

Departement für klinische Veterinärmedizin
Kleintierklinik, Abteilung Kleintierchirurgie
der Vetsuisse-Fakultät Universität Bern

Leiter der Abteilung: Prof. Dr. med. vet. Franck Forterre

Arbeit unter wissenschaftlicher Betreuung von
Dr. med. vet. Christina Precht

CT gestützte Untersuchung einer möglichen Assoziation zwischen Hüftgelenksdysplasie und lumbosakraler Stenose beim Hund

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Dokortitels der
Vetsuisse-Fakultät, Universität Bern

vorgelegt von

Angelika Christa Schneider

Tierärztin
von Bülach, Aargau

2025

Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons 4.0
International Lizenz (CC BY 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Inhaltsverzeichnis

u^b

Abstract	3
Zusammenfassung	4
1. Einleitung	5
2. Material und Methoden	7
3. Ergebnisse	17
4. Diskussion	27
5. Fazit und Ausblick	33
6. Literaturverzeichnis	34
7. Anhang - Rohdaten	36
Danksagung	41
Eigenständigkeitserklärung	42

Abstract

Vetsuisse Faculty University of Bern 2025

u^b

Angelika Christa Schneider

Department of Clinical Veterinary Science, Small Animal Clinic, Division of Surgery
ktk.chirurgie.vetsuisse@unibe.ch

CT based investigation of the potential association between hip dysplasia and lumbosacral stenosis in dogs

Lumbosacral stenosis (LSS) and hip dysplasia (HD) are among the most frequent disorders in dogs causing hind limb lameness. The objective of this study was to investigate a potential association between both pathologies using computed-tomography based parameters. In total, 73 dogs of various breeds with diagnosed LSS were retrospectively evaluated. Metrics analysed included the Dorsal Acetabular Rim Angle (DARA), the Lateral Center Edge Angle (LCEA), the Center Distance Index (CD), as well as the presence of lumbosacral transitional vertebrae (LTV), and a modified parameter to assess compression of the cauda equina (FCR), defined as the ratio of epidural fat tissue to the area of the vertebral canal. In addition, the degree of disc protrusion at L7–S1, the configuration of the dorsal lamina of S1, facet joints, neuroforamina and the nerve roots of the cauda equina were assessed. The results of regression and correlation analysis, as well as group comparison showed no significant association ($p < 0,05$) between lumbosacral stenosis and hip dysplasia, suggesting that these are two independent conditions.

Keywords: lumbosacral stenosis, computed tomography, hip dysplasia, FCR, DARA

Bern, 21.10.2025
Ort, Datum


Unterschrift, Franck Forterre, Hauptbetreuungsperson

Bern, 21.10.2025
Ort, Datum

Christina Precht
Unterschrift, Christina Precht, Zweitbetreuungsperson

Zusammenfassung

Vetsuisse-Fakultät Universität Bern 2025

u^b

Angelika Christa Schneider

Departement für klinische Veterinärmedizin, Kleintierklinik, Abteilung für Chirurgie
ktk.chirurgie.vetsuisse@unibe.ch

CT gestützte Untersuchung einer möglichen Assoziation zwischen Hüftgelenksdysplasie und lumbosakraler Stenose beim Hund

Die lumbosakrale Stenose (LSS) und die Hüftgelenksdysplasie (HD) zählen zu den häufigsten Erkrankungen, die zu Lahmheiten der Hinterhand beim Hund führen. Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung eines möglichen Zusammenhangs zwischen beiden Pathologien anhand computertomographischer Parameter. Insgesamt wurden 73 Hunde unterschiedlicher Rassen mit diagnostizierter LSS retrospektiv ausgewertet. Analysiert wurden Messgrößen wie Dorsal Acetabular Rim Angle (DARA), Lateral Center Edge Angle (LCEA), Center Distance Index (CD) sowie das Vorhandensein von lumbosakralen Übergangswirbeln (LÜW) und ein modifizierter Parameter zur Evaluierung der Kompression der Cauda equina (FCR), der das Verhältnis von epiduralem Fettgewebe zur Fläche des Wirbelkanals beschreibt. Des Weiteren wurde der Grad der Diskusprotrusion im Bereich L7-S1, die Konformation der dorsalen Lamina von S1, Facettengelenke, Neuroforamina und Nervenwurzeln der Cauda equina beurteilt. Durch Regressions- und Korrelationsanalysen sowie Gruppenvergleiche ließ sich kein signifikanter Zusammenhang ($p < 0,05$) zwischen lumbosakraler Stenose und Hüftgelenksdysplasie darstellen und somit wird davon ausgegangen, dass es sich wahrscheinlich um zwei eigenständige Erkrankungen handelt.

