

**Mikrocomputertomographische Analyse der ulnaren subtrochlearen  
Sklerose bei Hundekadavern mittlerer und großer Rassen mit und  
ohne mediale Koronoiderkrankung**

von

Tim Peter Glück

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

Mikrocomputertomographische Analyse der ulnaren  
subtrochlearen Sklerose bei Hundekadavern mittlerer und  
großer Rassen mit und ohne mediale  
Koronoiderkrankung

von

Tim Peter Glück

aus Würzburg

München 2024

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

Gedruckt mit der 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:** Priv.-Doz. Dr. Rebecca A.-M. Kenngott

**Tag der Promotion:** 6. Juli 2024



*Mama und Hubi*

*Danke für Eure Unterstützung jeglicher Art*



Inhalte der Dissertation wurden auf folgender nationaler Tagung  
vorgestellt:

**DVG-Vet-Congress**

Berlin, 13.10.2022

14. Tagung der DVG-Fachgruppe Chirurgie

**Mikrocomputertomographische Analyse der ulnaren subtrochlearen Sklerose bei  
Hundekadavern mittlerer und großer Rassen mit und ohne mediale  
Koronoiderkrankung**

Tim Glück, Yury Zablotski, Andrea Meyer-Lindenberg





# INHALTSVERZEICHNIS

<b>I.</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>3</b>
<b>II.</b>	<b>LITERATURÜBERSICHT.....</b>	<b>5</b>
<b>1.</b>	<b>Mikrocomputertomographie.....</b>	<b>5</b>
1.1.	Geschichte und Anfänge der Mikrocomputertomographie.....	5
1.2.	Aufbau und Funktionsweise eines Mikrocomputertomographen.....	6
1.3.	Röntgenquelle, Röntgendetektoren und Strahlengeometrie.....	6
<b>2.</b>	<b>Knochenarchitektur.....</b>	<b>7</b>
2.1.	Mechanische Kompetenz des trabekulären Knochens.....	8
<b>3.</b>	<b>Parameter zur Analyse des trabekulären Knochens.....</b>	<b>10</b>
3.1.	Bone Volume Fraction (BV/TV).....	10
3.2.	Bone Surface Fraction (BS/BV).....	10
3.3.	Trabecular Thickness (Tb.Th), Trabecular Separation (Tb.Sp), Trabecular Number (Tb.N).....	10
3.4.	Connectivity-Density (Conn.D).....	11
3.5.	Structure-Model-Index (SMI).....	11
3.6.	Degree of Anisotropy (DA).....	12
<b>4.</b>	<b>Anatomie des Ellbogengelenks.....</b>	<b>13</b>
<b>5.</b>	<b>Grundlagen der Koronoiderkrankung.....</b>	<b>14</b>
5.1.	Ätiologie und Pathogenese.....	14
5.2.	Rassedisposition und Vererbung.....	16
<b>6.</b>	<b>Diagnostik der Koronoiderkrankung.....</b>	<b>18</b>
6.1.	Klinische Befunde.....	18
6.2.	Röntgendiagnostik.....	19

6.3	Computertomographische Diagnostik.....	19
7.	<b>Ulnare subtrochleare Sklerose.....</b>	<b>20</b>
7.1.	Ulnare subtrochleare Sklerose in der Mikrocomputertomographie.....	21
<b>III.</b>	<b>VERÖFFENTLICHUNG.....</b>	<b>23</b>
1.	<b>Publikation.....</b>	<b>23</b>
<b>IV.</b>	<b>DISKUSSION.....</b>	<b>32</b>
<b>V.</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>38</b>
<b>VI.</b>	<b>SUMMARY.....</b>	<b>40</b>
<b>VII.</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>42</b>
<b>VIII.</b>	<b>DANKSAGUNG.....</b>	<b>61</b>

## **ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

BS	Bone Surface
BS/BV	Specific Bone Surface Bone (Bone Surface per Bone Volume)
BS/TV	Bone Surface Density (Bone Surface per Total Volume)
BV	Bone Volume
BV/TV	Bone Volume Fraction (Bone Volume per Total Volume)
CCD	Charge-coupled Device
Conn.D	Connectivity Density
CT	Computertomographie
DA	Degree of Anisotropy
ED	Ellbogendysplasie
FMCP	Fragmented Medial Coronoid Process
$h^2$	Heritabilität
INC	Inkongruenz
IPA	Isolierter Processus anconaeus
MCD	Medial Coronoid Disease
PCM	Processus coronoideus medialis ulnae
MRT	Magnetresonanztomographie
Mikro-CT	Mikrocomputertomographie
OC	Osteochondrose
OCD	Osteochondrosis dissecans
p	Signifikanzwert
ROI	Region of Interest
RUI	Radioulnare Inkongruenz
SMI	Structure Model Index

STS	Subtrochleare Sklerose
Tb.N	Trabecular Number
Tb.Sp	Trabecular Separation
Tb.Th	Trabecular Thickness
TV	Total Volume
UMCP	Ununited Medial Coronoid Process
VOI	Volume of Interest

## I. EINLEITUNG

Die Ellbogendysplasie (ED) ist eine häufig auftretende Krankheit, die oft mit einer Lahmheit der Vordergliedmaße bei Hunden mittlerer und großer Rassen verbunden ist (Meyer-Lindenberg et al. 2002, Moores et al. 2008). Dem Überbegriff der ED werden folgende vier Krankheitsbilder zugeordnet: Erkrankung des Processus coronoideus medialis ulnae (MCPD), Isolierter Processus anconaeus (IPA), Osteochondrosis dissecans (OCD) und Inkongruenz der Gelenkflächen (INC). Der Begriff Medial Coronoid Disease (MCD) wurde 2008 eingeführt, da er sowohl Läsionen des Gelenkknorpels als auch des subchondralen Knochens umfasst (Moores et al. 2008, Fitzpatrick et al. 2009). Einige Hunderassen wie Labrador und Golden Retriever, Rottweiler, Deutscher Schäferhund, Berner Sennenhund und Boxer sind offensichtlich vorherrschend betroffen (Denny 1987, Meyer-Lindenberg et al. 1993, Meyer-Lindenberg et al. 2002, Narojek et al. 2008, Temwichitr et al. 2010). Neben der erblichen Komponente gibt es weitere bekannte Risikofaktoren wie Ernährung, Wachstumsrate, Gewicht und Bewegung, die die Entstehung einer MCD begünstigen (Beuing et al. , Beuing et al. 2000, Mäki et al. 2000, Janutta et al. 2006, Sallander et al. 2006, Narojek et al. 2008).

Die Ätiologie und die genaue Pathogenese der MCD ist noch nicht endgültig geklärt (Danielson et al. 2006, Burton et al. 2010, Temwichitr et al. 2010, Fitzpatrick et al. 2016). Der Krankheitsprozess kann längere Zeit vor dem Auftreten klinischer Symptome beginnen, insbesondere wenn die Erkrankung bilateral vorliegt (Fitzpatrick und Yeadon 2009). Eine Studie, veröffentlicht von Breit et al. (2004), ergab eine verzögerte Verknöcherung des medialen Processus coronoideus und des Processus anconaeus bei Hunden großer Rassen im Vergleich zu Hunden kleinerer Rassen. Derzeit ist die gängige Hypothese, dass die MCD durch Mikroschäden des subchondralen Knochens aufgrund von Ermüdung durch mechanische Überlastung in Verbindung mit Gelenkinkongruenz einhergeht (Danielson et al. 2006, Burton et al. 2008, Boettcher et al. 2009, Burton et al. 2010, Fitzpatrick et al. 2016, Rohwedder et al. 2017, Rohwedder et al. 2018, Mostafa et al. 2019).

Aufgrund der nicht-überlagerungsfreien Darstellung des medialen Koronoids ist eine eindeutige Diagnose einer MCD mittels Röntgenaufnahmen oft nicht möglich (Meyer-Lindenberg et al. 2006, Fitzpatrick et al. 2009, Rau et al. 2011, Lau et al. 2013b). Die Computertomographie gilt derzeit als Mittel der Wahl, um Veränderungen des medialen Koronoids darzustellen (Tromblee et al. 2007, Klumpp et al. 2013).

Zu den radiologisch mit MCD assoziierten Merkmalen gehören periartikuläre Osteophyten,

Inkongruenz, fehlende Visualisierung des medialen Koronoids und eine Sklerose der ulnaren trochlearen Notch (Hornof et al. 2000, Fitzpatrick et al. 2009, Smith et al. 2009, Mostafa et al. 2018, Mostafa et al. 2019). Studien von Mason et al. (2005) und Burton et al. (2007) zeigten, dass etwa 50 Prozent der von den Humeruskondylen ausgehenden Last auf den Radiuskopf und 50 Prozent auf die ulnare trochleare Notch, welche den Bereich der Basis des medialen Koronoids und angrenzende Areale abdeckt, übertragen wird. Es beschäftigten sich zahlreiche Studien in der Vergangenheit intensiv mit der Bedeutung der ulnaren subtrochlearen Sklerose (STS) im Zusammenhang mit MCD. Röntgenologische Untersuchungen wie beispielsweise Messungen der Röntgendichte sowie von Breitenverhältnissen der ulnaren STS wurden durchgeführt, um die Sensitivität der Diagnose einer MCD zu verbessern (Burton et al. 2008, Mostafa et al. 2018). In einer anderen Studie wurde unter anderem durch die Auswertung von ulnaren STS-Längenverhältnissen das Kurz- und Langzeit-Ergebnis nach arthroskopischer Behandlung beurteilt (Barthélémy et al. 2014). Sowohl röntgenologische als auch computertomographisch basierte Studien entwickelten Methoden, um die Messung der ulnaren STS einheitlicher und damit vergleichbarer zu machen (Smith et al. 2009, Shimizu et al. 2015). Eine weitere Studie untersuchte unter Verwendung einer Mikro-CT erste auftretende Veränderungen des MCP bei wenige Wochen alten Labrador Retrievern. Röntgenologisch konnte in dieser Studie bei keinem der erkrankten Patienten eine ulnare STS identifiziert werden. Die ulnare STS wird demnach als sekundäre Veränderung der MCD-Erkrankung angesehen (Lau et al. 2013b). Bei der Untersuchung älterer MCD-Patienten konnte bei 96 % der Fälle eine ulnare STS festgestellt werden (Mostafa et al. 2018).

Da es bisher keine mikrocomputertomographische Untersuchungen der ulnaren subtrochlearen Sklerose gibt, war es Ziel der vorliegenden Arbeit, mithilfe der mikrocomputertomographischen Parameter (BV/TV (%), Tb.N ( $\text{mm}^{-1}$ ), Tb.Th (mm), Tb.Sp (mm), Conn.D ( $\text{mm}^{-3}$ ), DA) den trabekulären Aufbau der ulnaren trochlearen Notch zu erforschen und Unterschiede zwischen gesunden und Ellbogen mit MCD zu ermitteln.

## II. LITERATURÜBERSICHT

### 1. Mikrocomputertomographie

#### 1.1. Geschichte und Anfänge der Mikrocomputertomographie

Anfang der 1980er Jahre wurden die ersten Mikrocomputertomographie-Bilder (Mikro-CT) veröffentlicht. In den frühen 1990er Jahren führte ein zunehmendes Interesse an experimenteller Bildgebung zur Entwicklung der Mikro-CT, die sich speziell für die Untersuchung von kleinen Nagetieren eigneten (Bag et al. 2010). Kommerzielle Mikro-CT-Systeme sind seit Mitte der 1990er Jahre erhältlich. Die Zahl der veröffentlichten Mikro-CT-Studien hat seitdem jährlich zugenommen (Ritman 2011). Diese Verfügbarkeit der Systeme mit einer mikroskopischen Auflösung und der Fähigkeit, verschiedene Proben sowie lebende Tiere abzubilden, war der Startschuss vieler neuer Studien (Holdsworth und Thornton 2002). In den letzten 10 Jahren gab es einen exponentiellen Anstieg der präklinischen In-vivo-Studien unter Verwendung von Mikro-CT. Grund dafür ist der kontinuierliche technische Fortschritt der räumlichen und zeitlichen Auflösung, welcher den Forschern ermöglicht, immer detailliertere anatomische Schnittbilder anzufertigen (Schambach et al. 2010).

Im Jahr 2009 ergab eine Pubmed-Recherche von Publikationen zur Anwendung von Mikro-CT im Bereich der Biologie und der medizinischen Wissenschaften folgende Verteilung: 58 % erforschten knöcherne Strukturen, 16 % beschäftigten sich mit den Gefäßen und 26 % behandelten andere Anwendungsgebiete (Ritman 2011). Untersuchungen der Knochenarchitektur und -dichte waren die ersten Forschungsanwendungen, die die frühe Entwicklung der Mikro-CT vorantrieben. In diesen präklinischen Studien wurde erstmals Osteoporose und Osteoarthritis an geeigneten Tiermodellen mittels Mikro-CT untersucht (Dedrick et al. 1993, Kapadia et al. 1998, Badger et al. 2000).

Die Mikro-CT bietet die Möglichkeit, nicht-invasive beziehungsweise zerstörungsfreie Informationen über den strukturellen Aufbau des trabekulären und kortikalen Knochens zu liefern. Zudem ist die Möglichkeit gegeben, anhand der gewonnenen Daten neben der Knochendichte weitere Parameter wie beispielsweise das relative Trabekelvolumen, den Trabekelabstand sowie die Konnektivität zu berechnen und damit genauere Aussagen über die Knochenfestigkeit zu treffen (Genant et al. 1999).



### **1.2. Aufbau und Funktionsweise eines Mikrocomputertomographen**

Die Computertomographie ist ein dreidimensionales (3D) Röntgenbildgebungsverfahren (Ritman 2011). Ein Computertomograph besteht aus einer Untersuchungseinheit, auch Gantry genannt und einem Kontrollzentrum mit einem leistungsstarken Computer. Bestandteile der Gantry sind eine Röntgenröhre und ein Detektorsystem. Die Röntgen-Detektoreinheit ist mechanisch miteinander verbunden. Diese mechanische Einheit rotiert um das zu untersuchende Objekt (Bag et al. 2010). Dabei durchdringen kontinuierlich Röntgenstrahlen, sogenannte Röntgenstrahlenfächer (Fan Beams) das Objekt. Je nach Beschaffenheit des Objektes wird ein Teil der Strahlung absorbiert oder gestreut, ein anderer Teil durchdringt das Objekt und gelangt zu der Detektorleiste (Engelke et al. 1999). Die empfangenen Informationen der Detektoren werden anschließend durch den Computer unter Anwendung eines tomographischen Rekonstruktionsalgorithmus in einen Volumendatensatz umgewandelt. Mit diesem errechneten Datensatz kann man dreidimensionale Ansichten oder Schnittbilder erzeugen (Engelke et al. 1999, Ritman 2011).

Bei der Entwicklung der Mikro-CT wurde überwiegend der etablierte Aufbau einer um das Objekt rotierenden Gantry übernommen. Ein Unterschied zwischen alten und neuen Geräten dieser Bauart ist die Möglichkeit, den Abstand zwischen Strahlquelle und Detektor zu verändern (Stiller et al. 2007). Die modernsten Mikro-CT zeichnen sich zudem durch sehr empfindliche Röntgendetektoren aus, die mithilfe von neuen Kontrastmitteln in der Lage sind, Weichteilgewebe, Strukturen und Gefäße genau darzustellen. Darüber hinaus wurde bei diesen Geräten die geometrische Auflösung sowie die Auslesegeschwindigkeit optimiert (Schambach et al. 2010).

### **1.3. Röntgenquelle, Röntgendetektoren und Strahlengeometrie**

Transmissionsröntgenröhren sind derzeit auf dem Markt der Mikro-CT in der Mehrzahl vertreten. Alternativ werden Reflexionsanodenröhren mit einem deutlich größeren Brennfleck von ungefähr 300  $\mu\text{m}$  angeboten (Schambach et al. 2010). Bei Transmissionsröntgenröhren wird die erzeugte Elektronenstrahlung von mehreren magnetischen Linsen auf das Transmissionstarget mit Brennfleckgrößen zwischen ca. 1  $\mu\text{m}$  und 50  $\mu\text{m}$  fokussiert (Bag et al. 2010).

Häufig in Micro-CT eingesetzte Detektoren sind sogenannte Charge-Coupled-Device-Fotodetektoren (CCD) (Spahn et al. 2003). Die Datenakquisition erfolgt hierbei über ein Schieberegister. Detektoren, die in den letzten Jahren vermehrt eingesetzt werden, sind

Flachbilddetektoren. Die Verarbeitung der Röntgenstrahlung erfolgt hierbei in Szintillatorplatten. Diese Technik der Datenumwandlung hat eine höhere Auslesegeschwindigkeit als die CCD-Detektoren (Spahn et al. 2003). Ausführliche Vergleiche der komplex aufgebauten Detektoren, die in der Bildgebung von Kleintieren Verwendung finden, wurden von Goertzen et al. (2004) publiziert. Engelke et al. (1999) fassten vor mehr als 20 Jahren wichtige Punkte der Technologie und Anwendungen der Mikro-CT, die im Bereich der Strukturanalyse des Knochens relevant sind, zusammen. Die Mikro CT ermöglicht eine räumliche Auflösung von 5-10  $\mu\text{m}$ . Die Probengröße und Auflösung hängen circa über einen Faktor 1000 zusammen: Bei einer Probengröße von 1 cm liegt die maximal zu erzielende Ortsauflösung bei etwa 10  $\mu\text{m}$ . Die Scanzeit ist abhängig von dem zu untersuchenden Objekt und liegt im Bereich von Minuten bis Stunden. In den letzten Jahren hat sich die Technologie der Mikro-CT stetig weiterentwickelt (Schambach et al. 2010). Die 5 wesentlichen Einsatzgebiete in der Osteologie sind folgende:

1. Die Suche und Optimierung von Parametern, die die dreidimensionale Trabekelstruktur charakterisieren
2. Die Anwendung von Finite-Elemente-Methoden zur Bestimmung der biomechanischen Wertigkeit der stereologischen Parameter
3. Der Einsatz in der präklinischen Forschung zu in-vivo Verlaufskontrollen in kleinen Labortieren
4. Die Validierung von Analysemethoden, die in hochauflösenden In-vivo Verfahren zur Osteoporosediagnostik angewendet werden
5. Die dreidimensionale Quantifizierung von Modeling- und Remodelingprozessen (Engelke et al. 1999).

## 2. Knochenarchitektur

Röhrenknochen, auch lange Knochen genannt, kennzeichnen sich durch einen Körper, der Diaphyse und zwei Endstücken der proximalen und distalen Epiphyse aus. Die Diaphyse besteht aus einer Markhöhle und einem dicken Knochenmantel (Substantia compacta). Die proximale und distale Epiphyse ist jeweils von einer dünnen Knochenrinde (Substantia corticalis) überzogen. Im Inneren der Epiphysen befindet sich ein Netzwerk aus Bälkchen, welches vergleichbar einem feinporigen Schwamm (Substantia spongiosa) aufgebaut ist. Die Substantia spongiosa kann strukturell weiter in Substantia tubulosa, Substantia trabeculosa oder Substantia lamellosa unterteilt werden (Nickel et al. 1992, König und Liebich 2018).

Je nach Knochen und dessen Funktion lassen sich unterschiedliche Anordnungen der in der Spongiosa befindlichen Trabekel erkennen (Nickel et al. 1992). Dieser Zusammenhang zwischen trabekulärer Orientierung und mechanischen Eigenschaften wurde bereits vor mehr als hundert Jahren durch das Wolffsche Gesetz beschrieben (Wolff 1892). Koch bestätigte einige Jahre später durch umfangreiche Analysen am proximalen Femur die von Wolff aufgestellten Theorien (Koch 1917).

In weiteren Studien in den letzten Jahrzehnten wurde die anfängliche mathematische Basis der Wolffschen Gesetze widerlegt. Viele der ursprünglichen Annahmen und Interpretationen haben sich entweder als falsch oder zu variabel erwiesen, um als „Gesetz“ betrachtet werden zu können (Ruff et al. 2006).

### **2.1. Mechanische Kompetenz des trabekulären Knochens**

Jeder Knochen unterliegt zeitlebens adaptiven Umgestaltungsvorgängen. Änderungen verschiedener physiologischer Kräfte führen schon nach kurzer Zeit zum Umbau des Knochengewebes (Nickel et al. 1992, König und Liebich 2018). Die mechanischen Eigenschaften der Spongiosa zu verstehen, ist auch von großer sozioökonomischer Bedeutung. Den genauen Aufbau und die mechanischen Eigenschaften eines Knochens zu erforschen und zu verstehen, zum Beispiel wie der Knochen auf verschiedene Veränderungen durch Ernährung oder Belastung reagiert, ist in der klinischen Forschung von hohem Interesse (Odgaard 1997).

