

**Mikrocomputertomographische Analyse der trabekulären
und kortikalen Architektur des proximalen Oberschenkel-
und Hüftgelenkknochens sowie des Antetorsionswinkels von
Katzen und Hunden kleiner Rassen**

von

Jessica Frei

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

**Mikrocomputertomographische Analyse der trabekulären
und kortikalen Architektur des proximalen Oberschenkel-
und Hüftgelenkknorpels sowie des Antetorsionswinkels von
Katzen und Hunden kleiner Rassen**

Von

Jessica Frei

aus Horw, Luzern, Schweiz

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:

Franziska Feichtner PhD

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

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Reinhard K. Straubinger, Ph.D.

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. Andrea Meyer-Lindenberg

Korreferent: Univ.-Prof. Dr. Johann Maierl

Tag der Promotion: 7. Februar 2026

*Meiner lieben Familie und meinen Freunden, die mich
auf diesem Weg begleitet und unterstützt haben.*

INHALTSVERZEICHNIS

I.	EINLEITUNG.....	1
II.	LITERATURÜBERSICHT.....	4
1.	Anatomie des Acetabulums und proximalen Femurs.....	4
1.1.	Acetabulum.....	4
1.2.	Proximales Femur.....	4
2.	Winkel des proximalen Femurs.....	6
2.1.	Antetorsions- (und Anteversionswinkel).....	6
2.2.	Varus- und Valgusfehlstellung.....	7
2.3.	Inklinationswinkel.....	7
3.	Mikrocomputertomographie.....	8
3.1.	Parameter zur Strukturanalyse trabekulären Knochens.....	8
4.	Implantate für Hüftprothesen bei Katzen und kleinen Hunden.....	11
4.1.	Materialien.....	11
4.2.	Implantatarten.....	11
4.2.1.	Zementierte Implantate für Hüftprothesen.....	11
4.2.2.	Zementfreie Hüftprothesen.....	11
4.2.2.1.	Press-fit Prothesen.....	12
4.2.2.2.	Verschraubte Prothesen.....	12
4.2.3.	Hybrid-Implantate für Hüftprothesen.....	13
4.3.	Schlussfolgerung.....	13
III.	PUBLIKATION.....	14
IV.	DISKUSSION.....	23
V.	ZUSAMMENFASSUNG.....	31
VI.	SUMMARY.....	33
VII.	LITERATURVERZEICHNIS.....	35
VIII.	DANKSAGUNG.....	45

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BS	Bone Surface
BS/BV	Bone Surface per Bone Volume; Bone surface fraction
BV	Bone Volume
BV/TV	Bone Volume per Total Volume; Bone volume fraction
Conn.D	Connectivity Density
CT	Computertomographie
DA	Degree of Anisotropy
μ -CT	Mikrocomputertomographie
p	Signifikanzwert
ROI	Region of Interest
Tb.N	Trabecular Number
Tb.Sp	Trabecular Separation
Tb.Th	Trabecular Thickness
TV	Total Volume
VOI	Volume of Interest

I. EINLEITUNG

Totale Hüftprothesen, auch Total Hip Replacement (THR) oder Totale Endoprothese (TEP) genannt, werden bereits seit Jahrzehnten erfolgreich bei mittelgroßen und großen Hunden mit einem Hüftleiden, wie beispielsweise schmerzhafter Coxarthrose, eingesetzt und stetig an die neusten Erkenntnisse angepasst (Kidd et al. 2016; Hummel 2017; Schiller 2017). Es wurde gezeigt, dass der Ersatz eines geschädigten Hüftgelenkes durch Implantate beim Menschen zu einer deutlich verbesserten Lebensqualität führen kann (Knahr et al. 1998). Bei Hunden kann dies indirekt durch ein postoperativ verbessertes bis normales Gangbild angenommen werden (Kalis et al. 2012; Massat and Vasseur 1994). Hunde gelten in dieser Hinsicht außerdem gemeinhin als geeignete Modelltiere für humanmedizinische Fragestellungen (Skurla et al. 2005; Pascual-Garrido et al. 2018). Dennoch gibt es zahlreiche Unterschiede zwischen der Anatomie des Hundes und des Menschen, welche die perfekte Passform und möglicherweise die geeigneten Materialien des Implantats beeinflussen können (Bloebaum et al. 1993). Für die Veterinärmedizin ist es daher von größter Bedeutung, die entsprechenden Erkrankungen direkt an der jeweiligen Tierart zu untersuchen, da es bemerkenswerte Unterschiede in der Knochenstruktur und im Knochenumbau im Vergleich zum Menschen und auch zwischen verschiedenen Tierarten gibt (Pearce et al. 2007). Bislang gibt es nur wenige, jedoch zunehmend mehr Forschungsarbeiten zur Untersuchung der trabekulären Knochenstruktur in der Veterinärmedizin. Vereinzelt gibt es davon sogar schon Studien des proximalen Femurs bei Hunden (Townsend 2012; Scherzer et al. 2009). Untersuchungen der strukturellen Parameter des proximalen Femurs und des Acetabulums bei Katzen, sowie des Acetabulums bei Hunden, gibt es in der heute zugänglichen Literatur noch nicht. Weiter ist es von besonderer Bedeutung, Implantate und Operationsmethoden spezifisch an die jeweilige Tierart anzupassen.

Für das Einsetzen künstlicher Gelenke ist die Kenntnis der anatomischen Beschaffenheit der umliegenden Knochen eine außerordentlich wichtige Komponente. Weiter hat auch die Berücksichtigung des Knochenumbaus bei der Implantation einer TEP höchste Priorität (Ni et al. 2007). Je nach anatomischer Beschaffenheit gibt es heutzutage die Möglichkeit, zementierte oder zementfreie Implantate zu verwenden (Denny et al. 2018; Olmstead 1995). Bisher war bei

kleinen Hunden und vor allem Katzen die Femurkopfhalsresektion die üblicherweise gewählte Prozedur und teilweise ist sie dies auch heutzutage noch (Liska et al. 2009; El-Seddawy et al. 2022). Da die Ergebnisse einer Femurkopfhalsresektion aber bezüglich einer Lahmheitsfreiheit nicht in allen Fällen zufriedenstellend waren, wurden auch für kleine Hunde und Katzen unter 12 kg Körpergewicht sogenannte zementierte Mikro- bzw. Nano-TEP's auf den Markt gebracht. Diese befinden sich derzeit noch in der Anfangsphase, haben aber überwiegend gute Ergebnisse erzielt (Liska 2010; Liska et al. 2009). Da eine zementierte TEP jedoch auch Komplikationen mit sich bringen kann, wie zum Beispiel ein erhöhtes Infektionsrisiko durch zusätzliches Einbringen von verbleibendem Fremdmaterial, ist es umso wichtiger, genaue Kenntnisse über die Spongiosa im Beckenbereich des Acetabulums sowie des proximalen Femurs zu haben (Tomáš et al. 2007). Dies könnte die Grundlage sein, um zukünftig auch zementlose Hüftprothesen herzustellen und erfolgreich bei kleinen Hunden und Katzen anwenden zu können.

Um die speziesspezifische Anatomie und die Qualität des Knochens in Bezug auf die TEP beim Hund zu beurteilen, wurde die μ -CT bereits als geeignetes Instrument in Studien verwendet (Pugliese 2014). Diese dient der Darstellung der knöchernen Trabekel und ihrer dreidimensionalen Anordnung, welche ursprünglich von Wolff (1870) beschrieben wurde. Dazu werden verschiedene bereits etablierte Strukturparameter verwendet, wie Knochenvolumen (BV/TV), Knochenoberfläche (BS/BV), Trabekeldicke (Tb.Th), Trabekelanzahl (Tb.N), Trabekelabstand (Tb.Sp), Anisotropiegrad (DA), Konnektivitätsdichte (Conn. D) und mittlere Knochendichte. Anhand dieser Parameter lassen sich die Verhältnisse, die Anordnung, die Form und das Volumen der trabekulären Knochenmikroarchitektur im Mikrometermaßstab quantitativ vergleichen (Engelke et al. 1999). In den letzten Jahren und Jahrzehnten hat sich die microcomputertomographische Untersuchung etabliert und enormes Wachstum erfahren (Schambach et al. 2010; Kuhn et al. 1990). Dies ist vor allem auf die mittels μ -CT nun mögliche dreidimensionale und nicht-invasive Untersuchung von Knochen und Organen im Vergleich zur ex-vivo-Goldstandard-Untersuchungsmethode der Histopathologie/ -morphometrie zurückzuführen (Nazarian et al. 2008; Feldkamp et al. 1989; Kuhn et al. 1990). Die Mikrocomputertomographie hat sich bereits bei anderen Lokalisationen etabliert, wie zum Beispiel bei der Untersuchung von Kreuzbandproblemen im Kniegelenk

bei Hundekadavern (Dedrick et al. 1993). Darüber hinaus wurde eine erste Studie veröffentlicht, in welcher Knochenparameter der Unterarme von Katzen und Hunden verglichen wurden und die bemerkenswerten Unterschiede zwischen den beiden Spezies zeigte (Planner et al. 2021). Sogar Nano-CT-Untersuchungen von trabekulärem Knochen sind in der Humanmedizin sowie auch in der Tiermedizin beschrieben worden (Peyrin et al. 2014; Holdsworth and Thornton 2002). Es gibt bisher noch keine μ -CT-Untersuchungen, welche den Knochen von gesunden Hunden und Katzen im Bereich des proximalen Femurs und Acetabulums untersucht und vergleicht.

Die vorliegende Studie hat daher in einem ersten Schritt zum Ziel, die verschiedenen Knochenstrukturparameter bei Katzen und kleinen Hunden zu messen und mögliche Unterschiede in der trabekulären und kortikalen Struktur des proximalen Femurs und Acetabulums bei Katzen im Vergleich zu kleinen Hunden aufzuzeigen. Darüber hinaus soll durch den Vergleich der Knochenstruktur des Femurs und des Acetabulums zwischen den beiden Spezies untersucht werden, inwiefern eine Katze im anatomischen und somit auch im chirurgischen Bereich mit kleinen Hunden verglichen werden kann. Als zusätzlicher Parameter wurde dabei auch der Antetorsionswinkel gemessen und zwischen den beiden Tierarten verglichen, da dieser beim Einsetzen einer TEP, und somit dem Zusammenfügen von Schaft- und Acetabulumimplantat, eine Rolle spielen kann. Ziel dieser Studie ist es, eine erste Datengrundlage zu schaffen, anhand dieser in Zukunft bestmöglichst angepasste zementlose Implantate sowohl für Katzen als auch für kleine Hunde entwickelt werden können. Darüber hinaus könnten diese Daten auch bei der Untersuchung und chirurgischen Behandlung von Frakturen (proximale Femurfraktur, Femurkopf- und -halsfraktur, Acetabulumfraktur) individuell nach Tierart hilfreich sein.

II. LITERATURÜBERSICHT

1. Anatomie des Acetabulums und proximalen Femurs

1.1. Acetabulum

Das Acetabulum besteht generell aus drei verschiedenen Knochen. Beteiligt sind das Sitzbein (*Os ischii*) nach kaudolateral, das Schambein (*Os pubis*) nach medial und das Darmbein (*Os ilium*) nach kraniallateral (Salomon et al. 2020). Dazwischen eingebettet befindet sich bei den Fleischfressern noch zusätzlich der Acetabularknochen (*Os acetabuli*), welcher jedoch bei den anderen Haussäugetieren meistens nicht nachweisbar ist (König and Liebich 2011). Die Gelenksfläche wird durch eine halbmondförmige Struktur, der *Facies lunata*, gebildet. Diese besitzt zwischen dem Scham- und Sitzbein medial eine Einziehung, die *Incisura acetabuli*, welche durch ein Band (*Ligamentum transversum acetabuli*) überbrückt wird (König and Liebich 2011). Mittig der *Facies lunata* liegt die *Fossa acetabuli*, eine grubenähnliche Vertiefung, welche als Ansatz für das Femurkopfband (*Ligamentum capitis ossis femoris*) dient (Salomon et al. 2020). Am äußeren Rand der Gelenkspfanne des Acetabulums wird die knöcherne Auflagefläche durch eine Pfannenlippe (*Labrum acetabulare*) begrenzt (Salomon et al. 2020). Diese Auflagefläche, im Besonderen der kraniale Pfannenrand, spielt auch eine wichtige Rolle bei der entwicklungsbedingten Erkrankung der Hüftgelenksdysplasie (Salomon et al. 2020).

1.2. Proximales Femur

Das Femur (*Os femoris*) ist ein langer Röhrenknochen (*Ossa longa*) und besteht aus einem Schaft (*Diaphysis*) und zwei Endstücken (*Epiphysis distalis et proximalis*) (Salomon et al. 2020). Er ist der stärkste Röhrenknochen des Skeletts und ist maßgeblich am Bewegungsablauf beteiligt (Salomon et al. 2020). Außerdem übernimmt er eine wesentliche Last- und Stützfunktion (König and Liebich 2011). Im Bereich der Diaphyse besteht der Knochen aus einer Kompakta (*Substantia compacta*), welche die Markhöhle (*Cavum medullare*) umschließt (Salomon et al. 2020). Das proximale Endstück des Femurs (sowie das distale Endstück, für diese Studie jedoch nicht von Relevanz) wird von einer Kortikalis (*Substantia corticalis*) umhüllt und ist mit einer Spongiosa (*Substantia spongiosa*) ausgefüllt (Salomon et

al. 2020). Im proximalen Femur ist die Epiphyse im Bereich des Femurkopfes (*Caput ossis femoris*), welcher sich bei den Fleischfressern deutlich durch einen Femurhals (*Collum ossis femoris*) vom restlichen Knochen absetzt (König and Liebich 2011). Der Femurkopf neigt von der Längsachse des Femurs nach medial und überragt den Körper des Femurs (*Corpus ossis femoris*) markant (König and Liebich 2011). Zusammen mit dem Acetabulum bildet der Femurkopf die knöcherne Grundlage für das Hüftgelenk, welches funktionell ein Kugelgelenk darstellt (Salomon et al. 2020). In der Gelenksfläche des Femurkopfes zeichnet sich eine gelenksknorpelfreie Grube (*Fovea capitis*) ab, in welcher das Femurkopfband (*Ligamentum capitis ossis femoris*) ansetzt und somit den Femurkopf mit dem Acetabulum verbindet (Salomon et al. 2020).

Der *Trochanter major* des proximalen Femurs, welcher unterhalb des Femurhalses nach lateral steht, dient als knöcherner Ansatz für die Muskeln *Mm. gluteus medius*, *gluteus profundus* und *piriformis* (Salomon et al. 2020). Diese Muskeln dienen bei Kontraktion der Extension des Hüftgelenkes (Salomon et al. 2020). Im Vergleich zu den Wiederkäuern und Pferden überragt der *Trochanter major* bei den Hunden den Femurkopf kaum und bei der Katze gar nicht (König and Liebich 2011). Medial des *Trochanter majors*, etwas unterhalb des Femurkopfes, liegt der kleine Umdreher, der sogenannte *Trochanter minor* (Salomon et al. 2020). Er dient als Ansatz des *M. iliopsoas*, welcher als Beuger und Supinator des Hüftgelenkes dient (König and Liebich 2011; Salomon et al. 2020). Kaudal des *Trochanter majors* zieht ein leistenförmiger Vorsprung, die *Crista intertrochanterica*, nach distal Richtung *Trochanter minor* (Salomon et al. 2020). Durch eine sogenannte mediale und laterale Lippe (*Labium mediale et laterale*) begrenzt, dient diese den Adduktorenmuskeln als Ansatzstelle (Salomon et al. 2020; König and Liebich 2011).

2. Winkel des proximalen Femurs

2.1. Antetorsions- (und Anteversionswinkel)

Eine Torsion beschreibt eine Drehung des Knochens um seine Längsachse, welche sich als eine Innen- oder Außenrotation darstellen kann (Dudley et al. 2006). Das heißt, die Antetorsion beschreibt die Rotation im Femurschaft um die eigene Längsachse (Georgiadis et al. 2015). Genaugenommen hingegen ist die Definition des Anteversionswinkels der Winkel, der von der Schenkelhalsachse und der Tangente an die Hinterkante der Femurkondylen gebildet wird (Georgiadis et al. 2015). Das heißt, die Anzahl Grad, die die Femurhalsachse nach vorne, also anterior, abgewinkelt ist. In der Veterinärmedizin werden die Begriffe ‚Antetorsionswinkel‘ und ‚Anteversionswinkel‘ als Synonyme verwendet, da bisher keine Kriterien beschrieben wurden, welche diese zwei Bezeichnungen unterscheiden lassen würden und es schwierig ist, diese separat voneinander zu messen (Dudley et al. 2006).