Keywords: Lumbosakrale Stenose, Computertomographie, Hüftgelenksdysplasie, FCR, DARA

Bern, 21.10.2025
Ort, Datum

Unterschrift, Franck Forterre, Hauptbetreuungsperson



Bern, 21.10.2025
Ort, Datum

Unterschrift, Christina Precht, Zweitbetreuungsperson

Christina Precht

1. Einleitung

u^b

Mit dem wachsenden Stellenwert des Hundes als Familienmitglied und Alltagsbegleiter rückt sein körperliches Wohlbefinden verstärkt in den Fokus der Tierhalter. Erkrankungen des Bewegungsapparates – insbesondere solche, die schleichend verlaufen oder die Lebensqualität erheblich einschränken – werden zunehmend differenziert diagnostiziert und gezielt behandelt. In diesem Kontext gewinnen Erkrankungen wie die Lumbosakrale Stenose (LSS) und die Hüftgelenksdysplasie (HD) sowohl klinisch als auch wissenschaftlich an Relevanz – nicht zuletzt, weil ihre Ätiologie, Symptomatik und ihr möglicher Zusammenhang noch immer Gegenstand aktueller Forschung sind [1–3].

Die Lumbosakrale Stenose (LSS) beschreibt eine kongenitale, entwicklungsbedingte oder degenerative Einengung des Wirbelkanals und/oder der Neuroforamina an der Übergangsregion L7–S1. Folge ist eine Kompression der Nervenwurzeln der Cauda equina (bestehend aus der siebten Lendennerve (L7), den ersten bis dritten Sakralnervenwurzeln (S1–S3) sowie den anschließenden kaudalen Nervenwurzeln) [4] und /oder Gefäßstrukturen mit klinischem Spektrum von lumbosakralen Schmerzen, Schwäche über Hinterhandlahmheit bis hin zu Harn- oder Kotinkontinenz [5]. Der Deutsche Schäferhund ist einer der bekanntesten Vertreter, welcher eine Rasseprädisposition aufweist, aber auch andere mittelgroße bis große Arbeits- oder Sporthunderassen wie Border Collie, Labrador Retriever, Malinois und Rottweiler weisen ein erhöhtes Risiko auf [6]. Eine Kompression der Cauda equina lässt sich in der Computertomographie bzw. Magnetresonanztomographie anhand typischer morphologischer Veränderungen identifizieren. Charakteristische Befunde sind: Verlust des epiduralen Fettpolsters sowie zunehmende Weichteildichte im Neuroforamen, Vorwölbung des Bandscheibenrandes und begleitende Verlagerung des Thekalsacks, degenerative Knochenreaktionen wie Spondylosen, bulbös verbreiterte oder subluxierte Facettengelenke, periartikuläre Osteophyten und Verengung von Wirbelkanal und Intervertebralforamina, die den Nervenwurzelaustritt zusätzlich limitieren [5].

Ein bekannter anatomischer Risikofaktor, der mit der Entwicklung einer Cauda equina Kompression beziehungsweise Lumbosakrale Stenose in Verbindung gebracht wird, ist das Vorliegen eines sogenannten lumbosakralen Übergangswirbels (Lumbosacral Transitional Vertebra, LTV) [7].

