) befassten sich mit den Femurköpfen von Hunden, die an Legg-Calve-Perthes erkrankt waren. Boyd et al. (2005) verglichen in einer Studie die knöchernen Veränderungen der proximalen Tibia bei Katzen nach Riss des vorderen Kreuzbandes im Langzeitvergleich. Alle drei Studien konnten zeigen, dass pathologische Prozesse mit signifikanten Veränderungen der trabekulären Knochenstruktur einhergehen.

Im Gegensatz zur hier vorliegenden Arbeit, die sich mit orthopädisch gesunden Tieren befasst, wurden in diesen Studien pathologische Vorgänge untersucht. Auch andere Studien haben sich mit der Untersuchung gesunder Tiere beschäftigt. So wurden in einer Studie die Antebrachia von Toy-Rassen und kleinen Hunden verglichen (Planner et al. 2021b), in einer weiteren Studie die Antebrachia von Toy-Rassen und Katzen (Planner et al. 2021a) und in einer anderen Studie die Hüftgelenke von kleinen Hunden und Katzen (Frei et al. 2025). Die Autoren konnten Unterschiede sowohl zwischen verschiedenen Rassen als auch zwischen Hunden und Katzen feststellen. Es konnte gezeigt werden, dass die Katzen weniger Trabekel besitzen, diese sind aber dicker und weiter voneinander entfernt als beim kleinen Hund. Ebenfalls waren die Werte für die Konnektivität (Conn.D) geringer als beim Hund (Frei et al. 2025; Planner et al. 2021a). Diese Besonderheiten konnten auch in der vorliegenden Studie beim Karpus festgestellt werden (Goldstein et al. 2025). Planner et al. (2021a) konnten zusätzlich, genau wie in der vorliegenden Arbeit, höhere Werte für den Knochenvolumenanteil und niedrigere Werte für den Oberflächenvolumenanteil bei den Katzen feststellen. Der Vergleich zwischen Toy-Rassen und kleinen Hunden von Planner et al. (2021b) zeigte, dass sich Hunde unterschiedlicher Größe voneinander unterscheiden. Diese Ergebnisse stimmen mit denen der eigenen Untersuchungen

überein (Goldstein et al. 2025). Zusätzlich konnte auch die gesonderte Stellung des Chihuahuas reproduziert werden, dessen Knochen eine deutlich herabgesetzte Stabilität im Vergleich zu anderen Toy-Rassen aufweisen (Goldstein et al. 2025; Planner et al. 2021b). In einer anderen Studie wurden der erste und zweite Lendenwirbel von kastrierten und intakten Hündinnen analysiert, um zu untersuchen, ob auch Hündinnen nach Kastration potentiell anfällig für Osteoporose sind (Kostenko et al. 2023). Aufgrund der kleinen Studienpopulation (n=5) konnten aber keine aussagekräftigen Daten gewonnen werden und die Autoren halten deshalb weitere Untersuchungen für nötig. Diese Studien zeigen, dass auch beim Hund und der Katze großes Interesse an diesem Untersuchungsverfahren in Bezug auf die Qualität und Veränderungen des Knochens herrscht. Auch die eigene Untersuchung zeigte eindeutige Abweichungen zwischen den Gruppen. Dies verdeutlicht, dass bei der chirurgischen Versorgung von Karpalgelenkstraumata nicht nur die komplexe Anatomie des Gelenks berücksichtigt werden muss, sondern auch die variierenden kortikalen und trabekulären Knochenstrukturen sowie rassespezifische Unterschiede.

In der Humanmedizin liegen verschiedene Studien vor, die sich mit den Veränderungen der trabekulären Architektur im Bereich des Karpalgelenkes befassen. Ziel dieser Arbeiten war es unter anderem, ein tieferes Verständnis für Erkrankungen wie die Arthrose des Daumensattelgelenks zu gewinnen (Lee et al. 2013; Nufer et al. 2008). Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde das *Os trapezium* betrachtet, welches beim Tiere dem *Os carpal primum* entspricht (Nickel et al. 2004). Dieser Knochen artikuliert beim Menschen direkt mit dem Daumen und ist somit komplett anderen Belastungen ausgesetzt als bei Hund und Katze. Hier dient der Karpus primär der Fortbewegung und trägt während der vollen Belastung, beispielsweise beim Hund, jeweils mindestens 30 % des Körpergewichts (Budsberg et al. 1987). Lee et al. (2013) wiesen beim Menschen nach, dass sich die Strukturparameter innerhalb eines einzelnen Knochens in Abhängigkeit von der lokal wirkenden mechanischen Belastung verändern. In stark beanspruchten Arealen erreichten die Parameter BV/TV und Tb.N die höchsten Werte.

Überträgt man diese Annahme auf die vorliegende Untersuchung, so fällt beim Hund auf, dass nicht wie vermutet das *Os carpi intermedioradiale* als größter Karpalknochen, sondern das darunterliegende *Os carpale secundum* die höchsten Werte für BV/TV und Tb.N aufweist (Goldstein et al. 2025). Dies lässt darauf schließen, dass sich beim Hund die Kraftübertragung des *Os carpi intermedioradiale* auf das *Os carpale secundum* konzentriert. Wendet man die Erkenntnisse von Lee et al. (2013) auf die Katze an, so wird deutlich, dass hier das *Os carpi ulnare* heraussticht.

Der Anteil des Knochenvolumens am Gesamtvolumen (BV/TV) hat einen entscheidenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften spongiösen Knochens und zählt zu den wichtigsten Faktoren, die die maximale Belastbarkeit bestimmen (Ding et al. 2002; Pothuau et al. 2002). Darüber hinaus besteht ein enger Zusammenhang zwischen BV/TV und weiteren Strukturparametern wie der Anzahl (Tb.N), Dicke (Tb.Th) sowie der Konnektivität (Conn.D) der Trabekel (Goulet et al. 1994; Hildebrand et al. 1999). Gemäß Arlot et al. (2008) sind beim Menschen geringere Werte für BV/TV häufig mit dem Auftreten mikroskopischer Knochenschäden verbunden. Kang et al. (2016) konnten zudem zeigen, dass hohe Werte für BV/TV beim Menschen eine zuverlässige Grundlage für die primäre Stabilität von Implantaten darstellen. In der eigenen Studie unterschieden sich die Werte der Toy-Rassen und der mittelgroßen Hunde nur geringfügig (Goldstein et al. 2025). Die Katzen hatten an allen sieben Karpalknochen signifikant höhere Werte als die Toy-Rassen, am höchsten waren die Werte des *Os carpi ulnare*.

Das Verhältnis zwischen der trabekulären Oberfläche und dem Volumen des trabekulären Knochens wird durch den Oberflächenvolumenanteil (BS/BV) beschrieben (Goulet et al. 1994). Dieser Parameter hängt von der Anzahl der Trabekel ab und zeigt eine negative Korrelation zum BV/TV (Scherzer et al. 2009). Niedrige Werte lassen daher auf eine kompaktere Knochenstruktur schließen, was mit einer gesteigerten Stabilität verbunden ist. In der eigenen Untersuchung hatten die Toy Rassen signifikant niedrigere Werte als die mittelgroßen Hunde und die Katzen signifikant niedrigere Werte als die Toy Rassen (Goldstein et al. 2025). Die Tatsache, dass das Os

carpale secundum auch hier in beiden Hunde Gruppen die niedrigsten Werte aufweist, stützt die These, dass es besonders stabil ist. Das *Os carpi ulnare* der Katzen hatte die niedrigsten Werte und zeigt wieder, dass dieser Knochen bei den Katzen sehr stabil ist.