Der Antetorsionswinkel wurde bisher in der zugänglichen Literatur bei Hunden noch nicht häufig und bei Katzen bisher noch nicht untersucht. Die bisher gemessenen Winkel befinden sich bei deutschen Schäferhunden im Bereich von 28.1° bis 29.3° (Wigger et al. 2008). Eine ältere Studie hatte Werte von 24° bis 36° ebenfalls bei deutschen Schäferhunden gemessen (Schawalder and Sterchi 1981). Eine neuere Studie bei kleinen Hunderassen konnte anhand Röntgenbilder einen durchschnittlichen Winkel von 25.4° bestimmen, wobei Malteser einen signifikant größeren Winkel hatten im Vergleich zu Pudeln und Yorkshire Terriern (Kim et al. 2016). Wie in der Studie von Kim et al. (2016) wurden früher die Winkel mit Hilfe von Röntgenbildern bestimmt. Dies stellte aber eine große Herausforderung dar, da eine korrekte Lagerung für eine genaue Auswertung der Röntgenbilder unabdingbar war. Dudley et al. (2006) konnten jedoch zeigen, dass Auswertungen anhand einer Computertomographie vergleichbar und deutlich einfacher waren. Burg-Personnaz et al. (2024) haben kürzlich ein Programm entworfen, anhand dessen verschiedenste Winkel, unter anderem auch der Antetorsionswinkel, anhand CT-Bildern einfach und trotzdem genau bestimmt werden können.

2.2. Varus- und Valgusfehlstellung

Varusstellung im Femur bedeutet eine Abweichung der Femurlängsachse nach lateral, wobei eine Valgusstellung gegenteilig eine Abweichung nach medial darstellt (Dudley et al. 2006; Petazzoni 2008). Soparat et al. (2012) konnten beispielsweise aufzeigen, dass Pomeranians mit einer Patellaluxation Grad 3 nach medial größere femorale Varuswinkel aufwiesen als solche mit tieferen Graden oder solche ohne Patellaluxation.

2.3. Inklinationswinkel

Der femorale Inklinationswinkel wird als der Winkel zwischen der Femurlängsachse und der Achse des Femurhalses definiert (Kim et al. 2016). Er wird verwendet, um Deformationen des Femurs zu beurteilen. Er ist bei der Kraftübertragung des Femurs auf das Acetabulum unabdingbar (Sarierler 2004).

3. Mikrocomputertomographie

Die Mikrocomputertomographie (μ -CT) funktioniert ähnlich wie die Computertomographie, bietet aber eine viel höhere Auflösung im ein- bis zweistelligen Mikrometerbereich im Vergleich zu Dezimalstellen im Millimeterbereich der Computertomographie (Engelke et al. 1999). Allerdings besteht bei den heute erwerbbaaren μ -CT Geräten eine Einschränkung der Probenbeziehungsweise Patientengröße. Auch die Scanzeit beträgt beim μ -CT, je nach Gerät und Auflösung, eher Minuten bis Stunden im Vergleich zu wenigen Minuten in der Computertomographie. Im Vergleich zur Goldstandard-Methode der Histomorphometrie zur Untersuchung von Knochenstrukturen ist es jedoch möglich, mittels μ -CT bereits kleinere Tiere wie Nager und Kaninchen lebend zu scannen. Daher wird diese Methode bisher vorwiegend für die experimentelle Forschung verwendet (Hemmerlein et al. 2024; Oliviero et al. 2022; Scarano et al. 2021). Diese Methode ist vergleichsweise weniger aufwendig, da die Präparation von in-vitro Proben wegfällt (David et al. 2003). Weiter kann in der Mikrocomputertomographie die dreidimensionale Topologie direkt dargestellt werden und muss nicht wie in der Histomorphometrie aus zweidimensionalen Schnitten ermittelt werden (Engelke et al. 1999). Neben einer beschränkten Probengröße (beim Xtreme CT II von Scanco, welches in dieser Studie verwendet wurde, beträgt die maximale Probengröße 17cm im Durchmesser) kann jedoch auch die Größe der erstellten Datensätze eine Einschränkung darstellen. Bei der Computertomographie bewegen sich diese im Bereich von Megabytes, bei der Mikrocomputertomographie bereits im Bereich von Gigabytes.

3.1. Parameter zur Strukturanalyse trabekulären Knochens

Zur Strukturanalyse des trabekulären Knochens im Mikrometerbereich wurden in der zugänglichen Literatur bereits verschiedene Parameter definiert und verwendet, welche nachfolgend erklärt werden (Engelke et al. 1999; Bouxsein et al. 2010; Goulet et al. 1994).

Bone Volume Fraction / Knochenvolumenanteil (BV/TV)

Der Knochenvolumenanteil beschreibt das Verhältnis von trabekulärem Knochen zum gesamten Volumen der untersuchten Probe. Der Wert wird in Prozent (%)

angegeben. Bei dichtem Knochen ist der Wert höher und demzufolge bei wenig Knochenmenge pro Volumen tiefer.

Bone Surface to Bone Volume Ratio / Oberflächenvolumenanteil (BS/BV)

Der Oberflächenvolumenanteil definiert das Verhältnis an Knochenoberfläche pro Knochen eines bestimmten Volumens. Das Ergebnis wird in mm^2/mm^3 angegeben (Bouxsein et al. 2010).

Mean Trabecular Number / Durchschnittliche Trabekelanzahl (Tb.N)

Dieser Wert beschreibt die durchschnittliche Anzahl der Trabekel pro bestimmtes Volumen, in der Regel Millimeter und wird somit in $1/\text{mm}$ definiert.

Mean Trabecular Thickness / Durchschnittliche Trabekeldicke (Tb.Th)

Die durchschnittliche Trabekeldicke wird anhand einer dreidimensionalen Methode bestimmt und ergibt die durchschnittliche Trabekeldicke aus einer definierten Probe. Das Messsystem beruht auf Kugeln, welche mit möglichst großem Durchmesser auf den Knochen pro Voxel (Volumenelement) gelegt werden. Die Durchmesser dieser Kugeln werden dann gemittelt (Bouxsein et al. 2010). Das Resultat wird in mm angegeben.

Mean Trabecular Separation / Durchschnittlicher Trabekelabstand (Tb.Sp)

Der Tb.Sp gibt den durchschnittlichen Abstand zwischen den Trabekeln in der Messprobe an. Auch dieser Wert wird anhand einer dreidimensionalen Messmethode, ähnlich zu Tb.Th, bestimmt. Allerdings wird hier der Bereich zwischen den Trabekeln pro Voxel bestimmt und in mm angegeben.

Connectivity-Density / Konnektivität (Conn.D)

Die Konnektivität bezeichnet den Vernetzungsgrad des trabekulären Geflechts. Sie stellt die maximale Anzahl von Verbindungen dar, die innerhalb des Netzwerkes unterbrochen werden können, ohne dass dieses als Ganzes in zwei nicht mehr miteinander verbundene Teile zerfällt (Bouxsein et al. 2010). Es ist eine Aussage über die Quantität der Verbindungen, nicht aber über die Qualität. Die Konnektivität wird in $1/\text{mm}^3$ angegeben, jeweils auf ein definiertes Volumen bezogen.

Degree of Anisotropy / Geometrischer Grad der Anisotropie (DA)

Die Anisotropie steht für die räumliche Ausrichtung der Trabekel eines Knochens. Je stärker die Ausrichtung der Trabekel in eine bestimmte Richtung ist, desto größer ist der Wert und somit der Grad der Anisotropie. Dieser Wert ist dimensionslos.

Mean Density / Mittlere Dichte des kortikalen Knochens

Die mittlere Dichte beschreibt die durchschnittliche Menge an mineralischem Material pro definierte Probe eines Knochens. Dieser Wert ist beispielsweise wichtig in der Osteoporoseforschung der Humanmedizin und wird in mg HA/ccm angegeben (Lu et al. 2001).

4. Implantate für Hüftprothesen bei Katzen und kleinen Hunden

4.1. Materialien

Implantate für eine Hüftprothese bestehen normalerweise aus zwei Anteilen. Die Femurkomponente, welche aus einem Stamm und einem Kopf besteht, ist meistens aus rostfreiem Stahl, Kobalt, Chrom oder Titanium (Venkatesh et al. 2024; Marino et al. 2012). Der Acetabulum-Cup besteht aus UHMW (ultra-high molecular weight) Polyethylen (Venkatesh et al. 2024; Schiller 2017). Beide Elemente sind in verschiedenen Größen von verschiedenen Firmen erhältlich (Venkatesh et al. 2024).

4.2. Implantatarten

4.2.1. Zementierte Implantate für Hüftprothesen

Zementierte Hüftprothesen werden seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt (Bergh et al. 2006; Olmstead 1995). Aufgrund des Einbringens eines zusätzlichen Fremdmaterials, dem sogenannten Zement (Polymethylmethacrylat, PMMA), besteht bereits intraoperativ eine sofortige Verbindung zwischen Implantat und Knochen (Schiller 2017). Jedoch birgt dies aber ein erhöhtes Risiko, welches verspätet zu größeren Komplikationen, wie beispielsweise Infektion oder aseptischer Implantatlockerung, führen kann (Bergh et al. 2006). Diese Komplikationen, welche sich je nach Studie meistens zwischen 7 und 20 Prozent befinden, müssen anschließend je nach Fall, zum Beispiel mit einer zementfreien Hüftprothese, repariert werden (Venkatesh et al. 2024; Hummel 2017). Skurla et al. (2005) konnten sogar nachweisen, dass Hüftprothesen (acetabulärer Cup, sowie Femurstamm) post mortem in mehr als der Hälfte der Fälle zum Todeszeitpunkt locker waren. Es gibt auch bereits zementierte Nano- und Mikro-TEPs, welche bei kleinen Hunden und Katzen mit einem Gewicht von 2-12 kg verwendet werden können und sehr gute Resultate erzielt haben (Liska 2010; Marino et al. 2012).

4.2.2. Zementfreie Hüftprothesen

Zementfreie Hüftprothesen werden ohne Zusatzstoffe wie Zement eingebracht und haben den Vorteil einer kürzeren Operationsdauer, einem deutlich geringeren Infektionsrisiko sowie einer Osseointegration, welche der aseptischen Lockerung möglicherweise entgegenwirkt (Kidd et al. 2016). Osseointegration wurde in der Veterinärmedizin bisher nicht definiert. In der Humanmedizin spricht man von

einem histologischen Phänomen, bei welchem die Inkorporation von lebendem Knochen in ein nicht-lebendes Implantat (beziehungsweise dessen poröse Oberfläche) geschieht und somit zu (Implantat-)Stabilität führt. Auch bei zementfreien Prothesen sind Komplikationen, wie beispielsweise Dislokation, unsachgemäße Implantatbefestigung sowie Femurfissur oder sogar -fraktur, möglich. Diese kommen jedoch nicht nur bei zementfreien, sondern können auch bei zementierten Implantaten auftreten (Marino et al. 2012). Nachfolgend werden verschiedene Verankerungsmöglichkeiten beschrieben.

4.2.2.1. Press-fit Prothesen

Vergleichsweise zu zementierten Hüftprothesen sind bei Press-fit Prothesen eher Komplikationen wie Femurfissuren oder -frakturen sowie Implantatabsenkung/-rotation im Femur zu erwarten (Kidd et al. 2016; Schiller 2017; Hummel 2017). In der Studie von Kidd et al. (2016) betrug die Komplikationsrate von diaphysären Femurfrakturen 6.8%. Um ein Absenken oder Rotieren des Implantates zu verhindern, wird empfohlen einen möglichst großen Durchmesser der Prothese zu verwenden, da eine Korrelation zwischen Ausfüllung des Kanals und der Implantatstabilität gezeigt werden konnte (Kidd et al. 2016). Die sofortige Stabilität des Femurimplantates geschieht durch Einpressen (press-fit) direkt in den vorbereiteten Knochenkanal. Durch die exakte geometrische Form und direktem Knochen am Implantat wird der stabile Sitz der Hüftprothese ermöglicht. Postoperative längerfristige Stabilität wird initial durch Einwachsen von fibrösem Gewebe, später durch einwachsenden Knochen, gewährleistet (Schiller 2017). Qualitativ gutes und vitales Knochengewebe ist daher von unabdingbarem Wert. Die Stabilität des acetabulären Implantates wird durch vorherige Entfernung des subchondralen und trabekulären Knochens durch sogenannte Reamer (Reibahlen) erreicht (Schiller 2017).

4.2.2.2. Verschraubte Prothesen

Als weitere zementlose Möglichkeit, bietet sich die verschraubte Hüftprothese an, welche durch ein Interlocking-System sofortige Stabilität erreicht. Das Femurimplantat wird mittels drei bis fünf Locking-Schrauben fixiert (Hummel 2017). Das Implantat des Acetabulum wird dabei durch eine zentrale Ankerschraube fixiert (Hummel 2017). Die längerfristige Stabilität wird ebenfalls, wie bei der press-fit Hüftprothese mittels Osseointegration gewährleistet (Hummel

2017). Bei der Studie von Hummel (2017) betrug die Komplikationsrate der diaphysären Femurfraktur 7.4%.

4.2.3. Hybrid-Implantate für Hüftprothesen

Als Zwischenlösung gibt es auch sogenannte Hybrid-Implantate für die TEP, welche aus einer nicht-zementierten Acetabulum-Komponente kombiniert mit einem zementierten Femurimplantat bestehen. Diese Methode kann individuell als Alternative von zementierten oder auch nicht-zementierten Prothesen verwendet werden und hat bisher gute Resultate erzielt (Gemmill et al. 2011). Allerdings bestehen auch hier Risiken wie bei den zementierten Implantaten (zum Beispiel Infektionen), da auch hier der Femurschaft zementiert wird.

4.3. Schlussfolgerung

Um die Risiken, welche mit zementierten Implantaten einhergehen, zu minimieren beziehungsweise zu vermeiden, wäre es vorteilhaft, nicht-zementierte Implantate als Mikro-TEP's für Katzen und kleine Hunde zu entwickeln und einsetzen zu können (Schiller 2017). Da für diese Implantate aber ein guter Halt im Knochen direkt, ohne das Bindungselement des Zements, unabdingbar ist, ist auch das Wissen über die Knochen-/Trabekelstruktur von essenziellem Wert. Ohne die Osseointegration des Knochens in die Implantatoberfläche ist die Verankerung zu locker und das Implantat wird längerfristig nicht halten (Schiller 2017). Selbstverständlich muss aber die Art des Implantats und dessen Verankerung individuell für jeden Patienten abgestimmt werden und auch die Erfahrung des jeweiligen Chirurgen muss zwingend miteinbezogen werden, um ein guter Outcome zu erzielen.

III. PUBLIKATION

Der Originalartikel wurde am 08.06.2024 im Journal Research in Veterinary Science eingereicht und am 05.01.2025 zur Veröffentlichung akzeptiert und schließlich am 07.01.2025 veröffentlicht.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034528825000050?via%3Dihub>

Clinic for Small Animal Surgery and Reproduction, Ludwig-Maximilians-
University Munich, Germany

Microcomputed tomographic analysis of the trabecular and cortical architecture of the proximal femur and hip bone of cats and small breed dogs

Jessica Frei, Franziska Feichtner, Andrea Meyer-Lindenberg

Abstract

This study aims to provide an initial database to gain more detailed knowledge of the trabecular and cortical bone structure of pelvic and femur bones in cats and smaller dogs. Additionally, the bony microarchitecture between cats and smaller dogs was compared to identify possible differences between those species. These findings could potentially improve the development of non-cemented total hip replacement (THR). To determine the bony microarchitecture, a total of 48 pelvises and thus 96 acetabuli and femora of smaller dogs ($n = 21$) and cats ($n = 27$) were analysed using microcomputed tomography. The parameters bone volume (BV/TV), bone surface (BS/BV), trabecular thickness (Tb.Th), number of trabeculae (Tb.N), trabecular separation (Tb.Sp), degree of anisotropy (DA), connectivity density (Conn. D) and mean bone density were measured and compared between the species. In addition, the femoral angle of antetorsion was determined on both sides of the body.

Overall, cats had fewer but thicker trabeculae than the small dogs in the analysed areas of the pelvis and femur. This resulted in a greater trabecular distance in cats than in small dogs. Together with a higher cortical bone density at the femoral shaft in cats, it could be determined that cats have a more stable bone architecture in the measured areas than smaller dogs. The angle of antetorsion did not differ significantly between the cats and the dogs examined.