Vergleichende und experimentelle Mikro-CT-gestützte Studien zeigten einen Zusammenhang zwischen der trabekulären Orientierung und den aufgetragenen Lasten (Fajardo und Müller 2001, Ryan und Ketcham 2002). In einer innerartlichen Studie an Schafen von Barak et al. (2011) wurde gezeigt, dass sich der trabekuläre Knochen sehr schnell an Veränderungen durch Spitzenbelastung anpasst (Barak et al. 2011). Eine weitere, auch an Schafen durchgeführte Studie untersuchte die Veränderung der trabekulären Architektur im Zusammenhang mit der Beschaffenheit des Untergrundes. Ergebnis dieser Studie war die stärkere Längsorientierung der Trabekel auf härterem Untergrund (Radin et al. 1982). Die an Ratten durchgeführte Studie von Laib et al. (2001) lieferte neue Einblicke in die mit der Ovariectomie verbundenen Veränderungen der trabekulären Struktur. Diese Studie zeigte, dass auch hormonelle Veränderungen einen signifikanten Einfluss auf die trabekuläre Architektur haben können.

Neben den zahlreich erforschten krankheitsbedingten beziehungsweise medikamentös induzierten Veränderungen der trabekulären Struktur hat sowohl das Geschlecht als auch das

---

Alter einen wichtigen Einfluss auf die mechanische Kompetenz des trabekulären Knochens. Geschlechtsbedingte Unterschiede der trabekulären Struktur werden unter anderem in der Studie von Glatt et al. (2007) beschrieben. Diese Studie beschreibt den im Alter stärkeren Rückgang der Knochendichte bei weiblichen im Vergleich zu männlichen Mäusen.

### **3. Parameter zur Analyse des trabekulären Knochens**

#### **3.1. Bone Volume Fraction (BV/TV)**

Der Knochenvolumenanteil (BV/TV) steht für Bone Volume per Total Volume. Dieser Parameter der trabekulären Mikrostruktur lässt sich aus rekonstruierten dreidimensionalen Mikro-CT-Bildern berechnen. Er beschreibt den Anteil, der vom mineralisierten Knochen in einem bestimmten Volumen (Volume of Interest - VOI) belegt ist (Hildebrand und Rüegsegger 1997). Dieser Wert wird in der Regel in Prozent angegeben (Goulet et al. 1994). In Knochenstudien unter Verwendung einer Mikro-CTs wird dieser Index häufig verwendet, da er erste Informationen über die mechanische Eigenschaft gibt (Pothuau et al. 2002).

#### **3.2. Specific Bone Surface. (BS/BV)**

Messungen von Volumen und Oberfläche gelten als Basismaße bei der Beschreibung dreidimensionaler Objekte. Das von der Oberfläche eingeschlossene Volumen beschreibt das Volumen des Objektes. Die Oberflächen- und Volumenberechnung kann für jedes Objekt auf die gleiche Weise durchgeführt werden. Die Bezeichnung der Maße im Bereich der Knochen sind typischerweise Knochenvolumen (BV) und Knochenoberfläche (BS) (Hildebrand und Rüegsegger 1997). Der spezifische Knochenoberflächenvolumenanteil (BS/BV) beschreibt das Verhältnis der segmentierten Knochenoberfläche zum segmentierten Knochenvolumen (Ho et al. 2013). Die Einheit der spezifischen Knochenoberfläche ist  $\text{mm}^2\text{mm}^{-3}$  (Goulet et al. 1994)

#### **3.3. Trabecular Thickness (Tb.Th), Trabecular Separation (Tb.Sp), Trabecular Number (Tb.N)**

Die Trabekeldicke (Tb.Th), der Trabekelabstand (Tb.Sp) und die Trabekelanzahl (Tb.N) sind heutzutage Schlüsselmaße in der Knochengrundlagenforschung, um die dreidimensionale Struktur der Spongiosa zu charakterisieren. Bis zur Einführung der Mikro-CT wurden die Parameter Trabekeldicke, der Trabekelabstand und die Trabekelanzahl histomorphometrisch indirekt über Gleichungen bestimmt (Parfitt et al. 1987). Hildebrand und Rüegsegger (1997) entwickelten eine neue Methode für die modellunabhängige Bewertung von Trabekeldicke und -abstand in dreidimensionalen Bildern.

Die trabekuläre Dicke (Tb.Th) definiert durch die lokale Dicke des trabekulären Knochens an einem bestimmten Punkt dem Durchmesser des größtmöglichen Kreises, der diesen Punkt

enthält und innerhalb des Trabekels vollständig zum Liegen kommt (Hildebrand und Rüeegsegger 1997, Würstlin 2007). Anschließend wird die durchschnittliche Dicke aller Knochenvoxel berechnet, um den endgültigen Wert von Tb.Th zu erhalten (Hildebrand et al. 1999). Der errechnete Durchschnittswert der Tb.Th wird in mm angegeben (Goulet et al. 1994).

Trabecular Separation (Tb.Sp) wird nach dem gleichen Verfahren berechnet, nur diesmal werden die Voxel herangezogen, welche nicht dem Knochen zugeordnet wurden - anders ausgedrückt, die Voxel, deren Dichte unterhalb des festgelegten Schwellenwerts liegen. Tb.Sp beschreibt somit den mittleren Abstand der einzelnen Trabekel zueinander (Hildebrand et al. 1999). Die Einheit der Tb.Sp wird in mm angegeben (Goulet et al. 1994).

Trabecular Number (Tb.N) beschreibt die mittlere Anzahl der Trabekel. Th.N ist definiert als Umkehrfunktion des mittleren Abstands zwischen den Achsen der Platten und der Stäbe (Hildebrand et al. 1999). Die Einheit der Tb.N ist  $\text{mm}^{-1}$  (GOULET et al. 1994).

### **3.4. Connectivity Density (Conn.D)**

Ein Maß für Vernetzung des trabekulären Geflechts ist die Connectivity-Density. Die Konnektivität beschreibt die maximale Anzahl an Verästelungen innerhalb eines Netzwerks, die durchtrennt werden können, ohne dieses dabei in zwei Teile zu trennen (Feldkamp et al. 1989). Eine mathematische Definition sowie grundlegende topologische Methoden zu diesem Parameter wurden von Odgaard (1997) beschrieben. Connectivity-Density wird in  $\text{mm}^3$  angegeben.

### **3.5. Structure Model Index (SMI)**

Die Beobachtung, dass es sich bei dem trabekulären Aufbau um ein platten- und stab-ähnliches aufgebautes Netzwerk handelt, veranlasste Malluche et al. (1982) und Parfitt et al. (1983), ein Stab- und Plattenmodell zu entwickeln. Diese Modelle ermöglichten aus zweidimensionalen Schnitten auf die dreidimensionale Architektur rückzuschließen.

In der Realität besteht der trabekuläre Knochen nicht aus Stäben oder Platten, sondern es herrscht ein fließender Übergang. Eine Studie von Engelke et al. (1999) hat gezeigt, dass sich im Alter ein eher plattenähnliches Netzwerk in ein stabähnliches Netzwerk umwandelt. Aufgrund dieser Erkenntnis führte die Arbeitsgruppe um Hildebrand und Rüeegsegger (1997) einen neuen morphometrischen Parameter ein, den sogenannten Structure Model Index (SMI). Dieser Parameter ermöglicht die Struktur in Bezug auf die Anzahl der Platten und Stäbe zu

quantifizieren. Ein ideales Plattenmodell nimmt den SMI-Wert von 0 ein. Ein ideales Stabmodell nimmt den Wert von 3 ein. Bei realen Trabekelnetzwerken liegt der SMI-Wert in der Regel zwischen 0 und 3, je nach Verhältnis zwischen Stäben und Platten. Trabekelnetzwerke mit gleicher Knochendichte können adäquat auf Basis des SMI charakterisiert werden (Hildebrand und Rüegsegger 1997).

### **3.6. Degree of Anisotropy (DA)**

Die Anisotropie beschreibt die räumliche Ausrichtung der Trabekel innerhalb des Knochens. Je mehr Trabekel die gleiche Orientierung haben, desto größer ist der geometrische Grad der Anisotropie (DA). Der Wert des DA steht demnach mit den mechanischen Eigenschaften des Knochens in Korrelation (Odgaard 1997). Bestimmt wurde dieser Parameter von Whitehouse (1974) sowie Harrigan und Mann (1984) durch die Mean-Intercept-Length Methode. Diese ist als der durchschnittliche Abstand zwischen zwei Knochen und Knochenmark-Grenzflächen definiert.

#### 4. Anatomie des Ellbogengelenks

Das Ellbogengelenk besteht aus drei Knochen, dem Humerus, dem Radius und der Ulna. Die Gelenkflächen zwischen Humerus und Radius (Articulatio humeroradialis), Humerus und Ulna (Articulatio humeroulnaris) und Radius und Ulna (Articulatio radioulnaris proximalis) bilden zusammen die Gelenkfläche des Ellbogengelenks (Articulatio cubiti). Das Ellbogengelenk ist ein Schnappgelenk, eine besondere Ausführung eines Schrauben- und Scharniergelenks (König und Liebich 2018). Das Ellbogengelenk wird medial und lateral durch Seitenbänder gestützt (Ligamentum collaterale cubiti mediale und laterale). Ein weiteres Band, das Ligamentum anulare radii, umschließt von kranial den Radius und verbindet die beiden Processus coronoidei miteinander. Mit dem lateralen Seitenband steht es teilweise in Verbindung. Kaudal befindet sich ein weiteres Band, das Ligamentum olecrani. Dieses Band verbindet die Fossa olecrani des Epicondylus medialis humeri mit dem Olecranon sowie mediale Anteile des Processus anconaeus (Nickel et al. 1992). Eine Vielzahl an Muskeln umgibt das Ellbogengelenk. Die Flexoren befinden sich medial am Ellbogengelenk. Zu den Flexoren gehören folgende Muskeln: Musculus flexor carpi radialis, Musculus flexor carpi ulnaris, Musculus flexor digitalis superficialis und Musculus flexor digitalis profundus. Lateral am Ellbogengelenk befinden sich die Extensoren: Musculus extensor carpi radialis, Musculus extensor carpi ulnaris, Musculus extensor digitalis communis und Musculus extensor digitalis lateralis. Acht weitere Muskeln, die das Ellbogengelenk umgeben, sind folgende: Musculus brachialis, Musculus biceps brachii, Musculus triceps brachii, Musculus tensor fasciae antebrachii, Musculus anconaeus, Musculus brachioradialis, Musculus supinator und Musculus pronator teres (Nickel et al. 1992).

Die Nerven, welche das Ellbogengelenk umgeben, sind der Nervus radialis, Nervus medianus, Nervus ulnaris und der Nervus cutaneus antebrachii medialis. Der Nervus radialis zieht zusammen mit dem Musculus brachialis von medial nach lateral und entlässt sensible Fasern an die Gelenkkapsel. Der Nervus medianus zieht von medial nach kranial und innerviert hauptsächlich die Flexoren und Supinatoren (Nickel et al. 1992, König und Liebich 2018, Salomon et al. 2020). Die Nervenwurzeln des Nervus ulnaris sind der siebte Halswirbel und der erste sowie zweite Brustwirbel. Er zieht von medial nach kaudal und entlässt auf halber Höhe des Humerus den Nervus cutaneus antebrachii caudalis. So wie der Nervus medianus innerviert der Nervus ulnaris vor allem die Flexoren (Nickel et al. 1992, Salomon et al. 2020).



## 5. Grundlagen der Koronoiderkrankung

Die Erkrankung des Processus coronoideus medialis ulnae (Medial Coronoid Process Disease - MCPD) ist laut der Internationalen Elbow Working Group eine von vier Erkrankungen, die unter dem Oberbegriff der Ellbogendysplasie (ED) zusammengefasst werden (Lau et al. 2018). Die anderen drei dazugehörigen Erkrankungen der ED sind folgende: Isolierter Processus anconaeus (IPA), Osteochondrosis dissecans der Trochlea humeri (OCD) und Ellbogeninkongruenzen (INC). Die Ellbogendysplasie betrifft hauptsächlich junge Hunde mittlerer und großer Rassen (Grondalen 1979, Meyer-Lindenberg et al. 2002). In den meisten Fällen kommt es im Laufe der Erkrankung zur Bildung von Arthrosen (Hazewinkel 2018). Die ED ist ein multifaktorieller Krankheitsprozess mit einer genetischen Veranlagung sowie weiteren Umwelteinflüssen (Beuing et al. , Beuing et al. 2000, Mäki et al. 2000, Janutta et al. 2006). Zu diesen Einflüssen zählen schnelles Wachstum, Fütterung, Übergewicht, Hormone und übermäßige Bewegung (Richardson et al. 2000, Zentek 2002). Die ED kann nur ein aber auch häufig beide Gelenke der Vordergliedmaßen betreffen (How 2018).

MCPD ist eine orthopädische Erkrankung, welche von allen Formen der ED am häufigsten auftritt (Olsson 1987, Meyer-Lindenberg et al. 2002, Moores et al. 2008). Die Erkrankung des Processus coronoideus medialis wurde anfänglich als Ununited Medial Coronoid Process (UMCP) bezeichnet (Tirgari 1974). Beschrieben wurde das Vorhandensein einer kleinen Verknöcherung, welche lose am Processus coronoideus medialis ulnae (Medial Coronoid Process - MCP) der Elle befestigt ist. Einige Jahre später wurde dieses Krankheitsgeschehen in Fragmented Medial Coronoid Process (FMCP) umbenannt, da sich keine Wachstumsfuge nachweisen ließ. Die Fragmente befinden sich meist an der Spitze des MCP oder an der Ulna parallel der Incisura radialis (Fitzpatrick et al. 2016). Durch weitere Studien von Moores et al. (2008) und Fitzpatrick et al. (2009) wurde zudem der Begriff mediale Koronoiderkrankung (Medial Coronoid Disease - MCD) eingeführt. Im Vergleich zum Begriff FMCP beinhaltet der Begriff MCD neben den subchondralen Veränderungen des MCP auch Pathologien der beiden Knorpelflächen von Ulna und Humerus.

### 5.1. Ätiologie und Pathogenese

Trotz umfangreicher Forschungen bleibt die genaue Ätiologie der MCD weiterhin unklar (Gortz et al. 2004, Burton et al. 2010, Temwichitr et al. 2010, Fitzpatrick et al. 2016). Die Koronoiderkrankung wurde von vielen Autoren anfänglich als eine Form der Osteochondrose

(OC) beschrieben (Bennett et al. 1981, Grøndalen und Grøndalen 1981). Die OC tritt als Folge einer abnormalen endochondralen Ossifikation auf. Die normale Differenzierung der Chondrozyten wird verzögert, was zu einer abnormalen Verdickung und Retention des Knorpels führt (Boudrieau et al. 1983, Olsson 1987). Als Folge dieser Veränderungen kann es zu Fissuren des Knorpels bis hin zur Anschwemmung von Knorpelschuppen kommen. Sekundär entsteht dadurch eine schmerzhafte, entzündliche Synovialitis, die für eine Lahmheit verantwortlich sein kann (Boudrieau et al. 1983, Olsson 1987).

In den 1990er und 2000er Jahren unterstützten einige Forschungsergebnisse die Annahme, dass die MCD durch Pathologien des subchondralen Knochens verursacht wird (Burton et al. 2010). Laut diesen Studien ist die supraphysiologische Belastung ein wichtiger Faktor bei der Entstehung der Krankheit des MCP (Danielson et al. 2006, Gemmill und Clements 2007, Burton et al. 2008, Lau et al. 2013b, Fitzpatrick et al. 2016). Mikrorisse des subchondralen Knochens sind ein wichtiger Bestandteil der MCD-Pathologie diese können ohne sichtbare Veränderungen des Knorpels vorhanden sein (Danielson et al. 2006, Fitzpatrick et al. 2016). Die Entstehung von Mikrorissen, der Verlust von Osteozyten und ein damit einhergehender Dichteabfall ist im Bereich der radialen Inzisur des MCP am größten (Danielson et al. 2006). Eine Arbeit von Burton et al. (2010) stellte wenige Jahre später einen signifikanten Unterschied in der Widerstandsfähigkeit gegenüber Druckbelastungen des axialen und abaxialen Teils des MCP fest. Der axiale Bereich ist weniger belastungsfähig als der abaxiale Bereich des MCP. Dieser Unterschied kann eine Mikrorissbildung und anschließende Fragmentierung begünstigen. Dieses Phänomen der Ermüdungsschäden von kortikalem Knochen ist schon länger bekannt und wurde schon in der Humanmedizin erforscht (Burrows 1956). Das Ansammeln von Mikrorissen durch wiederholte zyklische Belastung mit anschließendem Versagen wird als Ermüdungsbruch bezeichnet (Tami et al. 2003)

Die MCD stellt sich sehr unterschiedlich dar (Fitzpatrick et al. 2016). Weitere wichtige Faktoren wie Inkongruenz, Torsion und Rotation führen zu unterschiedlichen Belastungen bestimmter Bereiche im Gelenk (Holsworth et al. 2005, Burton et al. 2013, Rohwedder et al. 2017, Rohwedder et al. 2018). Die Inkongruenz ist laut einigen Studien ein Faktor, welcher an der Entstehung der Veränderungen am MCP beteiligt sein kann (Samoy et al. 2012, Rohwedder et al. 2017). Als Ellbogeninkongruenz wird eine Fehlstellung der medialen Gelenkflächen des Ellbogens bezeichnet (Samoy et al. 2006). Beschriebene Varianten der Inkongruenz des Ellbogens sind eine abnorme Form der ulnaren Incisura trochlearis beziehungsweise eine Stufe zwischen Radius und Ulna (Wind 1986, Wind und Packard 1986, Preston et al. 2001, Samoy et al. 2006, Gemmill und Clements 2007). Studien von Collins et al. (2001) und Viehmann et al.

(1999) untersuchten die Stellung der Gelenksflächen von MCD-prädisponierten Rassen im Vergleich zu nicht-prädisponierten Rassen. Ergebnis der Arbeiten ist ein verminderter Krümmungsradius bei Rassen, die häufiger an MCD erkranken. Eine große Anzahl an Studien lässt vermuten, dass aufgrund der Anomalien ein erhöhter lokaler Druck innerhalb des medialen Gelenks entsteht, was zu Schädigungen an verschiedenen Stellen führt (Wind 1986, Preston et al. 2001, Gemmill et al. 2005, Rohwedder et al. 2017). Eine frühzeitige Diagnose und Behandlung der Inkongruenz ist entscheidend, um dem Fortschreiten des Krankheitsprozesses entgegenzuwirken (Thomson und Robins 1995, Samoy et al. 2012). Aufgrund dessen gibt es einige Studien, die sich durch verschiedenste Messungen mit der Inkongruenz des Ellbogengelenks beschäftigt haben (Mason et al. 2002, Wagner et al. 2007, Boettcher et al. 2009, Rohwedder et al. 2017, Mostafa et al. 2019, Mostafa et al. 2019). Wagner et al. (2007) untersuchte unter Verwendung von Arthroskopie, Computertomografie und Röntgen die radioulnare Inkongruenz (RUI). Ergebnis dieser Studie war, dass sich die Arthroskopie für die Diagnosestellung von RUI am besten eignet.

Eine weitere beschriebene Form der RUI ist die transiente Inkongruenz (Wind 1986, Thomson und Robins 1995, Gemmill et al. 2005, Gemmill und Clements 2007). Hierbei handelt es sich um eine temporäre Inkongruenz. Diese entsteht im Laufe der Wachstumsphase des Hundes. Ein langsamer wachsender Radius ist der Grund für die vorübergehende RUI (Gemmill et al. 2005, Gemmill und Clements 2007). In dieser Phase kann es zu Schädigungen der verschiedenen Strukturen kommen. Im späteren Verlauf ist dann keine Inkongruenz mehr nachvollziehbar, jedoch kann es zu Schäden kommen, wie zum Beispiel: Frakturen im Bereich des MCP, sowie Knorpel- und Knochenveränderungen (Gemmill et al. 2005, Gemmill und Clements 2007). Eine Studie von Rohwedder und Böttcher (2021) unterscheidet zwischen statischer und dynamischer RUI, um den Krankheitsprozess der MCD genauer zu verstehen.