Die Anzahl (Tb.N), Dicke (Tb.Th) und der Abstand (Tb.Sp) der Trabekel stehen in engem Zusammenhang mit der Stabilität des Knochens. Eine geringe Trabekelanzahl und -dicke sowie große Abstände zwischen den Trabekeln wirken sich negativ auf die Stabilität und die primäre Haltekraft von Implantaten aus (Arlot et al. 2008; Boyd et al. 2005; Ito et al. 1998; Kang et al. 2016). In der eigenen Studie hatten die mittelgroßen Hunde signifikant mehr Trabekel in jedem Knochen als die Toy Hunde, dafür waren diese bei den mittelgroßen Hunden aber signifikant dünner. Der Abstand der Trabekel zueinander wies keinen großen Unterschied zwischen den beiden Gruppen auf. Auch bei der Trabekeldicke und Trabekelanzahl hatte das *Os carpale secundum* die höchsten Werte sowie für den Trabekelabstand die niedrigsten Werte von alle sieben Knochen (Goldstein et al. 2025). Auch dies spricht für die erhöhte Stabilität dieses Knochens. Die Katzen wiesen im Vergleich zu den Toy Rassen signifikant weniger Trabekel auf, dafür waren diese signifikant dicker und signifikant weiter voneinander entfernt. Erneut fiel in der Gruppe der Katzen auf, dass das *Os carpi ulnare* mehr Trabekel aufweist als die anderen beiden Knochen der proximalen Gelenketape, zusätzlich sind diese am engsten angeordnet und am dicksten im Vergleich zu den anderen sechs Knochen.

Der Vernetzungsgrad des trabekulären Knochens (Conn.D) gibt Aufschluss über die Quantität der vorhandenen Trabekelverbindungen, erlaubt jedoch keine Aussage über deren Qualität (Goulet et al. 1994). Zudem besteht zwischen der Konnektivität und der mechanischen Versagenslast des Knochens eine negative Korrelation (Ding et al. 2002). In der eigenen Studie hatten die mittelgroßen Hunde an allen Knochen signifikant höhere Werte für Conn.D als die Toy Rassen (Goldstein et al. 2025). Zudem wiesen die mittelgroßen Hunde eine weitaus höhere Streuung der Werte im Vergleich zu den Toy Rassen auf. Dies ist dadurch zu erklären, dass der Gewichtsunterschied der einzelnen Hunde in dieser Gruppe deutlich größer war als in der Gruppe

der Toy Rassen (Goldstein et al. 2025). Die Katzen hatten an allen Lokalisationen signifikant geringere Werte als die Toy Rassen. Die niedrigsten Werte waren jeweils am *Os carpi accessorium* lokalisiert. Auch in den Studien von Frei et al. (2025) und Planner et al. (2021a) hatten die Katzen niedrigere Werte für die Konnektivität als die Toy Rassen und kleinen Hunde.

Die Ausrichtung der Trabekel im Knochen wird durch den Grad der Anisotropie (DA) beschrieben. Hohe Werte wirken sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften und die Fragilität des Knochens aus (Ding et al. 2002; van Eijden et al. 2006). Die Toy Rassen präsentierten sich in der eigenen Studie mit signifikant höheren Werten im Vergleich zur Gruppe der mittelgroßen Hunde (Goldstein et al. 2025). Die niedrigeren Werte für Conn.D und die erhöhten Werte für DA bei Toy-Rassen deuten darauf hin, dass deren Trabekel weniger Querverbindungen besitzen und überwiegend einheitlich ausgerichtet sind. Dies lässt auf einen geringeren formativen Stimulus durch reduzierte mechanische Belastung schließen (Wolff 1870). Die Katzen wiesen in dieser Studie im Schnitt höhere Werte auf im Vergleich zu den Toy Rassen, die deutlich höchsten Werte konnten am *Os carpi accessorium* nachgewiesen werden.

Das *Os carpi accessorium* sollte nochmals gesondert betrachtet werden, da es als Apophyse auf Zugbelastungen ausgerichtet ist und damit im Gegensatz zu den übrigen sechs Karpalknochen eine andere Funktion innerhalb des Gelenks übernimmt (Evans und de Lahunta 2012). In der eigenen Studie besaß dieser Knochen im Vergleich zu den anderen Knochen die niedrigste Anzahl an Trabekeln mit sehr weitem Abstand, zudem wiesen diese untereinander weniger Verzweigungen (Conn.D) auf als die Trabekel der anderen Knochen (Goldstein et al. 2025). Dies ist darauf zurückzuführen, dass das *Os carpi accessorium* nur in geringem Maß an der Kraftübertragung entlang der Längsachse des Vorderbeins beteiligt ist und daher keine gleichmäßige Stabilität in alle Richtungen aufweisen muss. Auffallend ist in diesem Zusammenhang jedoch sein hoher Grad der Anisotropie (DA), der darauf hinweist, dass die Trabekel überwiegend in einer Richtung ausgerichtet sind, um den auftretenden Zugkräften optimal entgegenzuwirken.

Ebenfalls genauer betrachtet werden sollte das *Os carpi ulnare* der Katzen. Es besaß in der eigenen Studie den höchsten BV/TV, korrespondierend den niedrigsten BS/BV, die engsten Trabekel (Tb. Sp) und die dicksten Trabekel (Tb.Th) sowie zusätzlich deutlich mehr Trabekel als die beiden anderen Knochen der proximalen Gelenkreihe. Es scheint also stabiler als die anderen Karpalknochen zu sein. Die Unterschiede lassen sich dadurch erklären, dass das Karpalgelenk der Katze mit rund 115° einen deutlich größeren Bewegungsumfang in Pro- und Supination besitzt als das des Hundes, das nur etwa 50° erreicht (Basa und Johnson 2019; Roos et al. 1992). Dies führt zu mehr Bewegung und somit einer größeren Belastung des *Os carpi ulnare*, was gemäß dem Wolff'schen Gesetz (Wolff 1870) eine funktionelle Anpassung des Knochens nach sich zieht. Da der Karpus der Katze nicht ausschließlich als Scharniergelenk fungiert, sondern auch Bewegungen in weiteren Ebenen zulässt, ergeben sich daraus wichtige Implikationen für die zukünftige Behandlung von Verletzungen in diesem Bereich (Basa et al. 2021).