Die Hüftgelenksdysplasie ist eine polygenetisch beeinflusste, entwicklungsbedingte Inkongruenz des Hüftgelenks, die über eine vermehrte Gelenklaxität zur sekundären Coxarthrose fortschreitet [6]. Konventionelle Röntgenaufnahmen im ventrodorsalen Strahlengang erfassen vor allem strukturelle Spätfolgen und werden in Screening Verfahren zur Zuchtselektion verwendet, sind jedoch in der Frühdiagnostik limitiert. Röntgenaufnahmen in Distraktion können die Laxität direkt darstellen, aus ihnen abgeleitete Indices sind bessere Prädiktoren für die Entwicklung einer Osteoarthrose, erfordern jedoch aufwändige Verfahren mit speziellen Distraktionsvorrichtungen. Computertomographische Untersuchungen erlauben demgegenüber in überlagerungsfreier 3D-Technologie eine präzise Vermessung der Gelenkmorphologie. Relevante CT-Parameter sind unter anderem der Lateral Center Edge angle (LCEA), der dorsal Acetabular Rim Angle (DARA) sowie der Center Distance Index (CD) [8], auf welche im folgenden Kapitel genauer eingegangen wird.

Anatomisch bilden Hüftgelenk, Beckenring und lumbosakrale Übergangsregion eine funktionelle Einheit. Veränderungen der Beckenstellung oder der Kraftübertragung infolge einer HD könnten die Biomechanik des L7–S1 Segments, genau wie bei einem Lumbosakralen Übergangswirbel, beeinflussen. Trotz dieser plausiblen Verbindung liegt nach bestem Wissen des Autors zum aktuellen Stand keine Studie vor, die den Zusammenhang zwischen Hüftdysplasie und LSS beim Hund systematisch untersucht – weder bildgebend noch klinisch. Dies gilt insbesondere für CT-basierte Analysen, die beide Regionen im selben Datensatz hochauflösend abbilden können.

Ziel der vorliegenden Dissertation ist es daher, mittels computertomographischer Diagnostik zu prüfen, ob und in welchem Ausmaß eine Assoziation zwischen Hüftgelenkdysplasie und lumbosakraler Stenose besteht. Dazu sollen etablierten CT-Parameter zur Beurteilung des Hüftgelenks den Beurteilungskriterien der lumbosakralen Region innerhalb einer Studienpopulation gegenübergestellt werden. Das Projekt leistet somit Evidenz dafür, ob eine Hüftdysplasie zu einem erhöhten Risiko der Entwicklung einer Lumbosakralen Stenose beim Hund führt.

2. Material und Methoden

Studiendesign und Zeitraum

u^b

Vorliegende Dissertation stellt eine retrospektive monozentrische Studie dar, deren Daten aus einem Fachtierärztlichen Zentrum zwischen Dezember 2015 und Dezember 2025 bezogen wurden. Alle Probanden haben die klinisch und bildgebend gesicherte Diagnose Lumbosakrale Stenose beziehungsweise Cauda equina Kompression. Eine Kontrollgruppe mit nicht betroffenen Probanden wurde nicht aufgeführt. Eingeschlossen wurden Patienten, die sich aufgrund von Hinterhandproblemen – darunter Schmerzen, Schwäche, Leistungseinbußen oder manifeste Lahmheiten vorgestellt hatten.

Jeder Hund unterzog sich zunächst einer vollständigen klinischen Allgemeinuntersuchung, an die sich eine orthopädisch-neurologische Befundaufnahme durch einen ECVS zertifizierten Tierarzt anschloss. Erhärtete der klinische Befund den Verdacht auf eine lumbosakrale Pathologie, erfolgte ein Computertomogramm in Vollnarkose.

Für die Anästhesie wurde ein peripherer Venenkatheter gelegt; als Prämedikation kamen intravenös Diazepam (0,33 mg/kg intravenös (i.v.)) und Levomethadon (0,25 mg/kg i.v.) oder Butorphanol (0,2 mg/kg i.v.) zum Einsatz, die Narkoseeinleitung erfolgte mittels Propofol. Alternativ wurde eine Injektionsnarkose mittels Ketamin (4 mg/kg i.v.) / Dexmedetomidin (0,015 mg/kg i.v.) Mischspritze intramuskulär durchgeführt. Der überwiegende Teil der Hunde wurde intubiert und unter einem Isofluran-Sauerstoff-Gemisch in Narkose aufrechterhalten.