## **5.2. Rassedisposition und Vererbung**

Die Mehrzahl der Hunde, welche an MCD leiden, sind bei Erstvorstellung aufgrund einer Lahmheit noch recht jung; laut den meisten Studien zwischen 4 Monate und 34 Monate alt (Meyer-Lindenberg et al. 2002, Fitzpatrick et al. 2009, Fitzpatrick et al. 2016). In einigen Fällen können durch MCD ausgelöste Lahmheiten auch erst im höheren Alter auftreten (Grøndalen und Grøndalen 1981, Meyer-Lindenberg et al. 2002, Fitzpatrick et al. 2009). Es sind zumeist schnell wachsende Hunde mittel- und großwüchsiger Rassen mit einer Vorgeschichte von intermittierender oder anhaltender Lahmheit erkrankt. Häufig betroffene Rassen sind Berner

Sennenhund, Golden und Labrador Retriever, Rottweiler, Deutscher Schäferhund, Neufundländer oder Boxer (Grøndalen und Grøndalen 1981, Carpenter et al. 1993, Meyer-Lindenberg et al. 1993, Meyer-Lindenberg et al. 2002, Temwichitr et al. 2010). Kleinwüchsige Rassen können ebenfalls, wenn auch seltener, betroffen sein (Janthur et al. 2000, Meyer-Lindenberg et al. 2003, Fitzpatrick et al. 2016). Die MCD kann sowohl einseitig als auch beidseitig auftreten, die größere Anzahl der erkrankten Tiere zeigen bilaterale Veränderungen des MCP (Mason et al. 1980, Fehr und Meyer-Lindenberg 1992, How 2018). Viele Studien zeigen eine höhere Betroffenheit männlicher Tiere (Meyer-Lindenberg et al. 1993, Gutbrod und Festl 1999, Beuing et al. 2000, Mäki et al. 2000, Janutta et al. 2006). Das schnellere Wachstum der männlichen Tiere wird als prädisponierender Faktor beschrieben (Boudrieau et al. 1983, Walde und Tellhelm 1991). Es wird angenommen, dass die Krankheit einen multifaktoriellen und polygenen Ursprung hat. Studien von Guthrie und Pidduck (1990) und Lavrijsen et al. (2012) haben sich intensiv mit dem Einfluss der Vererbung beschäftigt. Die Heritabilität ( $h^2$ ) ist rassespezifisch. In einer Studie von Guthrie und Pidduck (1990) wurde die Häufigkeit der MCD bei Verwandten ersten Grades betroffener Hund mit der Häufigkeit in der Population verglichen. Eine Beteiligung von genetischen Faktoren bei der MCD ist das Ergebnis dieser Studie. Wiederum konnten andere Studien keine erhöhte Heritabilität verschiedener Rassen im Zusammenhang mit der ED bestätigen (Beuing et al. 2000, Mäki et al. 2000, Heine et al. 2009). Oberbauer et al. (2017) veröffentlichten eine genetische Langzeitstudie zur Reduzierung der Prävalenz von ED, jedoch konnten bisher keine MCD-verursachenden Genorte identifizieren

## **6. Diagnostik der Koronoiderkrankung**

### **6.1. Klinische Befunde**

Betroffene Patienten zeigen aufgrund der fortschreitenden Veränderungen je nach Zeitpunkt der Vorstellung sehr variable klinische Symptome (Winhart 1991). Im Frühstadium der Krankheit wird häufig kurzzeitig ein steifes Gangbild beobachtet, welches vor allem nach längeren Ruhephasen auftritt (Olsson 1993). Beschrieben werden auch Lahmheiten, die erst nach Belastung auftreten oder durch diese verstärkt werden (Walde und Tellhelm 1991, Fehr und Meyer-Lindenberg 1992). Im Falle einer bilateralen Betroffenheit kommt es hin und wieder zu wechselnder Lahmheit, die Zuordnung der stärker betroffenen Vordergliedmaße ist nicht immer ganz eindeutig (Walde und Tellhelm 1991, Fehr und Meyer-Lindenberg 1992, Schleich 1998). Nicht selten wird das Vorliegen einer intermittierenden Lahmheit als vorübergehender Wachstumsschmerz fehlinterpretiert (Henry 1984, Fehr und Meyer-Lindenberg 1992). Im weiteren Verlauf können sich die Phasen zwischen den Lahmheiten verkürzen, bis schließlich eine chronische Lahmheit zu beobachten ist (Houlton 1984). Adspektorisch wird oft eine supinierte Pfote mit einem eng am Körper anliegenden Ellbogen beobachtet (Grondalen 1979, Schleich 1998). Das Ellbogengelenk kann deutlich verdickt sein (Grondalen 1979, Walde und Tellhelm 1991). Beschrieben sind auch Schwellungen des periartikulären Weichteilgewebes (Grøndalen und Grøndalen 1981). Schmerzhaftigkeit zeigen erkrankte Patienten bei maximaler Beugung und Streckung des Gelenks. Diese kann durch digitalen Druck im Bereich des MCP verdeutlicht werden (Grondalen 1979, Schleich 1998, Fitzpatrick und Yeadon 2009).

In einigen Fällen ist bei der Beugung und Streckung des Ellbogengelenks Krepitation zu spüren und zu hören. Zudem kann es zu einer Einschränkung des Bewegungsradius kommen (Mason et al. 1980, Walde und Tellhelm 1991, Schleich 1998). Atrophie der gesamten Muskulatur der erkrankten Vordergliedmaße ist zudem häufig nach länger bestehender Lahmheit zu beobachten (Grondalen 1979, Walde und Tellhelm 1991, Fehr und Meyer-Lindenberg 1992, Schleich 1998). Unter Betrachtung des Signalements der Anamnese und der orthopädischen Untersuchung kann der Verdacht einer Erkrankung des MCPs gestellt werden.

Differentialdiagnostisch sind jedoch auch andere Erkrankungen des Ellbogengelenks sowie Erkrankungen des Schultergelenks zu berücksichtigen. Zusätzliche Diagnostik ist im Anschluss vonnöten, um eine endgültige Diagnose stellen zu können (Winhart 1991, Fehr und Meyer-Lindenberg 1992, Olsson 1993, Gutbrod und Festl 1999, Meyer-Lindenberg et al. 2003).

## 6.2. Röntgendiagnostik

Die Verfügbarkeit, hohe Kosten und eine notwendige Narkose bei der Computertomographie (CT) oder der Magnetresonanztomographie (MRT) haben dazu geführt, dass die konventionelle Röntgenuntersuchung nach wie vor ein wichtiger Bestandteil der MCD-Diagnose ist (Mason et al. 2002). Für die Beurteilung von Veränderungen des Ellbogengelenks ist eine röntgenologische Untersuchung unerlässlich (Fitzpatrick et al. 2009). Empfohlen werden Aufnahmen beider Gelenke, um diese vergleichend beurteilen zu können (Carpenter et al. 1993, Meyer-Lindenberg 2001). Zudem erkrankt die Mehrzahl der Hunde beidseits an der MCD (Mason et al. 1980, Fehr und Meyer-Lindenberg 1992, How 2018). Einige Autoren empfehlen weitere Aufnahmen auch des Schultergelenks, da die Zuordnung des betroffenen Gelenks nicht immer eindeutig ist (Schleich 1998). Eine Vielzahl von Arbeiten haben sich mit verschiedenen Röntgenprojektionen beschäftigt, um dadurch die Diagnose der verschiedenen Erkrankungen des Ellbogengelenks zu verbessern (Denny 1987, Voorhout und Hazewinkel 1987, Fehr und Meyer-Lindenberg 1992, Meyer-Lindenberg et al. 1993, Schleich 1998, Haudiquet et al. 2002, Meyer-Lindenberg et al. 2003). Jedoch ist die Beurteilung und die Diagnosestellung der Koronoiderkrankung aufgrund der nicht-überlagerungsfreien Darstellung des MCP trotz diverser Projektionstechniken in vielen Fällen nicht möglich (Henry 1984, Fehr und Meyer-Lindenberg 1992). Nur deutlich dislozierte Fragmente sind radiologisch erkennbar (Carpenter et al. 1993, Haudiquet et al. 2002). Meist kann deshalb nur eine Verdachtsdiagnose aufgrund von sekundären Veränderungen geäußert werden (Walde und Tellhelm 1991, Hornof et al. 2000). Sekundäre Veränderungen sind eine nicht klar abgrenzbare kraniale Kontur des MCP, osteophytäre Zubildungen kranial am Radiuskopf, dorsal am Processus anconaeus und am Epicondylus lateralis sowie eine ulnare subtrochleare Sklerose (Grondalen 1979, Meyer-Lindenberg et al. 1993, Schleich 1998, Hornof et al. 2000, Smith et al. 2009, Mostafa et al. 2018). Eine Arthrose bei vorhandener Koronoiderkrankung ist meist erst ab dem 12. Lebensmonat deutlich zu erkennen (Carpenter et al. 1993). Verschiedene Studien zeigen aber auch, dass Koronoidpathologien ohne röntgenologische Veränderungen vorkommen (Read et al. 1990, Fitzpatrick et al. 2009). Ein entscheidender Faktor für die röntgenologische Beurteilung der MCD ist die Erfahrung und Expertise des Betrachters (Rau et al. 2011).

## 6.3. Computertomographische Diagnostik

Aus heutiger Sicht gilt die Computertomographie als bildgebendes Verfahren der Wahl zur

Diagnosesicherung von Veränderungen des MCP (Carpenter et al. 1993, Klumpp et al. 2010). Sie ermöglicht eine überlagerungsfreie Darstellung der proximalen Ulna. Die Computertomographie sichert als Ergänzung zum konventionellen Röntgen in vielen Fällen die Diagnose (Voorhout und Hazewinkel 1987, Braden et al. 1994, Kapatkin et al. 2003). Die Computertomographie eignet sich in den meisten Fällen dazu verschobene und nicht-verschobene Fragmente zu erkennen (Carpenter et al. 1993). Studien untersuchten röntgenologisch unauffällige Ellbogen von prädisponierten Rassen und konnten in etwa einem Drittel der Fälle mittels CT eine Koronoiderkrankung diagnostizieren (Klumpp et al. 2013, Lau et al. 2013b). Nicht-dislozierte Fragmente und Fissuren können jedoch auch im CT nicht immer zuverlässig dargestellt werden (van Bree und Van Ryssen 1998, Reichle et al. 2000, Rovesti et al. 2002). Weitere in der CT sichtbare Befunde können einen indirekten Hinweis auf eine vorliegende Koronoiderkrankung liefern. Zu diesen zählen: Sklerosen an Humerus und insbesondere der Ulna, kaudal des MCP, zystenähnliche Läsionen, eine unregelmäßige Incisura radialis, Gelenksinkongruenz sowie Sklerosierung und osteophytäre Zubildung im Bereich des MCP, kranial am Radiuskopf sowie auf dem Processus anconaeus (Reichle und Snaps 1999, Reichle et al. 2000, Kapatkin et al. 2003, Moores et al. 2008, Groth et al. 2009). Beschrieben werden auch Konturveränderungen des MCP, jedoch muss hierbei die rassespezifische Variation beachtet werden (Reichle et al. 2000, Klumpp et al. 2010, Klumpp et al. 2013).

### **7. Ulnare Subtrochleare Sklerose**

Die Bedeutung der ulnaren subtrochlearen Sklerose (STS) im Zusammenhang mit MCD wurde in der Vergangenheit in vielen Studien erforscht und diskutiert. Eine ulnare subtrochleare Sklerose war mit 87,6 % der häufigste radiologische Befund bei an MCD erkrankten Patienten unter 12 Monaten (Lau et al. 2015). Eine jüngere Studie von Mostafa et al. (2018) untersuchten anhand der Röntgenbilder die ulnare STS bei vorhandener MCD. Von den 206 untersuchten Ellbogengelenken lag das Durchschnittsalter der untersuchten Patienten bei circa 5 Jahren. Die MCD wurde in dieser Studie mittels Computertomographie, Arthroskopie oder Arthrotomie diagnostiziert. In 96 % der Fälle konnte mithilfe von speziellen Graustufenwertmessungen eine ulnare STS bei MCD bestätigt werden.

Lau et al. (2013b) untersuchten röntgenologisch die ulnare STS bei 14 Wochen alten an MCD erkrankten Labrador Retrievern. MCD wurde mit der Hilfe der Mikrocomputertomographie diagnostiziert. Eine ulnare STS konnte bei keinem der erkrankten Patienten festgestellt werden.

Aufgrund dieser Erkenntnis wird die ulnare STS von Lau et al. (2013b) als sekundäre Veränderung angesehen, welche sich erst im fortschreitenden Krankheitsprozess der MCD entwickelt. Eine Studie von Burton et al. (2007) bestätigte einen Zusammenhang zwischen ulnarer STS und MCD; zudem wurde röntgenologisch und mithilfe einer speziellen Digitalkamera die Region der stärksten Sklerose untersucht. Der Bereich um die Koronoidbasis und direkt angrenzende Regionen sind am stärksten von der Sklerose betroffen.

Ein Jahr später erforschten Burton et al. (2008) die Inter- und Intraobserver-Reliabilität ulnare subtrochleare Sklerose sowie Abstufungen davon anhand von mediolateralen Röntgenaufnahmen zu erkennen. Die Übereinstimmung der Interobserver war „fair“ ( $\kappa = 0,251-0,369$ ) und die Übereinstimmung Intraobserver war „moderate“ bis „substantial“ ( $\kappa = 0,462-0,667$ ). Eine weitere Studie zur besseren Objektivierung der ulnaren STS wurde von Smith et al. (2009) veröffentlicht. Hier wurden anhand von mediolateralen Röntgenbildern Längenverhältnismessungen der ulnaren STS bei Labrador Retrievern durchgeführt. Die Wahrscheinlichkeit durch diese Längenverhältnismessung ulnare STS bei an MCD erkrankten Patienten zu diagnostizieren, lag bei 81 %. Ähnliche Längenverhältnismessungen der ulnaren STS wurden herangezogen, um die Kurz- und Langzeiterfolge bei MCD-Patienten nach arthroskopischer Behandlung des FPC zu beurteilen. Eine Zunahme von 2 Prozent nach 6 Wochen postoperativ und keine weitere Veränderung der ulnaren subtrochlearen Sklerose in der Langzeitkontrolle waren das Ergebnis dieser Studie (Barthélémy et al. 2014). Eine weitere Studie, die sich der Längenverhältnismessungen bediente, bestätigte einen Zusammenhang zwischen vorhandener ulnarer STS und der Entwicklung von Arthrose als Folge einer MCD (Draffan et al. 2009).

Das Ausmaß der ulnaren subtrochlearen Sklerose anhand von transversalen Computertomographie-Aufnahmen mit und ohne spezielle Messhilfe zu bestimmen, war das Ziel einer Studie von Shimizu et al. (2015). Bei der Einstufung des Ausmaßes der ulnaren subtrochlearen Sklerose ohne Messhilfe war die Inter- und Intraobserver Übereinstimmung „poor“. Die Verwendung der speziellen Messhilfe zeigte eine „moderate“ bis „almost perfect“ Inter- und Intraobserver Übereinstimmung bei der Einstufung des Ausmaßes der ulnaren subtrochlearen Sklerose (Shimizu et al. 2015).

### **7.1. Ulnare subtrochleare Sklerose in der Mikrocomputertomographie**

Fitzpatrick et al. (2016) untersuchten Anteile des MCP mittels Mikrocomputertomographie.



Die Koronoidanteile von MCD- und Kontrollpatienten wurden durch eine subtotale Koronoidektomie gewonnen. An MCD erkrankte Patienten zeigten eine höhere Anzahl an Trabekeln mit geringerem Abstand zueinander. Zudem wurde betont, dass die MCD kein homogenes Erscheinungsbild hat. Je nachdem in welchem Bereich des MCPs die Last am größten ist, zeigen sich innerhalb der Gruppe der MCD-Patienten signifikante Unterschiede des trabekulären Aufbaus und der Ausrichtung (Fitzpatrick et al. 2016).

Lau et al. (2013a) untersuchten experimentell den Gelenkknorpel sowie den subchondralen Knochen des MCP bei 15 bis 27 Wochen alten Labrador Retrievern. Die Diagnose MCD wurde mittels Mikrocomputertomographie gestellt. Die Auswertung der im Mikrocomputertomographen gewonnenen Parameter des subchondralen Knochens zeigten keinen signifikanten Unterschied zwischen gesunden und an MCD erkrankten Patienten. Die Knorpelzusammensetzung, im Besonderen der Glykosaminoglykan-Gehalt, war bei erkrankten Individuen signifikant geringer als bei gesunden Patienten (Lau et al. 2013a). Diese Studie zeigt Veränderungen des Gelenkknorpels, aber keine Veränderungen der subchondralen Knochendichte in den frühen Stadien der MCD.

Eine weitere experimentelle Publikation von Lau et al. (2013b) untersuchten mittels Röntgen, Computertomographie und Mikrocomputertomographie erste Veränderungen bei wenigen Wochen alten Labrador Retrievern im Zusammenhang mit MCD. Die Diagnose MCD wurde mittels Mikrocomputertomographie und Nekropsie gestellt. 50 % der untersuchten Ellbogen waren erkrankt. Computertomographisch konnte bei 30,8 % MCD diagnostiziert werden. Röntgenologisch konnten bei 14 Wochen alten Patienten keine Veränderung wie ulnare subtrochleare Sklerose oder eine nicht abgrenzbare Koronoidspitze detektiert werden.

Eine andere mikrocomputertomographisch gestützte Studie untersuchte den subchondralen Knochen des MCP bei 4 bis 24 Wochen alten Labrador Retrievern. Im Alter von 10 Wochen waren bereits große Anteile der Basis und der Spitze des MCP von trabekulärer in eine glatte Oberfläche umgewandelt worden. Diese frühe Umwandlung des subchondralen Knochens an bestimmten Punkten ist vermutlich das Ergebnis mechanischer Faktoren. Im Bereich des MCP ist der mediale Humeruskondylus dafür verantwortlich (Wolschrijn und Weijs 2005a).

## **III. VERÖFFENTLICHUNG**

### **1. Publikation**

Der Originalartikel wurde am 07.12.2023 im Journal Research in Veterinary Science akzeptiert.

**Titel:** Microcomputed tomographic analysis of ulnar trochlear notch in medium- and large-breed canine cadavers with and without medial coronoid disease.

**Autoren:** Tim Glück, Yury Zablotski, Andrea Meyer-Lindenberg

**Zeitschrift:** Research in Veterinary Science



Contents lists available at ScienceDirect

Research in Veterinary Science

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/rvsc](http://www.elsevier.com/locate/rvsc)

## Microcomputed tomographic analysis of the ulnar trochlear notch in medium- and large-breed canine cadavers with and without medial coronoid disease

Tim Glück<sup>\*</sup>, Yury Zablotski, Andrea Meyer-Lindenberg

*Clinic of Small Animal Surgery and Reproduction, Ludwig-Maximilians-University, Veterinärstr. 13, 80539 Munich, Germany*

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Canine elbow  
Medial coronoid disease  
Ulnar trochlear notch  
Ulnar subtrochlear sclerosis  
Microcomputed tomography

### ABSTRACT

Medial coronoid disease (MCD) is a common disease often associated with thoracic limb lameness in medium- and large-breed dogs. The term MCD includes subchondral changes of the medial coronoid process (MCP), as well as pathologies of both cartilaginous surfaces. As there are only a few comprehensive and detailed studies on the trabecular structure of the medial coronoid, the goal of this study was to compare the trabecular structure of the ulnar trochlear notch of canine cadavers with and without MCD using different micro-computed tomographic (micro-CT) parameters.

Fifty-eight elbow joints from 29 canine cadavers of MCD-predisposed and non-predisposed breeds (control group) were examined radiographically, macroscopically and by microcomputed tomography. The study included elbow joints of eight Labrador Retrievers (21.6–37 kg), seven Golden Retrievers (26.3–42 kg), seven Bernese Mountain dogs (31–47 kg) and seven dogs of non-predisposed breeds (19.7–52 kg) (control group). The final diagnosis of MCD was based on necropsy and micro-computed tomographic examinations. Micro-CT examinations were performed using XtremeCT II (Scanco Medical, Zurich, Switzerland) and the following parameters were examined: bone volume fraction (BV/TV), trabecular thickness (Tb.Th), trabecular separation (Tb.Sp), trabecular number (Tb.N), connectivity density (Conn.D) and degree of anisotropy (DA).

Twenty-four elbows of 44 elbows of the predisposed breeds (Labrador Retrievers, Golden Retrievers Bernese Mountain dogs) showed subchondral changes and lesions of the cartilage surfaces. The result of this study is a higher density (BV/TV) of the trabecular bone of the ulnar trochlear notch in elbows affected by MCD compared to the control group. The increased density due to trabecular reconstruction in the ulnar trochlear notch is likely the result of selectively increased loading during life.

### 1. Introduction

Elbow dysplasia (ED) is a common disease often associated with lameness of the thoracic limb in medium- and large-breed dogs (Meyer-Lindenberg et al., 2002; Moores et al., 2008). The following four diseases are classified under the umbrella term ED: Medial coronoid process disease (MCPD), ununited anconeal process (UPA), osteochondritis dissecans (OCD) and elbow incongruity (INC) (How, 2018). The term medial coronoid disease (MCD) includes subchondral changes of the medial coronoid process (MCP), as well as pathologies of both cartilaginous surfaces (Moores et al., 2008; Fitzpatrick et al., 2009a, 2009b). Mentioned pathologies and resulting full thickness cartilage erosion of the medial coronoid process and medial humeral condyle has been

referred to as medial compartment disease (Fitzpatrick et al., 2009a, 2009b; Coppieters et al., 2016; Ballester et al., 2022).

Some dog breeds such as Labrador and Golden Retrievers, Rottweilers, German Shepherds, Bernese Mountain dogs and Boxers appear to be predominantly affected (Denny, 1987; Meyer-Lindenberg et al., 1993; Meyer-Lindenberg et al., 2002; Narojek et al., 2008; Temwichitr et al., 2010). Besides the hereditary component, there are other known risk factors such as nutrition, growth rate, weight and exercise that assist the development of MCD (Beuing et al., 2000; Mäki et al., 2000; Beuing et al., 2006; Sallander et al., 2006; Narojek et al., 2008).