Contents lists available at ScienceDirect

Research in Veterinary Science

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

Microcomputed tomographic analysis of the trabecular and cortical architecture of the proximal femur and hip bone of cats and small breed dogs

Jessica Frei^{*}, Franziska Feichtner, Andrea Meyer-Lindenberg*Clinic for Small Animal Surgery and Reproduction, Ludwig-Maximilians University Munich, Germany*

ARTICLE INFO

Keywords:

Microcomputed tomography
Trabecular bone
Total endoprosthesis
Bone parameters
Cats
Small dogs

ABSTRACT

This study aims to provide an initial database to gain more detailed knowledge of the trabecular and cortical bone structure of pelvic and femur bones in cats and smaller dogs. Additionally, the bony microarchitecture between cats and smaller dogs was compared to identify possible differences between those species. These findings could potentially improve the development of non-cemented total hip replacement (THR). To determine the bony microarchitecture, a total of 48 pelvises and thus 96 acetabuli and femora of smaller dogs ($n = 21$) and cats ($n = 27$) were analysed 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), connectivity density (Conn. D) and mean bone density were measured and compared between the species. In addition, the femoral angle of antetorsion was determined on both sides of the body.

Overall, cats had fewer but thicker trabeculae than the small dogs in the analysed areas of the pelvis and femur. This resulted in a greater trabecular distance in cats than in small dogs. Together with a higher cortical bone density at the femoral shaft in cats, it could be determined that cats have a more stable bone architecture in the measured areas than smaller dogs. The angle of antetorsion did not differ significantly between the cats and the dogs examined.

1. Introduction

Osteoarthritis (OA) is the main indication for a total hip replacement (THR) in dogs and relatively common with a radiographic prevalence of 38–40 % in general (Enomoto et al., 2024), (Wright et al., 2022) and 35.9 % (Roitner et al., 2024) in hip joints specifically. In cats OA in the hip joint is also quite frequently with a prevalence of 24–38 % in adult to geriatric cats (Clarke and Bennett, 2006; Slingerland et al., 2011). THR have been used successfully in small animal medicine for medium and large breed dogs for decades and are constantly being adapted and improved (Olmstead et al., 1981; Allen, 2012; Mitchell et al., 2020; Allaith et al., 2023). Depending on the anatomical characteristics of the femur or acetabulum, it is possible to use cemented, hybrid or cementless implants (Olmstead, 1995; Gemmill et al., 2011; Denny et al., 2018). Cementless implants in particular have been favoured in recent years. However, for small dogs and cats, resection arthroplasty used to be, and to some extent still is, the favoured procedure (Liska et al., 2009; El-Seddawy et al., 2022). As the results in small dogs were not always

satisfactory in terms of freedom from lameness (Off and Matis, 2010), THR were also developed for small dogs and cats. These have mostly achieved good results, but have to be cemented due to a lack of knowledge about the bony microstructure for the construction of cementless endoprostheses in these animals (Liska et al., 2009; Liska, 2010; Schiller, 2017; Rodino Tilve et al., 2022; Vezzoni et al., 2023). However, a cemented THR can lead to complications such as an increased risk of infection, prosthesis loosening or cement disease (Conzemius and Vandervoort, 2005; Tomáš et al., 2007; Kapatkin et al., 2018). It is therefore very important that a cementless endoprosthesis is also developed for small dogs and cats. In medium-sized and large dogs, these are routinely fixed as either a 'press-fit' or by screwing them into the socket or the proximal femur (Hummel, 2017; Schiller, 2017). It is therefore of interest to have detailed knowledge of the micro- and macro anatomy of the cortical and trabecular bone in the acetabulum and proximal femur of small dogs and cats.

Over the last few decades, microcomputed tomography has become established for the investigation of animal models and has experienced

^{*} Corresponding author.

E-mail addresses: jessica.frei@bluemail.ch (J. Frei), ameylin@lmu.de (A. Meyer-Lindenberg).

<https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2025.105531>

Received 8 June 2024; Received in revised form 19 December 2024; Accepted 5 January 2025

Available online 7 January 2025

0034-5288/© 2025 Elsevier Ltd. All rights reserved, including those for text and data mining, AI training, and similar technologies.

J. Frei et al.

Research in Veterinary Science 185 (2025) 105531

enormous growth (Schambach et al., 2010). In clinical veterinary medicine, in contrast to humans, only a few studies of the bone structure at various anatomical localisations exist to date (Bouxsein et al., 2010; Clark and Badea, 2014) or of the structures of the proximal femur and the acetabulum in dogs (Bergh et al., 2004; Scherzer et al., 2009; Townsend, 2012). Studies on the structural parameters of the acetabulum and proximal femur of cats do not yet exist in the available literature.

In conclusion, the aim of the present study was to analyse the trabecular and cortical structures of the proximal femur and acetabulum in small dogs and cats and to identify possible differences. Knowledge of the angle of antetorsion, the angle formed by the femoral neck axis and the tangent to the caudal edge of the femoral condyles in small dogs and cats is lacking in the available literature, which is why this parameter was also analysed in the present study comparing small dogs and cats. This data on the bony microarchitecture of the pelvic region could form a basis for the future manufacture of cementless hip prostheses and their successful use in small dogs and cats. It was not an aim of this study to go further into the mode of action and biomechanics. But this might be the next step to further investigate the difference between cats and small dogs regarding surgical considerations.

2. Material and methods

2.1. Study sample

A total of 21 small dogs and 27 cats were used for the examination of the pelvic and femur bones. The dogs and cats died or were euthanised at the Clinic for Small Animal Surgery and Reproduction, Ludwig-Maximilians University Munich or surrounding veterinary clinics and practices for various reasons unrelated to the study. This study was approved by the Ethics Committee of the Faculty of Veterinary Medicine of the LMU Munich (Approval number: 272–28-06-2021).

2.2. Preliminary examination and preparation of the specimen

A ventro-dorsal radiograph (Siemens Axiom Luminos dRF; Siemens Healthcare AG, Erlangen, Germany) of the hip joint was taken of each animal with the femora extended caudally (HD position 1) to document the integrity of the hip joints. The basic settings for x-ray were 51.8 kV and 6 mAs (cats) and 59.8 kV and 7 mAs (dogs), adjusted according to body size and weight. Animals with divergences such as high-grade hip dysplasia (HD), old fractures of the femur and pelvic bones and other deformities were excluded from the study. The breed, weight and sex of the animal carcasses were recorded. To avoid age-related bone remodelling processes, which are most pronounced in juvenile and old animals, only adult animals with an estimated age of 3 to 8 years were included in the study.

The animal carcasses were frozen at minus 21 °C and thawed in the refrigerator at a temperature of 5 °C for the examination. The soft tissue was completely dissected from the pelvis and both femora, leaving out the hip joint, and detached from the tibia, patella and sacrum. The ligaments and the joint capsule in the immediate vicinity of the hip joint were preserved to keep the bones in their anatomical position. The specimens were labelled immediately and stored in a 4 % formalin solution until further examination.

2.3. Microcomputed tomography (μ CT) examination and evaluation

The specimens were removed from the formalin and placed in the specimen holder of the XtremeCT II device (Scanco Medical, Zurich, Switzerland) with the cranioventral surface of the pelvis and the cranial surface of the femora, arranged parallel, facing downwards (Fig. 1). The scan area was acquired using a topogram from the centre of the pelvic blades to the end of the proximal third of the femur. The scan settings were: 30.3 μ m (voxel size), 68 kV (tube voltage), 100 ms (integration

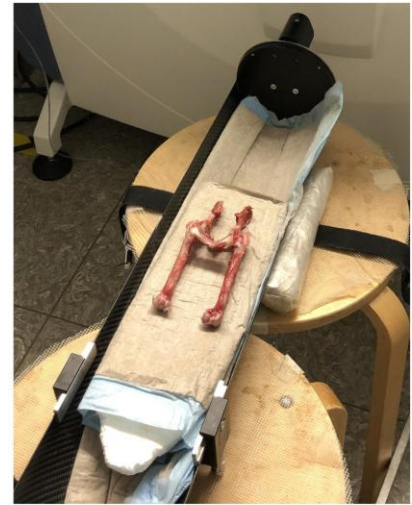


Fig. 1. Positioning of the pelvis including both femora in the sample holder of the μ CT.

time), 1000 projections/180°. The scans were analysed using the μ CT evaluation program V6.6 (Scanco Medical, Zurich, Switzerland). Six regions of interest (ROI) (Figs. 2 & 3) were defined for the left and right acetabula and femora, resulting in twelve total localisations.

2.3.1. ROI acetabulum (measurement of the trabecular bone structure)

The ROI of the cranial acetabulum (AC) was defined as the area of trabecular bone of the cranial acetabulum. The region stretched from the beginning of the acetabular fossa to the separation of the dorsal and ventral part of the acetabulum visible on the scan. As the second (dorsal acetabulum AD) and third (ventral acetabulum AV) ROI, the trabecular bone of the dorsal and ventral trabecular area of the acetabulum were measured. These regions stretched in each case from the separation of the acetabulum to the scan image on which trabecular bone was no longer present (Fig. 2). The ROIs were made as large as possible and comprised only trabecular bone, without including the cortical bone. All three ROIs in the acetabulum were drawn manually on all layers of the

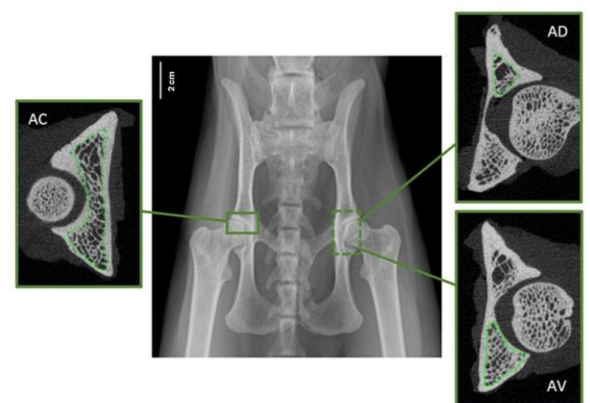


Fig. 2. Ventro-dorsal X-ray image of the pelvis of a cat with a healthy hip. Evaluated regions (regions of interest) in the area of the acetabulum are marked in green.

AC = cranial acetabulum; AD = dorsal acetabulum; AV = ventral acetabulum. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)



Fig. 3. Ventro-dorsal X-ray image of the pelvis of a cat with a healthy hip. Evaluated regions (regions of interest) in the area of the femur are marked in green.

FH = femoral head; FM = femoral metaphysis; FS = femoral shaft. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

μ CT scan individually using the drawing tool of the μ CT evaluation program V6.6.

2.3.2. ROI femur (measurement of trabecular bone structure and cortical bone density)

For the femur, a fourth ROI (localisation of the femoral head FH, measurement of trabecular bone structure) was defined by positioning the largest possible circles inside the femoral head (comprising only trabecular bone, without including the cortical bone) until the femoral neck was reached. The circles were created and positioned manually on all scan images using the drawing tool of the μ CT evaluation program V6.6. The fifth ROI (localisation of the proximal femoral metaphysis FM, measurement of trabecular bone) stretched from 5 mm distal to the highest point of the lesser trochanter to proximal to the division into the femoral neck and greater trochanter and was also drawn manually on all layers of the μ CT scan according to the ROIs of the acetabulum.

The sixth ROI (localisation femoral shaft FS, measurement of the mean density of the cortical bone in the area of the diaphysis) included the cortical bone and began in the proximal part of the femur 5 mm distally to the highest point of the lesser trochanter and covered 10 % of the entire length of the femur (Fig. 3). The cortical bone was automatically recognised by means of circles surrounding the cortical bone (Fig. 3) and measured by the evaluation program.

The trabecular bone structure of the acetabulum (localisations AC, AD, AV; Fig. 2) and femur (localisations FH, FM; Fig. 3) were measured using the following parameters: bone volume fraction (BV/TV (%)), bone surface to bone volume ratio (BS/BV (mm⁻¹)), trabecular number (Tb.N (mm⁻¹)), trabecular thickness (Tb.Th (mm)), trabecular spacing (Tb.Sp (mm)), degree of anisotropy (DA) and connectivity density (Conn. D (mm⁻³)). The cortical mean bone density (mg HA ccm) was only determined on the femoral shaft FS. For the measurement of the parameters, it was necessary to determine thresholds for trabecular and cortical bone, which were determined for each group and each localisation by two independent observers.

2.4. Measurement of the angle of antetorsion

To measure the angle of antetorsion, the samples were scanned in a conventional computer tomograph (Somatom Definition AS, Siemens Healthcare GmbH, Erlangen, Germany) and the 3D Slicer 4.11. program

was used for the analysis (Fedorov et al., 2012). The 'Bone Angle Meter' extension method according to Burg-Personnaz et al. (2024) was used which allowed a practical measurement of the angle of antetorsion. In order to obtain exact results, three measurements were taken per animal and side of the body, and the mean value was then calculated.

2.5. Statistics

The statistical analysis and the preparation of tables and figures were carried out using the SPSS program (IBM SPSS Statistics 28.0.1.1. (IBM Corp. Armonk, NY, USA) and Microsoft Excel 2019 MSO Version 2204 16.0. (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA)). The data was tested for normal distribution using Shapiro-Wilk and Kolmogorov-Smirnov tests. Normally distributed data was analysed with the Levene test and subsequently with the Welch test and the Students *t*-test, respectively. For non-normally distributed data, the Mann-Whitney *U* test was used. The comparison of the trabecular and cortical parameters, as well as the comparison of the angles of antetorsion, were carried out for each localisation analogous to the procedure described above. The structural parameters and mean density of the bones of cats and small dogs were compared at each ROI. All results were considered significant if the statistical value was $p < 0.05$.

3. Results

3.1. Values of study sample

The breeds of animals are summarised in Table 1. Only adult animals (from 3 to 8 years of age) up to a weight of 6.2 kg were included in the study. In the cat group, the lightest animal weighed 1.8 kg and the heaviest 6.2 kg (average weight 3.42 ± 1.16 kg). The minimum weight of the dogs was 1.2 kg and the maximum weight was 5.6 kg (average weight 3.73 ± 1.32 kg). A total of 27 bilaterally hip-healthy animals (54 hip joints) were included in the cat group. 17 cats were neutered females, nine males were neutered, and one male was intact. In the small dog group, 21 animals (42 hip joints) were included. Of these, 11 dogs were female, seven of which were neutered, and 10 dogs were male, six of which were neutered. The most represented breed in each group was the European Shorthair cat and the Chihuahua in the dog group.

3.2. Comparison of right and left acetabula and femora of both groups

The mean values of all localisations on the acetabulum and femur were very close to each other for all examined parameters (BV/TV, BS/BV, Tb.N, Tb.Th, Tb.Sp, Conn.D, DA, density of the corticalis) within an animal species and there was no statistically significant deviation. Therefore, the values are combined below (localisation of the right and left limb).

Table 1
Breed distribution of the study population by group.

Group	Cats ($n = 27$)	Small Dogs ($n = 21$)
Body weight	1.78–6.15 kg	1.23–5.55 kg
Breeds	European Shorthair ($n = 23$) British Shorthair ($n = 1$) European Longhair ($n = 1$) Maine Coon Mix ($n = 1$) Sphynx ($n = 1$)	Chihuahua ($n = 7$) Terrier Mix ($n = 3$) Maltese ($n = 2$) Mix ($n = 2$) Pomeranian ($n = 2$) Cairn Terrier ($n = 1$) Havanese ($n = 1$) Miniature Pinscher ($n = 1$) Miniature Poodle ($n = 1$) Yorkshire Terrier ($n = 1$)

3.3. Results of the analysis of the acetabulum

The parameter bone volume percentage **BV/TV** (%) showed slightly higher mean values in the small dogs than in the cats at all three measured localisations (Table 2). However, this difference was not significant ($p \geq 0.05$). Similarly, when comparing the ratio of bone surface area to bone volume **BS/BV** (mm-1), small dogs showed higher mean values than cats, except for the cranial acetabulum. However, only the localisation in the dorsal part of the acetabulum showed a significant difference between cats and dogs ($p < 0.001$). It was noticeable, however, that the mean value of 9.32 mm-1 for cats was significantly lower than that of 11.36 mm-1 for dogs compared to cranial and ventral localisation. The number of trabeculae **Tb.N** (mm-1) was lower in cats than in dogs at all localisations (cranial, dorsal and ventral acetabulum). Cats therefore had fewer trabeculae than dogs in this area. However, significant differences were only detected in the dorsal ($p < 0.001$) and ventral acetabulum ($p < 0.001$).