Die Tiere wurden in Rückenlage in einem halbmondförmigen Schaumstoffkissen gelagert; die Hintergliedmaßen wurden lediglich stabilisiert, ohne übermäßige Zug- oder Streckmanöver nach kaudal auszuüben und ohne eine Gewichtsbelastung der Hüftgelenke zu simulieren.

Neben den nativen CT-Datensätzen wurde zur besseren Beurteilung der Weichteilstrukturen das nichtionische, monomere Kontrastmittel (folgend als KM abgekürzt) Iobitriol (750 mg Iod/kg i.v.) verabreicht.

Im Verlauf des Untersuchungszeitraums standen zwei Mehrzeilen-Spiral-CT Systeme zur Verfügung: zunächst ein SIEMENS® SOMATOM Sensation 16 (Siemens Healthineers AG Erlangen, Deutschland), später ein Canon Aquilion Lightning (Canon Medical Systems GmbH, Neuss, Deutschland). Alle Scans wurden im WS - (Wirbelsäulen) Modus durchgeführt; die kollimierte Schichtdicke variierte je nach Fall zwischen 0,5 mm und 3 mm.

Nachträglich wurde auf den Gesundheitszustand der Hüften geachtet. Weitere Komorbiditäten wurden in dieser Studie nicht untersucht. Somit sind Patienten, bei denen eine lumbosakrale Stenose als Zufallsbefund diagnostiziert wurde (ohne klinische Anzeichen), von der Studie ausgeschlossen.

Datenerhebung und -analyse

Die Auswertung der Bilddaten und die Erhebung der Messwerte wurden von der Autorin eigenständig durchgeführt. Das methodische Vorgehen wurde zuvor gemeinsam mit der betreuenden geboardeten Radiologin (DipECVDI) abgestimmt. Bei Unsicherheiten oder Unklarheiten erfolgte stets eine Rücksprache, sodass eine konsistente Anwendung der Messkriterien gewährleistet war.

Auswertung Hüftgelenke

Die Auswertung der CT-Studien erfolgte über folgendes Schema: Zur Beurteilung der Hüftgelenke wurde das Knochenfenster genutzt und jeweils 6 Parameter bestimmt. Dazu gehören DARA, LCEA, CD, Kongruenz, Form des Femurkopfes und das Vorhandensein von arthrotischen Zubildungen. Die Berechnung erfolgte über DICOM Library und den zur Messung zur Verfügung stehenden Tools der Software.

DARA

Der Dorsal Acetabular Rim Angle (DARA) beschreibt die Ausrichtung des dorsalen Randes des Acetabulums, welcher in der Transversalebene des Beckens im CT bestimmt wird. Dazu wird eine Senkrechte in der Medianebene und eine dazu im rechten Winkel stehende Horizontale gezogen (siehe *Abbildung 1*). Eine Linie, die auf der Ebene der subchondralen Gelenkfläche des dorsalen Acetabulums liegt (also auf der gewichtstragenden Fläche) bildet mit der Horizontalen den DARA. [9] Basierend auf Referenzwerten der Literatur wird ein DARA von

- $< 15^\circ$ als physiologisch
- von 15 bis 20° als leicht abnormal
- von $> 20^\circ$ als pathologisch

gewertet [8–10]. Ein Hüftgelenk mit DARA-Werten zwischen 15 und 20° ist somit flacher ausgebildet, ohne direkt als pathologisch eingestuft zu werden.

Zur Vereinheitlichung der Daten wurden diese auf ganze Zahlen gerundet. Die Rundung erfolgte arithmetisch: Dezimalstellen $\geq 0,5$ wurden auf- und $< 0,5$ abgerundet. Der Transversalschnitt wurde so gewählt, dass der Femurkopf des jeweils vermessenen Hüftgelenks im Sagittalschnitt mittig positioniert war.