The aetiology and exact pathogenesis of MCD has not been finally clarified (Danielson et al., 2006; Burton et al., 2010; Temwichitr et al., 2010; Fitzpatrick et al., 2016). A study published by Breit et al. (2004)

<sup>\*</sup> Corresponding author at: Berta-Cramer-Ring 34b, 65205 Wiesbaden, Germany.  
E-mail address: [timgluck@gmail.com](mailto:timgluck@gmail.com) (T. Glück).

<https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2023.105108>

Received 28 September 2023; Received in revised form 18 November 2023; Accepted 7 December 2023

Available online 13 December 2023

0034-5288/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.

found delayed ossification of the medial coronoid and anconeal processes in large-breed dogs compared to smaller breed dogs. Currently, the common hypothesis is that MCD is associated with microdamage to the subchondral bone due to fatigue from mechanical overload associated with joint incongruence (Danielson et al., 2006; Schawalter et al., 2006; Burton et al., 2008a, 2008b; Boettcher et al., 2009; Burton et al., 2010; Fitzpatrick et al., 2016; Rohwedder et al., 2017; Rohwedder et al., 2018; Mostafa et al., 2019a, 2019b; Rohwedder and Böttcher, 2021).

Features radiologically associated with MCD include periarticular osteophytes, incongruity, lack of visualisation of the medial coronoid process and sclerosis of the ulnar trochlear notch (William et al., 2000; Fitzpatrick et al., 2009a, 2009b; Smith et al., 2009; Mostafa et al., 2018; Mostafa et al., 2019a, 2019b). Trochlear notch sclerosis (TNS) is also known as ulnar subtrochlear sclerosis (STS) (Smith et al., 2009; Lau et al., 2013a, 2013b; Mostafa et al., 2018). The importance of TNS in the context of MCD has been addressed by numerous studies in the past. Radiographic studies such as measurements of radiopacity as well as width ratios of the TNS have been performed to improve the sensitivity of the diagnosis of MCD (Burton et al., 2008a, 2008b; Mostafa et al., 2018). In another study, evaluation of TNS length ratios was one of the methods used to assess short- and long-term outcome after arthroscopic treatment (Barthélémy et al., 2014). Both radiographic and computed tomography-based studies developed methods to make the measurement of TNS more consistent and thus more comparable (Smith et al., 2009; Shimizu et al., 2015). Lau et al. (2013a, 2013b) investigated first-appearing changes in the MCP in few-week-old Labrador Retrievers affected by MCD using a micro-CT. TNS could not be identified radiographically in any of the very young patients diagnosed with MCD. TNS is therefore considered to be a secondary change in MCD. In the examination of older MCD patients, TNS could be identified in 96% of the cases (Mostafa et al., 2018).

Since there are no comprehensive and detailed studies on the trabecular structure of the ulnar trochlear notch, the goal of this study was to compare it in healthy and MCD patients using micro-CT. The working hypothesis is that elbows affected by MCD show significant differences in trabecular structure and density compared to healthy elbows.

## 2. Material and methods

### 2.1. Population

Fifty-eight elbow joints from 29 canine cadavers of MCD predisposed ( $n = 44$ ) and non-predisposed ( $n = 14$ ) breeds (control group) were examined macroscopically, radiographically, and by microcomputed tomography. The dogs were euthanised for reasons unrelated to the research of the present study. This study included elbow joints of eight Labrador Retrievers (21.6–37 kg), seven Golden Retrievers (26.3–42 kg), seven Bernese Mountain dogs (31–47 kg) and seven dogs of non-predisposed breeds (19.7–52 kg) (control group). The elbow joints to be examined were separated from the carcass by sawing the humerus and the radius and ulna about 15 cm proximal and distal to the joint, respectively. Soft tissue except for the joint capsule and collateral ligaments was removed. All elbow joints were fixed in 10% unbuffered formaldehyde solution.

### 2.2. Radiographic examination

Standard mediolateral flexed and craniocaudal pronated radiographs were taken of all separated joints (Multix Secret DR, Siemens, Erlangen, Germany, 4.5 mA s, 55 kV) and evaluated according to the IEWG radiological screening for elbow dysplasia (Ohlerth et al., 2016). The images were evaluated using the software dicompACS® vet (version 8.3.20; Oehm und Rehbein GmbH, Rostock, Germany).

### 2.3. Necropsy examination of the cartilage surface

The elbow joints were carefully separated into proximal and distal parts by removing the joint capsule and collateral ligaments, so that the proximal part consisted of the sawed-off humerus and the distal part of radius and ulna. The articular surfaces of both parts were macroscopically examined for lesions of the cartilage layer. Inspired by grades of the modified Outerbridge Score (MOS) (Johnston and Tobias, 2017) (Table 1). OCD and INC were not included in this study because their diagnosis was not entirely clear due to severe degenerative changes.

### 2.4. Micro-CT examination

Micro-CT scans of the elbow joints were performed using the XtremeCT (Scanco Medical AG, Zurich, Switzerland). The following settings were used: voxel size: 30.3  $\mu\text{m}$ , tube voltage: 68 kV, projections: 1000/180°, integration time: 100 ms. During scanning, the elbow joints were secured in a plastic bottle with modelling clay to prevent movement. The elbow joints were always placed and secured in the same horizontal lying position. The scanning area was defined from just above the most cranial point of the anconeal process to about 3 cm below the most cranial point of the medial coronoid process. This was followed by a two- and three-dimensional (2D/3D) analysis of the micro-CT data obtained.

#### 2.4.1. 2D analysis of the subchondral bone of the MCP

The micro-CT transverse cross-sectional images were evaluated for changes such as fissures and fractures of the subchondral bone in the medial coronoid process. The definitive diagnosis of MCD was based on necropsy and micro-computed tomography findings (Lau et al., 2013a, 2013b).

#### 2.4.2. 3D analysis of the volume of interest (VOI) and of the region of interest (ROI)

For the 3D evaluation, a corresponding threshold value for cancellous bone was determined. The threshold was determined from micro-CT cross-sectional images at the level of the MCP. This was determined visually independently by two different persons. The mean value of the two determined threshold values was calculated and used for further evaluation. A volume of interest (VOI) was defined to calculate the parameters reflecting the structure of the trabecular bone. In this study, the shape of the VOI is cylindrical.

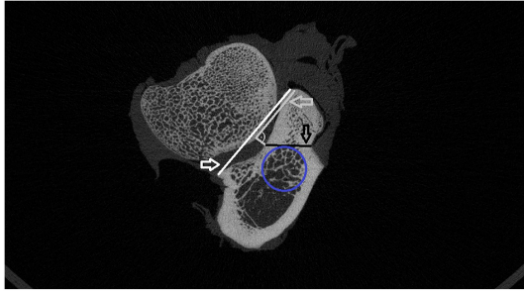
**2.4.2.1. Region of interest (ROI).** The diameter of the cylinder, which also represents the diameter of the circle of the region of interest (ROI) of the transverse plane, was measured at the level of the most cranial point of the medial coronoid process. It corresponds to the length of the base of the medial coronoid. The base was determined using the same procedure as in Oltersdorf (2015) (Fig. 1).

**2.4.2.2. Volume of interest (VOI).** The study by Burton et al. (2007) was used to select the area most affected by sclerosis. The coronoid base and adjacent regions proximally, distally and caudally are most affected by

**Table 1**  
Modified Outerbridge Scoring System Used for Macroscopic Evaluation of Cartilage Pathology.

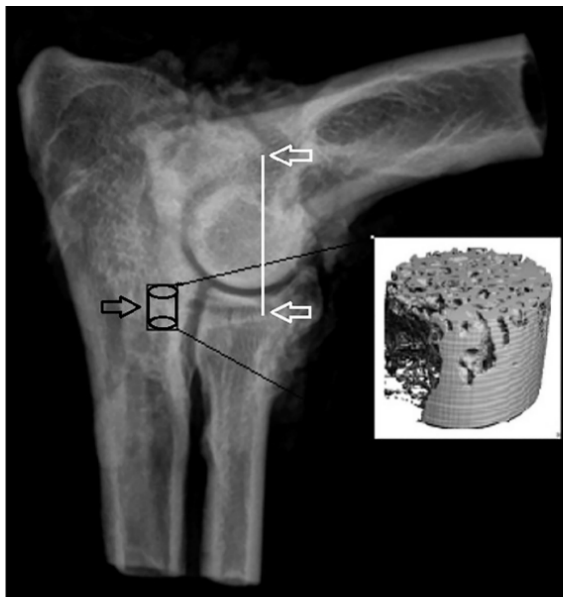
Score	Lesions of the cartilage layer
0	Normal
1	Chondromalacia
2	Partial cartilage loss
3	Incomplete cartilage loss (subchondral bone still covered)
4	Penetration, full thickness cartilage fissure (subchondral bone visible)
5	Eburnated subchondral bone

Note. Inspired by Arthroscopic Evaluation of Cartilage Pathology (Johnston and Tobias, 2017)



**Fig. 1.** Microcomputed tomographic cross section at the level of the MCP of a left elbow with no degenerative changes of the subchondral bone. Schematic drawing to determine the base of the MCP. A perpendicular line is placed halfway between the cranial and caudal ends of the radioulnar joint space (white line, white arrow) (short grey line, grey arrow). The base of the medial coronoid process (black line, black arrow) passes between the intersection of this perpendicular with the ulna and the typical retraction at the medial cortex of the ulna. The circle describes the region of interest (ROI), which lies (tangential to the base) within the cancellous bone.

sclerosis. The height of the cylinder was determined by the number of cross-sections from the most cranial point of the anconeal process (AP) to the cross-section of the most cranial point of the medial coronoid process. Twenty percent of this calculated distance corresponds to the cylinder height. The centre of the cylinder corresponds to the previously determined ROI (Fig. 2). In all cross-sectional images of the VOI, care was taken to ensure that the region of interest (ROI) was located within the cancellous bone.



**Fig. 2.** Latero-lateral x-ray image of a left elbow with schematic representation of the microcomputed tomography reconstructed volume of interest (VOI). The height of the cylinder (black arrow) corresponds to 20% of the number of sectional images from the most cranial point of the AP (upper white arrow) to the most cranial point of the MCP (lower white arrow). The center of the height of the cylinder is the cross-sectional image of the most cranial point of the MCP.

### 2.5. Statistical analysis

The statistical analysis was carried out using the software IBM SPSS Statistic 28.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) and R statistical software (R version 4.0.3; RStudio desktop version 1.4.1103, 2021). First, all values of the descriptive statistics were determined. This was followed by a check for normal distribution using the Shapiro-Wilk and Kolmogorov-Smirnov tests and check of homogeneity of variances using the Levene's test. Depending on the result of the normal distribution, the data were expressed in mean and standard deviation (SD) or median and interquartile range (IQR). The comparison of the individual parameters of the trabecular structure (BV/TV (%), Tb.N ( $\text{mm}^{-3}$ ), Tb.Th (mm), Tb.Sp (mm), Conn.-D ( $\text{mm}^{-3}$ ), DA) of the two groups (MCD and control) was performed with a *t*-test for parametric data and a Mann-Whitney *U* test for non-parametric data. Significant differences were assumed from an error probability of  $P < 0.05$ .

## 3. Results

### 3.1. Population

#### 3.1.1. Diseased elbows of predisposed breeds (MCD group)

The group of MCD predisposed breeds includes 44 elbow joints from 22 dog cadavers of three different breeds. Eight Labrador Retrievers ( $11.3 \pm 1.4$  years,  $31.9 \pm 4.6$  kg), seven Golden Retrievers ( $10.7 \pm 2.49$  years,  $33.7 \pm 5.4$  kg) and seven Bernese Mountain dogs ( $9.2 \pm 2.8$  years,  $39.6 \pm 5.4$  kg). Of the 22 dog carcasses, ten were male (4 castrated) and twelve female (5 spayed). Twenty-four (55%) of the 44 elbow joints examined were found to have MCD based on necropsy of the cartilaginous surfaces and subchondral microcomputed tomographic examination. The 24 diseased joints (MCD group) were from 14 canine cadavers ( $11.1 \pm 2.4$  years,  $33.2 \pm 6$  kg): four (28.6%) Labrador Retrievers (3 affected bilaterally), six (42.9%) Golden Retrievers (4 affected bilaterally) and four (28.6%) Bernese Mountain dogs (three affected bilaterally) (Table 2).

#### 3.1.2. Non-predisposed breeds (control group)

The group of non-predisposed breeds included 14 elbow joints from seven dog cadavers ( $9.5 \pm 2.4$  years,  $37.2 \pm 12.5$  kg) of five different breeds. The following breeds were examined: Weimaraner ( $n = 2$ ), Great Dane ( $n = 2$ ), Border Collie ( $n = 1$ ), German Wirehaired ( $n = 1$ ), Doberman ( $n = 1$ ) giving a total of three males (2 castrated) and four females (1 spayed). All radiographs and micro-CT transverse cross-sectional images of the control group showed no signs of pathology. No damage of the cartilage surface was found in this group (Table 3).

#### 3.1.3. MCD and control group ( $\pm$ standard deviation)

No significant difference in age ( $p = 0.054$ ) and body weight ( $p = 0.28$ ) between the diseased ( $n = 24$ ) and the control group ( $n = 14$ ). The results of the analysis of age and body weight for the MCD and control groups are summarised in Table 4.

### 3.2. Radiographic findings

I EWG results for the diseased group and for the control group are summarised in Table 2 and Table 3, respectively.

### 3.3. Necropsy findings of the cartilage surface

Changes of cartilage were found in all 24 diseased elbow joints. The joint surfaces of the MCP including the adjacent areas and those of the medial humeral condyle were examined (Fig. 3). The severity of the cartilage pathologies is summarised in Table 2. The articular surfaces of the control group were all free of cartilage changes.

**Table 2**  
Details of diseased group.

Elbow	Breed	Sex	Age (years)	Weight (kg)	Limb	IEWG score	Outerbridge score	Micro-CT (subchondral bone)
1	Labrador	F	9,8	21,6	right	2	2-3	Fissur
2	Labrador	F	9,8	21,6	left	2	1-2	Fissur
3	Labrador	F	10,4	33,3	right	2	1-2	Fissur
4	Labrador	F	10,4	33,3	left	2	2-3	Fragment
5	Labrador	M	13,1	35,9	right	1	2-3	Fissur
6	Labrador	M	13,1	35,9	left	0	1-2	Fissur
7	Labrador	F	13,2	30	left	1	1	Fissur
8	Golden Retriever	F	12,3	43	left	1	1	Fissur
9	Golden Retriever	F	10,7	26,3	right	3	3-4	Fragment
10	Golden Retriever	F	10,7	26,3	left	3	2-3	Fragment
11	Golden Retriever	F	10,1	30	right	3	2	Fragment
12	Golden Retriever	F	10,1	30	left	3	4	Fragment
13	Golden Retriever	M	14,4	33,9	right	3	2-3	Fissur
14	Golden Retriever	M	14,4	33,9	left	3	2-3	Fissur
15	Golden Retriever	M	12,4	30	right	3	4-5	Fragment
16	Golden Retriever	M	12,4	30	left	3	4-5	Fragment
17	Golden Retriever	M	6,2	39,2	right	1	2	Fissur
18	Bernese Mountain Dog	F	13,7	31	right	2	2	Fissur
19	Bernese Mountain Dog	F	13,7	31	left	2	3-4	Fragment
20	Bernese Mountain Dog	F	12	40	right	2	1	Fissur
21	Bernese Mountain Dog	F	12	40	left	1	1-2	Fissur
22	Bernese Mountain Dog	F	6,8	36	left	2	3	Fragment
23	Bernese Mountain Dog	F	7,5	42	right	0	1	Fissur
24	Bernese Mountain Dog	F	7,5	42	left	0	1	Fissur

Predisposed Breeds (Labrador Retriever, Golden Retriever, Bernese Mountain dog); F, female, M, male; IEWG, International Elbow Working Group; MicroCT, micro-computed tomographic; MCD, medial coronoid disease.

**Table 3**  
Details of control group.

Elbow	Breed	Sex	Age (years)	Weight (kg)	Limb	IEWG score	Outerbridge score	MicroCT (subchondral bone)
1	Border Collie	M	10,6	19,7	right	0	0	Normal
2	Border Collie	M	10,6	19,7	left	0	0	Normal
3	German Wirehaired Pointer	F	7,4	36	right	0	0	Normal
4	German Wirehaired Pointer	F	7,4	36	left	0	0	Normal
5	Weimaraner	M	10,4	33,4	right	0	0	Normal
6	Weimaraner	M	10,4	33,4	left	0	0	Normal
7	Great Dane	F	6,4	52	right	0	0	Normal
8	Great Dane	F	6,4	52	left	0	0	Normal
9	Doberman	M	11,1	33	right	0	0	Normal
10	Doberman	M	11,1	33	left	0	0	Normal
11	Great Dane	F	7,6	52	right	0	0	Normal
12	Great Dane	F	7,6	52	left	0	0	Normal
13	Weimaraner	F	13,2	13,2	right	0	0	Normal
14	Weimaraner	F	13,2	13,2	left	0	0	Normal

Control Group; F, female, M, male; IEWG, International Elbow Working Group; Micro-CT, micro-computed tomographic; MCD, medial coronoid disease.

**Table 4**  
The mean (± standard deviation) and range of values with respect to age, body weight, and sex distribution for diseased and control group.

Parameter	Diseased group (14 dogs, 24 elbows)		Control group (7 dogs, 14 elbows)	
	Mean ± SD	Range	Mean ± SD	Range
Age (years)	11,1 ± 2,4	6,2 - 14,4	9,5 ± 2,4	6,4 - 13,2
Bodyweight (kg)	33,2 ± 6,0	21,6-43	37,2 ± 12,5	19,7-57
<b>Sex distribution</b>	<b>Male</b> 4 (2 castrated)	<b>Female</b> 10 (4 spayed)	<b>Male</b> 3 (2 castrated)	<b>Female</b> 4 (spayed)

Notes. No significant difference in age ( $p = 0.054$ ) and body weight ( $p = 0.28$ ) between the diseased and the control group

3.4. 2D analysis of the subchondral bone of the MCP

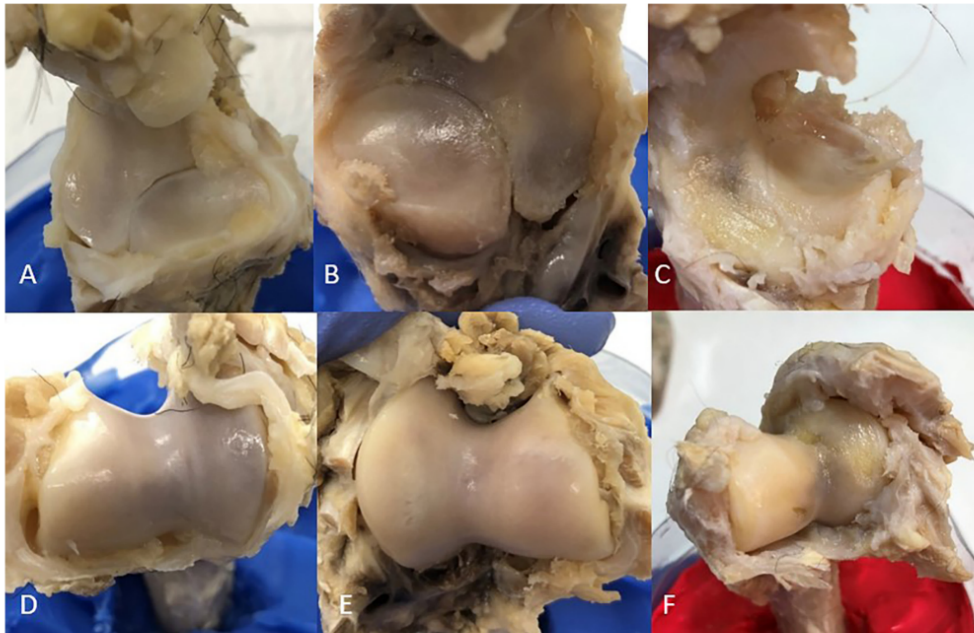
Pathologies of the subchondral MCP were assessed using the  $\mu$ CT transverse cross-sectional images. All 44 joints of the predisposed group were scanned. Fissures (15) and fragments (9) were identified in the 24

diseased elbows. Other pathologies such as periarticular osteophytes and cyst-like changes in the articular surfaces were seen (Fig. 4).