Die Dicke der Kortex unterschied sich innerhalb eines Karpalknochens in der eigenen Studie nicht. Dies galt für alle Karpalknochen aller Gruppen (Goldstein et al. 2025). Deutlich war der Unterschied aber zwischen den Gruppen. Die Gruppe der mittelgroßen Hunde hatte eine deutlich dicker ausgebildete Kortex als die Gruppe der Toy Rassen (Goldstein et al. 2025). Ebenso hatten die Katzen eine deutlich besser ausgebildete Kortex als die Toy-Rassen. Bei der Gruppe der Toy Rassen war diese an allen Knochen nur sehr schwach ausgebildet und bestand teilweise nur aus einer unterbrochenen Knochenlamelle. Mehrere humanmedizinische Untersuchungen zeigen, dass die Ausprägung der Kortikalis maßgeblich die Stabilität und die Versagenslast von Knochen beeinflusst (Eckstein et al. 2004; Lochmüller et al. 2002; Lochmüller et al. 2008). Besonders die Dicke der Kortikalis spielt hierbei eine zentrale Rolle sowohl für die Stabilität (Fonseca et al. 2014) als auch für die Haltekraft von Implantaten (Seebeck et al. 2005). Da in der vorliegenden Studie deutliche Unterschiede in der Ausprägung der Kortikalis zwischen den untersuchten Gruppen festgestellt wurden, liegt die Annahme nahe, dass Faktoren wie ein höheres Körpergewicht, die daraus resultierende stärkere Belastung sowie der größere Bewegungsumfang bei größeren

Hunden erheblichen Einfluss auf diese Struktur haben. Bei Katzen ist vermutlich ihr arttypisches Verhalten, wie Springen und Klettern, ausschlaggebend. Hervorzuheben ist zudem, dass das *Os carpi accessorium* am Ansatzbereich der Weichteilstrukturen eine stark ausgeprägte Kortikalis aufweist, um ausreichend Ansatzfläche zu bieten und den dort wirkenden Zugkräften standhalten zu können. An der kaudalen Fläche des *Os carpi intermedioradiale* dürfte die verstärkte Kortikalis vor allem auf die erhöhte Belastung durch die benachbarten Sehnen der langen Zehenmuskulatur zurückzuführen sein. Auch Planner et al. (2021a) und Frei et al. (2025) konnten in ihren Studien zeigen, dass die Kortikalis des Antebrachiums und der Femora bei der Katze eine höhere Stabilität hat als die der Toy-Rassen.

Unter den Toy Rassen der eigenen Studie war der Chihuahua die herausstechende Rasse. Der Chihuahua unterschied sich bei fast allen gemessenen Strukturparametern von den anderen Hunden der Toy Rassen an allen sieben Karpalknochen. Neben einem erniedrigten BV/TV und erhöhten BS/BV, wies diese Rasse weniger, dünnere Trabekel mit größerem Abstand auf (Goldstein et al. 2025). Dies weist darauf hin, dass die Karpalknochen dieser Rasse im Vergleich zur restlichen Gruppe eine geringere Stabilität aufweisen. Auch Planner et al. (2021b) konnten in ihrer Studie veränderte Parameter im Vergleich zu anderen kleinen Hunden und Toy Rassen für den Chihuahua nachweisen. Die Ursache für diese Besonderheiten konnte in der vorliegenden Studie nicht eindeutig geklärt werden. Eine mögliche Erklärung wäre, dass der Chihuahua, als weltweit kleinste von der FCI anerkannte Hunderasse, durch das häufige Tragen durch seine Besitzer einem geringeren mechanischen Reiz auf die Knochen ausgesetzt ist, wodurch sich strukturelle Unterschiede entwickelt haben könnten.

Die operative Behandlung von Verletzungen des Karpalgelenks, insbesondere durch Arthrodesen, ist mit hohen Komplikationsraten von bis zu 50 % verbunden (Arnott et al. 2008; Merbl et al. 2013; Michal et al. 2003). Die meisten dieser Komplikationen treten aufgrund der eingesetzten Implantate auf (Buote et al. 2009), vor allem ist hier Schraubenlockerung und Implantatversagen zu nennen. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass sich die Knochenarchitektur

zwischen Hunden unterschiedlicher Größe und Katzen durchaus unterscheidet. Neben der bereits beschriebenen Bedeutung der Kortikalis für die Verankerungskraft von Implantaten spielt auch die Struktur des Trabekelnetzwerks eine wesentliche Rolle (Wirth et al. 2011). Hier hängt die Stabilität der Implantate von der Kontaktfläche zum trabekulären Knochen ab, welche in der Regel recht gering ist (Joffre et al. 2017). Aufgrund dessen bedarf es einer äußerst präzisen Auswahl der eingesetzten Implantate (Chapman et al. 1996). Die Analyse der vorliegenden Daten zeigt, dass alle sieben Karpalknochen spongiösen Aufbau besitzen und somit grundsätzlich in eine Versteifung einbezogen werden können. Besonders das *Os carpale secundum* des Hundes, welches besonders stabil zu sein scheint, könnte bei der Versteifung berücksichtigt werden, um eine zusätzliche Schraube in der distalen Gelenksreihe zu platzieren und dadurch eine stabilere Fixation zu erzielen. Bisher findet sich in der Literatur lediglich eine Arbeit, die ein Implantat beschreibt, das neben dem *Os carpi intermedioradiale* auch das *Os carpi ulnare* in die Stabilisierung einbezieht (Burton et al. 2013). Diese experimentelle Studie konnte zeigen, dass dadurch interkarpale und carpometakarpale Mikrobewegungen reduziert werden und eine weiter distal gelegene Plattenpositionierung möglich ist, wodurch das Risiko eines Impingements verringert wird. In zukünftigen Studien sollten hier weitere Möglichkeiten evaluiert werden.

Bei der Katze sind Verletzungen des Karpus seltener und meist die Folge von Stürzen (Nakladal et al. 2013). Zusätzlich zur komplexen Anatomie ist bei Katzen im Rahmen der Arthrodesen auch die noch komplexere Biomechanik aufgrund von Pro- und Supination zu beachten (Basa et al. 2021). Gerade das *Os carpi ulnare*, welches sich in der vorliegenden Studie als besonders stabil erwiesen hat, sollte es möglich sein, diesen Knochen bei Arthrodesen mit einzubeziehen, könnte auch den Rotationskräften entgegenwirken. Aufgrund der geringen Größe der felinen Karpalknochen sind aber weitere Studien nötig, um die vorliegenden Annahmen zu bestätigen.

Die Limitationen dieser Studie sind in erster Linie durch das teilweise unvollständige Signalement der Tiere begründet. Primär ist hier das Alter zu erwähnen. Da aus ethischen Gründen ausschließlich euthanasierte oder verstorbene Tiere verwendet wurden, ist davon auszugehen,

dass es sich überwiegend um Tiere mittleren bis höheren Alters handelte. Es wurde angestrebt Tiere zwischen acht und zwölf Jahren zu untersuchen, um altersbedingte Einflüsse zu minimieren, da dies Auswirkungen auf Trabekelanzahl und Dicke haben kann (Cunningham et al. 2018; Parfitt et al. 1983).

6. Zusammenfassung

Verletzungen des Karpalgelenkes sind sowohl beim Hund als auch bei der Katze relativ selten, dennoch ist die Komplikationsrate bei der chirurgischen Versorgung, vor allem bei einer Teil- oder Panarthrodese mit bis zu 50% sehr hoch. Um die chirurgische Versorgung solcher Verletzungen zu verbessern, war es Ziel der vorliegenden Untersuchung das aktuelle Wissen über die Architektur der Karpalgelenksknochen bei Hund und Katze zu verbessern.

Hierzu wurden in der vorliegenden Arbeit orthopädisch gesunde Hunde und Katzen unterschiedlichen Alters untersucht, um eine Normwerterhebung der sieben Karpalknochen durchzuführen, da dies in der zugänglichen Literatur bisher nicht existiert. Zudem sollte untersucht werden, ob es Rasseunterschiede zwischen Toy-Rassen, mittelgroßen Hunden und Katzen gibt. Die Tiere wurden in drei Gruppen unterteilt, die Toy Rassen (n=20), die mittelgroßen Hunde (n=20) und die Katzen (n=20). Somit wurden gruppenübergreifend insgesamt 120 Karpalgelenke untersucht.