LCEA

Der Lateral Center Edge Angle (LCEA) stellt den Winkel dar, der - ähnlich wie der Norbergwinkel in Röntgenuntersuchungen – den Grad der Überdachung des Femurkopfes darstellen soll. Der Winkel entsteht zwischen einer Linie durch die Mittelpunkte beider Femurköpfe und der Linie durch den jeweiligen Femurkopfmittelpunkt und dem lateralsten Punkt des dorsalen Pfannenrandes im Transversalschnitt des CT (siehe *Abbildung 2*). Bei der Erhebung des Norbergwinkels im Röntgen wird hingegen der lateralste Punkt des kranialen Pfannenrandes genutzt [8]. In dieser Studie wird, basierend auf der Studie von Fujiki et al. [9], ein LCEA

- von $\geq 99^\circ$ als normal
- und $< 99^\circ$ als abnormal

gewertet. Auch bei diesem Parameter wurden die Werte auf ganze Zahlen auf- oder abgerundet.

u^b

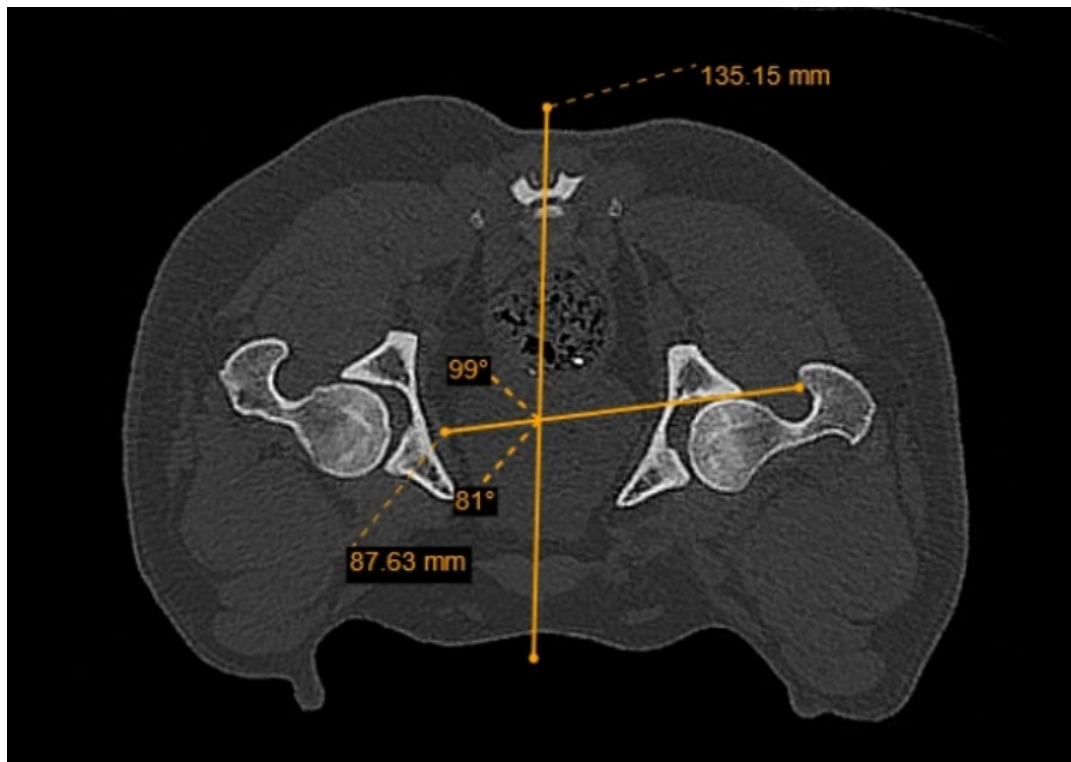


Abbildung 1: Transversalschnitt CT Studie. Zur Messung des DARA wird eine Senkrechte in der Medianebe und eine dazu im rechten Winkel stehende Horizontale (hier im Bild nicht zu sehen) genutzt. Eine Linie, die auf der Ebene der subchondralen Gelenkfläche des dorsalen Acetabulums liegt bildet zusammen mit der Horizontalen den DARA. In diesem Fall beträgt DARA 9°.