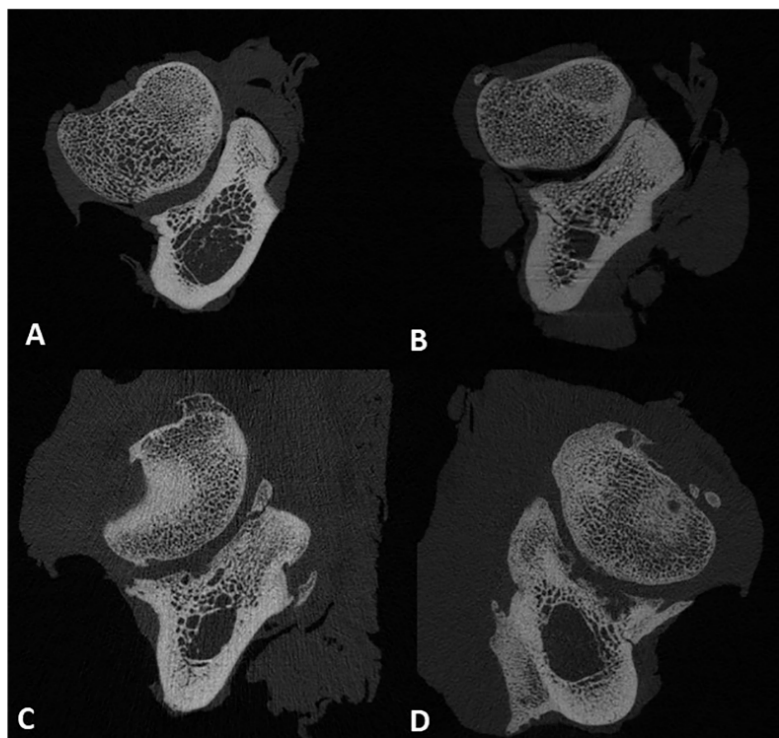
3.5. 3D analysis of the VOI

Comparison of the mean values between the MCD group and the control group revealed a significant difference in density (BV/TV (%)). The mean value of diseased elbows was 0.49 (SD ± 0.12) and was significantly greater than that of the control group: 0.38 (SD ± 0.08) ( $p = 0.007$ ) (Fig. 5a). The number of trabeculae (Tb.N (mm<sup>-3</sup>)) in the diseased group (1.65 mm<sup>-3</sup> (SD ± 0.36)) was very close to the number in the control group (1.68 mm<sup>-3</sup> (SD ± 0.26)). A significant difference could not be found ( $p = 0.807$ ) (Fig. 5b). The difference in trabecular separation (Tb.Sp (mm)) was similarly small. No significant difference between the MCD (0.33 mm (IQR: 0.24–0.38)) and the control group (0.35 mm (IQR: 0.34–0.42)) could be found ( $p = 0.082$ ) (Fig. 5c).

There was a greater differences between the control and MCD groups in trabecular thickness (Tb.Th (mm)). The trabecular thickness of the MCD group was 0.29 mm (IQR: 0.23–0.38) greater than that of the control group with 0.21 mm (IQR: 0.18–0.27). The significance level in this case was  $p = 0.055$  (Fig. 5d). When comparing the connectivity in



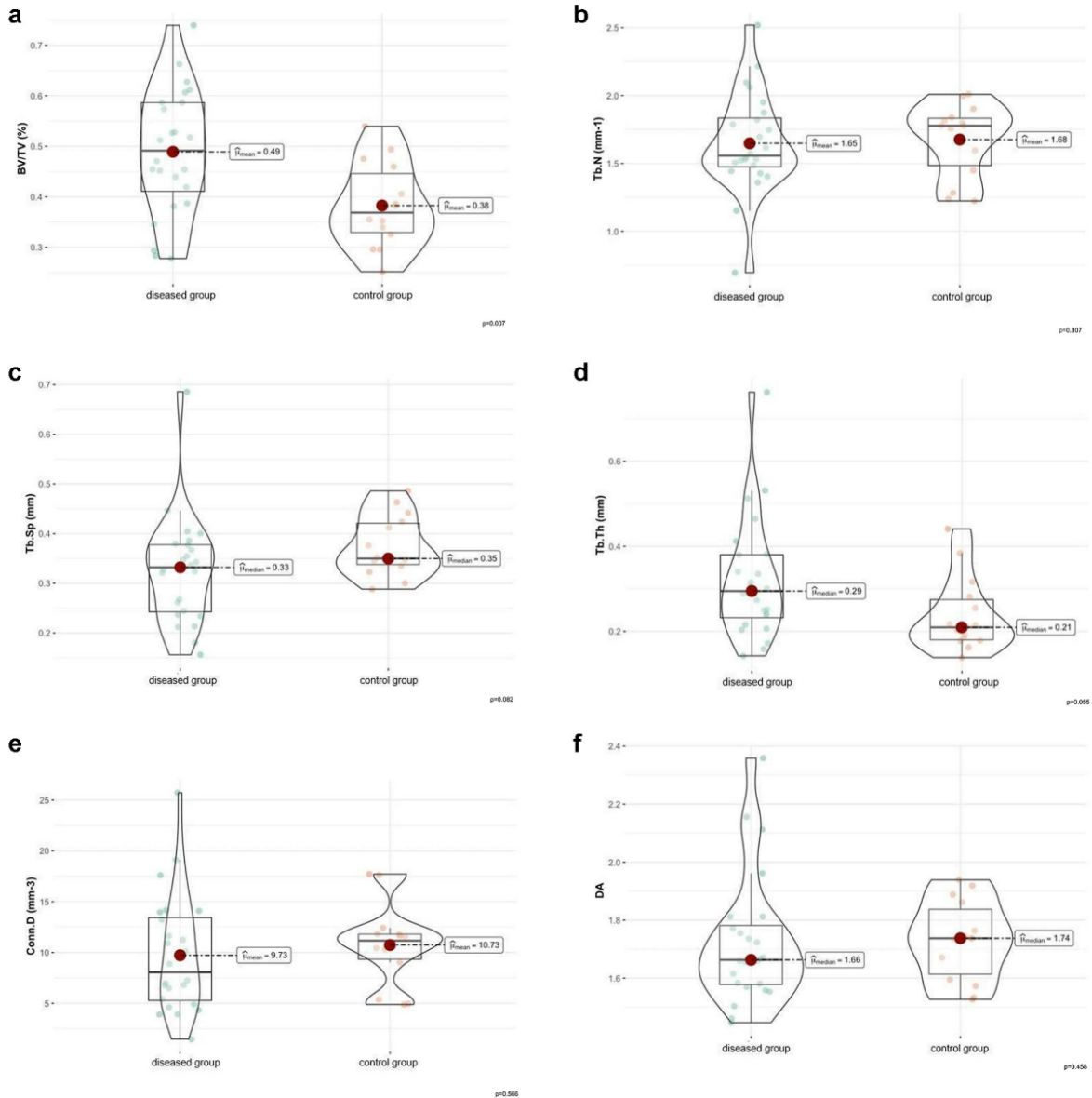
**Fig. 3.** Images of both articular surfaces: Radius and ulna (A, B, C) and humerus (D, E, F). Border Collie, left elbow, 10.6 years of age, no articular cartilage damage (A, D). Labrador Retriever, right elbow, 10.4 years of age, low-grade cartilage defects on MCP, medial radius, and medial humeral condyle (B, E). Bernese Mountain dog, left elbow, 13.7 years of age, clear cartilage defects on both articular surfaces (C, F).



**Fig. 4.** Transverse micro-CT images at the level of the MCP (A-D). No subchondral pathologies at the MCP (A). Fissure of radial incisure encroaching tip of the MCP (B). Fragment in the area of the tip of the MCP (C). Cystic-like changes with area of radial incisure (D).

T. Glück et al.

Research in Veterinary Science 166 (2024) 105108



**Fig. 5.** a-f Graphical representation of bone volume fraction BV/TV (a), number of trabeculae Tb.N ( $\text{mm}^{-1}$ )(b), trabecular separation Tb.Sp (c), trabecular thickness Tb.Th (d), degree of cross-linking Conn.D ( $\text{mm}^{-3}$ ) (e), trabecular anisotropy DA (f) of diseased and control group by boxplots.

trabecular bone (Conn.D ( $\text{mm}^{-3}$ )), a slightly higher value was found for the control group. However, this was not statistically significant ( $p = 0.566$ ) (Fig. 5e). The examination of the trabecular anisotropy (DA) revealed a higher value in the diseased group, but also without a statistically significant difference ( $p = 0.458$ ) (Fig. 5f) (Table 5).

**4. Discussion**

This study investigated the trabecular architecture of the ulnar trochlear notch in canine cadavers affected by MCD. Fifty-five percent of elbows of the examined Labrador Retrievers, Golden Retrievers, Bernese Mountain dogs showed MCD, indicating the high prevalence in these

breeds (Meyer-Lindenberg et al., 2002).

According to the IEWG, an increased radiopacity in the area of the MCP base and of the ulnar trochlear notch is a criterion for the assessment of elbow dysplasia. The assessment and the extent of TNS is subjective (Hazewinkel, 2018). In this study, an increased density in the area of the ulnar trochlear notch was found in elbows affected by MCD. Previous studies have used different methods to classify TNS more objectively in the context of MCD. One well known study chose to calculate length ratios to objectify the extent of TNS (Smith et al., 2009). Among others, this study as well as other studies investigated TNS through different measurements of radiopacity (Burton et al., 2007; Mostafa et al., 2018). The proportion of MCD in diseased elbows with



T. Glück et al.

Research in Veterinary Science 166 (2024) 105108

**Table 5**

Mean and standard deviation (SD) or median and interquartile range (IQR) of the bone structure parameters for the group of diseased and the control group.

	Diseased group (14 dogs, 24 elbows)	Control group (7 dogs, 14 elbows)	P-value
BV/TV (%)	0,49 ± 0,12	0,38 ± 0,08	0,007
Tb.N (mm <sup>-1</sup> )	1,65 ± 0,36	1,68 ± 0,36	0,807
Tb.Sp (mm)	0,33 (0,24-0,38)	0,35 (0,34-0,42)	0,082
Tb.Th (mm)	0,29 (0,23-0,38)	0,21 (0,18-0,27)	0,055
Conn.D (mm <sup>-3</sup> )	9,73 ± 5,74	10,73 ± 3,94	0,566
DA	1,66 (1,58-1,78)	1,74 (1,61-1,84)	0,458

Notes. Significant differences were assumed from a probability of error of  $P < 0.05$

TNS varied between 62% and 96% in the studies (Burton et al., 2007; Smith et al., 2009; Mostafa et al., 2018).

The evaluation of the microcomputed tomographic transversal cross-sectional images of the MCP showed a similarly varying fissure and fracture pattern as described in detail by Fitzpatrick et al. (2016). The mean age of the patients examined in this study was 11.1 years, significantly higher than in many previous studies (Burton et al., 2007; Smith et al., 2009; Lau et al., 2013a, 2013b; Shimizu et al., 2015). Only one other micro-CT based study investigated TNS in patients a few months old. At this young age, TNS could not be detected in the presence of MCD. Therefore, it is now assumed that TNS is a secondary degenerative change, which in the context of MCD is either due to inflammation or mechanical overload (Lau et al., 2013a, 2013b).

The ulnar trochlear notch was examined in this study with the help of a microcomputer tomograph. Micro-CT is a suitable, non-destructive method and provides more detailed structural data of the bone. The trabecular structure of the ulnar trochlear notch as well as its arrangement is reflected by the evaluation of the different parameters (Engelke et al., 1999). The microcomputed tomographic examination offers the determination of a volume of interest (VOI). The selection of the VOI allowed a density determination of the trabecular bone without including the cortex or degenerative changes such as periarticular osteophytes. Periarticular osteophytes along the base of the trochlear notch of the ulna are partly responsible for the increase in radiopacity of many previous studies (William et al., 2000; Burton et al., 2007).

The evaluation of the VOI showed an increased density (BV/TV) of the trabecular bone of the ulnar trochlear notch of the MCD group compared to the control group. The trabecular bone structure and increased bone density in the diseased group are presumably the result of an increased point load.

A similar statement is also made by Mostafa et al. (2018) in the summary of their results and speaks of an increased load acting on the subtrochlear region of the corresponding ulna in the early and late stages of the disease. Fitzpatrick et al. (2016) assume that supraphysiological stresses are responsible for various MCP pathologies.

Comparative and experimental micro-CT-based studies in other species highlight the relationship between trabecular orientation and applied loads (Fajardo and Müller, 2001; Ryan and Ketcham, 2002). An intraspecies micro-CT study in sheep showed that trabecular bone adapts to changes by increasing bone density (BV/TV), trabecular number (Tb.N) and trabecular thickness (Tb.Th) and decreasing trabecular separation (Tb.Sp) (Barak et al., 2011).

The findings of Barak et al. (2011) were partially confirmed in the present study. A significant increase in bone density (BV/TV) ( $p = 0.007$ ) in the diseased group was confirmed in the present study. No significant difference was found in the trabecular number (Tb.N) in this study ( $p = 0.807$ ). An increased mean value of the trabecular thickness (Tb.Th) of the diseased group was measured. The significance level of the trabecular thickness (Tb.Th) was  $p = 0.055$  and thereby just above the defined error probability of  $p < 0.05$ . A reduced mean value of the trabecular spacing (Tb.Sp) in the diseased group compared to the control group was also measured in this study, but the difference in this

parameter was not significant ( $p = 0.085$ ).

Changes in various physiological forces lead to altering of bone tissue after a short time (Nickel et al., 1992; Odgaard, 1997; König and Liebich, 2018). Recording and analysing the changes in trabecular architecture due to stress or disease was the goal of this and numerous micro-computed tomographic studies (Fajardo and Müller, 2001; Barak et al., 2011; Fitzpatrick et al., 2016). Examination of segments obtained by subtotal coronoidectomy showed sclerosis of the subchondral trabeculae in chronic cases (Fitzpatrick et al., 2016).

## 5. Conclusion

In conclusion, this study was a snapshot in which micro-CT parameters were used to investigate differences in trabecular micro-architecture and density between the MCD group and the control group. It focused purely on the trabecular bone of the ulnar trochlear notch, which is most affected by sclerosis. Significantly higher density of trabecular bone was found in the MCD group compared to the control group. This change is presumably the result of forces acting over a lifetime. The deciding factors for these forces are incongruence, torsion and rotation, which lead to different loads in certain areas of the joint (Holsworth et al., 2005; Fitzpatrick and Yeaton, 2009; Guillou et al., 2012; Burton et al., 2013; Rohwedder et al., 2017; Rohwedder et al., 2018; Rohwedder and Böttcher, 2021). MCD is not homogeneous (Fitzpatrick et al., 2016). Further micro-CT follow-up studies are needed to investigate the exact change in trabecular architecture of the ulnar trochlear notch in young growing dogs with MCD.

## Declaration of Competing Interest

The authors declare no conflict of interest related to this report. The research was not financially supported. The experiment was approved by the Animal Ethics Committee of the Faculty of Veterinary Medicine, Ludwig-Maximilians-University, Munich, Germany. Material preparation, data collection and analysis were performed by Tim Glück, Yury Zablotski and Andrea Meyer-Lindenberg. All authors read and approved the final manuscript.

## Acknowledgements

The authors would like to thank Franziska Feichtner of the Research Department of the Faculty of Veterinary Medicine, Ludwig-Maximilians-University Munich, for her support.

## References

- Ballester, C.O., Canet, C.S., García, J.I.R., Salesa, N.F., Canet, V.S., CIS, Aguado, 2022. Proximal abduction ulnar osteotomy (PAUL): short-and long-term evaluation in dogs presenting medial compartment disease. *Animals*. 12 (4), 466.
- Barak, M.M., Lieberman, D.E., Hublin, J.-J., 2011. A Wolf in sheep's clothing: trabecular bone adaptation in response to changes in joint loading orientation. *Bone*. 49 (6), 1141–1151.
- Barthélémy, N.P., Griffon, D.J., Ragety, G.R., Carrera, I., Schaeffer, D.J., 2014. Short-and long-term outcomes after arthroscopic treatment of young large breed dogs with medial compartment disease of the elbow. *Vet. Surg.* 43 (8), 935–943.
- Beuing, R., Mues, C., Tellhelm, B., Erhardt, G., 2000. Prevalence and inheritance of canine elbow dysplasia in German Rottweiler. *J. Anim. Breed. Genet.* 117 (6), 375–383.
- Beuing, R., Janssen, N., Brand, H., 2006. Analysis of fertility in canine populations in respect to genetic and environmental influences. In: Proceedings of the 5th Biannual EVSSAR Congress.
- Boettcher, P., Werner, H., Ludewig, E., Grevel, V., Oechtering, G., 2009. Visual estimation of radioulnar incongruence in dogs using three-dimensional image rendering: an in vitro study based on computed tomographic imaging. *Vet. Surg.* 38 (2), 161–168.
- Breit, S., Künzel, W., Seiler, S., 2004. Variation in the ossification process of the anconeal and medial coronoid processes of the canine ulna. *Res. Vet. Sci.* 77 (1), 9–16.
- Burton, N., Comerford, E., Bailey, M., Pead, M., Owen, M., 2007. Digital analysis of ulnar trochlear notch sclerosis in Labrador retrievers. *J. Small Anim. Pract.* 48 (4), 220–224.