When comparing the two species, higher mean values were detected for the parameter **Tb.Th**, i.e. trabecular thickness, in the cats, with the exception of equal mean values at the cranial acetabular localisation. In the dorsal acetabulum, the cats had significantly thicker trabeculae than the dogs ($p < 0.001$). The mean values of the trabecular spacing **Tb.Sp** were higher in the cats than in the dogs at all localisations. Statistically, however, a significant deviation was only detected in the dorsal and ventral acetabular section (AD $p = 0.004$; AV $p < 0.001$). For the connectivity parameter **Conn.D** (mm-3), cats showed lower mean values at all localisations than dogs. There were significant differences between the two animal species in the dorsal ($p < 0.001$) and ventral area ($p < 0.001$) of the acetabulum. The degree of anisotropy **DA** showed significance at all three localisations of the acetabulum (all $p < 0.001$), with cats showing higher mean values than dogs (Table 2).

3.4. Results of the analysis of the trabecular and cortical bone of the femur

The mean values of the bone volume percentage **BV/TV** at the localisation of the femoral head showed slightly higher values in the cats compared to small dogs, but they did not differ significantly from each

other. In the area of the proximal femoral metaphysis, however, the **BV/TV** was the opposite. Here, the mean values were significantly higher in the dogs (FS $p < 0.001$). The bone surface ratio **BS/BV**, on the other hand, showed a significant difference in the femoral head with higher mean values in dogs (FH $p = 0.002$). This could also be measured for the proximal femoral metaphysis (FM $p = 0.002$; see Table 3). The parameter **Tb.N** (both localisations $p < 0.001$), which was higher in the dogs, was also significant. The values in the femoral head, **Tb.Th** (FH < 0.001), which was correspondingly lower in the dogs than in the cats, was also significant. For this parameter, the proximal femoral metaphysis showed no significant difference between the two animal species. The opposite was the case for the trabecular spacing **Tb.Sp**, where a significant difference (FM $p < 0.001$) was found in the proximal femoral metaphysis. However, there was no significant difference between cats and dogs in this parameter in the femoral head. In both localisations, however, the measured values were higher in cats than in dogs. **Conn.D** (both localisations $p < 0.001$) showed significantly higher values in dogs than in cats. The degree of anisotropy **DA**, which was higher in cats at both localisations, only showed a significant difference in the femoral head ($p < 0.001$; Table 3). The density of the cortical bone measured in the femoral shaft (**FS**) showed significantly higher values in cats compared to dogs ($p < 0.001$).

3.5. Analysis of the antetorsion angle

The cats showed an angle of antetorsion of $30.26 \pm 3.79^\circ$ and the small dogs $29.18 \pm 6.30^\circ$. The mean values of this angle were relatively close to each other when comparing cats and dogs, with the mean values being slightly higher in cats (Fig. 4). However, no significant difference was found between the two groups.

4. Discussion

When implanting a THR, both the cortical bone and the trabecular bone are important for its stability (Ni et al., 2007). To date, cementless THR has been routinely used for medium-sized and large dogs (Gemmill et al., 2011; Schiller, 2017). In cats and small dogs, where it is more likely to be cemented, there is lack of data on the bony microstructure for the construction of prostheses in these animals in the available

Table 2
Mean values of the right and left acetabulum combined and their standard deviation of the 27 cats and 21 dogs; * $p \leq 0.05$.

ACETABULUM		Cats (\pm SD)	Dogs (\pm SD)
BV/TV (%)	Acetabulum cranial	40.55 (\pm 10.07)	43.64 (\pm 13.65)
	Acetabulum dorsal	43.89 (\pm 7.86)	44.01 (\pm 12.04)
	Acetabulum ventral	45.26 (\pm 10.95)	49.62 (\pm 13.67)
BS/BV (mm-1)	Acetabulum cranial	11.56 (\pm 2.28)	11.49 (\pm 2.59)
	Acetabulum dorsal*	9.32 (\pm 1.46)	11.36 (\pm 2.12)
	Acetabulum ventral	11.14 (\pm 2.44)	12.02 (\pm 2.38)
Tb.N (mm-1)	Acetabulum cranial	2.24 (\pm 0.23)	2.35 (\pm 0.37)
	Acetabulum dorsal*	2.00 (\pm 0.19)	2.40 (\pm 0.36)
	Acetabulum ventral*	2.40 (\pm 0.24)	2.84 (\pm 0.34)
Tb.Th. (mm)	Acetabulum cranial	0.18 (\pm 0.04)	0.18 (\pm 0.04)
	Acetabulum dorsal*	0.22 (\pm 0.03)	0.18 (\pm 0.03)
	Acetabulum ventral	0.19 (\pm 0.04)	0.17 (\pm 0.03)
Tb.Sp (mm)	Acetabulum cranial	0.27 (\pm 0.07)	0.25 (\pm 0.10)
	Acetabulum dorsal*	0.29 (\pm 0.06)	0.24 (\pm 0.08)
	Acetabulum ventral*	0.23 (\pm 0.06)	0.19 (\pm 0.07)
Conn.D (mm-3)	Acetabulum cranial	10.21 (\pm 3.40)	11.61 (\pm 3.03)
	Acetabulum dorsal*	6.03 (\pm 2.31)	10.47 (\pm 2.65)
	Acetabulum ventral*	10.18 (\pm 3.71)	13.84 (\pm 3.10)
DA	Acetabulum cranial*	1.44 (\pm 0.12)	1.34 (\pm 0.07)
	Acetabulum dorsal*	1.54 (\pm 0.08)	1.36 (\pm 0.10)
	Acetabulum ventral*	1.54 (\pm 0.08)	1.43 (\pm 0.08)

Legend: BV/TV bone volume percentage, BS/BV bone surface to bone volume, Tb.N. trabecular number, Tb.Th. trabecular thickness in mm, Tb.Sp trabecular distance in mm, Conn.D connectivity, DA degree of anisotropy.

Table 3
Mean values of the right and left femur and their standard deviation of the 27 cats and 21 dogs; * $p \leq 0.05$.

FEMUR		Cats (\pm SD)	Dogs (\pm SD)
BV/TV (%)	Femoral head	44.55 (\pm 10.91)	42.99 (\pm 8.84)
	Femoral metaphysis*	15.55 (\pm 5.25)	23.85 (\pm 8.54)
BS/BV (mm-1)	Femoral head*	11.01 (\pm 2.65)	12.46 (\pm 2.07)
	Femoral metaphysis*	12.58 (\pm 2.00)	13.80 (\pm 1.76)
Tb.N (mm-1)	Femoral head*	2.32 (\pm 0.22)	2.62 (\pm 0.44)
	Femoral metaphysis*	0.94 (\pm 0.21)	1.59 (\pm 0.39)
Tb.Th. (mm)	Femoral head*	0.19 (\pm 0.04)	0.17 (\pm 0.03)
	Femoral metaphysis	0.16 (\pm 0.03)	0.15 (\pm 0.02)
Tb.Sp (mm)	Femoral head	0.24 (\pm 0.07)	0.23 (\pm 0.07)
	Femoral metaphysis*	0.96 (\pm 0.27)	0.52 (\pm 0.16)
Conn.D (mm-3)	Femoral head*	12.22 (\pm 3.55)	19.42 (\pm 7.77)
	Femoral metaphysis*	2.88 (\pm 0.67)	6.77 (\pm 1.86)
DA	Femoral head*	1.45 (\pm 0.06)	1.30 (\pm 0.04)
	Femoral metaphysis	1.52 (\pm 0.09)	1.49 (\pm 0.11)
Mean Density (mg HA/ccm)	Femoral shaft*	1372.39 (\pm 39.86)	1310.03 (\pm 34.34)

J. Frei et al.

Research in Veterinary Science 185 (2025) 105531

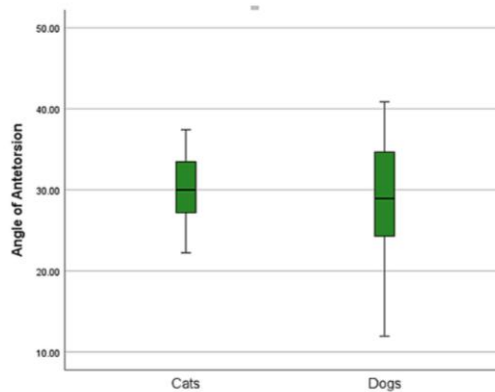


Fig. 4. Antetorsion angle by animal species (24 cats - 48 femora and 21 dogs - 42 femora), with the vertical line in the bar marking the mean value and the vertical lines outside the bar marking the minimum and maximum values respectively. The values in degrees are visible on the left of the Y-axis.

literature. This study aimed to close this gap and was the first to measure various microstructural bone parameters, bone density and angle of antetorsion in cats and small dogs <6.2 kg body weight. It was also intended to detect any differences that could be significant for the development of a THR and serve as a scientific basis and possible aid for developing suitable cementless hip prostheses (press-fit) for cats and small dogs.

Microcomputed tomography (μ CT) was used to measure the microstructural bone parameters of cats and dogs, as it provides more accurate results than conventional CT examinations, particularly in small animals (Holdsworth and Thornton, 2002; Schambach et al., 2010). This method also visualises the bony trabeculae and their three-dimensional arrangement, which was originally described by Wolff (1870). Various already established structural parameters were used for the analysis (Scherzer et al., 2009; Townsend, 2012; Planner et al., 2021), on which the ratios, arrangement, shape and volume of the trabecular bone microarchitecture could be quantitatively compared on a micrometre scale (Engelke et al., 1999). Microcomputed tomography has already been used in one study as a suitable tool to assess species-specific anatomy and bone quality in relation to THR in medium and large dogs (Pugliese, 2014). In this study, a piece of bone (bone core) was removed from the spongy region of the proximal femur from a total of 19 larger breed dogs before the onset of THR, examined using μ CT and then subjected to a mechanical test. A strong positive correlation between BV/TV, peak load and stiffness was demonstrated.

In the present study, no significant differences were found in the bone volume fractions (BV/TV) in the acetabulum and femoral head in dogs and cats, and the values were relatively similar in both groups. From this result it can be concluded that the BV/TV of the mentioned localisations did not provide any species-specific differences. In the femoral metaphysis, however, the dogs showed a significantly higher ratio of BV/TV compared to the cats. This could be due to the fact that pronation and supination phases of the hindlimbs are different in the two species (Corbee et al., 2014).

Fewer but thicker trabeculae were measured in cats compared to dogs. As a result, less bone surface was present in cats, apart from the localisation of the cranial acetabulum. In the dorsal part of the acetabulum and in the femur (femoral head and metaphysis), the values in cats were even significantly lower than in dogs. The number of trabeculae in the dorsal and ventral acetabulum as well as in the femur (femoral head and metaphysis) was even significantly higher in dogs than in cats and significantly different at the aforementioned localisations. Planner et al. (2021) were also able to show corresponding differences in bone parameters between the two species. Although the localisation

antebrachium (radius and ulna) was examined in the study by Planner et al. (2021) and the localisations acetabulum and femur in the present study, a higher number of trabeculae was found in dogs compared to cats in both studies. This could be an important finding, as trabeculae are indispensable when inserting a press-fit THR. There is a detrimental need of trabeculae to grow into the implant and thus ensure stability.

Furthermore, in the present study it was shown that cats had thicker trabeculae overall compared to dogs, except for the cranial acetabulum, where the values were almost identical. In the dorsal acetabulum and in the femoral head, the trabeculae were even significantly thicker in cats than in dogs. It was noticeable in cats and dogs that the trabeculae of the dorsal acetabulum were thicker than ventral. This could be due to an altered load compared to the trabeculae in the ventral acetabulum. It has been shown in rabbits that mechanical stimulation increases bone mass and thickens the trabeculae (van der Meulen et al., 2009). In the present study, this might be explained by the fact that the dorsal part of the acetabulum rests on the femoral head due to gravity and is subjected to more stress by the pressure of the femoral head compared to the ventral part of the acetabulum. Beck et al. (2005) also found a difference between the distribution of forces in the cranial and central/caudal acetabulum in a kinematic study of the hip joint in healthy cats and cat cadavers. On the other hand, the different trabecular thickness within the feline acetabulum could, for example, be due to the different locomotion in the hip joint of cats compared to dogs, vary due to the additional locomotion option of climbing or represent a species-specific difference (Jenkins and Camazine, 2009). A study on femoral heads of humans and different monkey species was even able to differentiate the taxonomy and locomotion groups on the basis of the trabecular parameters determined in the μ CT (Ryan and Shaw, 2012). Whether this finding can also be transferred to the order of carnivores would certainly be interesting but cannot be clarified based on the present study. However, it can certainly be assumed that, in addition to the primary anchorage and the ingrowth behaviour of the bone (both socket and shaft), locomotion also has a considerable influence on the bone and thus also on the implantation of a THR.

Compared to the dogs in the study by Scherzer et al. (2009), and with the exception of the dogs with hip joint dysplasia/coxarthrosis, the trabecular thickness values at the femoral head of the dogs in the present study were higher. In line with this, the number of trabeculae was significantly lower in the present study. It can be concluded that thicker trabeculae can be assumed with a lower number of trabeculae and thinner trabeculae with a higher number of trabeculae, as appears to be the case, for example, with the remodelling processes of the bone (Daubs et al., 2006). The slightly lower average trabecular thickness in the proximal femoral metaphysis can be explained by the fact that in long tubular bones, such as the femur, the medullary cavity increases towards the diaphysis and thus the trabeculae decrease (Salomon et al., 2008).

In the present study, the trabecular distance at both localisations (acetabulum and femur) was smaller in dogs than in cats. This difference was significant in the dorsal and ventral acetabulum, as well as the femoral metaphysis. In other words, the medullary spaces between the trabeculae were conversely larger in cats. A larger trabecular distance in cats compared to dogs was also observed in the study by Planner et al. (2021), although their study examined the microstructure of a different localisation (antebrachium). A closer look at the results of the acetabulum in the present study reveals that the smallest trabecular distances were in the ventral acetabulum, both in the group of cats and in the dogs. In conclusion, this measurement area showed the highest number of trabeculae in both groups. As already mentioned, this could be due to the different load on the acetabulum, as reported by Jenkins and Camazine (2009).

In the cats in our study, the connectivity density was significantly lower than in dogs at all localisations in the acetabulum, apart from the localisation of the cranial acetabulum, as well as in the femur at all localisations. This is not surprising as it is consistent with the lower number of trabeculae in dogs compared to cats. According to a human

medical study by Davison et al. (2006), a high Conn.D correlates with high bone stability. Overall, however, this relationship is controversially discussed in literature (Goldstein et al., 1993; Thomsen et al., 1998; Ding et al., 2002). Another study showed that bone volume of human bones is the only parameter that is meaningful for bone strength (Thomsen et al., 1998). In contrast, a more recent study in humans showed that, in addition to the bone volume ratio, the degree of anisotropy is also significantly involved in bone stiffness (Maquer et al., 2015). In the present study, the geometric degree of anisotropy was significantly higher in cats than in dogs for all three localisations in the acetabulum and femoral head. This means that the bone trabeculae are orientated more in a certain direction in cats than in dogs. Planner et al. (2021) came to the same conclusion. It is known from the literature that anisotropy is caused by the growth of collagen fibres in certain directions under mechanical stress and is also constantly adapted to changing loads in order to continuously maintain bone stability (Matsugaki et al., 2013).

The bone density of the cortical bone, which was measured in the femoral shaft in the present study, was significantly higher in cats compared to dogs, which was also demonstrated by Planner et al. (2021) in the radius and ulna area. With these results it seems as if cats have more stable bones than smaller dogs, which is especially important when inserting a press-fit shaft implant (Schiller, 2017). Conversely, dogs have more trabeculae which may lead to faster ingrowth or a more stable implant-bone connection. However, this conclusion cannot be based on our bone parameters alone and would require further biomechanical and comparative clinical studies. Interestingly, it has been shown in the literature that the femur is the most frequently fractured bone (Cardoso et al., 2016). This is particularly significant, as the femur is indispensable for a successful THR. The authors of various papers disagree as to whether cats or dogs are more frequently affected by fractures of the femur (Bennour et al., 2014; Elzomor et al., 2014). It is primarily known from orthodontic research in human medicine that lower bone density has a detrimental effect on implant stability (Turkyilmaz and McGlumphy, 2008; Radi et al., 2018). In addition, it was experimentally shown that extensive remodelling occurs in the proximal and medial femoral region in goats with unilateral THR, i.e. the cortical bone and mineral density were reduced on the side with the THR compared to the non-implanted side (Ni et al., 2007). This could have a significant influence on the manufacture or implantation of species-specific implants for small dogs and cats, such as a THR. Another parameter that could be important for the implantation of a THR is knowledge of the angle of antetorsion. For small dogs and cats, there is no information on this in the available literature.