Die Gelenke wurden mikrocomputertomographisch untersucht und jeder einzelne Karpalknochen als ROI (Region of Interest) definiert. Im Anschluss an die Untersuchung, wurde jeder Scan einzeln ausgewertet. Darauf aufbauend wurden die Strukturparameter Knochenvolumenanteil (BV/TV), Oberflächenvolumenanteil (BS/BV), Trabekelanzahl (Tb.N), Trabekeldicke (Tb.Th), Trabekelabstand (Tb.Sp), Konnektivität (Conn.D) und der Grad der Anisotropie (DA) bestimmt. Zusätzlich wurde die Ausprägung der knöchernen Kortex anhand eines drei-stufigen Scoring-Systems klassifiziert. Dies wurde für jeden Karpalknochen einzeln durchgeführt.

Es konnte gezeigt werden, dass alle Karpalknochen, unabhängig von ihrer Größe, den klassisch spongiösen Aufbau besitzen.

Beim Vergleich der Toy Rassen und mittelgroßen Hunde fiel auf, dass die Toy Rassen höhere Werte für BS/BV, Tb.Th, Conn.D und DA besitzen, sowie niedrigere Werte für Tb.N. Die Werte für BV/TV und Tb.Sp waren ausgeglichen. Zudem wies das *Os carpal secundum* gruppenübergreifend die niedrigsten Werte für BS/BV und Tb.Sp und die höchsten Werte für Tb.Th und Tb.N auf. Dies lässt darauf schließen, dass es besonders stabil ist. Eine Besonderheit unter den Toy-Rassen zeigte der Chihuahua mit sehr geringen Werten für BV/TV, Tb.N und Tb.Th, sowie hohen Werten für BS/BV und Tb.Sp, was auf eine deutlich verminderte Stabilität der Karpalknochen hinweist.

Beim Vergleich der Toy Rassen mit den Katzen fiel auf, dass sich die knöchernerne Architektur von Hunden und Katzen der gleichen Gewichtskategorie deutlich unterscheidet, die Katzen hatten höhere Werte für BV/TV, Tb.Th und Tb.Sp, sowie niedrigere Werte für BS/BV, Tb.N und Conn.D. Beim DA waren die Werte ausgeglichen. Bei den Katzen stach das *Os carpi ulnare* heraus, dies hatte innerhalb der Gruppe die höchsten Werte für BV/TV, Tb.N und Tb.Th, sowie die niedrigsten Werte für BS/BV und Tb.Sp, dies lässt wiederum auf eine hohe Stabilität schließen.

Die Ausprägung der Kortikalis unterschied sich zwischen den Gruppen stark, während die mittelgroßen Hunde und die Katzen eine normal ausgeprägte Kortikalis besitzen, stellt sich diese bei den Toy Rassen teilweise nur als eine unterbrochene Knochenlamelle dar.

7. Summary

Although carpal joint injuries are relatively rare, occurring in cats at a frequency of 0.26-0.29% and even less frequently in dogs, surgical treatment carries a high complication rate, reaching up to 50%, particularly in partial or panarthrodesis. To improve the surgical treatment of such injuries, the present study aimed to expand current knowledge about the architecture of the carpal joint in dogs and cats.

Orthopedically healthy dogs and cats of different ages were examined in the present study to establish normal values for the seven carpal bones, as this has not yet been done in the available literature. In addition, the study aimed to investigate whether there are breed differences between toy breeds, medium-sized dogs, and cats. The animals were divided into three groups: toy breeds (n=20), medium-sized dogs (n=20), and cats (n=20). A total of 120 carpal joints were examined across all groups.

The joints were examined using microcomputed tomography with each individual carpal bone defined as a ROI (region of interest). Following the tomography, each scan was evaluated individually. Based on this, the structural parameters bone volume fraction (BV/TV), surface volume fraction (BS/BV), trabecular number (Tb.N), trabecular thickness (Tb.Th), trabecular spacing (Tb.Sp), connectivity density (Conn.D), and degree of anisotropy (DA) were assessed. In addition, cortical development was classified using a three-stage scoring system. This was done individually for each carpal bone.

It was shown that all carpal bones, no matter how small, have the classic spongy structure.

When comparing toy breeds and medium-sized dogs, it was noticeable that toy breeds had higher values for BS/BV, Tb.Th, Conn.D, and DA, as well as lower values for Tb.N. The values for BV/TV and Tb.Sp were balanced. In addition, the second carpal bone had the lowest values for BS/BV and Tb.Sp and the highest values for Tb.Th and Tb.N across all groups, suggesting that it is particularly stable. It was also shown that the Chihuahua differs from the other toy breeds and has significantly reduced stability. Dogs of this breed showed very low values for BV/TV, Tb.N, and Tb.Th, as well as high values for BS/BV and Tb.Sp.

When comparing toy breeds with cats, the results showed that the bone architecture of dogs and cats in the same weight category differed significantly, with cats having higher values for BV/TV, Tb.Th, and Tb.Sp, as well as lower values for BS/BV, Tb.N, and Conn.D. The DA values were balanced. In cats, the ulnar carpal bone stood out, with the highest values for BV/TV, Tb.N, and

Tb.Th within the group, as well as the lowest values for BS/BV and Tb.Sp, which in turn suggests high stability.

Cortical thickness differed greatly between the groups. While medium-sized dogs and cats have a normally thick cortex, in some toy breeds it is only an interrupted bone lamella.

8. Literaturverzeichnis

- Aiken, M. J., J. E. Stewart und A. A. Anderson. 2013. 'Avascular necrosis of the canine radial carpal bone: a condition analogous to Preiser's disease?', *Journal of Small Animal Practice*, 54: 374-76.
- Andreoni, A. A., U. Rytz, R. Vannini und K. Voss. 2010. 'Ground reaction force profiles after partial and pancarpal arthrodesis in dogs', *Vet Comp Orthop Traumatol*, 23: 1-6.
- Arlot, M. E., B. Burt-Pichat, J. P. Roux, D. Vashishth, M. L. Boussein und P. D. Delmas. 2008. 'Microarchitecture influences microdamage accumulation in human vertebral trabecular bone', *J Bone Miner Res*, 23: 1613-8.
- Arnott, J. L., R. Bailey, A. Shields und D. Bennett. 2008. 'An in vitro comparison of a 2.7/3.5 mm hybrid plate alone and combined with crossed K-wires for canine pancarpal arthrodesis', *Vet Comp Orthop Traumatol*, 21: 307-11.
- Basa, R. M., P. J. Canfield, W. R. Walsh und K. A. Johnson. 2023. 'Anatomy of the distal radioulnar ligament in cats', *J Feline Med Surg*, 25: 1098612x221149382.
- Basa, R. M. und K. A. Johnson. 2019. 'Management of feline carpal injuries: What are the options and when is arthrodesis indicated?', *J Feline Med Surg*, 21: 809-23.
- Basa, R. M., W. C. H. Parr, C. J. Tan, W. R. Walsh und K. A. Johnson. 2021. 'Kinematics of the Feline Antebrachiocarpal Joint from Supination to Pronation', *Vet Comp Orthop Traumatol*, 34: 115-23.
- Beierer, L. H. 2021. 'Canine Carpal Injuries: From Fractures to Hyperextension Injuries', *Vet Clin North Am Small Anim Pract*, 51: 285-303.
- Bergot, C., A. M. Laval-Jeantet, F. Prêteux und A. Meunier. 1988. 'Measurement of anisotropic vertebral trabecular bone loss during aging by quantitative image analysis', *Calcif Tissue Int*, 43: 143-9.