T. Glück et al.

Research in Veterinary Science 166 (2024) 105108

- Burton, N., Dobney, J., Owen, M., Colborne, G., 2008a. Joint angle, moment and power compensations in dogs with fragmented medial coronoid process. *Vet. Comp. Orthop. Traumatol.* 21 (02), 110–118.
- Burton, N., Toscano, M., Barr, F., Owen, M., 2008b. Reliability of radiological assessment of ulnar trochlear notch sclerosis in dysplastic canine elbows. *J. Small Anim. Pract.* 49 (11), 572–576.
- Burton, N.J., Perry, M.J., Fitzpatrick, N., Owen, M.R., 2010. Comparison of bone mineral density in medial coronoid processes of dogs with and without medial coronoid process fragmentation. *Am. J. Vet. Res.* 71 (1), 41–46.
- Burton, N., Warren-Smith, C., Roper, D., Parsons, K., 2013. CT assessment of the influence of dynamic loading on physiological incongruity of the canine elbow. *J. Small Anim. Pract.* 54 (6), 291–298.
- Coppieters, E., Van Ryssen, B., van Bree, H., Verhoeven, G., Broeckx, B., de Bakker, E., Deforce, D., Gielen, I., 2016. Computed tomographic findings in canine elbows arthroscopically diagnosed with erosion of the medial compartment: an analytical method comparison study. *Vet. Radiol. Ultrasound* 57 (6), 572–581.
- Danielson, K.C., Fitzpatrick, N., Muir, P., Manley, P.A., 2006. Histomorphometry of fragmented medial coronoid process in dogs: a comparison of affected and normal coronoid processes. *Vet. Surg.* 35 (6), 501–509.
- Denny, H., 1987. The canine elbow. *Br. Vet. J.* 143 (1), 1–20.
- Engelke, K., Karolczak, M., Lutz, A., Seibert, U., Schaller, S., Kalender, W., 1999. Mikro-ct technologie und applikationen zur erfassung von knochenarchitektur. *Radiologe* 39 (3), 203–212.
- Fajardo, R., Müller, R., 2001. Three-dimensional analysis of nonhuman primate trabecular architecture using micro-computed tomography. *Am. J. Phys. Anthropol. Off. Pub. Am. Assoc. Phys. Anthropol.* 115 (4), 327–336.
- Fitzpatrick, N., Yeadon, R., 2009. Working algorithm for treatment decision making for developmental disease of the medial compartment of the elbow in dogs. *Vet. Surg.* 38 (2), 285.
- Fitzpatrick, N., Smith, T.J., Evans, R.B., Yeadon, R., 2009a. Radiographic and arthroscopic findings in the elbow joints of 263 dogs with medial coronoid disease. *Vet. Surg.* 38 (2), 213–223.
- Fitzpatrick, N., Yeadon, R., Smith, T., Schulz, K., 2009b. Techniques of application and initial clinical experience with sliding humeral osteotomy for treatment of medial compartment disease of the canine elbow. *Vet. Surg.* 38 (2), 261–278.
- Fitzpatrick, N., Garcia, T.C., Daryani, A., Bertran, J., Watari, S., Hayashi, K., 2016. Micro-CT structural analysis of the canine medial coronoid disease. *Vet. Surg.* 45 (3), 336–346.
- Guillou, R., DeJardin, L., McDonald, C., 2012. 3-dimensional kinematics of the Normal canine elbow at the walk and trot. In: *Proceedings, Annual Meeting of the Veterinary Orthopedic Society, Crested Butte, CO.*
- Hazewinkel, H.A., 2018. Screening for Elbow Dysplasia, grading according to the IEWG. In: *Proceeding: 33rd Annual Meeting IEWG, Singapore 24th 2018*, pp. 25–32.
- Holsworth, I.G., Wisner, E.R., Scherrer, W., Filipowicz, D., Kass, P.H., Pooya, H., Larson, R.F., Schulz, K.S., 2005. Accuracy of computerized tomographic evaluation of canine radio-ulnar incongruence in vitro. *Vet. Surg.* 34 (2), 108–113.
- How, K.L., 2018. Clinical signs of Elbow Dysplasia. In: *Proceedings 33rd annual meeting IEWG, Singapore, September 24th 2018*, p 5 (2018) Clinical signs of Elbow Dysplasia. *Proceedings 33rd annual meeting IEWG, Singapore, September 24th 2018*, p. 5.
- Johnston, S.A., Tobias, K.M., 2017. *Veterinary Surgery: Small Animal*, second edition vol. 1. Elsevier Health Sciences, pp. 862–865. chapter 52. 2017.
- König, E., Liebich, H., 2018. *Anatomie der Haussäugetiere: Band I Bewegungsapparat*. Thieme Verlag, Stuttgart, 2018, Auflage, 7, pp. 173–193.
- Lau, S.F., Wolschrijn, C.F., Hazewinkel, H.A., Siebelt, M., Voorhout, G., 2013a. The early development of medial coronoid disease in growing Labrador retrievers: radiographic, computed tomographic, necropsy and micro-computed tomographic findings. *Vet. J.* 197 (3), 724–730.
- Lau, S.F., Wolschrijn, C.F., Siebelt, M., Vernooij, J.C., Voorhout, G., Hazewinkel, H.A., 2013b. Assessment of articular cartilage and subchondral bone using EPIC-microCT in Labrador retrievers with incipient medial coronoid disease. *Vet. J.* 198 (1), 116–121.
- Mäki, K., Liinamo, A., Ojala, M., 2000. Estimates of genetic parameters for hip and elbow dysplasia in Finnish Rottweilers. *J. Anim. Sci.* 78 (5), 1141–1148.
- Meyer-Lindenberg, A., Fehr, M., Brunner, L., Nolte, I., 1993. Fragmentierter Processus coronoideus medialis der Ulna beim Hund. Vorkommen und Therapieergebnisse: Erfahrungen an, 101, pp. 457–466.
- Meyer-Lindenberg, A., Langhann, A., Fehr, M., Nolte, I., 2002. Prevalence of fragmented medial coronoid process of the ulna in lame adult dogs. *Vet. Rec.* 151 (8), 230–234.
- Moores, A.P., Benigni, L., Lamb, C.R., 2008. Computed tomography versus arthroscopy for detection of canine elbow dysplasia lesions. *Vet. Surg.* 37 (4), 390–398.
- Mostafa, A., Nolte, I., Wefstaedt, P., 2018. The prevalence of medial coronoid process disease is high in lame large breed dogs and quantitative radiographic assessments contribute to the diagnosis. *Vet. Radiol. Ultrasound* 59 (5), 516–528.
- Mostafa, A., Nolte, I., Wefstaedt, P., 2019a. Quantitative radiographic evaluation of elbow incongruity in Labrador and Golden retrievers with confirmed medial coronoid disease. *Vet. Comp. Orthop. Traumatol.* 32 (01), 010–017.
- Mostafa, A.A., Nolte, I., Wefstaedt, P., 2019b. Radiographic determination of humeroradial, humeroulnar, and radioulnar subluxation indices to quantify elbow incongruence in dogs confirmed to have medial coronoid disease. *Res. Vet. Sci.* 126, 83–88.
- Narajek, T., Fiszdon, K., Hanyasz, E., 2008. Canine elbow dysplasia in different breeds. *Bull. Vet. Inst. Pulawy* 52, 169–173.
- Nickel, R., Schummer, A., Seiferle, E., 1992. *Lehrbuch der Anatomie der Haustiere*, Band 1. Berlin/Hamburg, Auflage, pp. 28–53.
- Odgaard, A., 1997. Three-dimensional methods for quantification of cancellous bone architecture. *Bone* 20 (4), 315–328.
- Olerth, S., Tellhelm, B., Amort, K., Ondreka, N., 2016. Explanation of the IEWG grading system. In: *Proceedings 30th Annual Meeting of the International Elbow Working Group*.
- Oltersdorf, B., 2015. Retrospektive computertomographische Studie zum Vergleich der Knochendichte des Processus coronoideus medialis ulnae von Hunden unterschiedlicher Rassen mit und ohne arthroskopischem Hinweis auf eine Koronoiderkrankung.
- Rohwedder, T., Böttcher, P., 2021. Relation of computed tomography-based static axial radioulnar incongruence measurements under general anaesthesia and dynamic, in vivo RUI during the walk in canine elbow joints with and without medial coronoid process disease. *Vet. Comp. Orthop. Traumatol.* 34 (06), 386–393.
- Rohwedder, T., Fischer, M., Böttcher, P., 2017. In vivo fluoroscopic kinematography of dynamic radio-ulnar incongruence in dogs. *Open Vet. J.* 7 (3), 221–228.
- Rohwedder, T., Fischer, M., Böttcher, P., 2018. In vivo axial humero-ulnar rotation in normal and dysplastic canine elbow joints. *Tierärztl. Prax. Ausg. K Klientiere Heimtiere* 46 (02), 83–89.
- Ryan, T.M., Ketcham, R.A., 2002. The three-dimensional structure of trabecular bone in the femoral head of strepsirrhine primates. *J. Hum. Evol.* 43 (1), 1–26.
- Sallander, M.H., Hedhammar, A.K., Trogen, M.E., 2006. Diet, exercise, and weight as risk factors in hip dysplasia and elbow arthrosis in Labrador retrievers. *J. Nutr.* 136 (7), 2050S–2052S.
- Schawaldner, P., Stich, H., Spänhauer, Z., Polikeit, A., Der lahmende Junghund, Ferguson S., 2006. *veterinär spiegel*, 16 (01), 6–12.
- Shimizu, N., Warren-Smith, C., Langley-Hobbs, S., Burton, N., Kulendra, E., Bradley, K., Bowen, E., Holdsworth, A., Parsons, K., 2015. Inter- and intraobserver agreement in interpretation of CT features of medial coronoid process disease. *J. Small Anim. Pract.* 56 (12), 707–713.
- Smith, T.J., Fitzpatrick, N., Evans, R.B., Pead, M.J., 2009. Measurement of ulnar subtrochlear sclerosis using a percentage scale in Labrador retrievers with minimal radiographic signs of periarticular osteophytosis. *Vet. Surg.* 38 (2), 199–208.
- Temwichtir, J., Leegwater, P.A., Hazewinkel, H.A., 2010. Fragmented coronoid process in the dog: a heritable disease. *Vet. J.* 185 (2), 123–129.
- William, J.H., Alida, P.W., Seth, T.W., Kurt, S.S., 2000. Canine elbow dysplasia: the early radiographic detection of fragmentation of the coronoid process. *Vet. Clin. Small Anim. Pract.* 30 (2), 257–266.

## IV. DISKUSSION

Die vorliegende Studie untersuchte mikrocomputertomographisch die Sklerose der ulnaren trochlearen Notch bei älteren an MCD erkrankten Hundekadavern. Eine erhöhte Dichte der ulnaren trochlearen Notch auf mediolateralen Röntgenaufnahmen wurde in verschiedenen Studien als subcoronoide subchondrale Sklerose, ulnare subtrochleare Sklerose und als ulnare subtrochleare Sklerose bezeichnet (Burton et al. 2007, Gemmill und Clements 2007, Lau et al. 2015). Eine erhöhte Röntgendichte im Bereich der MCP-Basis und der ulnaren trochlearen Notch ist laut IEWG ein Kriterium für die Beurteilung einer Ellbogendysplasie (Hazewinkel 2018). Studien, die sich in der Vergangenheit mit ulnarer STS im Zusammenhang mit MCD beschäftigt haben, bestätigten in hoher Prozentzahl, teilweise bis zu 96 %, das Vorhandensein von ulnarer STS bei an MCD erkrankten Patienten (Burton et al. 2007, Smith et al. 2009, Lau et al. 2015, Mostafa et al. 2018).

Das erste Ziel dieser Studie war die ulnare STS mittels Mikrocomputertomographie bei den an MCD erkrankten Ellbogen zu bestätigen. Das Durchschnittsalter der untersuchten Patienten dieser Studie lag bei 11,1 Jahren (Glück et al. 2024). Vorherige Studien untersuchten die ulnare STS bei deutlich jüngeren Patienten (Lau et al. 2013b, Barthélémy et al. 2014, Mostafa et al. 2018). Die ulnare STS war der häufigste radiologische Befund bei an MCD erkrankten Patienten unter 12 Monaten (Smith et al. 2009, Lau et al. 2015). Bei MCD-Patienten älter als 12 Monaten sind Veränderungen der Koronoidspitze der häufigste radiologische Befund (Lau et al. 2015). Die Erkenntnisse, dass ulnare STS zu den ersten erkennbaren Veränderungen im Zusammenhang mit der MCD gehört, war der Grund, weshalb viele ulnare STS-Studien an sehr jungen Patienten durchgeführt wurden. Eine mikrocomputertomographisch gestützte Studie untersuchte bei 14 Wochen alten Patienten die STS. In diesem jungen Alter konnte bei vorhandener MCD noch keine ulnare STS festgestellt werden. Deshalb geht man heute davon aus, dass es sich bei der ulnaren STS um eine sekundäre degenerative Veränderung handelt, welche im Zusammenhang mit MCD entweder auf eine Entzündung oder auf mechanische Überbelastung zurückzuführen ist (Lau et al. 2013a). Die vorliegende Studie stützt diese Aussage, da eine ulnare STS bei an MCD erkrankten Patienten messbar war (Glück et al. 2024).

Die Bewertung beziehungsweise das Ausmaß der ulnaren subtrochlearen Sklerose ist subjektiv (Hazewinkel 2018). Inter- und Intraobserver-Studien haben gezeigt, dass das Erkennen beziehungsweise die Bewertung des Ausmaßes der ulnaren subtrochlearen Sklerose nicht immer eindeutig war (Burton et al. 2008, Shimizu et al. 2015). Vorangegangene Studien bedienten sich verschiedener Methoden zur Objektivierung von ulnarer STS im

Zusammenhang mit MCD. Viele der Studien nutzten Röntgenaufnahmen für die Durchführung bestimmter Messungen, da Röntgen kostengünstig und weit verbreitet ist (Draffan et al. 2009, Mostafa et al. 2018). Die Studien wählten die Berechnung von Längenverhältnissen, um das Ausmaß der ulnaren STS zu objektivieren (Draffan et al. 2009, Smith et al. 2009). Diese, wie auch andere Studien, untersuchten die ulnare STS durch unterschiedliche Messungen der Röntgendichte (Burton et al. 2007, Mostafa et al. 2018).

Ein zweites Ziel dieser Studie war der Vergleich der Trabekelarchitektur der ulnaren trochlearen Notch zwischen der an MCD erkrankten Hunden und der Kontrollgruppe. Untersuchungen der ulnaren STS mittels Röntgen und Computertomographie wurden in der jüngeren Vergangenheit mehrfach durchgeführt (Burton et al. 2007, Smith et al. 2009, Burton et al. 2010, Lau et al. 2015, Shimizu et al. 2015). Eine Studie, welche die Sklerose der ulnaren trochlearen Notch mittels Mikrocomputertomographie untersucht, gab es bisher noch keine (Glück et al. 2024).

Jeder Knochen unterliegt zeitlebens adaptiven Umgestaltungsvorgängen (Nickel et al. 1992, König und Liebich 2018). Der Zusammenhang zwischen trabekulärer Orientierung und mechanischen Eigenschaften wurde bereits vor mehr als hundert Jahren durch das Wolffsche Gesetz beschrieben (Wolff 1892). Änderungen verschiedener physiologischer Kräfte führen schon nach kurzer Zeit zum Umbau des Knochengewebes (Nickel et al. 1992, Odgaard 1997, König und Liebich 2018). Das Ziel dieser und weiterer Mikro-CT gestützter Studien war es die Veränderung der Trabekelarchitektur durch Belastungen oder Krankheiten zu erfassen und zu analysieren (Fajardo und Müller 2001, Barak et al. 2011, Fitzpatrick et al. 2016, Glück et al. 2024).

Für die Zielsetzung der vorliegenden Studie wurden 58 Ellbogengelenke von 29 Hundekadavern MCD-prädisponierter und nicht-prädisponierter Rassen (Kontrollgruppe) makroskopisch, röntgenologisch und mittels Mikrocomputertomographie untersucht. Die MCD-prädisponierten Rassen waren Labrador Retriever, Golden Retriever und Berner Sennenhunde. Bei 24 der 44 untersuchten Ellbogengelenke der MCD-prädisponierten Rassen wurde aufgrund der Untersuchung der Knorpelflächen und der mikrocomputertomographischen Auswertung des subchondralen Knochens eine MCD festgestellt (Glück et al. 2024). Die Diagnose MCD bei mehr als der Hälfte (55 %) der untersuchten Ellbogen zeigt die hohe Prävalenz bei bestimmten Rassen (Meyer-Lindenberg et al. 2002, Mostafa et al. 2018, Glück et al. 2024). Der Begriff MCD beinhaltet neben subchondralen Veränderungen des Processus coronoideus medialis ulnae auch Pathologien der

beiden Knorpelflächen (Moore et al. 2008, Fitzpatrick et al. 2009). Alle 24 Ellbogen dieser Studie, bei denen MCD diagnostiziert wurde, zeigten einen Abrieb der Knorpelflächen und subchondrale Pathologien wie Frakturen oder Fissuren. Eine histologisch gestützte Studie von Danielson et al. (2006) zeigte bei circa 17 Monate alten Patienten Pathologien des subchondralen Knochens ohne Knorpelveränderungen. Die Knorpelveränderungen aller MCD-Patienten der vorliegenden Studie sind dem hohen Alter und der deshalb lange bestehenden MCD geschuldet (Glück et al. 2024). Auch Danielson et al. (2006) gehen im weiteren Verlauf der Krankheit von entstehenden Knorpeldefekten aus. Eine Studie an circa 24 Monate alten Patienten zeigte milde Knorpeldefekte aller erkrankten Ellbogen (Fitzpatrick et al. 2016). Lau et al. (2013a) beobachteten bei an MCD erkrankten Ellbogen erste Veränderungen des Gelenkknorpels ohne messbare Veränderung der mikrocomputertomographischen Parameter des subchondralen Knochens. Die Auswertung der transversalen Schnittbilder der Mikro-CT zeigten ähnlich variierende Fissur- und Frakturmuster des MCP, wie sie von Fitzpatrick et al. (2016) ausführlich beschrieben wurden (Glück et al. 2024). Viele der von Groth et al. (2009) detailliert beschriebenen Pathologien in den computertomographischen Untersuchungen wie periartikuläre Osteophyten, subchondrale Defekte des medialen Kondylus oder zystische Veränderungen im Bereich der Gelenkflächen waren in den mikrocomputertomographischen Schnittbildern dieser Studie auch zu finden (Glück et al. 2024). Mikrorisse des subchondralen Knochens, die in der Vergangenheit histologisch diagnostiziert wurden, sind in mikrocomputertomographischen Schnittbildern zu erkennen (Danielson et al. 2006).

Die Mikro-CT ist eine zerstörungsfreie Methode und liefert detailliertere Strukturdaten des Knochens (Engelke et al. 1999). Morphologische Veränderungen können detaillierter beurteilt werden als im konventionellen CT (Groth et al. 2009, Fitzpatrick et al. 2016). Der trabekuläre Aufbau der ulnaren STS sowie deren Anordnung wird durch die Auswertung der verschiedenen Parameter wiedergespiegelt (Engelke et al. 1999). Darüber hinaus bietet die Mikro-CT die Möglichkeit der Bestimmung eines Volume of Interest (VOI). Die Auswahl des VOI in der vorgelegten Studie ermöglichte eine Dichtebestimmung des trabekulären Knochens ohne Einbeziehung der Kortex oder degenerativer Veränderungen wie periartikuläre Osteophyten (Glück et al. 2024). Periartikuläre Osteophyten entlang der Basis der ulnaren trochlearen Notch sind mitverantwortlich für eine Zunahme der Röntgenopazität (Hornof et al. 2000, Burton et al. 2007). Für die Auswahl des Bereiches, welcher von der Sklerose am stärksten betroffen ist, wurde die Studie von Burton et al. (2007) herangezogen. Die Koronoidbasis und angrenzende Regionen proximal, distal und kaudal sind am stärksten von der Sklerose betroffen (Glück et al. 2024).

Der Vergleich der Mittelwerte zwischen der MCD-Gruppe und der Kontrollgruppe ergab einen signifikanten Unterschied in der Dichte (BV/TV (%)) (Glück et al. 2024). Die Studie von Lau et al. (2013a) zeigte keinen signifikanten Unterschied der Knochendichte des MCP zwischen gesunden und erkrankten Ellbogen wenige Wochen alter Patienten. Eine Studie von Fitzpatrick et al. (2016), welche auch die Trabekelarchitektur des MCP untersuchte, stellte eine signifikant geringere Knochendichte bei an der Spitze fragmentierten MCP im Vergleich zur Kontrollgruppe fest. Das Durchschnittsalter dieser Patienten war mit circa zwei Jahren deutlich jünger als die der vorliegenden Studie (Glück et al. 2024).

Bei der Anzahl der Trabekel (Tb.N ( $\text{mm}^{-1}$ )) und dem Trabekelabstand (Tb.Sp (mm)) konnte kein signifikanter Unterschied zwischen der MCD-Gruppe und der Kontrollgruppe festgestellt werden (Glück et al. 2024). Deutlichere Unterschiede zwischen Kontroll- und MCD-Gruppe gab es bei der Trabekeldicke (Tb.Th (mm)). Das Signifikanzniveau lag in diesem Fall bei  $p = 0,055$  (Glück et al. 2024). Fitzpatrick et al. (2016) beobachteten im Bereich des MCP eine Zunahme der Trabekelanzahl und eine Abnahme der Trabekeldicke bei der erkrankten Gruppe im Vergleich zu der Kontrollgruppe. Bei chronischen Fällen war eine Sklerose der subchondralen Trabekel zu erkennen. Eine erhöhte Trabekeldicke und verringerter Trabekelabstand waren in diesem Fall das Ergebnis der Auswertung der mikrocomputertomographischen Parameter (Fitzpatrick et al. 2016). Wolschrijn et al. (2005b) beobachteten bei der Mikro-CT-Auswertung des MCP eines, an MCD erkrankten Golden Retriever-Welpen eine dichtere Trabekelstruktur als bei anderen Hunden ähnlichen Alters. Diese dichte Trabekelstruktur war als Sklerose an der Basis des MCP röntgenologisch zu erkennen. Eine Sklerose der trochlearen Notch war auf den Röntgenbildern der an MCD erkrankten Hunden dieser Studie auch zu erkennen (Glück et al. 2024).

Die Dichte des Knochens nimmt unter Belastung zu (Radin 1999, Clarke et al. 2004). Die veränderte Trabekelmorphologie und erhöhte Knochendichte bei den erkrankten Ellbogen bei Glück et al. (2024) sind vermutlich das Ergebnis erhöhter punktueller Belastungen. Eine ähnliche Aussage treffen auch Mostafa et al. (2018) in der Zusammenfassung ihrer Ergebnisse und sprechen von einer erhöhten Belastung, welche im Früh- und Spätstadium der Erkrankung auf die subtrocchleare Region der entsprechenden Ulna einwirkt. Fitzpatrick et al. (2016) beobachteten unterschiedliche Fissur- und Frakturmuster des subchondralen Knochens des MCP. Die unterschiedlichen Pathologien des MCP führte er auch auf unterschiedliche supraphysiologische Belastungen im Gelenk zurück (Glück et al. 2024).

Vergleichende und experimentelle Mikro-CT-gestützte Studien bei anderen Spezies

unterstreichen den Zusammenhang zwischen der trabekulären Orientierung und den aufgetragenen Lasten (Fajardo und Müller 2001, Ryan und Ketcham 2002). In einer innerartlichen Mikro-CT-Studie an Schafen konnte gezeigt werden, dass sich der trabekuläre Knochen durch eine höhere Knochendichte (BV/TV), Trabekelanzahl (Tb.N), Trabekeldicke (Tb.Th) und geringere Trabekelabstände (Tb.Sp) sehr präzise an Änderungen der Spitzenbelastung anpasst (Barak et al. 2011).

Eine Zunahme der Dichte und ein Umbau der Trabekel wurde in einer Studie Tanck et al. (2001) an Schweinewirbeln beschrieben. Auch hier ist der Grund für diese Veränderungen die Anpassung an die mechanische Belastung durch eine wachsende Körpermasse. Die Ausrichtung der Trabekel findet etwas zeitversetzt statt (Tanck et al. 2001).

Die Mikro-CT ist ein nützliches Werkzeug zur Erforschung der Ellbogendysplasie. Sie bietet aufgrund der hohen Auflösung genaue Einblicke in Veränderungen des kortikalen und spongiösen Knochens. Des Weiteren lassen sich mithilfe der 3D-Rekonstruktionen und der daraus resultierenden Parameter entwicklungsbedingte beziehungsweise krankheitsbedingte Unterschiede objektiver bewerten (Glück et al. 2024).

Abschließend bleibt festzustellen, dass diese Studie eine Momentaufnahme ist, welche unter Zuhilfenahme der Parameter der Mikro-CT erstmalig die Trabekelmorphologie und den Dichteunterschied im Bereich der ulnaren trochlearen Notch zwischen der MCD-Gruppe und der Kontrollgruppe darstellt (Glück et al. 2024). Die MCD ist nicht homogen (Fitzpatrick et al. 2016). Weitere wichtige Faktoren wie Inkongruenz, Torsion und Rotation führen zu unterschiedlichen Belastungen bestimmter Bereiche im Gelenk (Holsworth et al. 2005, Guillou et al. 2012, Burton et al. 2013, Rohwedder et al. 2017, Rohwedder et al. 2018). Die Inkongruenz kann mitverantwortlich für die Entstehung von Mikrorissen sein (Gemmill et al. 2005, Holsworth et al. 2005, Danielson et al. 2006, Gemmill und Clements 2007). Eine Torsionsüberlastung kann durch Inkongruenz in der Transversalebene entstehen (Collins et al. 2001, Guillou et al. 2012). Über die Ursache der unterschiedlichen Belastungen konnten in der vorliegenden Untersuchung keine Aussagen gemacht werden (Glück et al. 2024).