Since Dudley et al. (2006) showed in nine cadavers of healthy dogs that measurements of the angle of antetorsion in radiological imaging are comparable to those of computer tomography, this angle was determined in the present study with the aid of a 3D model of the femora in CT. The measured angles of antetorsion of dogs in this study are consistent with previous radiological measurements in medium and large dogs (Schawaldler and Sterchi, 1981; Wigger et al., 2008; Bruehschwein et al., 2023), although the angles of dogs in these studies showed a greater variation than in our study. Nothing is known about the angle of antetorsion in cats in the available literature and it has been shown in this study that the angle of antetorsion in cats is slightly smaller than in small dogs.

This study provides initial insights into the microstructural bone parameters in the acetabulum and femur in cats and small dogs. The study sample consisted of a relatively balanced number of sexes and weights to minimise sex- and weight-related differences. Further studies are needed to determine other factors that influence bony microstructure, such as possible breed or age differences. It has also been described in the literature that other factors such as gender, castration status or hormonal fluctuations, for example in endocrinological disease, play a role in bone remodelling in dogs that should not be underestimated (Dannucci et al., 1987; Sajjarengpong, 2003). These, and further

aspects, such as biomechanics, were not considered further in the present study and could be of interest for subsequent studies. Overall, differences in the bony microstructure of cats and dogs were found in the present study, which could be important in developing THR for cats and small dogs. This study shows that cats anatomically are not small dogs and adjustments to implants might be necessary for each species even with comparable weight.

5. Explanations

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

CRedit authorship contribution statement

Jessica Frei: Writing – original draft, Visualization, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation. **Franziska Feichtner:** Writing – review & editing, Supervision, Resources. **Andrea Meyer-Lindenberg:** Writing – review & editing, Validation, Supervision, Resources, Project administration.

Declaration of competing interest

None.

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 her in her work with the μ CT.

References

- Allaith, S., Tucker, L.J., Innes, J.F., Arthurs, G., Vezzoni, A., Morrison, S., Onyett, J., Stork, C.K., Witte, P., Denny, H., Pettitt, R., Moores, A.P., Maddox, T., Comerford, E. J., 2023. Outcomes and complications reported from a multiuser canine hip replacement registry over a 10-year period. *Vet. Surg.* 52 (2), 196–208. <https://doi.org/10.1111/vsu.13885>.
- Allen, M.J., 2012. Advances in total joint replacement in small animals. *J. Small Anim. Pract.* 53 (9), 495–506. <https://doi.org/10.1111/j.1748-5827.2012.01264.x>.
- Beck, A.L., Pead, M.J., Draper, E., 2005. Regional load bearing of the feline acetabulum. *J. Biomech.* 38 (3), 427–432. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.04.035>.
- Bennour, E., Abushhiwa, M., Ben Ali, L., Sawesi, O., Marzok, M., Abuargob, O., Tmumen, S., Abdelhadi, J., Abushima, M., Benothman, M., 2014. A retrospective study on appendicular fractures in dogs and cats in Tripoli-Libya. *J. Vet. Adv.* 4 (3), 425–431.
- Bergh, M.S., Muir, P., Markel, M.D., Manley, P.A., 2004. Femoral bone adaptation to stable long-term cemented total hip arthroplasty in dogs. *Vet. Surg.* 33 (3), 214–220. <https://doi.org/10.1111/j.1532-950X.2004.04032.x>.
- Bouxein, M.L., Boyd, S.K., Christiansen, B.A., Goldberg, R.E., Jepsen, K.J., Muller, R., 2010. Guidelines for assessment of bone microstructure in rodents using micro-computed tomography. *J. Bone Miner. Res.* 25 (7), 1468–1486. <https://doi.org/10.1002/jbmr.141>.
- Bruehschwein, A., Burg-Personnaz, J., Zollner, M., Reese, S., Meyer-Lindenberg, A., 2023. Comparison of CT-measured angles of pelvic limbs without patellar luxation of six canine breeds. *Front. Vet. Sci.* 10, 1194167. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1194167>.
- Burg-Personnaz, J., Zoellner, M., Reese, S., Meyer-Lindenberg, A., Bruehschwein, A., 2024. 3D slicer open-source software plug-in for vector-based angle calculation of canine hind limb alignment in computed tomographic images. *PLoS ONE* 19 (3), e0283823. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283823>.
- Cardoso, C.B., Rahal, S.C., Agostinho, F.S., Mamprim, M.J., Santos, R.R., Ednaldo Filho, S., Mortari, A.C., Monteiro, F.O., 2016. Long bone fractures in cats: a retrospective study. *Vet. Zootec.* 23 (3), 504–509.
- Clark, D.P., Badaea, C.T., 2014. Micro-CT of rodents: state-of-the-art and future perspectives. *Phys. Med.* 30 (6), 619–634. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2014.05.011>.
- Clarke, S.P., Bennett, D., 2006. Feline osteoarthritis: a prospective study of 28 cases. *J. Small Anim. Pract.* 47 (8), 439–445. <https://doi.org/10.1111/j.1748-5827.2006.00143.x>.
- Conzemius, M.G., Vandervoort, J., 2005. Total joint replacement in the dog. *Vet. Clin. North Am. Small Anim. Pract.* 35 (5), 1213–1231 vii. <https://doi.org/10.1016/j.cvs.2005.05.006>.

- Corbee, R.J., Maas, H., Doornbal, A., Hazewinkel, H.A., 2014. Forelimb and hindlimb ground reaction forces of walking cats: assessment and comparison with walking dogs. *Vet. J.* 202 (1), 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2014.07.001>.
- Dannucci, G.A., Martin, R.B., Patterson-Buckendahl, P., 1987. Ovariectomy and trabecular bone remodeling in the dog. *Calcif. Tissue Int.* 40 (4), 194–199. <https://doi.org/10.1007/BF02556621>.
- Daubs, B.M., Markel, M.D., Manley, P.A., 2006. Histomorphometric analysis of articular cartilage, zone of calcified cartilage, and subchondral bone plate in femoral heads from clinically normal dogs and dogs with moderate or severe osteoarthritis. *Am. J. Vet. Res.* 67 (10), 1719–1724. <https://doi.org/10.2460/ajvr.67.10.1719>.
- Davison, K.S., Siminoski, K., Adachi, J.D., Hanley, D.A., Goltzman, D., Hodsmann, A.B., Josse, R., Kaiser, S., Olszynski, W.P., Papaioannou, A., Ste-Marie, L.G., Kendler, D.L., Tenenhouse, A., Brown, J.P., 2006. Bone strength: the whole is greater than the sum of its parts. *Semin. Arthritis Rheum.* 36 (1), 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.semarthrit.2006.04.002>.
- Denny, H.R., Linnell, M., Maddox, T.W., Comerford, E.J., 2018. Canine total hip replacement using a cementless threaded cup and stem: a review of 55 cases. *J. Small Anim. Pract.* 59 (6), 350–356. <https://doi.org/10.1111/jsap.12827>.
- 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.* 84-B (6), 900–907. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.84b6.0840900>.
- Dudley, R.M., Kowaleski, M.P., Drost, W.T., Dyce, J., 2006. Radiographic and computed tomographic determination of femoral varus and torsion in the dog. *Vet. Radiol. Ultrasound* 47 (6), 546–552. <https://doi.org/10.1111/j.1740-8261.2006.00184.x>.
- El-Seddawy, F.D., El-Mezayen, A.F., Tantawy, M.F., M., G., 2022. Femoral head and neck ostectomy (FHO) for treatment of different hip joint disorders in dogs. *J. Adv. Vet. Res.* 12 (4), 422–425.
- Elzomor, S., Sheta, E., Farghali, H., Ashour, A., 2014. Prevalence of femoral fractures in dogs and cats. *J. Egypt. Vet. Med. Assoc.* 74 (2), 269–278.
- Engelke, K., Karolczak, M., Lutz, A., Seibert, U., Schaller, S., Kalender, W., 1999. Mikro-CT - Technologie und Applikationen zur Erfassung von Knochenarchitektur. In: *Der Radiologe*, pp. 203–212.
- Enomoto, M., de Castro, N., Hash, J., Thomson, A., Nakanishi-Hester, A., Perry, E., Aker, S., Haupt, E., Opperman, L., Roe, S., Cole, T., Thompson, N.A., Innes, J.F., Lascelles, B.D.X., 2024. Prevalence of radiographic appendicular osteoarthritis and associated clinical signs in young dogs. *Sci Rep* 14 (1), 2827. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52324-9>.
- Fedorov, A., Beichel, R., Kalpathy-Cramer, J., Finet, J., Fillion-Robin, J.C., Pujol, S., Bauer, C., Jennings, D., Fennessy, F., Sonka, M., Buatti, J., Aylward, S., Miller, J.V., Pieper, S., Kikinis, R., 2012. 3D slicer as an image computing platform for the quantitative imaging network. *Magn. Reson. Imaging* 30 (9), 1323–1341. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2012.05.001>.
- Gemmill, T.J., Pink, J., Renwick, A., Oxley, B., Downes, C., Roch, S., McKee, W.M., 2011. Hybrid cemented/cementless total hip replacement in dogs: seventy-eight consecutive joint replacements. *Vet. Surg.* 40 (5), 621–630. <https://doi.org/10.1111/j.1532-950X.2011.00827.x>.
- Goldstein, S.A., Goulet, R., McCubrey, D., 1993. Measurement and significance of three-dimensional architecture to the mechanical integrity of trabecular bone. *Calcif. Tissue Int.* 53 Suppl 1, S127–S132 discussion S132–123. <https://doi.org/10.1007/BF01673421>.
- Holdsworth, D.W., Thornton, M.M., 2002. Micro-CT in small animal and specimen imaging. *Trends Biotechnol.* 20 (8), S34–S39. [https://doi.org/10.1016/s0167-7799\(02\)02004-8](https://doi.org/10.1016/s0167-7799(02)02004-8).
- Hummel, D., 2017. Zurich cementless total hip replacement. *Vet. Clin. North Am. Small Anim. Pract.* 47 (4), 917–934. <https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2017.02.004>.
- Jenkins, F.A., Camazine, S.M., 2009. Hip structure and locomotion in ambulatory and cursorial carnivores. *J. Zool.* 181 (3), 351–370. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1977.tb03249.x>.
- Kapatkin, A.S., Shofer, F.S., Gilley, R.S., Bergh, M.S., 2018. Complications and radiographic findings following cemented total hip replacement. *Vet. Comp. Orthop. Traumatol.* 19 (03), 172–179. <https://doi.org/10.1055/s-0038-1632994>.
- Liska, W.D., 2010. Micro total hip replacement for dogs and cats: surgical technique and outcomes. *Vet. Surg.* 39 (7), 797–810. <https://doi.org/10.1111/j.1532-950X.2010.00725.x>.
- Liska, W.D., Doyle, N., Marcellin-Little, D.J., Osborne, J.A., 2009. Total hip replacement in three cats: surgical technique, short-term outcome and comparison to femoral head ostectomy. *Vet. Comp. Orthop. Traumatol.* 22 (6), 505–510. <https://doi.org/10.1055/s-0009-0087>.
- Maquer, G., Musy, S.N., Wandel, J., Gross, T., Zysset, P.K., 2015. Bone volume fraction and fabric anisotropy are better determinants of trabecular bone stiffness than other morphological variables. *J. Bone Miner. Res.* 30 (6), 1000–1008. <https://doi.org/10.1002/jbmr.2437>.
- Matsugaki, A., Fujiwara, N., Nakano, T., 2013. Continuous cyclic stretch induces osteoblast alignment and formation of anisotropic collagen fiber matrix. *Acta Biomater.* 9 (7), 7227–7235. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.03.015>.
- Mitchell, M.M., Hudson, C.C., Beale, B.S., 2020. Comparison of femoral stem subsidence between three types of press-fit cementless total hip replacement in dogs. *Vet. Surg.* 49 (4), 787–793. <https://doi.org/10.1111/vsu.13391>.
- Ni, G.X., Lu, W.W., Chiu, P.K., Wang, Y., Li, Z.Y., Zhang, Y.G., Xu, B., Deng, L.F., Luk, K. D., 2007. Mechanical properties of femoral cortical bone following cemented hip replacement. *J. Orthop. Res.* 25 (11), 1408–1414. <https://doi.org/10.1002/jor.20388>.
- Off, W., Matis, U., 2010. Excision arthroplasty of the hip joint in dogs and cats. Clinical, radiographic, and gait analysis findings from the Department of Surgery, veterinary Faculty of the Ludwig-Maximilians-University of Munich, Germany. 1997. *Vet. Comp. Orthop. Traumatol.* 23 (5), 297–305. <https://doi.org/10.1055/s-0037-1617478>.
- Olmstead, M.L., 1995. Canine cemented total hip replacements: state of the art. *J. Small Anim. Pract.* 36 (9), 395–399. <https://doi.org/10.1111/j.1748-5827.1995.tb02962.x>.
- Olmstead, M.L., Hohn, R.B., Turner, T.M., 1981. Technique for canine total hip replacement. *Vet. Surg.* 10 (1), 44–50. <https://doi.org/10.1111/j.1532-950X.1981.tb00628.x>.
- Planner, F., Feichtner, F., Meyer-Lindenberg, A., 2021. 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 (6), 2113–2119. <https://doi.org/10.1002/vms3.619>.
- Pugliese, L.C., 2014. Proximal Femoral Morphology and Bone Quality Assessment in Dogs. The Ohio State University, USA. https://etd.ohiolink.edu/acprod/odb_etd_etd/tr/1501/10?clear=10&p10_accession_num=osu1405609448.
- Radi, I.A., Ibrahim, W., Iskandar, S.M.S., AbdelNabi, N., 2018. Prognosis of dental implants in patients with low bone density: a systematic review and meta-analysis. *J. Prosthet. Dent.* 120 (5), 668–677. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2018.01.019>.
- Rodino Tilve, V., Allaith, S., Girling, S., Moores, A.P., Mulholland, L., Morrison, S., Onyett, J., Maddox, T.W., Lascelles, B.D.X., Langley-Hobbs, S., Comerford, E., 2022. Long-term follow up of 44 cats undergoing total hip replacement: cases from a feline hip registry (2010–2020). *Vet. Surg.* 51 (5), 763–771. <https://doi.org/10.1111/vsu.13822>.
- Roitner, M., Klever, J., Reese, S., Meyer-Lindenberg, A., 2024. Prevalence of osteoarthritis in the shoulder, elbow, hip and stifle joints of dogs older than 8 years. *Vet. J.* 305, 106132. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2024.106132>.
- Ryan, T.M., Shaw, C.N., 2012. Unique suites of trabecular bone features characterize locomotor behavior in human and non-human anthropoid primates. *PLoS ONE* 7 (7), e41037. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041037>.
- Sajjarengpong, K., 2003. Differences seen in the pelvic bone parameters of male and female dogs. *Thai J. Vet. Med.* 33, 55–61.
- Salomon, F., Geyer, H., Gille, U., 2008. *Anatomie Für die Tiermedizin*, vol. 2. Enke.
- Schambach, S.J., Bag, S., Schilling, L., Groden, C., Brockmann, M.A., 2010. Application of micro-CT in small animal imaging. *Methods* 50 (1), 2–13. <https://doi.org/10.1016/j.jymeth.2009.08.007>.
- Schawwalder, P., Sterchi, H.P., 1981. Measurement of the Centre-collum-diaphysis and antetorsion angles of the canine hip. *Kleintierpraxis* 6 (3), 151–158, 160–162.
- Scherzer, C., Windhagen, H., Nellesen, J., Crostack, H.A., Rohn, K., Witte, F., Thorey, F., Fehr, M., Hauschild, G., 2009. Comparative structural analysis of the canine femoral head in Legg-calve-Perthes disease. *Vet. Radiol. Ultrasound* 50 (4), 404–411. <https://doi.org/10.1111/j.1740-8261.2009.01557.x>.
- Schiller, T.D., 2017. BioMedtrix Total hip replacement systems: an overview. *Vet. Clin. North Am. Small Anim. Pract.* 47 (4), 899–916. <https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2017.03.005>.
- Slingerland, L.L., Hazewinkel, H.A., Meij, B.P., Picavet, P., Voorhout, G., 2011. Cross-sectional study of the prevalence and clinical features of osteoarthritis in 100 cats. *Vet. J.* 187 (3), 304–309. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2009.12.014>.
- Thomsen, J.S., Ebbesen, E.N., Mosekilde, L., 1998. Relationships between static histomorphometry and bone strength measurements in human iliac crest bone biopsies. *Bone* 22 (2), 153–163. [https://doi.org/10.1016/s8756-3282\(97\)00235-4](https://doi.org/10.1016/s8756-3282(97)00235-4).
- Tomáš, T., Nachtnebl, L., Otička, P., 2007. The relation between implanted material and infection of the total joint replacement. *Orthop. Surg.* 80 (3), 107–122.
- Townsend, K.L., 2012. The Use of Radiographs, Dual-Energy X-Ray Absorptiometry, Quantitative Computed Tomography and Micro-Computed Tomography to Determine Local Cancellous Bone Quality in the Canine Proximal Femur. The Ohio State University. http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=osu1336769521.
- Turkylmaz, I., McGlumphy, E.A., 2008. Influence of bone density on implant stability parameters and implant success: a retrospective clinical study. *BMC Oral Health* 8, 32. <https://doi.org/10.1186/1472-6831-8-32>.
- van der Meulen, M.C., Yang, X., Morgan, T.G., Bostrom, M.P., 2009. The effects of loading on cancellous bone in the rabbit. *Clin. Orthop. Relat. Res.* 467 (8), 2000–2006. <https://doi.org/10.1007/s11999-009-0897-4>.
- Vezzoni, A., Boano, S., Sacristani, A., Bresina, S., Lanz, O.I., 2023. Zurich mini cementless total hip arthroplasty in 42 small breed dogs and 8 cats: surgical technique and outcomes. *VCOT Open* 06 (01), e22–e36. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1761600>.
- Wigger, A., Tellhelm, B., Kramer, M., Rudolf, H., 2008. Influence of femoral head and neck conformation on hip dysplasia in the German shepherd dog. *Vet. Radiol. Ultrasound* 49 (3), 243–248. <https://doi.org/10.1111/j.1740-8261.2008.00358.x>.
- Wright, A., Amodie, D.M., Cernicchiaro, N., Lascelles, B.D.X., Pavlock, A.M., Roberts, C., Bartram, D.J., 2022. Identification of canine osteoarthritis using an owner-reported questionnaire and treatment monitoring using functional mobility tests. *J. Small Anim. Pract.* 63 (8), 609–618. <https://doi.org/10.1111/jsap.13500>.
- Wolff, J., 1870. Ueber die innere Architektur der Knochen und ihre Bedeutung für die Frage vom Knochenwachstum. *Archiv Pathol. Anat. Physiol. Klin. Med.* 50 (3), 389–450. <https://doi.org/10.1007/bf01944490>.