- Bokemeyer, J., A. Fischer, Madeh A. Sadan, M. Kramer und M. Gerwing. 2011. 'Pankarpale Arthrodesse unter Verwendung einer „CastLess Plate“ bei Hunden und Katzen 1 1 2 1 1', *Tierärztliche Praxis. Ausgabe K, Kleintiere/Heimtiere*, 39: 7-16.
- Bouxein, M. L., S. K. Boyd, B. A. Christiansen, R. E. Guldborg, K. J. Jepsen und R. Müller. 2010. 'Guidelines for assessment of bone microstructure in rodents using micro-computed tomography', *J Bone Miner Res*, 25: 1468-86.
- Boyd, S. K., R. Müller, T. Leonard und W. Herzog. 2005. 'Long-term periarticular bone adaptation in a feline knee injury model for post-traumatic experimental osteoarthritis', *Osteoarthritis Cartilage*, 13: 235-42.
- Brinker, W. O., D. Piermattei und G. Flo. 2016. *Chapter 14 - Fractures and Other Orthopedic Conditions of the Carpus, Metacarpus, and Phalanges; Handbook of Small Animal Orthopedics and Fracture Repair, 389-433* (W.B. Saunders: Saint Louis).
- Bristow, P. C., R. L. Meeson, R. M. Thorne, S. J. Butterworth, S. Rutherford, A. I. Renwick, B. Wustefeld-Janssens, P. G. Witte, S. Woods, K. J. Parsons, B. J. Keeley, M. R. Owen, A. Li und G. I. Arthurs. 2015. 'Clinical comparison of the hybrid dynamic compression plate and the castless plate for pancarpal arthrodesis in 219 dogs', *Vet Surg*, 44: 70-7.
- Budsberg, S. C., M. C. Verstraete und R. W. Soutas-Little. 1987. 'Force plate analysis of the walking gait in healthy dogs', *Am J Vet Res*, 48: 915-8.
- Buote, N. J., D. McDonald und R. Radasch. 2009. 'Pancarpal and partial carpal arthrodesis', *Compend Contin Educ Vet*, 31: 180-91; quiz 92.
- Burstein, P., P. J. Bjorkholm, R. C. Chase und F. H. Seguin. 1984. 'The largest and smallest X-ray computed tomography systems', *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 221: 207-12.
- Burton, N. J., A. W. Miles und P. Pollintine. 2013. 'Biomechanical comparison of a novel castless arthrodesis plate with T-plate and cross pin techniques for canine partial carpal arthrodesis', *Vet Comp Orthop Traumatol*, 26: 165-71.
- Campbell, J. R. 1976. 'Carpal injuries', *J Small Anim Pract*, 17: 179-82.

- Chambers, J. N. und D. E. Bjorling. 1982. 'Palmar surface plating for arthrodesis of the canine carpus', *J Am Anim Hosp Assoc*, 18: 875–82.
- Chandler, J. C. und B. S. Beale. 2002. 'Feline orthopedics', *Clin Tech Small Anim Pract*, 17: 190-203.
- Chapman, J. R., R. M. Harrington, K. M. Lee, P. A. Anderson, A. F. Tencer und D. Kowalski. 1996. 'Factors affecting the pullout strength of cancellous bone screws', *J Biomech Eng*, 118: 391-8.
- Clarke, S. P., J. F. Ferguson und A. Miller. 2009. 'Clinical evaluation of pancarpal arthrodesis using a CastLess plate in 11 dogs', *Vet Surg*, 38: 852-60.
- Cunningham, H. C., D. W. D. West, L. M. Baehr, F. D. Tarke, K. Baar, S. C. Bodine und B. A. Christiansen. 2018. 'Age-dependent bone loss and recovery during hindlimb unloading and subsequent reloading in rats', *BMC Musculoskelet Disord*, 19: 223.
- David, V., N. Laroche, B. Boudignon, M. H. Lafage-Proust, C. Alexandre, P. Ruegsegger und L. Vico. 2003. 'Noninvasive In Vivo Monitoring of Bone Architecture Alterations in Hindlimb-Unloaded Female Rats Using Novel Three-Dimensional Microcomputed Tomography', *J Bone Miner Res*, 18: 1622-31.
- Day, J. S., M. Ding, P. Bednarz, J. C. van der Linden, T. Mashiba, T. Hirano, C. C. Johnston, D. B. Burr, I. Hvid, D. R. Sumner und H. Weinans. 2004. 'Bisphosphonate treatment affects trabecular bone apparent modulus through micro-architecture rather than matrix properties', *J Orthop Res*, 22: 465-71.
- De Graef, B., V. Cnudde, J. Dick, N. De Belie, P. Jacobs und W. Verstraete. 2005. 'A sensitivity study for the visualisation of bacterial weathering of concrete and stone with computerised X-ray microtomography', *Sci Total Environ*, 341: 173-83.
- De Kock, T., M. A. Boone, T. De Schryver, J. Van Stappen, H. Derluyn, B. Masschaele, G. De Schutter und V. Cnudde. 2015. 'A pore-scale study of fracture dynamics in rock using X-ray micro-CT under ambient freeze-thaw cycling', *Environ Sci Technol*, 49: 2867-74.
- Diaz-Bertrana, C., F. Darnaculleta, I. Durall, J. Franch und J. L. Puchol. 2009. 'The stepped hybrid plate for carpal panarthrodesis - Part I: relationship between plate and bone surfaces', *Vet Comp Orthop Traumatol*, 22: 380-8.

- Ding, M., A. Odgaard, C. C. Danielsen und I. Hvid. 2002. 'Mutual associations among microstructural, physical and mechanical properties of human cancellous bone', *J Bone Joint Surg Br*, 84: 900-7.
- Eckstein, F., M. Fischbeck, V. Kuhn, T. M. Link, M. Priemel und E. M. Lochmüller. 2004. 'Determinants and heterogeneity of mechanical competence throughout the thoracolumbar spine of elderly women and men', *Bone*, 35: 364-74.
- Engelke, K., M. Karolczak, A. Lutz, U. Seibert, S. Schaller und W. Kalender. 1999. 'Micro-CT. Technology and application for assessing bone structure', *Radiologe*, 39: 203-12.
- Evans, H.E. und A. de Lahunta. 2012. *Miller's Anatomy of the Dog - E-Book: Miller's Anatomy of the Dog - E-Book* (Saunders).
- Feldkamp, L. A., S. A. Goldstein, A. M. Parfitt, G. Jesion und M. Kleerekoper. 1989. 'The direct examination of three-dimensional bone architecture in vitro by computed tomography', *J Bone Miner Res*, 4: 3-11.
- Fitzpatrick, N., T. C. Garcia, A. Daryani, J. Bertran, S. Watari und K. Hayashi. 2016. 'Micro-CT Structural Analysis of the Canine Medial Coronoid Disease', *Vet Surg*, 45: 336-46.
- Fonseca, H., D. Moreira-Gonçalves, H. J. Coriolano und J. A. Duarte. 2014. 'Bone quality: the determinants of bone strength and fragility', *Sports Med*, 44: 37-53.
- Frei, J., F. Feichtner und A. Meyer-Lindenberg. 2025. 'Microcomputed tomographic analysis of the trabecular and cortical architecture of the proximal femur and hip bone of cats and small breed dogs', *Res Vet Sci*, 185: 105531.
- García, A. R., C. Brincin und A. Craig. 2024. 'Outcome, Complications, and Follow-Up in Dogs Treated with Pancarpal Arthrodesis Stabilized with Orthogonal Plates', *J Am Anim Hosp Assoc*, 60: 252-64.
- Glück, T., Y. Zablotski und A. Meyer-Lindenberg. 2024. 'Microcomputed tomographic analysis of the ulnar trochlear notch in medium- and large-breed canine cadavers with and without medial coronoid disease', *Res Vet Sci*, 166: 105108.