Diese Studie fokussierte sich rein auf den trabekulären Knochen im Bereich der ulnaren trochlearen Notch und es konnten Unterschiede in der Dichte des spongiösen Knochens bei an MCD erkrankten Ellbogen mithilfe der mikrocomputertomographischen Parameter festgestellt werden. Diese Veränderung ist vermutlich Ergebnis der zeitlebens einwirkenden Kräfte bei prädisponierten Hunden.

Weitere Mikro-CT-Verlaufsstudien sind notwendig, um die genaue Veränderung der Trabekelarchitektur der ulnaren trochlearen Notch bei jungen wachsenden, an MCD erkrankten, Hunden zu untersuchen.



## V. ZUSAMMENFASSUNG

Die mediale ulnare Koronoiderkrankung (MCD) ist eine häufig auftretende Krankheit, die oft mit einer Lahmheit der Vordergliedmaße bei prädisponierten Hunden mittlerer und großer Rassen einhergeht. Der Begriff MCD beinhaltet neben den subchondralen Veränderungen des Processus coronoideus medialis ulnae (MCP) auch Pathologien der beiden Knorpelflächen. Da es bisher nur wenig umfangreiche und detaillierte Untersuchungen zum trabekulären Aufbau des medialen Processus coronoideus der Ulna gibt, war es Ziel dieser Studie, unter Zuhilfenahme der verschiedenen mikrocomputertomographischen (Mikro-CT) Parameter den trabekulären Aufbau der ulnaren trochlearen Notch von gesunden und an MCD erkrankten Patienten vergleichend zu untersuchen. Die Bedeutung der ulnaren subtrochlearen Sklerose (STS) im Zusammenhang mit MCD wurde in der Vergangenheit in vielen Studien untersucht und konnte durch die vorliegende Studie bestätigt werden.

Insgesamt wurden 58 Ellbogengelenke von 29 Hundekadavern MCD-prädisponierter ( $n = 44$ ) und nicht-prädisponierter Rassen (Kontrollgruppe,  $n = 14$ ) röntgenologisch, makroskopisch und mittels Mikro-CT untersucht. Die Studie umfasste Ellbogengelenke von acht Labrador Retrievern (LR; 21,6–37 kg), sieben Golden Retrievern (GR; 26,3–42 kg), sieben Berner Sennenhunden (BMD; 31–47 kg) und sieben Hunden nicht-prädisponierter Rassen (19,7–52 kg) (Kontrollgruppe). Die endgültige Diagnose MCD wurde anhand der Nekropsie und Mikro-CT Untersuchungen gestellt. Die Mikro-CT-Untersuchungen wurden mit dem XtremeCT II (Scanco Medical, Zürich, Schweiz) durchgeführt. Folgende Parameter wurden untersucht: Knochenvolumenanteil (BV/TV), Trabekelanzahl (Tb.N), Trabekeldicke (Tb.Th), Trabekelabstand (Tb.Sp), Vernetzungsgrad (Conn.D), Anisotropie (DA).

24 Ellbogen von 44 Ellbogen der prädisponierten Rassen (LR, GR, BMD) zeigten subchondrale Veränderungen oder Läsionen der Knorpelflächen oder beide Befunde. Die anderen Gelenke ( $n = 20$ ) der prädisponierten Rassen sowie die Gelenke der Kontrollgruppe ( $n = 14$ ) zeigten keine subchondralen Veränderungen oder Läsionen der Knorpelflächen. Der Vergleich der Mittelwerte zwischen der MCD-Gruppe und der Kontrollgruppe ergab einen signifikanten Unterschied in der Dichte (BV/TV (%)). Der Mittelwert der erkrankten Ellbogen betrug 0,49 ( $SD \pm 0,12$ ) und war signifikant größer als der der Kontrollgruppe: 0,38 ( $SD \pm 0,08$ ) ( $p = 0,007$ ). Die übrigen Parameter des trabekulären Aufbaus zeigten keinen signifikanten Unterschied.

Eine erhöhte Dichte bedingt durch einen trabekulären Umbau im Bereich der ulnaren trochlearen Notch bei an MCD erkrankten Patienten ist das Ergebnis dieser Studie.

Inkongruenz, Torsions- und Rotationskräfte sind wichtige Faktoren, die mitverantwortlich für punktuell erhöhte Belastungen bestimmter Bereiche im Ellbogengelenk sind. In Mikro-CT-gestützten Studien konnte gezeigt werden, dass sich der trabekuläre Knochen durch eine höhere Knochendichte (BV/TV), Trabekelanzahl (Tb.N) und Trabekeldicke (Tb.Th) und geringere Trabekelabstände (Tb.Sp) sehr präzise an Belastungsänderungen anpasst. Der trabekuläre Umbau der ulnaren trochlearen Notch aufgrund von erhöhten punktuellen Belastungen ist nur ein kleiner Teil, der zum Verständnis des komplexen Krankheitsprozesses der MCD beiträgt. Weitere Studien sind noch notwendig, um die komplexe Erkrankung MCD vollständig zu verstehen.

## VI. SUMMARY

Medial coronoid disease (MCD) is a common disease often associated with forelimb lameness in predisposed medium- and large-breed dogs. The term MCD includes subchondral changes of the medial coronoid process (MCP) as well as pathologies of both cartilaginous surfaces. Because there have been few comprehensive and detailed studies of the trabecular structure of the medial coronoid, the aim of this study was to use the various microcomputed tomographic (micro-CT) parameters to comparatively examine the trabecular structure of the ulnar trochlear notch of healthy patients and patients with MCD. The significance of ulnar subtrochlear sclerosis (STS) in connection with MCD has been investigated in many studies in the past and could be confirmed by the present study.

A total of 58 elbow joints from 29 dog cadavers of MCD predisposed ( $n = 44$ ) and non-predisposed breeds (control group,  $n = 14$ ) were examined radiographically, macroscopically and by microcomputed tomography (micro-CT). The study included elbow joints from eight Labrador Retrievers (LR; 21.6-37 kg), seven Golden Retrievers (GR; 26.3-42 kg), seven Bernese Mountain Dogs (BMD; 31-47 kg) and seven dogs of non-predisposed breeds (19.7-52 kg) (control group). The final diagnosis of MCD was made based on necropsy and micro-CT examinations. The micro-CT examinations were performed with the XtremeCT II (Scanco Medical, Zurich, Switzerland). The following parameters were examined: bone volume fraction (BV/TV), trabecular number (Tb.N), trabecular thickness (Tb.Th), trabecular spacing (Tb.Sp), connectivity density (Conn.D), anisotropy (DA).

Twenty-four elbows of 44 elbows of predisposed breeds (LR, GR, BMD) showed subchondral changes or lesions of the cartilaginous surfaces or both findings. The other joints ( $n = 20$ ) of the predisposed breeds as well as the joints of the control group ( $n = 14$ ) showed no subchondral changes or lesions of the cartilage surfaces. Comparison of the mean values between the MCD group and the control group revealed a significant difference in density (BV/TV (%)). The mean value of diseased elbows was 0.49 (SD±0.12) and was significantly greater than that of the control group: 0.38 (SD±0.08) ( $p = 0.007$ ). The other parameters of the trabecular structure showed no significant difference.

The result of this study is an increased density due to trabecular remodelling in the ulnar trochlear notch region in patients suffering from MCD. Incongruity, torsional and rotational forces are important factors that are partly responsible for punctual increased loads on specific areas in the elbow joint. Micro-CT based studies have shown that trabecular bone adapts very

---

precisely to load changes by increasing bone density (BV/TV), trabecular number (Tb.N) trabecular thickness (Tb.Th) and decreasing trabecular spacing (Tb.Sp). Trabecular remodelling of the ulnar trochlear notch due to increased point loads is only a small part of understanding the complex disease process of MCD. More studies are needed to fully understand the complex disease of MCD.

## VII. LITERATURVERZEICHNIS

- **Badger AM, Griswold DE, Kapadia R, Blake S, Swift BA, Hoffman SJ, Stroup GB, Webb E, Rieman DJ, Gowen M**  
Disease-modifying activity of SB 242235, a selective inhibitor of p38 mitogen-activated protein kinase, in rat adjuvant-induced arthritis.  
Arthritis & Rheumatology. 2000; 43(1): 175-183
- **Bag S, Schambach S, Boll H, Schilling L, Groden C, Brockmann MA**  
Aktueller Stand der Mikro-CT in der experimentellen Kleintierbildung.  
Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2010; 182(5): 390-403
- **Ballester CO, Canet CS, García JIR, Salesa NF, Canet VS, Aguado CIS**  
Proximal Abduction Ulnar Osteotomy (PAUL): Short-and Long-Term Evaluation in Dogs Presenting Medial Compartment Disease.  
Animals. 2022; 12(4): 466
- **Barak MM, Lieberman DE, Hublin J-J**  
A Wolff in sheep's clothing: trabecular bone adaptation in response to changes in joint loading orientation.  
Bone. 2011; 49(6): 1141-1151
- **Barthélémy NP, Griffon DJ, Ragetly GR, Carrera I, Schaeffer DJ**  
Short-and long-term outcomes after arthroscopic treatment of young large breed dogs with medial compartment disease of the elbow.  
Veterinary Surgery. 2014; 43(8): 935-943
- **Bennett D, Duff S, Kene R, Lee R**  
Osteochondritis dissecans and fragmentation of the coronoid process in the elbow joint of the dog.  
The Veterinary Record. 1981; 109(15): 329-336
- **Beuing R, Janssen N, Brand H**  
Analysis of fertility in canine populations in respect to genetic and environmental influences.  
Proceedings of the 5th biannual EVSSAR congress, Hungary, Budapest, 7-9th April 2006; Auflage 5: 5-6

- **Beuing R, Mues C, Tellhelm B, Erhardt G**  
Prevalence and inheritance of canine elbow dysplasia in German Rottweiler.  
Journal of Animal Breeding and Genetics. 2000; 117(6): 375-383
- **Boettcher P, Werner H, Ludewig E, Grevel V, Oechtering G**  
Visual estimation of radioulnar incongruence in dogs using three-dimensional image rendering: an in vitro study based on computed tomographic imaging.  
Veterinary Surgery. 2009; 38(2): 161-168
- **Boudrieau R, Hohn R, Bardet J**  
Osteochondritis dissecans of the elbow in the dog.  
The Journal of the American Animal Hospital Association. 1983; 19(5): 627-635
- **Braden T, Stickle R, Dejardin L, Mostosky U**  
The use of computed tomography in fragmented coronoid disease: a case report.  
Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology. 1994; 7(1): 40-44
- **Breit S, Künzel W, Seiler S**  
Variation in the ossification process of the anconeal and medial coronoid processes of the canine ulna.  
Research in Veterinary Science. 2004; 77(1): 9-16
- **Burrows HJ**  
Fatigue infraction of the middle of the tibia in ballet dancers.  
The Journal of Bone and Joint Surgery. 1956; 38(1): 83-94
- **Burton N, Comerford E, Bailey M, Pead M, Owen M**  
Digital analysis of ulnar trochlear notch sclerosis in Labrador retrievers.  
Journal of Small Animal Practice. 2007; 48(4): 220-224
- **Burton N, Dobney J, Owen M, Colborne G**  
Joint angle, moment and power compensations in dogs with fragmented medial coronoid process.  
Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology. 2008; 21(2): 110-118

- **Burton N, Toscano M, Barr F, Owen M**  
Reliability of radiological assessment of ulnar trochlear notch sclerosis in dysplastic canine elbows.  
Journal of Small Animal Practice. 2008; 49(11): 572-576
  
- **Burton N, Warren-Smith C, Roper D, Parsons K**  
CT assessment of the influence of dynamic loading on physiological incongruity of the canine elbow.  
Journal of Small Animal Practice. 2013; 54(6): 291-298
  
- **Burton NJ, Perry MJ, Fitzpatrick N, Owen MR**  
Comparison of bone mineral density in medial coronoid processes of dogs with and without medial coronoid process fragmentation.  
American Journal of Veterinary Research. 2010; 71(1): 41-46
  
- **Carpenter L, Schwarz P, Lowry J, Park R, Steyn P**  
Comparison of radiologic imaging techniques for diagnosis of fragmented medial coronoid process of the cubital joint in dogs.  
Journal of the American Veterinary Medical Association. 1993; 203(1): 78-83
  
- **Clarke S, Wakeley C, Duddy J, Sharif M, Watt I, Ellingham K, Elson C, Nickols G, Kirwan J**  
Dual-energy X-ray absorptiometry applied to the assessment of tibial subchondral bone mineral density in osteoarthritis of the knee.  
Skeletal Radiology. 2004; 33(10): 588-595
  
- **Collins KE, Cross AR, Lewis DD, Zapata JL, Goett SD, Newell SM, Rapoff AJ**  
Comparison of the radius of curvature of the ulnar trochlear notch of Rottweilers and Greyhounds.  
American Journal of Veterinary Research. 2001; 62(6): 968-973
  
- **Coppieters E, Van Ryssen B, van Bree H, Verhoeven G, Broeckx B, de Bakker E, Deforce D, Gielen I**  
Computed tomographic findings in canine elbows arthroscopically diagnosed with erosion of the medial compartment: an analytical method comparison study.  
Veterinary Radiology & Ultrasound. 2016; 57(6): 572-581

- **Danielson KC, Fitzpatrick N, Muir P, Manley PA**  
Histomorphometry of fragmented medial coronoid process in dogs: a comparison of affected and normal coronoid processes.  
Veterinary Surgery. 2006; 35(6): 501-50
- **Dedrick DK, Goldstein SA, Brandt K, O'Connor B, Goulet RW, Albrecht M**  
A longitudinal study of subchondral plate and trabecular bone in cruciate-deficient dogs with osteoarthritis followed up for 54 months.  
Arthritis & Rheumatology. 1993; 36(10): 1460-1467
- **Denny H**  
The canine elbow.  
British Veterinary Journal. 1987; 143(1): 1-20
- **Draffan D, Carrera I, Carmichael S, Heller J, Hammond G**  
Radiographic analysis of trochlear notch sclerosis in the diagnosis of osteoarthritis secondary to medial coronoid disease.  
Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology. 2009; 22(1): 7-15
- **Engelke K, Karolczak M, Lutz A, Seibert U, Schaller S, Kalender W**  
Mikro-CT Technologie und Applikationen zur Erfassung von Knochenarchitektur.  
Der Radiologe. 1999; 39(3): 203-212
- **Fajardo R, Müller R**  
Three-dimensional analysis of nonhuman primate trabecular architecture using micro-computed tomography.  
American Journal of Physical Anthropology. 2001; 115(4): 327-336
- **Fehr M, Meyer-Lindenberg A**  
Über die Ellbogenerkrankungen beim Hund.  
Kleintierpraxis. 1992; 37: 427-438
- **Feldkamp LA, Goldstein SA, Parfitt MA, Jasion G, Kleerekoper M**  
The direct examination of three-dimensional bone architecture in vitro by computed tomography.  
Journal of Bone and Mineral Research. 1989; 4(1): 3-11



- **Fitzpatrick N, Garcia TC, Daryani A, Bertran J, Watari S, Hayashi K**  
Micro-CT structural analysis of the Canine medial coronoid disease.  
Veterinary Surgery. 2016; 45(3): 336-346
- **Fitzpatrick N, Smith TJ, Evans RB, Yeadon R**  
Radiographic and arthroscopic findings in the elbow joints of 263 dogs with medial coronoid disease.  
Veterinary Surgery. 2009; 38(2): 213-223
- **Fitzpatrick N, Yeadon R**  
Working algorithm for treatment decision making for developmental disease of the medial compartment of the elbow in dogs.  
Veterinary Surgery. 2009; 38(2): 285-300
- **Fitzpatrick N, Yeadon R, Smith T, Schulz K**  
Techniques of application and initial clinical experience with sliding humeral osteotomy for treatment of medial compartment disease of the canine elbow.  
Veterinary Surgery. 2009; 38(2): 261-278
- **Gemmill T, Clements D**  
Fragmented coronoid process in the dog: is there a role for incongruency?  
Journal of Small Animal Practice. 2007; 48(7): 361-368
- **Gemmill T, Mellor D, Clements D, Clarke S, Farrell M, Bennett D, Carmichael S**  
Evaluation of elbow incongruency using reconstructed CT in dogs suffering fragmented coronoid process.  
Journal of Small Animal Practice. 2005; 46(7): 327-333
- **Genant H, Gordon C, Jiang Y, Lang T, Link T**  
Advanced imaging of bone macro and micro structure.  
Bone 1999; 25(1): 149-152
- **Glatt V, Canalis E, Stadmeier L, Bouxsein ML**  
Age-related changes in trabecular architecture differ in female and male C57BL/6J mice.  
Journal of Bone and Mineral Research. 2007; 22(8): 1197-1200

- **Glück T, Zablotski Y, Meyer-Lindenberg A**  
Microcomputed tomographic analysis of the ulnar trochlear notch in medium-and large-breed canine cadavers with and without medial coronoid disease.  
Research in Veterinary Science. 2024; 166: 105-108
- **Goertzen AL, Nagarkar V, Street RA, Paulus MJ, Boone JM, Cherry SR**  
A comparison of x-ray detectors for mouse CT imaging.  
Physics in Medicine & Biology. 2004; 49(23): 5251
- **Gortz K, Van Ryssen B, Taeymans O, van Heerden M, Gielen I, Risselada M**  
Traumatic fracture of the medial coronoid process in a dog-Radiographic, computed tomographic, arthroscopic and histological findings.  
Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology. 2004; 17(3): 159-162
- **Goulet RW, Goldstein SA, Ciarelli MJ, Kuhn JL, Brown MB, Feldkamp LA**  
The relationship between the structural and orthogonal compressive properties of trabecular bone.  
Journal of Biomechanics. 1994; 27(4): 375-389
- **Grøndalen J**  
Arthrosis in the elbow joint of young rapidly growing dogs. III. Ununited medial coronoid process of the ulna and osteochondritis dissecans of the humeral condyle. Surgical procedure for correction and post operative investigation.  
Nordisk Veterinærmedicin. 1979; 31(12): 520-527
- **Grøndalen J, Grøndalen T**  
Arthrosis in the elbow joint of young rapidly growing dogs. V. A pathoanatomical investigation.  
Nordisk Veterinærmedicin. 1981; 33(1): 1-16
- **Groth A, Benigni L, Moores A, Lamb C**  
Spectrum of computed tomographic findings in 58 canine elbows with fragmentation of the medial coronoid process.  
Journal of Small Animal Practice. 2009; 50(1): 12-22

- **Gutbrod F, Festl D**  
Surgical therapy of fragmented ulnar coronoid process and clinical results.  
Kleinterpraxis. 1999; 44(6): 405
  
- **Guthrie S, Pidduck H**  
Heritability of elbow osteochondrosis within a closed population of dogs.  
Journal of Small Animal Practice. 1990; 31(2): 93-96
  
- **Harrigan T, Mann R**  
Characterization of microstructural anisotropy in orthotropic materials using a second rank tensor.  
Journal of Materials Science. 1984; 19(3): 761-767
  
- **Haudiquet PR, Marcellin-Little DJ, Stebbins ME**  
Use of the distomedial-proximolateral oblique radiographic view of the elbow joint for examination of the medial coronoid process in dogs.  
American Journal of Veterinary Research. 2002; 63(7): 1000-1005
  
- **Hazewinkel HA**  
Screening for Elbow Dysplasia, grading according to the IEWG.  
Proceedings: 33rd annual meeting of the IEWG, Singapore, September 24th 2018; 25-32.
  