IV. DISKUSSION

Bei der Implantation einer Hüftprothese sind sowohl der kortikale Knochen als auch der trabekuläre Knochen für die Stabilität wichtig (Ni et al. 2007). Bislang wurde die zementfreie Hüftprothese routinemäßig bei mittelgroßen und großen Hunden eingesetzt (Gemmill et al. 2011; Schiller 2017; Franklin et al. 2021). Bei Katzen und kleinen Hunden, bei welchen die Hüftprothesen bisher zementiert werden, fehlt es in der zugänglichen Literatur an Daten über die knöcherne Mikrostruktur. Dies wäre aber für die Konstruktion von zementfreien Prothesen sehr hilfreich. Da es dazu in der zugänglichen Literatur bisher keine Untersuchungen gegeben hatte, hat die vorliegende Studie zum Ziel diese Lücke zu schließen. Es handelt sich um die erste Studie, die verschiedene mikrostrukturelle Knochenparameter, die Knochendichte und den Antetorsionswinkel bei Katzen und kleinen Hunden <6,2 kg Körpergewicht untersucht und vergleicht (Frei et al. 2025). Diese Daten sollen als wissenschaftliche Grundlage dienen und könnten als eine mögliche Hilfe für die Entwicklung geeigneter zementfreier Hüftprothesen (Press-fit) für Katzen und kleine Hunde dienen. Mit der vorliegenden Studie könnte die Entwicklung von zementlosen Hüftprothesen auch für Katzen und kleine Hunde einen wichtigen Schritt vorangebracht werden.

Für die vorliegende Studie wurde die Mikrocomputertomographie (μ -CT) zur Messung der mikrostrukturellen Knochenstrukturparameter von Katzen und Hunden verwendet, da sie insbesondere bei Kleintieren genauere Ergebnisse liefert als herkömmliche CT-Untersuchungen (Holdsworth and Thornton 2002; Schambach et al. 2010). Dieses Untersuchungsverfahren stellt auch die knöchernen Trabekel und ihre dreidimensionale Anordnung dar, wie sie ursprünglich von Wolff (1870) beschrieben wurde. Verschiedene bereits etablierte Strukturparameter wurden für die Analyse verwendet, wie dies auch in anderen Studien durchgeführt wurde (Scherzer et al. 2009; Townsend 2012; Planner et al. 2021). Anhand dieser konnten in der vorliegenden Untersuchung die Verhältnisse, die Anordnung, die Form und das Volumen der trabekulären Knochenmikroarchitektur quantitativ im Mikrometerbereich verglichen werden, wie dies auch von Engelke et al. (1999) beschrieben wurde. Die Mikrocomputertomographie wurde bereits in einer Studie als geeignetes Instrument zur Beurteilung der artspezifischen Anatomie und

Knochenqualität in Bezug auf die TEP bei mittelgroßen und großen Hunden verwendet (Pugliese 2014). In der Studie von Pugliese (2014) wurde ein Stück Knochen aus der spongiösen Region des proximalen Femurs von insgesamt 19 größeren Hunden vor Einsetzen der TEP entnommen und mittels μ -CT untersucht und anschließend einem mechanischen Test unterzogen. Eine starke positive Korrelation zwischen BV/TV, Spitzenbelastung und Steifigkeit wurde nachgewiesen. Der Bereich des Femurkopfes beziehungsweise seine Trabekelstruktur ist zwar für das Einsetzen einer TEP nicht direkt von Bedeutung, da dieses Knochenstück bei der Operation entfernt wird. Aufgrund bisher nur sehr wenigen Arbeiten im Bereich der Knochenstruktur des Femurs von Hunden, wurde dieser Messbereich in der vorliegenden Studie jedoch trotzdem untersucht, um Vergleichswerte zu haben und diskutieren zu können.

In der vorliegenden Studie wurden keine signifikanten Unterschiede in den Knochenvolumenanteilen (BV/TV) des Acetabulums und des Femurkopfes bei Hunden und Katzen nachgewiesen (Frei et al. 2025). Die gemessenen Werte waren in beiden Gruppen ähnlich. Aus diesem Ergebnis lässt sich schließen, dass das BV/TV der genannten Lokalisationen keine artspezifischen Unterschiede aufweist und somit die Spitzenbelastung sowie die Steifigkeit bei beiden Tierarten vergleichbar ist. In der Femurmetaphyse zeigten die Hunde jedoch ein signifikant höheres Verhältnis von BV/TV im Vergleich zu den Katzen. Dies könnte auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass die Pronations- und Supinationsbewegungen der Hintergliedmaßen bei beiden Spezies unterschiedlich sind (Corbee et al. 2014). Weiter könnte dies bedeuten, dass Hunde höhere Spitzenbelastung im Bereich der Femurmetaphyse aushalten als Katzen. Dies könnte beim Einsetzen einer TEP wichtig sein.

Bei den Katzen in der eigenen Studie wurden weniger, aber dickere Trabekel (Tb.N, Tb.Th) gemessen als bei den Hunden (Frei et al. 2025). Infolgedessen war bei Katzen weniger Knochenoberfläche vorhanden. Die Anzahl der Trabekel im Bereich des dorsalen und ventralen Acetabulums sowie im Femur (Femurkopf und -metaphyse) war bei den Hunden sogar signifikant höher als bei den Katzen. Planner et al. (2021) konnten ebenfalls entsprechende Unterschiede in den Knochenparametern zwischen den beiden Spezies zeigen. Obwohl die Lokalisation Antebrachium (Radius und Ulna) in der Studie von Planner et al. (2021) und die Lokalisationen Acetabulum und Femur in der vorliegenden Studie untersucht

wurden, wurde in beiden Arbeiten eine höhere Anzahl von Trabekeln bei Hunden nachgewiesen (Frei et al. 2025). Dies könnte ein wichtiger Befund sein, da Trabekel beim Einsetzen einer press-fit Hüftprothese unverzichtbar sind. Dies ist insbesondere von Bedeutung, weil die Trabekel nach Einsetzen einer TEP in das Implantat einwachsen müssen und so für langanhaltende Stabilität sorgen. Die sofortige vorübergehende Stabilität wird dabei entweder durch Verschraubung des acetabulären Cups oder den press-fit Effekt des Femurstammes erreicht (Schiller 2017).

Weiter wurde in der vorliegenden Studie gezeigt, dass Katzen im Vergleich zu Hunden insgesamt dickere Trabekel aufwiesen, mit Ausnahme des kranialen Acetabulums, wo die Werte fast identisch waren (Frei et al. 2025). Im dorsalen Acetabulum und im Femurkopf waren die Trabekel bei Katzen sogar signifikant dicker als bei Hunden. Bei beiden Tierarten war auffällig, dass die Trabekel des dorsalen Acetabulums dicker waren als ventral. Dies könnte auf eine veränderte Belastung im Vergleich zu den Trabekeln im ventralen Acetabulum hinweisen. Es wurde beispielsweise bei Kaninchen gezeigt, dass eine mechanische Stimulation die Knochenmasse erhöht und die Trabekel verdickt (van der Meulen et al. 2009). In der vorliegenden Studie könnte dies durch die Tatsache erklärt werden, dass der dorsale Teil des Acetabulums aufgrund der Schwerkraft auf dem Femurkopf ruht und durch den Druck des Femurkopfes stärker belastet wird als der ventrale Teil des Acetabulums. Beck et al. (2005) fanden bei einer kinematischen Untersuchung des Hüftgelenks von gesunden Katzen und Katzenkadavern einen Unterschied zwischen der Verteilung der Kräfte im kranialen und zentralen/kaudalen Acetabulum heraus. Andererseits könnte die unterschiedliche Trabekeldicke im Acetabulum bei Katzen zum Beispiel auf eine unterschiedliche Bewegung im Hüftgelenk von Katzen im Vergleich zu Hunden zurückzuführen sein. Es könnte sich hierbei also um einen artspezifischen Unterschied handeln. In der Studie von Jenkins and Camazine (2009) wurde bereits die unterschiedliche Belastung des Acetabulums bei verschiedenen Tierarten anhand interaktiver radiologischer Bildbetrachtung beschrieben. Eine Studie an menschlichen Femurköpfen und verschiedenen Affenarten konnte sogar eine Differenzierung der Taxonomie- und Fortbewegungsgruppen anhand der ermittelten Trabekelparametern im μ -CT ermitteln (Ryan and Shaw 2012). Ob diese Erkenntnisse auch auf die Ordnung der Karnivoren übertragen werden können, wäre sicherlich interessant, kann aber

anhand der vorliegenden Studie nicht geklärt werden. Es ist aber sicher davon auszugehen, dass neben der primären Verankerung und dem Einwachsverhalten des Knochens (sowohl Pfanne als auch Schaft) auch die Lokomotion einen erheblichen Einfluss auf den Knochen und damit auch auf die Implantation einer TEP haben könnte. Im Vergleich zu gesunden Hunden in einer vorangegangenen Studie von Scherzer et al. (2009) war die Trabekeldicke im Bereich des Femurkopfes der Hunde in der vorliegenden Studie höher (Frei et al. 2025). Diese untersuchten trabekuläre Strukturparameter bei gesunden Hunden und verglichen diese mit kranken Hunden, welche an Legg-Calvé-Perthes, Hüftgelenkdysplasie oder coxofemorale Luxation leiden). Bei Scherzer et al. (2009) handelte es sich aber bei der untersuchten Studienpopulation um größere Hunde. Dieser Unterschied könnte jedoch auch auf die unterschiedlichen Rassen zurückzuführen zu sein. Dennoch war auch die Anzahl der Trabekel der vorliegenden Studie (Frei et al. 2025) niedriger als bei den Hunden (gesunde sowie erkrankte) von Scherzer et al. (2009).

Daraus kann abgeleitet werden, dass dickere Trabekel mit einer geringeren Anzahl von Trabekeln und dünnere Trabekel mit einer höheren Anzahl von Trabekeln angenommen werden können, wie es zum Beispiel bei den Umbauprozessen des Knochens der Fall zu sein scheint (Daubs et al. 2006). Die etwas geringere durchschnittliche Trabekeldicke in der proximalen Femurmetaphyse im Vergleich zum Femurkopf lässt sich dadurch erklären, dass in langen Röhrenknochen, wie dem Femur, der Markraum zur Diaphyse hin zunimmt und somit die Trabekel abnehmen (Salomon et al. 2020).

In der vorliegenden Studie war der Trabekelabstand an allen Lokalisationen des Acetabulums und des Femurs bei den Hunden kleiner als bei den Katzen. Dieser Unterschied war sowohl im dorsalen und ventralen Acetabulum als auch in der Femurmetaphyse vorhanden und zeigte, dass die Markräume zwischen den Trabekeln bei den Katzen größer waren. Dieser Unterschied wurde auch in der Studie von Planner et al. (2021) festgestellt, obwohl es sich um eine andere Lokalisation (Antebrachium) handelte. Bei Betrachtung der Ergebnisse des Acetabulums zeigte sich, dass sowohl bei den Katzen als auch bei den kleinen Hunden die kleinsten Trabekelabstände im ventralen Acetabulum lagen (Frei et al. 2025). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass dieser Messbereich die höchste Anzahl von Trabekeln in beiden Gruppen besaß. Dies könnte auf die unterschiedliche Belastung des Acetabulums, wie auch von Jenkins and Camazine

(2009) beschrieben, zurückzuführen sein.

Bei den Katzen in der eigenen Studie war die Konnektivität (Conn.D) an allen Lokalisationen des Acetabulums (mit Ausnahme des kranialen Acetabulums) und Femurs signifikant niedriger als bei den Hunden (Frei et al. 2025). Dieses Ergebnis ist nicht überraschend, denn es passt mit der geringeren Anzahl von Trabekeln bei Katzen im Vergleich zu Hunden überein. Laut einer humanmedizinischen Studie korreliert ein hoher Conn.D mit einer hohen Knochenstabilität (Goldstein et al. 1993). Insgesamt wird diese Beziehung in der Literatur jedoch kontrovers diskutiert (Thomsen et al. 1998; Ding et al. 2002). Beispielsweise zeigte die Studie von Thomsen et al. (1998), dass das Knochenvolumen der menschlichen Knochen der einzige Parameter ist, der für die Knochenfestigkeit von Bedeutung ist. Dies würde auch mit der Studie von Pugliese (2014) bei Hunden übereinstimmen. Im Gegensatz dazu zeigte eine neuere Studie am Menschen, dass neben dem Verhältnis des Knochenvolumens auch der Grad der Anisotropie maßgeblich an der Knochensteifigkeit beteiligt ist (Maquer et al. 2015). In der vorliegenden Studie war der geometrische Anisotropiegrad bei Katzen für alle drei Lokalisationen im Acetabulum und im Femurkopf signifikant höher als bei Hunden (Frei et al. 2025). Das bedeutet in Bezug auf die Anisotropie, dass die Knochen trabekel bei Katzen stärker in eine bestimmte Richtung ausgerichtet sind als bei Hunden. Planner et al. (2021) kamen zu demselben Ergebnis, denn die Autoren fanden an der Lokalisation Radius und Ulna ebenso einen höheren Grad der Anisotropie bei Katzen im Vergleich zu Hunden. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Anisotropie durch das Wachstum von Kollagenfasern in bestimmte Richtungen unter mechanischer Belastung verursacht wird und sich auch ständig an wechselnden Belastungen anpasst, um die Stabilität des Knochens kontinuierlich zu erhalten (Matsugaki et al. 2013).

Die Knochendichte des kortikalen Knochens, die in der vorliegenden Studie unter anderem im Femurschaft gemessen wurde, war bei Katzen im Vergleich zu Hunden signifikant höher (Frei et al. 2025). Dies wurde so auch von Planner et al. (2021) im Bereich von Radius und Ulna beim Vergleich von Hunden und Katzen nachgewiesen.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass Katzen stabilere Knochen haben als kleinere Hunde, was besonders wichtig ist, wenn ein Pressfit-Schaftimplantat eingesetzt wird (Schiller 2017). Andererseits haben kleine Hunde an allen

gemessenen Lokalisationen mehr Trabekel als Katzen, was zu einem schnelleren Einwachsen oder einer längerfristig stabileren Implantat-Knochen-Verbindung führen kann (Frei et al. 2025). Diese Schlussfolgerung kann jedoch nicht allein auf den gemessenen Knochenparametern der eigenen Studie beruhen und erfordert weitere biomechanische und vergleichende klinische Studien. Interessanterweise wurde in der Literatur gezeigt, dass das Femur der am häufigsten frakturierte Knochen bei Hunden und Katzen ist (Cardoso et al. 2016). Dies ist besonders bedeutsam, da das Femur für eine erfolgreiche TEP unerlässlich ist und eine Femurfraktur während der Implantation einer TEP nicht selten ist (Allaith et al. 2023).