- Gnudi, G., C. M. Mortellaro, G. Bertoni, F. M. Martini, A. M. Cantoni, M. Di Giancamillo und M. Vignoli. 2003. 'Radial carpal bone fracture in 13 dogs', *Vet Comp Orthop Traumatol*, 16: 178-83.
- Goldstein, L., A. C. Waselau, Y. Zablotzki und A. Meyer-Lindenberg. 2025. 'Microcomputed tomographic examination of the osseous structures of the canine carpus', *Res Vet Sci*, 192: 105725.
- Goulet, R. W., S. A. Goldstein, M. J. Ciarelli, J. L. Kuhn, M. B. Brown und L. A. Feldkamp. 1994. 'The relationship between the structural and orthogonal compressive properties of trabecular bone', *J Biomech*, 27: 375-89.
- Guerrero, T. G. und P. M. Montavon. 2005. 'Medial plating for carpal panarthrodesis', *Vet Surg*, 34: 153-8.
- Guilliard, M. J. 2001. 'Accessory carpal bone displacement in two dogs', *J Small Anim Pract*, 42: 603-6.
- Guilliard, M. J. und A. K. Mayo. 2001. 'Subluxation/luxation of the second carpal bone in two racing greyhounds and a Staffordshire bull terrier', *J Small Anim Pract*, 42: 356-9.
- Haburjak, J. J., T. M. Lenehan, C. D. Davidson, G. B. Tarvin, K. R. Carlson und A. Hayes. 2003. 'Treatment of carpometacarpal and middle carpal joint hyperextension injuries with partial carpal arthrodesis using a cross pin technique: 21 cases', *Vet Comp Orthop Traumatol*, 16: 105-11.
- Harris, K. P., A. P. Moores, S. J. Butterworth und M. A. Bush. 2011. 'Three cases of accessorioulnar arthrodesis to address accessory carpal bone subluxation or fracture', *Vet Rec*, 169: 181.
- Hildebrand, T., A. Laib, R. Müller, J. Dequeker und P. Rügsegger. 1999. 'Direct three-dimensional morphometric analysis of human cancellous bone: microstructural data from spine, femur, iliac crest, and calcaneus', *J Bone Miner Res*, 14: 1167-74.
- Horowitz, F. B. und K. L. Wells. 2007. 'What is your diagnosis? Dorsomedial avulsion of the right second carpal bone with medial displacement of the proximal portion of the second metacarpal bone', *J Am Vet Med Assoc*, 230: 31-2.

- Hsu, J. T., H. L. Huang, M. T. Tsai, A. Y. Wu, M. G. Tu und L. J. Fuh. 2013. 'Effects of the 3D bone-to-implant contact and bone stiffness on the initial stability of a dental implant: micro-CT and resonance frequency analyses', *Int J Oral Maxillofac Surg*, 42: 276-80.
- Hu, J. H., M. Ding, K. Søballe, J. E. Bechtold, C. C. Danielsen, J. S. Day und I. Hvid. 2002. 'Effects of short-term alendronate treatment on the three-dimensional microstructural, physical, and mechanical properties of dog trabecular bone', *Bone*, 31: 591-7.
- Ito, M., T. Nakamura, T. Matsumoto, K. Tsurusaki und K. Hayashi. 1998. 'Analysis of trabecular microarchitecture of human iliac bone using microcomputed tomography in patients with hip arthrosis with or without vertebral fracture', *Bone*, 23: 163-9.
- Ito, M., M. Ohki, K. Hayashi, M. Yamada, M. Uetani und T. Nakamura. 1995. 'Trabecular texture analysis of CT images in the relationship with spinal fracture', *Radiology*, 194: 55-9.
- Jaegger, G., D. J. Marcellin-Little und D. Levine. 2002. 'Reliability of goniometry in Labrador Retrievers', *Am J Vet Res*, 63: 979-86.
- Joffre, T., P. Isaksson, P. Procter und C. Persson. 2017. 'Trabecular deformations during screw pull-out: a micro-CT study of lapine bone', *Biomech Model Mechanobiol*, 16: 1349-59.
- Johnson, K. A. 1980. 'CARPAL ARTHRODESIS IN DOGS', *Australian Veterinary Journal*, 56: 565-73.
- Johnson, K. A. 1987. 'Accessory carpal bone fractures in the racing greyhound. Classification and pathology', *Vet Surg*, 16: 60-4.
- Johnson, K. A., D. L. Piermattei und P. E. Davis. 1988. 'Characteristics of accessory carpal bone fracture in 50 racing Greyhounds', *Vet Comp Orthop Traumatol*, 2: 104-07.
- Johnston, S. A. und K. M. Tobias. 2017. *Veterinary Surgery: Small Animal; Carpus, Metacarpus, and Digits; 920-938* (Elsevier).
- Kalender, W. 2011. "Computed tomography : fundamentals, system technology, image quality, applications." In.: Publicis

- Kang, S. R., S. C. Bok, S. C. Choi, S. S. Lee, M. S. Heo, K. H. Huh, T. I. Kim und W. J. Yi. 2016. 'The relationship between dental implant stability and trabecular bone structure using cone-beam computed tomography', *J Periodontal Implant Sci*, 46: 116-27.
- Kapadia, R. D., G. B. Stroup, A. M. Badger, B. Koller, J. M. Levin, R. W. Coatney, R. A. Dodds, X. Liang, M. W. Lark und M. Gowen. 1998. 'Applications of micro-CT and MR microscopy to study pre-clinical models of osteoporosis and osteoarthritis', *Technol Health Care*, 6: 361-72.
- Keleş, A., H. Alcin, A. Kamalak und M. A. Versiani. 2014. 'Micro-CT evaluation of root filling quality in oval-shaped canals', *Int Endod J*, 47: 1177-84.
- Kim, Y., M. D. Brodt, S. Y. Tang und M. J. Silva. 2021. 'MicroCT for Scanning and Analysis of Mouse Bones', *Methods Mol Biol*, 2230: 169-98.
- Kleer-Reiter, N., S. Julmi, F. Feichtner, A. C. Waselau, C. Klose, P. Wriggers, H. J. Maier und A. Meyer-Lindenberg. 2021. 'Biocompatibility and degradation of the open-pored magnesium scaffolds LAE442 and La2', *Biomed Mater*, 16.
- Koestlin, R., U. Matis und H. Waibl. 1986. 'Zur Diagnostik und Therapie der Hyperextensionsverletzungen im Karpalgelenk ("Niederbruch") des Hundes', *Kleintierpraxis*, 31: 101-08.
- König, H. E. und H. G. Liebich. 2018. *Vorder- oder Schultergliedmaßen. Anatomie der Haustiere: Lehrbuch und Farbatlas für Studium und Praxis; 167-225* (Thieme).
- Kostenko, E., A. Pockevičius und A. Maknickas. 2023. 'Histomorphometry and μ CT scan analysis of osteoporosis in spayed female dogs', *Open Vet J*, 13: 1-10.
- Kowalewicz, K., E. Vorndran, F. Feichtner, A. C. Waselau, M. Brueckner und A. Meyer-Lindenberg. 2021. 'In-Vivo Degradation Behavior and Osseointegration of 3D Powder-Printed Calcium Magnesium Phosphate Cement Scaffolds', *Materials (Basel)*, 14.
- Lau, S. F., C. F. Wolschrijn, M. Siebelt, J. C. Vernooij, G. Voorhout und H. A. Hazewinkel. 2013. 'Assessment of articular cartilage and subchondral bone using EPIC-microCT in Labrador retrievers with incipient medial coronoid disease', *Vet J*, 198: 116-21.