- **Heine A, Hamann H, Tellhelm B, Distl O, Heine A, Hamann H, Distl O, Hannover STH**  
Schätzung von populationsgenetischen Parametern und Zuchtwerten für Ellbogengelenkdysplasie beim Rottweiler.  
Berliner und Münchener Tierärztliche Wochenschrift. 2009; 122: 100-107
  
- **Henry JW**  
Radiographic diagnosis and surgical management of fragmented medial coronoid process in dogs.  
Journal of the American Veterinary Medical Association. 1984; 184(7): 799-805

- **Hildebrand T, Laib A, Müller R, Dequeker J, Rüeegsegger P**  
Direct three-dimensional morphometric analysis of human cancellous bone: microstructural data from spine, femur, iliac crest, and calcaneus.  
Journal of Bone and Mineral Research. 1999; 14(7): 1167-1174
  
- **Hildebrand T, Rüeegsegger P**  
A new method for the model-independent assessment of thickness in three-dimensional images.  
Journal of Microscopy. 1997; 185(1): 67-75
  
- **Ho J-T, Wu J, Huang H-L, Chen MY, Fuh L-J, Hsu J-T**  
Trabecular bone structural parameters evaluated using dental cone-beam computed tomography: cellular synthetic bones.  
BioMedical Engineering OnLine. 2013; 12(1): 115
  
- **Holdsworth DW, Thornton MM**  
Micro-CT in small animal and specimen imaging.  
Trends in Biotechnology. 2002; 20(8): 34-39
  
- **Holsworth IG, Wisner ER, Scherrer W, Filipowicz D, Kass PH, Pooya H, Larson RF, Schulz KS**  
Accuracy of computerized tomographic evaluation of canine radio-ulnar incongruence in vitro.  
Veterinary Surgery. 2005; 34(2): 108-113
  
- **Hornof WJ, Wind AP, Wallack ST, Schulz K**  
Canine elbow dysplasia: the early radiographic detection of fragmentation of the coronoid process.  
Veterinary Clinics: Small Animal Practice. 2000; 30(2): 257-266
  
- **Houlton J**  
Osteochondrosis of the shoulder and elbow joints in dogs.  
Journal of Small Animal Practice. 1984; 25(7): 399-413

- **How KL**  
Clinical signs of Elbow Dysplasia.  
Proceedings: 33rd annual meeting of the IEWG, Singapore, September 24th 2018; 5
- **Janthur I, Meyer-Lindenberg A, Fehr M**  
Arthroskopische Diagnostik von Ellbogengelenkerkrankungen des Hundes.  
Tierärztliche Praxis Ausgabe K: Kleintiere/Heimtiere. 2000; 28: 11-18.
- **Janutta V, Hamann H, Klein S, Tellhelm B, Distl O**  
Genetic analysis of three different classification protocols for the evaluation of elbow dysplasia in German shepherd dogs.  
Journal of Small Animal Practice. 2006; 47(2): 75-82
- **Johnston SA, Tobias KM**  
Veterinary Surgery Small Animal, Second Edition.  
Elsevier Health Sciences 2017; 1(52): 862-865.
- **Kapadia RD, Stroup GB, Badger AM, Koller B, Levin JM, Coatney RW, Dodds RA, Liang X, Lark MW, Gowen M**  
Applications of micro-CT and MR microscopy to study pre-clinical models of osteoporosis and osteoarthritis.  
Technology and Health Care. 1998; 6(5-6): 361-372
- **Kapatkin A, Volk S, Keith D, McLear R, Smith G**  
Elbow dysplasia in a basset hound.  
Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology. 2003; 16(1): 11-15
- **Klumpp S, Karpenstein H, Tellhelm B, Failing K**  
Die computertomographische Morphologie und Anatomie des Ellbogengelenkes mit Schwerpunkt des Processus coronoideus medialis ulnae bei mit ED 0 beurteilten Hunden spezieller Rassen.  
Kleintierpraxis. 2013; 2: 57-64

- **Klumpp S, Ondreka N, Amort K, Zwick M, Gesierich K, Engert M, Tacke S, Failing K, Kramer M**  
Diagnostic value of CT and MRI for the diagnosis of coronoid pathology in the dog.  
Tierärztliche Praxis Ausgabe K: Kleintiere/Heimtiere. 2010; 38(1): 7-14
- **Koch JC**  
The laws of bone architecture.  
American Journal of Anatomy. 1917; 21(2): 177-298
- **König E, Liebich H**  
Anatomie der Haussäugetiere: Band I Bewegungsapparat.  
Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2018; Auflage 7: 173-193
- **Laib A, Kumer J, Majumdar S, Lane NE**  
The temporal changes of trabecular architecture in ovariectomized rats assessed by MicroCT.  
Osteoporosis International. 2001; 12(11): 936-941
- **Lau S, Hazewinkel H, Voorhout G**  
Etiologies of medial coronoid disease.  
Proceedings: 33rd annual meeting of the IEWG, Singapore, September 24th 2018: 8-10
- **Lau SF, Theyse LF, Voorhout G, Hazewinkel HA**  
Radiographic, computed tomographic, and arthroscopic findings in Labrador retrievers with medial coronoid disease.  
Veterinary Surgery. 2015; 44(4): 511-520
- **Lau SF, Wolschrijn CF, Hazewinkel HA, Siebelt M, Voorhout G**  
The early development of medial coronoid disease in growing Labrador retrievers: radiographic, computed tomographic, necropsy and micro-computed tomographic findings.  
The Veterinary Journal. 2013b; 197(3): 724-730
- **Lau SF, Wolschrijn CF, Siebelt M, Vernooij JC, Voorhout G, Hazewinkel HA**  
Assessment of articular cartilage and subchondral bone using EPIC-microCT in Labrador retrievers with incipient medial coronoid disease.  
The Veterinary Journal. 2013a; 198(1): 116-12

- **Lavrijsen I, Heuven H, Voorhout G, Meij B, Theyse L, Leegwater P, Hazewinkel H**  
Phenotypic and genetic evaluation of elbow dysplasia in Dutch Labrador Retrievers, Golden Retrievers, and Bernese Mountain dogs.  
The Veterinary Journal. 2012; 193(2): 486-492
  
- **Mäki K, Liinamo A, Ojala M**  
Estimates of genetic parameters for hip and elbow dysplasia in Finnish Rottweilers.  
Journal of Animal Science. 2000; 78(5): 1141-1148
  
- **Malluche HH, Sherman D, Meyer W, Massry SG**  
A new semiautomatic method for quantitative static and dynamic bone histology.  
Calcified Tissue International. 1982; 34(1): 439-448
  
- **Mason DR, Schulz KS, Samii VF, Fujita Y, Hornof WJ, Herrgesell EJ, Long CD, Morgan JP, Kass PH**  
Sensitivity of radiographic evaluation of radio-ulnar incongruence in the dog in vitro.  
Veterinary Surgery. 2002; 31(2): 125-132
  
- **Mason T, Lavelle R, Skipper S, Wrigley W**  
Osteochondrosis of the elbow joint in young dogs  
Journal of Small Animal Practice. 1980; 21(12): 641-656
  
- **Meyer-Lindenberg A, Fehr M, Brunnberg L, Nolte I**  
Fragmentierter Processus coronoideus medialis der Ulna beim Hund. Vorkommen und Therapieergebnisse: Erfahrungen an 101 Patienten.  
Monatsheft Vet. Med. 1993; 457-466
  
- **Meyer-Lindenberg A, Langhann A, Fehr M, Nolte I**  
Prevalence of fragmented medial coronoid process of the ulna in lame adult dogs.  
Veterinary Record. 2002; 151(8): 230-234
  
- **Meyer-Lindenberg A, Langhann A, Fehr M, Nolte I**  
Arthrotomy versus arthroscopy in the treatment of the fragmented medial coronoid process of the ulna (FCP) in 421 dogs.  
Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology. 2003; 16(4): 204-210

- **Meyer-Lindenberg A, Fehr M, Nolte I**  
Co-existence of ununited anconeal process and fragmented medial coronoid process of the ulna in the dog.  
Journal of Small Animal Practice. 2006; 47(2): 61-65
- **Moore AP, Benigni L, Lamb CR**  
Computed tomography versus arthroscopy for detection of canine elbow dysplasia lesions.  
Veterinary Surgery. 2008; 37(4): 390-398
- **Mostafa A, Nolte I, Wefstaedt P**  
The prevalence of medial coronoid process disease is high in lame large breed dogs and quantitative radiographic assessments contribute to the diagnosis.  
Veterinary Radiology & Ultrasound. 2018; 59(5): 516-528
- **Mostafa A, Nolte I, Wefstaedt P**  
Quantitative Radiographic Evaluation of Elbow Incongruity in Labrador and Golden Retrievers with Confirmed Medial Coronoid Disease.  
Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology. 2019; 32(1): 10-17
- **Mostafa AA, Nolte I, Wefstaedt P**  
Radiographic determination of humeroradial, humeroulnar, and radioulnar subluxation indices to quantify elbow incongruence in dogs confirmed to have medial coronoid disease.  
Research in Veterinary Science. 2019; 126: 83-88
- **Narajek T, Fiszdon K, Hanysz E**  
Canine elbow dysplasia in different breeds.  
Bulletin of the Veterinary Institute in Pulawy. 2008; 52: 169-173
- **Nickel R, Schummer A, Seiferle E**  
Lehrbuch der Anatomie der Haustiere, Band I. Auflage 6,  
Verlag Paul Parey, 1992; 28-53



- **Oberbauer A, Keller G, Famula T**  
Long-term genetic selection reduced prevalence of hip and elbow dysplasia in 60 dog breeds.  
Plos One. 2017; 12(2): e0172918
  
- **Odgaard A**  
Three-dimensional methods for quantification of cancellous bone architecture.  
Bone. 1997; 20(4): 315-328
  
- **Ohlerth S, Tellhelm B, Amort K, Ondreka N**  
Explanation of the IEWG grading system.  
Proceedings: 30th annual meeting of the IEWG, Vienna, Austria, June 23th 2016: 14-16
  
- **Olsson S**  
Pathophysiology, morphology, and clinical signs of osteochondrosis in the dog.  
Disease Mechanisms in Small Animal Surgery. 1993: 777-796
  
- **Olsson SE**  
General and aetiologic factors in canine osteochondrosis.  
Veterinary Quarterly. 1987; 9(3): 268-278
  
- **Parfitt A, Mathews C, Villanueva A, Kleerekoper M, Frame B, Rao D**  
Relationships between surface, volume, and thickness of iliac trabecular bone in aging and in osteoporosis. Implications for the microanatomic and cellular mechanisms of bone loss.  
Journal of Clinical Investigation. 1983; 72(4): 1396-1409
  
- **Parfitt AM, Drezner MK, Glorieux FH, Kanis JA, Malluche H, Meunier PJ, Ott SM, Recker RR**  
Bone histomorphometry: standardization of nomenclature, symbols, and units: report of the ASBMR Histomorphometry Nomenclature Committee.  
Journal of Bone and Mineral Research. 1987; 2(6): 595-610

- **Pothuaud L, Van Rietbergen B, Mosekilde L, Beuf O, Levitz P, Benhamou CL, Majumdar S**  
Combination of topological parameters and bone volume fraction better predicts the mechanical properties of trabecular bone.  
Journal of Biomechanics. 2002; 35(8): 1091-1099
- **Preston CA, Schulz KS, Taylor KT, Kass PH, Hagan CE, Stover SM**  
In vitro experimental study of the effect of radial shortening and ulnar ostectomy on contact patterns in the elbow joint of dogs.  
American Journal of Veterinary Research. 2001; 62(10): 1548-1556
- **Radin E**  
Subchondral bone changes and cartilage damage.  
Equine Veterinary Journal. 1999; 31(2): 94-95
- **Radin EL, Orr RB, Kelman JL, Paul IL, Rose RM**  
Effect of prolonged walking on concrete on the knees of sheep.  
Journal of Biomechanics. 1982; 15(7): 487-492
- **Rau F, Wigger A, Tellhelm B, Zwick M, Klumpp S, Neumann A, Oltersdorf B, Amort K, Failing K, Kramer M**  
Observer variability and sensitivity of radiographic diagnosis of canine medial coronoid disease.  
Tierärztliche Praxis Ausgabe K: Kleintiere/Heimtiere. 2011; 39(5): 313-322
- **Read R, Armstrong S, O'Keefe J, Eger C**  
Fragmentation of the medial coronoid process of the ulna in dogs: a study of 109 cases.  
Journal of Small Animal Practice. 1990; 31(7): 330-334
- **Reichle JK, Park RD, Bahr AM**  
Computed tomographic findings of dogs with cubital joint lameness.  
Veterinary Radiology & Ultrasound. 2000; 41(2): 125-130

- **Reichle JK, Snaps F**  
The elbow.  
Clinical Techniques in Small Animal Practice. 1999; 14(3): 177-186
- **Richardson D, Zentek J, Hazewinkel H, Nap R, Toll P, Zicker S**  
Developmental orthopedic disease of dogs.  
Small Animal Clinical Nutrition. 2000; 1(5): 505-528
- **Ritman EL**  
Current status of developments and applications of micro-CT.  
Annual Review of Biomedical Engineering. 2011; 13: 531-552
- **Rohwedder T, Böttcher P**  
Relation of computed tomography-based static axial radioulnar incongruence measurements under general anaesthesia and dynamic, in vivo RUI during the walk in canine elbow joints with and without medial coronoid process disease.  
Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology. 2021; 34(6): 386-393
- **Rohwedder T, Fischer M, Böttcher P**  
In vivo fluoroscopic kinematography of dynamic radio-ulnar incongruence in dogs.  
Open Veterinary Journal. 2017; 7(3): 221-228
- **Rohwedder T, Fischer M, Böttcher P**  
In vivo axial humero-ulnar rotation in normal and dysplastic canine elbow joints.  
Tierärztliche Praxis Ausgabe K: Kleintiere/Heimtiere. 2018; 46(2): 83-89
- **Rovesti GL, Biasibetti M, Schumacher A, Fabiani M**  
The use of the computed tomography in the diagnostic protocol of the elbow in the dog: 24 joints.  
Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology. 2002; 15(1): 35-43
- **Ruff C, Holt B, Trinkaus E**  
Who's afraid of the big bad Wolff?: "Wolff's law" and bone functional adaptation.  
American Journal of Physical Anthropology. 2006; 129(4): 484-498

- **Ryan TM, Ketcham RA**  
The three-dimensional structure of trabecular bone in the femoral head of strepsirrhine primates.  
Journal of Human Evolution. 2002; 43(1): 1-26
- **Sallander MH, Hedhammar Ak, Trogen ME**  
Diet, exercise, and weight as risk factors in hip dysplasia and elbow arthrosis in Labrador retrievers.  
The Journal of Nutrition. 2006; 136(7): 2050-2052
- **Salomon F-V, Geyer H, Gille U**  
Anatomie für die Tiermedizin.  
Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2020; Auflage 4: 568-572
- **Samoy Y, Gielen I, Van Caelenberg A, van Bree H, Duchateau L, Van Ryssen B**  
Computed tomography findings in 32 joints affected with severe elbow incongruity and fragmented medial coronoid process.  
Veterinary Surgery. 2012; 41(4): 486-494
- **Samoy Y, Van Ryssen B, Gielen I, Walschot N, Van Bree H**  
Elbow incongruity in the dog.  
Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology. 2006; 19: 1-8
- **Schambach SJ, Bag S, Schilling L, Groden C, Brockmann MA**  
Application of micro-CT in small animal imaging.  
Methods. 2010; 50(1): 2-13
- **Schawalder P, Stich H, Spänhauer Z, Polikeit A, Ferguson S**  
Der lahrende Junghund.  
Veterinär Spiegel. 2006; 16(1): 6-12
- **Schleich S**  
Ellbogengelenk (Teil 1): Fragmentierter Processus coronoideus medialis ulnae.  
Kleintier Konkret. 1998; 6(98): 21-27

- **Shimizu N, Warren-Smith C, Langley-Hobbs S, Burton N, Kulendra E, Bradley K, Bowen E, Holdsworth A, Parsons K**  
Inter- and intraobserver agreement in interpretation of CT features of medial coronoid process disease.  
Journal of Small Animal Practice. 2015; 56(12): 707-713
- **Smith TJ, Fitzpatrick N, Evans RB, Peard MJ**  
Measurement of ulnar subtrochlear sclerosis using a percentage scale in Labrador retrievers with minimal radiographic signs of periarticular osteophytosis.  
Veterinary Surgery. 2009; 38(2): 199-208
- **Spahn M, Heer V, Freytag R**  
Flachbilddetektoren in der Röntgendiagnostik.  
Der Radiologe. 2003; 43(5): 340-350
- **Stiller W, Kobayashi M, Koike K, Stampfl U, Richter G, Semmler W, Kiessling F**  
Erste Erfahrungen mit einem neuen Niedrigdosis-Mikro-CT.  
Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2007; 179(7): 669-675
- **Tami A, Nasser P, Schaffler M, Tate MK**  
Noninvasive fatigue fracture model of the rat ulna.  
Journal of Orthopaedic Research. 2003; 21(6): 1018-1024
- **Tanck E, Homminga J, van Lenthe GH, Huiskes R**  
Increase in bone volume fraction precedes architectural adaptation in growing bone.  
Bone. 2001; 28(6): 650-654
- **Temwichitr J, Leegwater PA, Hazewinkel HA**  
Fragmented coronoid process in the dog: a heritable disease.  
The Veterinary Journal. 2010; 185(2): 123-129
- **Thomson M, Robins G**  
Osteochondrosis of the elbow: a review of the pathogenesis and a new approach to treatment.  
Australian Veterinary Journal. 1995; 72(10): 375-378

- **Tirgari M**  
Clinical radiographical and pathological aspects of arthritis of the elbow joint in dogs.  
Journal of Small Animal Practice. 1974; 15(11): 671-679
- **Tromblee TC, Jones JC, Bahr AM, Shires PK, Aref S**  
Effect of computed tomography display window and image plane on diagnostic certainty for characteristics of dysplastic elbow joints in dogs.  
American Journal of Veterinary Research. 2007; 68(8): 858-871
- **van Bree HJ, Van Ryssen B**  
Diagnostic and surgical arthroscopy in osteochondrosis lesions.  
Small Animal Practice. 1998; 28(1): 161-189
- **Viehmann B, Waibl H, Brunnberg L**  
Computer assisted interpretation of radiographs for elbow dysplasia in dogs (I).  
Trochlear incisure of the ulna.  
Kleintierpraxis. 1999; 44: 595-606
- **Voorhout G, Hazewinkel HA**  
Radiographic evaluation of the canine elbow joint with special reference to the medial humeral condyle and the medial coronoid process.  
Veterinary Radiology. 1987; 28(5): 158-165
- **Wagner K, Griffon DJ, Thomas MW, Schaeffer DJ, Schulz K, Samii VF, Necas A**  
Radiographic, computed tomographic, and arthroscopic evaluation of experimental radio-ulnar incongruence in the dog.  
Veterinary Surgery. 2007; 36(7): 691-698
- **Walde I, Tellhelm B**  
Fragmented medial coronoid process of the ulna (FCP) and osteochondritis dissecans (OCD) of the canine elbow and hock joint. A review of literature review. Diagnosis and therapy.  
Wiener Tierärztliche Monatsschrift. 1991; 78(12): 414-424
- **Whitehouse W**  
The quantitative morphology of anisotropic trabecular bone.  
Journal of microscopy. 1974; 101(2): 153-168

- **Wind A**  
Elbow incongruity and developmental elbow diseases in the dog: Part I.  
Journal of the American Animal Hospital Association. 1986; 22(6): 711-724
- **Wind AP, Packard M**  
Elbow incongruity and developmental elbow diseases in the dog: Part II.  
Journal of the American Animal Hospital Association. 1986; 22(1): 725-730
- **Winhart S**  
Zur Fraktur des Processus coronoideus medialis ulnae beim Hund.  
Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München, 1991
- **Wolff J**  
Das Gesetz der Transformation der Knochen.  
Hirschwald, Berlin, 1892; 1: 1-152
- **Wolschrijn C, Weijs W, Gruys E**  
Microcomputed tomography and histology of a fragmented medial coronoid process in a 20-week-old golden retriever.  
Veterinary Record. 2005; 157(13): 383-386
- **Wolschrijn CF, Weijs WA**  
Development of the subchondral bone layer of the medial coronoid process of the canine ulna.  
The Anatomical Record. 2005; 284(1): 439-445
- **Wüstlin L**  
Mikrocomputertomographische Analyse der trabekulären Architektur der thorakolumbalen Wirbelsäule.  
  
Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität, München, 2007
- **Zentek J**  
Die Ernährung des heranwachsenden Hundes.  
Der Praktische Tierarzt. 2002; 83(9): 780-783

## VIII. DANKSAGUNG

Ich möchte meinen herzlichen Dank an Frau Prof. Meyer-Lindenberg aussprechen, die mich durch die Auswahl des Themas und Ihrer Expertise ermutigt hat, mich intensiv mit der komplexen Thematik der Koronoiderkrankung und darüber hinaus mit der Ellbogendysplasie zu beschäftigen. Die vielen Stunden, die ich in die intensive Bearbeitung dieses Themas gesteckt habe, helfen mir nun, in meiner täglichen Arbeit Fragen rund um die Koronoiderkrankung kompetenter zu beantworten.

Ebenso möchte ich mich bei meinen engen Freunden bedanken. Ihre anhaltende Neugier an den Fortschritten meiner Doktorarbeit haben meine Motivation gestärkt dieses Thema erfolgreich zu beenden. Ihre ermutigenden Worte und die gemeinsamen Momente der Entspannung haben diese Zeit zu einer bereichernden Erfahrung gemacht.

Ein großer Dank gilt auch meinem Zwillingbruder Carl, der an den Wochenenden des Schreibens ganz selbstverständlich die anfallenden häuslichen und generellen Pflichten übernommen und mir damit den Rücken freigehalten hat.

Ein besonderer Dank gebührt meiner Familie, insbesondere meiner Mama und Hubi, die von Anfang an fest an meine Fähigkeiten geglaubt haben. Die Fertigstellung dieser Arbeit wäre ohne das Engagement und auch der finanziellen Unterstützung meiner Familie nicht möglich gewesen.

Auch wollte ich mir selbst mit dem Abschluss der Dissertation beweisen, dass durch Fleiß, Durchhaltevermögen und Verzicht vieles möglich ist, selbst wenn das Verfassen umfangreicher Schriftsätze sicherlich nicht zu meinen Stärken zählt