Es herrscht Uneinigkeit in der Literatur, ob Katzen oder Hunde häufiger von Femurfrakturen betroffen sind. In der Studie von Bennour et al. (2014) wurde eine höhere Prävalenz bei Katzen im Vergleich zu Hunden festgestellt. Elzomor et al. (2014) hingegen konnten eine höhere Prävalenz von Femurfrakturen bei Hunden (mit Ausnahme der supracondylären Lokalisation) aufzeigen. Es ist aber vor allem aus der kieferorthopädischen Forschung in der Humanmedizin bekannt, dass sich eine geringe Knochendichte nachteilig auf die Implantatstabilität auswirkt (Turkyilmaz and McGlumphy 2008; Radi et al. 2018). Darüber hinaus wurde experimentell gezeigt, dass ein umfangreiches Remodelling im proximalen und medialen Femurbereich bei Ziegen mit unilateraler TEP stattfindet, das heißt, der kortikale Knochen und die Mineraldichte auf der Seite mit der TEP im Vergleich zur nicht-implantierten Seite reduziert waren (Ni et al. 2007).

Ein weiterer Parameter, der für die Implantation einer TEP wichtig sein könnte, ist die Kenntnis des Antetorsionswinkels. Für Katzen gibt es in der zugänglichen Literatur keine Informationen dazu. Da Dudley et al. (2006) an neun Kadavern gesunder großer Hunde zeigten, dass die Messungen des Antetorsionswinkels in der radiologischen Bildgebung vergleichbar mit denen der Computertomographie (CT) sind, wurde dieser Winkel in der vorliegenden Studie mit Hilfe eines 3D-Modells der Femora im CT bestimmt. Die gemessenen Antetorsionswinkel von Hunden in dieser Studie (Frei et al. 2025) stehen im Einklang mit früheren radiologischen Messungen bei mittelgroßen und großen Hunden, wo diese Winkel zwischen 24° und 36° betragen (Schawalder and Sterchi 1981; Wigger et al. 2008; Bruehschwein et al. 2023), obwohl die Winkel in diesen Studien eine größere Variation aufwiesen als in der vorliegenden Studie (Frei et al. 2025). In der

vorliegenden Studie wurde erstmals gezeigt, dass der Antetorsionswinkel bei Katzen mit durchschnittlich 30.26° etwas kleiner ist als bei den untersuchten kleinen Hunden mit 29.18° . Jedoch war dieser Unterschied statistisch nicht signifikant (Frei et al. 2025).

Diese Studie liefert erste Erkenntnisse über die mikrostrukturellen Knochenparameter im Acetabulum und Femur von Katzen und kleinen Hunden (Frei et al. 2025). Die Studienstichprobe bestand aus einer ausgewogenen Anzahl von Geschlechtern und Gewicht, um geschlechts- und gewichtsbedingte Unterschiede zu minimieren. Weitere Studien sind erforderlich, um andere Faktoren zu ermitteln, die die knöchernen Mikrostruktur beeinflussen, wie etwa mögliche Rassen- oder Altersunterschiede. In der vorliegenden Studie wurden nur adulte Tiere, älter als acht Jahre, eingeschlossen. Gerade bei Katzen könnte eine TEP aber auch im jüngeren Alter beispielsweise durch ein vorangehendes Trauma, wie bei einer Femurkopffepiphyseolyse, die laut Keller et al. (1999) und Loder and Todhunter (2018) bei Maine Coons vermehrt auftritt, oder Femurhalsfraktur nötig werden (Rodino Tilve et al. 2022). Dafür wären Studien mit verschiedenen Rassen und Altersklassen, insbesondere auch jungen und jungadulten Tieren notwendig. In der Literatur ist auch beschrieben worden, dass andere Faktoren wie Geschlecht, Kastrationsstatus oder hormonelle Einflüsse eine nicht zu unterschätzende Rolle beim Knochenumbau bei Hunden spielen (Dannucci et al. 1987). Dannucci et al. (1987) konnten beispielsweise aufzeigen, dass sich bei Hündinnen nach einer Ovariectomie elf Monate postoperativ das trabekuläre Knochenvolumen signifikant erniedrigt. Fukuda and Iida (2000) konnten zeigen, dass bei Beaglehunden sechs Monate nach der Orchiektomie die Trabekeldicke abgenommen hat. Eine weitere Studie beschreibt, dass das parathyroide Hormon anabolisch wirkt und somit auch bei Frauen in der Menopause einen schützenden Effekt gegen Osteoporose aufweist (Wojda and Donahue 2018). Diese und weitere Aspekte, wie zum Beispiel die Biomechanik, wurden in der vorliegenden Studie nicht weiter berücksichtigt und könnten in späteren Studien untersucht werden. Insgesamt wurden in der vorliegenden Studie Unterschiede in der knöchernen Mikrostruktur von Katzen und Hunden festgestellt, die für die Entwicklung von TEP's für Katzen und kleine Hunde von Bedeutung sein könnten. Diese Studie zeigt einmal mehr, dass Katzen anatomisch gesehen keine kleinen Hunde sind und dass selbst bei vergleichbarem Gewicht Anpassungen der Implantate für jede Spezies

erforderlich sein können (Frei et al. 2025; Planner et al. 2021).

Mit der vorliegenden Studie könnte die Entwicklung von zementlosen Hüftprothesen auch für Katzen und kleine Hunde einen wichtigen Schritt vorangebracht werden.

V. ZUSAMMENFASSUNG

Osteoarthrose ist eine der häufigsten Ursachen für Schmerzen im Bereich der Hüftgelenke. Als mögliche Therapie dazu wird die Totale Hüftprothese bereits seit Jahrzehnten erfolgreich bei größeren Hunden und zunehmend auch bei kleineren Hunden und sogar Katzen eingesetzt. Die vorliegende Studie hat daher in einem ersten Schritt zum Ziel, die verschiedenen Knochenstrukturparameter bei Katzen und kleinen Hunden zu messen und mögliche Unterschiede in der trabekulären und kortikalen Struktur des proximalen Femurs und Acetabulums bei Katzen im Vergleich zu kleinen Hunden aufzuzeigen.

Insgesamt wurden Kadaver von 21 hüftgesunden kleinen Hunden (42 Gelenke) und 27 hüftgesunden Katzen (54 Gelenke) untersucht. Dabei wurden an fünf verschiedenen zuvor bestimmten Regions of Interest verschiedene Strukturparameter im μ -CT gemessen. Die erste Lokalisation war der kraniale Acetabulumabschnitt (AC), welcher sich vom Beginn der Fossa acetabularis bis zur Trennung zwischen dem dorsalen und ventralen Teil der Hüftpfanne erstreckte. Als zweite (dorsales Acetabulum AD) und dritte (ventrales Acetabulum AV) Lokalisation wurde der trabekuläre Knochen des dorsalen und ventralen Bereichs des Acetabulums gemessen. Diese Regionen erstreckten sich jeweils von der Trennung des Acetabulums bis zu dem Ort, an dem kein trabekulärer Knochen mehr im μ -CT-Bild vorhanden war. Für das Femur wurde eine vierte Region of Interest (Femurkopf FH) definiert, indem die größtmöglichen Kreise im Inneren des Femurkopfes ausgemessen wurden. Die fünfte Region (Lokalisation der proximalen Femurmetaphyse FM) erstreckte sich von 5 mm distal des höchsten Punktes des Trochanter minors bis proximal der Aufteilung in den Femurhals und Trochanter major. An diesen Lokalisationen wurden folgende Parameter gemessen: Knochenvolumenanteil (BV/TV (%)), Verhältnis von Knochenoberfläche zu Knochenvolumen (BS/BV (mm⁻¹)), Trabekelanzahl (Tb.N (mm⁻¹)), Trabekeldicke (Tb.Th (mm)), Trabekelabstände (Tb.Sp (mm)), Grad der Anisotropie (DA) und Konnektivität (Conn. D (mm⁻³)). An der sechsten Region of Interest im Bereich des Knochenschaftes (Übergang Metaphyse zur Diaphyse) wurde die mittlere kortikale Knochendichte (mg HA ccm) bestimmt. Zusätzlich wurde bei allen Gelenken der Antetorsionswinkel im CT gemessen.

Im Seitenvergleich gab es bei beiden Tierarten und allen Messparametern, wie erwartet, keinen signifikanten Unterschied. Insgesamt wiesen Katzen in den untersuchten Bereichen des Acetabulums (Tb.N 2.21 mm⁻¹; Tb.Th. 0.2 mm) und des Femurs (Tb.N. 2.32 mm⁻¹; Tb.Th 0.19 mm) weniger, aber dickere Trabekel auf als die kleinen Hunde (Acetabulum Tb.N 2.53 mm⁻¹, Tb.Th 0.18 mm; Femur Tb.N 2.62 mm⁻¹; Tb.Th 0.17 mm). Dies führte zu einem größeren Trabekelabstand bei Katzen (Acetabulum Tb.Sp 0.26 mm; Femur 0.24 mm) als bei kleinen Hunden (Acetabulum Tb.Sp 0.23 mm; Femur 0.23 mm). Zusammen mit einer höheren kortikalen Knochendichte am Femurschaft bei Katzen (1372.39 mg HA/ccm) konnte festgestellt werden, dass Katzen in den gemessenen Bereichen eine stabilere Knochenarchitektur aufweisen als kleinere Hunde (1310.03 mg HA/ccm).

Der Antetorsionswinkel, der bei den kleinen Hunden mit durchschnittlich 29.18° etwas kleiner war als bei den Katzen mit 30.26°, zeigte jedoch keinen statistisch signifikanten Unterschied.

VI. SUMMARY

Osteoarthritis is one of the most common causes of pain in the hip joint area. Total hip replacement has been used successfully for decades as a possible treatment in larger dogs and increasingly in smaller dogs and even cats. The first aim of the present study was therefore to measure the various bone structure parameters in cats and small dogs and to identify possible differences in the trabecular and cortical structure of the proximal femur and acetabulum in cats compared to small dogs.

In total, cadavers from 21 hip-healthy small dogs (42 joints) and 27 hip-healthy cats (54 joints) were analysed. Different structural parameters were measured in μ -CT at five different previously determined regions of interest. The first localisation was the cranial acetabulum (AC), which extended from the beginning of the acetabular fossa to the separation between the dorsal and ventral part of the acetabulum. The second (dorsal acetabulum AD) and third (ventral acetabulum AV) localisations were the trabecular bone of the dorsal and ventral parts of the acetabulum. These regions extended from the separation of the acetabulum to the location where no trabecular bone was present in the μ -CT image. A fourth region of interest (femoral head FH) was defined for the femur by measuring the largest possible circles inside the femoral head. The fifth localisation (proximal femoral metaphysis FM) extended from 5 mm distal to the highest point of the lesser trochanter to proximal to the division into the femoral neck and greater trochanter. The following parameters were measured at these localisations: Bone volume fraction (BV/TV (%)), bone surface to bone volume ratio (BS/BV (mm⁻¹)), trabecular number (Tb.N (mm⁻¹)), trabecular thickness (Tb.Th (mm)), trabecular separation (Tb.Sp (mm)), degree of anisotropy (DA) and connectivity (Conn. D (mm⁻³)). The mean cortical bone density (mg HA ccm) was determined at the sixth region of interest in the area of the bone shaft (transition from metaphysis to diaphysis). In addition, the angle of antetorsion was measured on CT in all joints.

As expected, there was no significant difference in the side-by-side comparison for both animal species and all measurement parameters. Overall, cats had fewer but thicker trabeculae in the examined areas of the acetabulum (Tb.N 2.21 mm⁻¹; Tb.Th 0.2 mm) and femur (Tb.N 2.32 mm⁻¹; Tb.Th 0.19 mm) than the small dogs (acetabulum Tb.N 2.53 mm⁻¹, Tb.Th 0.18 mm; femur Tb.N 2.62 mm⁻¹; Tb.Th 0.17

mm). This resulted in a larger trabecular distance in cats (acetabulum Tb.Sp 0.26 mm; femur 0.24 mm) than in small dogs (acetabulum Tb.Sp 0.23 mm; femur 0.23 mm). Together with a higher cortical bone density at the femoral shaft in cats (1372.39 mg HA/ccm), it was found that cats have a more stable bone architecture in the measured areas than smaller dogs (1310.03 mg HA/ccm).

However, the angle of antetorsion, which was slightly smaller in the small dogs (29.18° on average) than in the cats (30.26°), showed no statistically significant difference.

VII. LITERATURVERZEICHNIS

Allaith, S., L. J. Tucker, J. F. Innes, G. Arthurs, A. Vezzoni, S. Morrison, J. Onyett, C. K. Stork, P. Witte, H. Denny, R. Pettitt, A. P. Moores, T. Maddox, and E. J. Comerford. 2023. 'Outcomes and complications reported from a multiuser canine hip replacement registry over a 10-year period', *Vet Surg*, 52: 196-208.

Beck, A. L., M. J. Pead, and E. Draper. 2005. 'Regional load bearing of the feline acetabulum', *J Biomech*, 38: 427-32.

Bennour, EM, MA Abushhiwa, L Ben Ali, OK Sawesi, MA Marzok, OM Abuargob, SK Tmumen, JA Abdelhadi, MM Abushima, and M Benothman. 2014. 'A retrospective study on appendicular fractures in dogs and cats in Tripoli-Libya', *J Vet Adv*, 4: 425-31.

Bergh, M. S., R. S. Gilley, F. S. Shofer, and A. S. Kapatkin. 2006. 'Complications and radiographic findings following cemented total hip replacement: a retrospective evaluation of 97 dogs', *Vet Comp Orthop Traumatol*, 19: 172-9.

Bloebaum, R. D., D. T. Ota, J. G. Skedros, and J. P. Mantas. 1993. 'Comparison of human and canine external femoral morphologies in the context of total hip replacement', *J Biomed Mater Res*, 27: 1149-59.

Bouxsein, M. L., S. K. Boyd, B. A. Christiansen, R. E. Guldborg, K. J. Jepsen, and R. Muller. 2010. 'Guidelines for assessment of bone microstructure in rodents using micro-computed tomography', *J Bone Miner Res*, 25: 1468-86.

Bruehschwein, A., J. Burg-Personnaz, M. Zollner, S. Reese, and A. Meyer-Lindenberg. 2023. 'Comparison of CT-measured angles of pelvic limbs without patellar luxation of six canine breeds', *Front Vet Sci*, 10: 1194167.

Burg-Personnaz, J., M. Zoellner, S. Reese, A. Meyer-Lindenberg, and A. Bruehschwein. 2024. '3D Slicer open-source software plug-in for vector-based angle calculation of canine hind limb alignment in computed tomographic images', *PLoS One*, 19: e0283823.

Cardoso, Catarina Borges, Sheila Canevese Rahal, Felipe S Agostinho, Maria Jaqueline Mamprim, Rogério R Santos, S Ednaldo Filho, Ana Carolina Mortari, and Frederico OB Monteiro. 2016. 'Long bone fractures in cats: a retrospective study', *Veterinária e Zootecnia*, 23: 504-09.

Corbee, R. J., H. Maas, A. Doornenbal, and H. A. Hazewinkel. 2014. 'Forelimb and hindlimb ground reaction forces of walking cats: assessment and comparison with walking dogs', *Vet J*, 202: 116-27.

Dannucci, G. A., R. B. Martin, and P. Patterson-Buckendahl. 1987. 'Ovariectomy and trabecular bone remodeling in the dog', *Calcif Tissue Int*, 40: 194-9.

Daubs, B. M., M. D. Markel, and P. A. Manley. 2006. 'Histomorphometric analysis of articular cartilage, zone of calcified cartilage, and subchondral bone plate in femoral heads from clinically normal dogs and dogs with moderate or severe osteoarthritis', *Am J Vet Res*, 67: 1719-24.

David, V., N. Laroche, B. Boudignon, M. H. Lafage-Proust, C. Alexandre, P. Ruegsegger, and 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.

Dedrick, D. K., S. A. Goldstein, K. D. Brandt, B. L. O'Connor, R. W. Goulet, and M. Albrecht. 1993. 'A longitudinal study of subchondral plate and trabecular bone in cruciate-deficient dogs with osteoarthritis followed up for 54 months', *Arthritis Rheum*, 36: 1460-7.