- Lee, A. T., A. A. Williams, J. Lee, R. Cheng, D. P. Lindsey und A. L. Ladd. 2013. 'Trapezium trabecular morphology in carpometacarpal arthritis', *J Hand Surg Am*, 38: 309-15.
- Li, A., D. Bennett, C. Gibbs, S. Carmichael, N. Gibson, M. Owen, S. J. Butterworth und H. R. Denny. 2000. 'Radial carpal bone fractures in 15 dogs', *J Small Anim Pract*, 41: 74-9.
- Liebich, H. G. 2009. *Binde und Stützgewebe. Funktionelle Histologie der Haussäugetiere und Vögel*; 69-97 (Schattauer).
- Lochmüller, E. M., D. Bürklein, V. Kuhn, C. Glaser, R. Müller, C. C. Glüer und F. Eckstein. 2002. 'Mechanical strength of the thoracolumbar spine in the elderly: prediction from in situ dual-energy X-ray absorptiometry, quantitative computed tomography (QCT), upper and lower limb peripheral QCT, and quantitative ultrasound', *Bone*, 31: 77-84.
- Lochmüller, E. M., K. Pöschl, L. Würstlin, M. Matsuura, R. Müller, T. M. Link und F. Eckstein. 2008. 'Does thoracic or lumbar spine bone architecture predict vertebral failure strength more accurately than density?', *Osteoporos Int*, 19: 537-45.
- Lotsikas, P. J. und R. M. Radasch. 2006. 'A clinical evaluation of pancarpal arthrodesis in nine dogs using circular external skeletal fixation', *Vet Surg*, 35: 480-5.
- Mason, M. J. und M. A. Lewis. 2024. 'Structure and scaling of the middle ear in domestic dog breeds', *J Anat*, 245: 324-38.
- Mathis, K. R. und K. Voss. 2015. 'Partial carpal arthrodesis using a medially applied mini-plate in three cats with carpometacarpal hyperextension injury', *J Feline Med Surg*, 17: 727-32.
- Meeson, R. L., A. E. Goodship und G. I. Arthurs. 2012. 'A biomechanical evaluation of a Hybrid Dynamic Compression Plate and a CastLess Arthrodesis Plate for pancarpal arthrodesis in dogs', *Vet Surg*, 41: 738-44.
- Merbl, Y., J. Milgram, Y. Moed, U. Bibring, D. Peery und I. Aroch. 2013. 'Epidemiological, Clinical and Hematological Findings in Feline High Rise Syndrome in Israel: A Retrospective Case-Controlled Study of 107 Cats', *Israel Journal of Veterinary Medicine*, 68: 28-37.

- Michal, U., M. Flückiger und H. Schmökel. 2003. 'Healing of dorsal pancarpal arthrodesis in the dog', *J Small Anim Pract*, 44: 109-12.
- Milgram, J., T. Milshtein und Y. Meiner. 2012. 'The role of the antebrachiocarpal ligaments in the prevention of hyperextension of the antebrachiocarpal joint', *Vet Surg*, 41: 191-9.
- Müller, R., H. Van Campenhout, B. Van Damme, G. Van Der Perre, J. Dequeker, T. Hildebrand und P. Rüeeggsegger. 1998. 'Morphometric analysis of human bone biopsies: a quantitative structural comparison of histological sections and micro-computed tomography', *Bone*, 23: 59-66.
- Nägele, E., V. Kuhn, H. Vogt, T. M. Link, R. Müller, E. M. Lochmüller und F. Eckstein. 2004. 'Technical considerations for microstructural analysis of human trabecular bone from specimens excised from various skeletal sites', *Calcif Tissue Int*, 75: 15-22.
- Nakladal, B., F. vom Hagen, M. Brunnberg, M. Gross, H. Nietz und L. Brunnberg. 2013. 'Carpal joint injuries in cats - an epidemiological study', *Vet Comp Orthop Traumatol*, 26: 333-9.
- Nickel, R., A. Schummer und E. Seiferle. 2004. *Knochen der Schultergliedmaße, Verbindungen der Knochen der Schultergliedmaße. Lehrbuch der Anatomie der Haustiere, Band 1 Bewegungsapparat; 67-97, 230-257 (Parey).*
- Nufer, P., J. Goldhahn, T. Kohler, V. Kuhn, R. Müller und D. B. Herren. 2008. 'Microstructural adaptation in trapezial bone due to subluxation of the thumb', *J Orthop Res*, 26: 208-16.
- Odgaard, A. 1997. 'Three-dimensional methods for quantification of cancellous bone architecture', *Bone*, 20: 315-28.
- Parfitt, A. M., C. H. Mathews, A. R. Villanueva, M. Kleerekoper, B. Frame und D. S. Rao. 1983. 'Relationships between surface, volume, and thickness of iliac trabecular bone in aging and in osteoporosis. Implications for the microanatomic and cellular mechanisms of bone loss', *J Clin Invest*, 72: 1396-409.
- Pistoia, W., B. van Rietbergen, E. M. Lochmüller, C. A. Lill, F. Eckstein und P. Rüeeggsegger. 2002. 'Estimation of distal radius failure load with micro-finite element analysis models based on three-dimensional peripheral quantitative computed tomography images', *Bone*, 30: 842-8.

- Planner, F., F. Feichtner und A. Meyer-Lindenberg. 2021a. 'The cat as a small dog?-Comparison of trabecular and cortical bone microarchitecture of radius and ulna in cats and small dogs using microcomputed tomography', *Vet Med Sci*, 7: 2113-19.
- Planner, F., F. Feichtner und A. Meyer-Lindenberg. 2021b. 'Comparative microcomputed tomographic structural analysis of the trabecular and cortical bone architecture of radius and ulna in toy dog breeds', *Res Vet Sci*, 136: 324-35.
- Pothuau, L., B. Van Rietbergen, L. Mosekilde, O. Beuf, P. Levitz, C. L. Benhamou und S. Majumdar. 2002. 'Combination of topological parameters and bone volume fraction better predicts the mechanical properties of trabecular bone', *J Biomech*, 35: 1091-9.
- Pozzi, A., D. D. Lewis, C. C. Hudson, S. E. Kim und E. Castelli. 2020. 'Percutaneous Plate Arthrodesis', *Vet Clin North Am Small Anim Pract*, 50: 241-61.
- Renner, C. und N. Medl. 2021. 'Multi-ligamentous injury of the carpus with dislocation of the ulnar styloid in a dog', *Veterinary Record Case Reports*, 9: e154.
- Roos, H., S. Brugger und T. Rauscher. 1992. 'The biological valence of the motion in the radioulnar joints of the cat and dog', *Anat Histol Embryol*, 21: 199-205.
- Rüeggsegger, P., B. Koller und R. Müller. 1996. 'A microtomographic system for the nondestructive evaluation of bone architecture', *Calcif Tissue Int*, 58: 24-9.
- Salomon, F. V., H. Geyer und U. Gille. 2015. *Bewegungsapparat, Anatomie für die Tiermedizin; 36-230* (Enke).
- Scherzer, C., H. Windhagen, J. Nellesen, H. A. Crostack, K. Rohn, F. Witte, F. Thorey, M. Fehr und G. Hauschild. 2009. 'Comparative structural analysis of the canine femoral head in Legg-Calvé-Perthes disease', *Vet Radiol Ultrasound*, 50: 404-11.
- Scott, H. und R. McLaughlin. 2006. *Feline orthopedics* (CRC Press).
- Seebeck, J., J. Goldhahn, M. M. Morlock und E. Schneider. 2005. 'Mechanical behavior of screws in normal and osteoporotic bone', *Osteoporos Int*, 16 Suppl 2: S107-11.

- Shales, C. J. und S. Langley-Hobbs. 2006. 'Dorso-medial ante-brachiocarpal luxation with radio-ulna luxation in a domestic shorthair', *J Feline Med Surg*, 8: 197-202.
- Slocum, B. und T. Devine. 1982. 'Partial carpal fusion in the dog', *J Am Vet Med Assoc*, 180: 1204-8.
- Steppe, K., V. Cnudde, C. Girard, R. Lemeur, J. P. Cnudde und P. Jacobs. 2004. 'Use of X-ray computed microtomography for non-invasive determination of wood anatomical characteristics', *J Struct Biol*, 148: 11-21.
- Stock, S. R. 2008. 'Recent advances in X-ray microtomography applied to materials', *International Materials Reviews*, 53: 129-81.
- Swain, M. V. und J. Xue. 2009. 'State of the art of Micro-CT applications in dental research', *Int J Oral Sci*, 1: 177-88.
- Tate, J. R. und C. E. Cann. 1982. 'High-resolution computed tomography for the comparative study of fossil and extant bone', *Am J Phys Anthropol*, 58: 67-73.
- Tomlin, J. L., M. J. Pead, S. J. Langley-Hobbs und P. Muir. 2001. 'Radial carpal bone fracture in dogs', *J Am Anim Hosp Assoc*, 37: 173-8.
- Ulrich, D., T. Hildebrand, B. Van Rietbergen, R. Müller und P. Rügsegger. 1997. 'The quality of trabecular bone evaluated with micro-computed tomography, FEA and mechanical testing', *Stud Health Technol Inform*, 40: 97-112.
- Ulrich, D., B. van Rietbergen, A. Laib und P. Rügsegger. 1999. 'The ability of three-dimensional structural indices to reflect mechanical aspects of trabecular bone', *Bone*, 25: 55-60.
- van Eijden, T. M., P. N. van der Helm, L. J. van Ruijven und L. Mulder. 2006. 'Structural and mechanical properties of mandibular condylar bone', *J Dent Res*, 85: 33-7.
- Van Rietbergen, B., A. Odgaard, J. Kabel und R. Huiskes. 1998. 'Relationships between bone morphology and bone elastic properties can be accurately quantified using high-resolution computer reconstructions', *J Orthop Res*, 16: 23-8.
- Vaughan, L. C. 1985. 'Disorders of the carpus in the dog II', *British Veterinary Journal*, 141: 435-46.

- Vedrine, B. 2013. 'Comminuted fracture of the ulnar carpal bone in a Labrador retriever dog', *Can Vet J*, 54: 1067-70.
- Viguier, E., D. Znaty, M. Medelci und C. Degueurce. 2001. 'In vitro comparison between a DCP and external fixator for pancarpal arthrodesis in the dog', *Equine Vet J Suppl*: 32-5.
- Vnuk, D., B. Pirkić, D. Maticić, B. Radisić, M. Stejskal, T. Babić, M. Kreszinger und N. Lemo. 2004. 'Feline high-rise syndrome: 119 cases (1998-2001)', *J Feline Med Surg*, 6: 305-12.
- Voss, K., H. Geyer und P. M. Montavon. 2003. 'Antebrachiocarpal luxation in a cat', *Vet Comp Orthop Traumatol*, 16: 266 - 70.
- Wang, Z., E. Herremans, S. Janssen, D. Cantre, P. Verboven und B. Nicolaï. 2018. 'Visualizing 3D Food Microstructure Using Tomographic Methods: Advantages and Disadvantages', *Annu Rev Food Sci Technol*, 9: 323-43.
- Wirth, A. J., J. Goldhahn, C. Flaig, P. Arbenz, R. Müller und G. H. van Lenthe. 2011. 'Implant stability is affected by local bone microstructural quality', *Bone*, 49: 473-8.
- Wolff, J. 1870. 'Ueber die innere Architectur der Knochen und ihre Bedeutung für die Frage vom Knochenwachstum', *Archiv für pathologische Anatomie und Physiologie und für klinische Medicin*, 50: 389-450.
- Woods, S. und K. L. Perry. 2018. 'Fractures of the carpus', *Companion Animal*, 23: 368-75.
- Yamauchi, D., D. Tamaoki, M. Hayami, M. Takeuchi, I. Karahara, M. Sato, K. Toyooka, H. Nishioka, Y. Terada, K. Uesugi, H. Takano, Y. Kagoshima und Y. Mineyuki. 2013. 'Micro-CT observations of the 3D distribution of calcium oxalate crystals in cotyledons during maturation and germination in Lotus miyakojimae seeds', *Microscopy (Oxf)*, 62: 353-61.

9. Danksagung

Danken möchte ich an erster Stelle Frau Prof. Dr. Andrea Meyer-Lindenberg, die mir als Leiterin der Chirurgischen und Gynäkologischen Kleintierklinik sowie Doktormutter die Promotion und die Absolvierung des Internships in der Chirurgischen und Gynäkologischen Kleintierklinik ermöglicht hat.

Großer Dank gilt dem Team der klinischen Forschung, allen voran Dr. Anja-Christina Waselau, die mir als Betreuerin immer zur Seite stand und für alle Anliegen erreichbar war. Ebenso danken möchte ich Franziska Feichtner, Ph.D und Rebekka Gödl für Ihre Einführung und Hilfe mit dem Mikro-CT.

Dank gebührt auch Dr. Yuri Zablotski für seine Beratung und statistische Berechnung der Ergebnisse.

Danken möchte ich auch Dr. Franziska Planner, die durch Ihre Dissertation schon viele der Proben gesammelt hatte und mir so einiges an Arbeit erspart blieb.

Danke möchte ich auch meinen ehemaligen Kollegen der CTK sagen, die die Zeit des Internships unvergesslich gemacht haben. Danke an Simone, Flo, Claudi, Nicola und Stine.

Ein riesengroßes Dankeschön gilt all meinen Freunden, die mich auf dem Weg durch das Studium und die Promotion immer unterstützt und motiviert haben. Vor allem seien erwähnt Clari, Helen, Julia, Marla und Evi, sowie meine Cousine Linda.

Das letzte und wohl größte Danke gebührt meiner Familie. Meinen Großeltern, meinen Brüdern Peter und Jakob und meinen Eltern, ohne Euch wäre dieses Studium und die Promotion nicht möglich gewesen. Danke für eure immerwährende Unterstützung und den nicht endenden Glauben an mich.