Denny, H. R., M. Linnell, T. W. Maddox, and E. J. Comerford. 2018. 'Canine total hip replacement using a cementless threaded cup and stem: a review of 55 cases', *J Small Anim Pract*, 59: 350-56.

Ding, M., A. Odgaard, C. C. Danielsen, and I. Hvid. 2002. 'Mutual associations among microstructural, physical and mechanical properties of human cancellous bone', *J Bone Jt Surg, British volume*, 84-B: 900-07.

Dudley, R. M., M. P. Kowaleski, W. T. Drost, and J. Dyce. 2006. 'Radiographic and computed tomographic determination of femoral varus and torsion in the dog', *Vet Radiol Ultrasound*, 47: 546-52.

El-Seddawy, F.D., A.F. El-Mezayen, M.F. Tantawy, and Gomaa M. 2022. 'Femoral head and neck ostectomy (FHO) for treatment of different hip joint disorders in dogs', *J Adv Vet Res*, 12: 422-25.

Elzomor, S.T., E.M.E. Sheta, H.A. Farghali, and A.E Ashour. 2014. 'Prevalence of femoral fractures in dogs and cats', *J Egypt Vet Med*, 74: 269-78.

Engelke, K., M. Karolczak, A. Lutz, U. Seibert, S. Schaller, and W. Kalender. 1999. 'Mikro-CT - Technologie und Applikationen zur Erfassung von Knochenarchitektur.' in, *Der Radiologe*.

Feldkamp, L. A., S. A. Goldstein, A. M. Parfitt, G. Jasion, and M. Kleerekoper. 1989. 'The direct examination of three-dimensional bone architecture in vitro by computed tomography', *J Bone Miner Res*, 4: 3-11.

Franklin, S. P., N. A. Miller, and T. Riecks. 2021. 'Complications with the Zurich Canine Total Hip Replacement System in an Initial Series of Cases Performed by a Single Surgeon', *Vet Comp Orthop Traumatol*, 34: 346-51.

Frei, J., F. Feichtner, and 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.

Fukuda, S., and H. Iida. 2000. 'Effects of orchidectomy on bone metabolism in beagle dogs', *J Vet Med Sci*, 62: 69-73.

Gemmill, T. J., J. Pink, A. Renwick, B. Oxley, C. Downes, S. Roch, and W. M. McKee. 2011. 'Hybrid cemented/cementless total hip replacement in dogs: seventy-eight consecutive joint replacements', *Vet Surg*, 40: 621-30.

Georgiadis, A. G., D. S. Siegal, C. E. Scher, and I. Zaltz. 2015. 'Can femoral rotation be localized and quantified using standard CT measures?', *Clin Orthop Relat Res*, 473: 1309-14.

Goldstein, S. A., R. Goulet, and D. McCubbrey. 1993. 'Measurement and significance of three-dimensional architecture to the mechanical integrity of trabecular bone', *Calcif Tissue Int*, 53 Suppl 1: S127-32; discussion S32-3.

Goulet, R. W., S. A. Goldstein, M. J. Ciarelli, J. L. Kuhn, M. B. Brown, and L. A. Feldkamp. 1994. 'The relationship between the structural and orthogonal compressive properties of trabecular bone', *J Biomech*, 27: 375-89.

Hemmerlein, E., E. Vorndran, A. M. Schmitt, F. Feichtner, A. C. Waselau, and A. Meyer-Lindenberg. 2024. 'In Vivo Investigation of 3D-Printed Calcium Magnesium Phosphate Wedges in Partial Load Defects', *Materials (Basel)*, 17.

Holdsworth, David W., and Michael M. Thornton. 2002. 'Micro-CT in small animal and specimen imaging', *Trends in Biotechnology*, 20: 34-S39.

Hummel, D. 2017. 'Zurich Cementless Total Hip Replacement', *Vet Clin North Am Small Anim Pract*, 47: 917-34.

Jenkins, Farish A., and Scott M. Camazine. 2009. 'Hip structure and locomotion in ambulatory and cursorial carnivores', *J Zool*, 181: 351-70.

Kalis, R. H., W. D. Liska, and D. A. Jankovits. 2012. 'Total hip replacement as a treatment option for capital physeal fractures in dogs and cats', *Vet Surg*, 41: 148-55.

Keller, G. G., A. L. Reed, J. C. Lattimer, and E. A. Corley. 1999. 'Hip dysplasia: a feline population study', *Vet Radiol Ultrasound*, 40: 460-4.

Kidd, S. W., C. A. Preston, and G. E. Moore. 2016. 'Complications of porous-coated press-fit cementless total hip replacement in dogs', *Vet Comp Orthop Traumatol*, 29: 402-8.

Kim, Jooho, Suyoung Heo, Jiyoung Na, Namsoo Kim, Minsu Kim, Seongmok Jeong, and HaeBeom Lee. 2016. 'Determination of Femoral and Tibial Joint Reference Angles in Small-breed Dogs', *J Vet Clin*, 33: 340-45.

Knahr, K., I. Kryspin-Exner, R. Jagsch, W. Freilinger, and M. Kasparek. 1998. 'Evaluating the quality of life before and after implantation of a total hip endoprosthesis', *Z Orthop*, 136: 321-9.

König, H.E., and H.-G. Liebich. 2011. *Anatomie der Haussäugetiere* (F. K. Schattauer Verlagsgesellschaft mbH).

Kuhn, J. L., S. A. Goldstein, L. A. Feldkamp, R. W. Goulet, and G. Jesion. 1990. 'Evaluation of a microcomputed tomography system to study trabecular bone structure', *J Orthop Res*, 8: 833-42.

Liska, W. D. 2010. 'Micro total hip replacement for dogs and cats: surgical technique and outcomes', *Vet Surg*, 39: 797-810.

Liska, W. D., N. Doyle, D. J. Marcellin-Little, and J. A. Osborne. 2009. 'Total hip replacement in three cats: surgical technique, short-term outcome and comparison to femoral head ostectomy', *Vet Comp Orthop Traumatol*, 22: 505-10.

Loder, R. T., and R. J. Todhunter. 2018. 'Demographics of hip dysplasia in the Maine Coon cat', *J Feline Med Surg*, 20: 302-07.

Lu, Y., H. K. Genant, J. Shepherd, S. Zhao, A. Mathur, T. P. Fuerst, and S. R. Cummings. 2001. 'Classification of osteoporosis based on bone mineral densities', *J Bone Miner Res*, 16: 901-10.

Maquer, G., S. N. Musy, J. Wandel, T. Gross, and P. K. Zysset. 2015. 'Bone volume fraction and fabric anisotropy are better determinants of trabecular bone stiffness than other morphological variables', *J Bone Miner Res*, 30: 1000-8.

Marino, D. J., S. J. Ireifej, and C. A. Loughin. 2012. 'Micro total hip replacement in dogs and cats', *Vet Surg*, 41: 121-9.

Massat, B. J., and P. B. Vasseur. 1994. 'Clinical and radiographic results of total hip arthroplasty in dogs: 96 cases (1986-1992)', *J Am Vet Med Assoc*, 205.

Matsugaki, A., N. Fujiwara, and T. Nakano. 2013. 'Continuous cyclic stretch induces osteoblast alignment and formation of anisotropic collagen fiber matrix', *Acta Biomater*, 9: 7227-35.

Nazarian, A., B. D. Snyder, D. Zurakowski, and R. Muller. 2008. 'Quantitative micro-computed tomography: a non-invasive method to assess equivalent bone mineral density', *Bone*, 43: 302-11.

Ni, G. X., W. W. Lu, P. K. Chiu, Y. Wang, Z. Y. Li, Y. G. Zhang, B. Xu, L. F. Deng, and K. D. Luk. 2007. 'Mechanical properties of femoral cortical bone following cemented hip replacement', *J Orthop Res*, 25: 1408-14.

Oliviero, S., E. Millard, Z. Chen, A. Rayson, B. C. Roberts, H. M. S. Ismail, I. Bellantuono, and E. Dall'Ara. 2022. 'Accuracy of in vivo microCT imaging in assessing the microstructural properties of the mouse tibia subchondral bone', *Front Endocrinol (Lausanne)*, 13: 1016321.

Olmstead, M. L. 1995. 'Canine cemented total hip replacements: state of the art', *J Small Anim Pract*, 36: 395-9.

Pascual-Garrido, C., F. Guilak, M. F. Rai, M. D. Harris, M. J. Lopez, R. J. Todhunter, and J. C. Clohisy. 2018. 'Canine hip dysplasia: A natural animal model for human developmental dysplasia of the hip', *J Orthop Res*, 36: 1807-17.

Pearce, A. I., R. G. Richards, S. Milz, E. Schneider, and S. G. Pearce. 2007. 'Animal models for implant biomaterial research in bone: a review', *Eur Cell Mater*, 13: 1-10.

Petazzoni, M. 2008. *Atlas of clinical goniometry and radiographic measurements of the canine pelvic limb* (Merial).

Peyrin, F., P. Dong, A. Pacureanu, and M. Langer. 2014. 'Micro- and nano-CT for the study of bone ultrastructure', *Curr Osteoporos Rep*, 12: 465-74.

Planner, F., F. Feichtner, and A. Meyer-Lindenberg. 2021. '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.

Pugliese, Lauren C. 2014. 'Proximal femoral morphology and bone quality assessment in dogs', Master Thesis, The Ohio State University, USA.

Radi, I. A., W. Ibrahim, S. M. S. Iskandar, and N. AbdelNabi. 2018. 'Prognosis of dental implants in patients with low bone density: A systematic review and meta-analysis', *J Prosthet Dent*, 120: 668-77.

Rodino Tilve, V., S. Allaith, S. Girling, A. P. Moores, L. Mulholland, S. Morrison, J. Onyett, T. W. Maddox, B. D. X. Lascelles, S. Langley-Hobbs, and E. Comerford. 2022. 'Long-term follow up of 44 cats undergoing total hip replacement: Cases from a feline hip registry (2010-2020)', *Vet Surg*, 51: 763-71.

Ryan, T. M., and C. N. Shaw. 2012. 'Unique suites of trabecular bone features characterize locomotor behavior in human and non-human anthropoid primates', *PLoS One*, 7: e41037.

Salomon, FV., H. Geyer, and U. Gille. 2020. *Anatomie für die Tiermedizin* (Thieme).

Sarierler, M. 2004. 'Comparison of femoral inclination angle measurements in dysplastic and nondysplastic dogs of different breeds', *Acta Vet Hung*, 52: 245-52.

Scarano, A., T. Orsini, F. Di Carlo, L. Valbonetti, and F. Lorusso. 2021. 'Graphene-Doped Poly (Methyl-Methacrylate) (Pmma) Implants: A Micro-CT and Histomorphometrical Study in Rabbits', *Int J Mol Sci*, 22.

Schambach, S. J., S. Bag, L. Schilling, C. Groden, and M. A. Brockmann. 2010. 'Application of micro-CT in small animal imaging', *Methods*, 50: 2-13.

Schawalder, P., and H. P. Sterchi. 1981. 'Measurement of the centre-collum-diaphysis and antetorsion angles of the canine hip.', *Kleintierpraxis*, 6: 151-58, 60-62.

Scherzer, C., H. Windhagen, J. Nellesen, H. A. Crostack, K. Rohn, F. Witte, F. Thorey, M. Fehr, and G. Hauschild. 2009. 'Comparative structural analysis of the canine femoral head in Legg-Calve-Perthes disease', *Vet Radiol Ultrasound*, 50: 404-11.

Schiller, T. D. 2017. 'BioMedtrix Total Hip Replacement Systems: An Overview', *Vet Clin North Am Small Anim Pract*, 47: 899-916.

Skurla, C. P., G. E. Pluhar, D. J. Frankel, E. L. Egger, and S. P. James. 2005. 'Assessing the dog as a model for human total hip replacement', *J Bone Joint Surg*, 87-B: 120-27.

Soparat, C., C. Wangdee, S. Chuthatep, and M. Kalpravidh. 2012. 'Radiographic measurement for femoral varus in Pomeranian dogs with and without medial patellar luxation', *Vet Comp Orthop Traumatol*, 25: 197-201.

Thomsen, J. S., E. N. Ebbesen, and L. Mosekilde. 1998. 'Relationships between static histomorphometry and bone strength measurements in human iliac crest bone biopsies', *Bone*, 22: 153-63.

Tomáš, Tomáš, Luboš Nachtnebl, and Petr Otiepka. 2007. 'The relation between implanted material and infection of the total joint replacement', *Orthopaedic Surgery*, 80: 107-22.

Townsend, K. L. 2012. 'The use of radiographs, dual-energy X-ray absorptiometry, quantitative computed tomography and micro-computed tomography to determine local cancellous bone quality in the canine proximal femur', Master Thesis, The Ohio State University, USA.

Turkyilmaz, I., and E. A. McGlumphy. 2008. 'Influence of bone density on implant stability parameters and implant success: a retrospective clinical study', *BMC Oral Health*, 8: 32.

van der Meulen, M. C., X. Yang, T. G. Morgan, and M. P. Bostrom. 2009. 'The effects of loading on cancellous bone in the rabbit', *Clin Orthop Relat Res*, 467: 2000-6.

Venkatesh, N., K. Jagan Mohan Reddy, E. L. Chandra Sekhar, and N. Rajendranath. 2024. 'A Clinical Study on Total Hip Replacement using Cemented Prosthetics for Management of Hip Dysplasia in Dogs', *Indian J Anim Res*.

Wigger, A., B. Tellhelm, M. Kramer, and H. Rudolf. 2008. 'Influence of femoral head and neck conformation on hip dysplasia in the German Shepherd dog', *Vet Radiol Ultrasound*, 49: 243-8.

Wojda, S. J., and S. W. Donahue. 2018. 'Parathyroid hormone for bone regeneration', *J Orthop Res*, 36: 2586-94.

Wolff, Julius. 1870. 'Ueber die innere Architectur der Knochen und ihre Bedeutung für die Frage vom Knochenwachsthum', *Archiv für pathologische Anatomie und Physiologie und für klinische Medicin*, 50: 389-450.

VIII. DANKSAGUNG

Mein erster Dank geht an Frau Prof. Dr. Andrea Meyer-Lindenberg für die Möglichkeit diese Dissertation zu schreiben und mich für ein solch spannendes, mir zuvor fremdes, Forschungsthema zu begeistern. Durch ihre jahrzehntelange Erfahrung und ihr unglaubliches Wissen konnte ich nicht nur im Rahmen dieser Promotion, sondern zusätzlich auch im klinischen Umfeld enorm profitieren.

Dr. Franziska Feichtner möchte ich an dieser Stelle ganz besonders danken. Ihre herausragende Unterstützung, ihre unendliche Geduld und nicht zuletzt ihre Spontanität waren von unsagbar großem Wert! Danke Franzi, dass du immer ein offenes Ohr und passende Ratschläge für mich hattest (besonders auch aus der Ferne)!

Ein großer Dank geht auch an das Team der Forschungsabteilung der Chirurgischen und gynäkologischen Kleintierklinik, welches mir bei allen Anliegen zum μ -CT mit Rat und Tat zur Seite stand, oft auch nach der offiziellen Arbeitszeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei Dr. Juliette Burg-Personnaz. Ohne deine Freundschaft und Anwesenheit an vielen Wochenenden wäre das Ausräumen des Tiefkühlers wohl nicht halb so unterhaltsam gewesen. Danke auch für deine Tipps und Ratschläge!

Ein besonderer Dank geht an meine geliebten Eltern Barbara und Walter Frei sowie an meine Lieblingsschwester Tamara Frei. Ohne sie alle wäre das tiermedizinische Studium kaum machbar gewesen und auch während meiner arbeitsreichen Zeit fern der Heimat haben sie mich in München stets aus der Ferne unterstützt und regelmäßig besucht. Danke dass ihr immer an mich glaubt und in allen möglichen Anliegen und Lebenslagen für mich da seid!

Gedenken möchte ich an dieser Stelle auch Grossdädi, Grossmueti und Grossmami, sie alle wären sicherlich unendlich stolz und hätten diese Dissertation gerne einmal in den Händen gehalten. Grosspapi wird diese Möglichkeit vielleicht noch haben.

Nicht zu vergessen sind auch Jimmy, Charly, Bijou, Emily, Tally, Mira, Ashanti, Lilly, Stella, Rauma, Narooma, Smiley, Nef, Lisi und alle anderen, die hier nicht namentlich erwähnt sind. Ihr habt mir das Reich der Tiere, ihre Bedürfnisse und somit auch diesen Beruf nähergebracht und mir stets große Freude bereitet!