CD

Der Center Distance Index ist ein Laxizitätsparameter und misst das Verhältnis von der Strecke zwischen Mittelpunkt des Femurs und Mittelpunkt des jeweiligen Acetabulums und dem Radius des Femurkopfes. [8] Dazu werden im Transversalschnitt mithilfe des Software Tools Kreise mit klar definiertem Radius individuell auf den jeweiligen Femurkopf und dem Hüftpfannenraum gelegt (siehe Abbildung 3). Die Berechnung erfolgt dann durch die Formel C/D (C = Distanz zwischen Mittelpunkt des Femurs und Mittelpunkt des Hüftpfannenraumes, D = Radius des Femurkopfes). In dieser Studie wird ein CD von $< 0,22$ in Anlehnung der aktuellen Literatur als physiologisch betrachtet [8]. Die resultierenden Messergebnisse wurden in dieser Studie mit zwei Nachkommastellen erhoben.

u^b

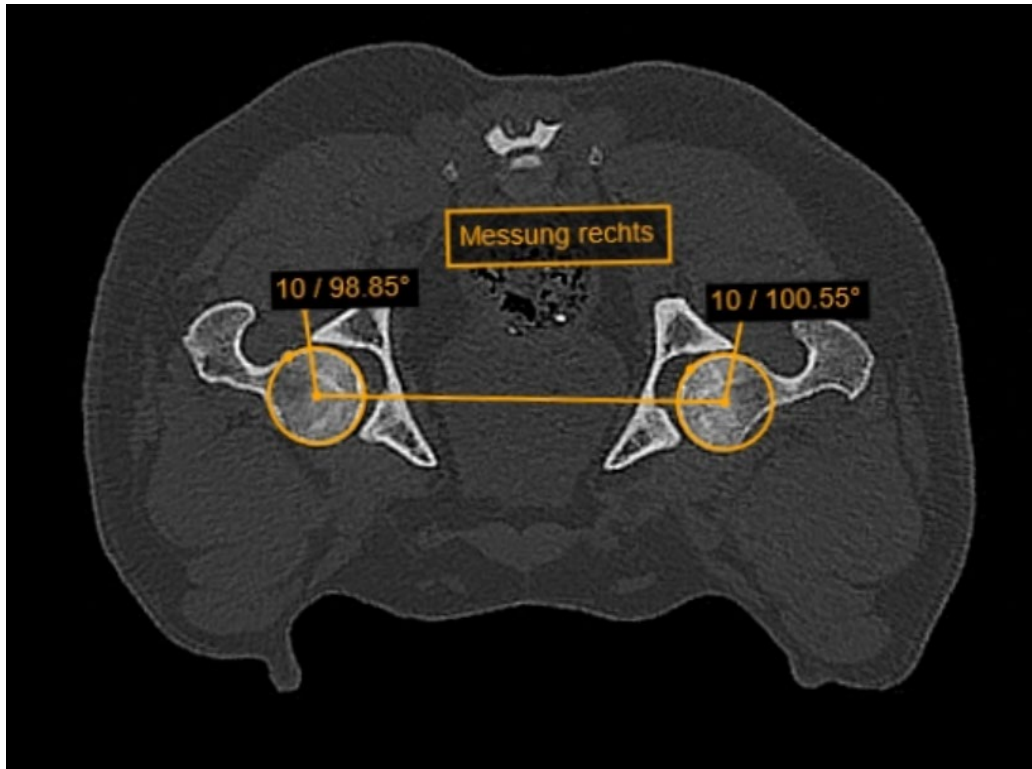


Abbildung 2: Transversalschnitt CT Studie. Zur Evaluierung des LCEA wird eine Linie zwischen den Mittelpunkten der beiden Femurköpfe gezogen und der Winkel zwischen dieser und der Linie zum lateralsten Punkt des dorsalen Acetabulumrandes vom Femurkopfmittelpunkt ausgehend gemessen.



Abbildung 3: Transversalschnitt CT Studie. Der CD (in dieser Abbildung als DI angezeigt) kann zur Evaluierung der Laxizität eines Hüftgelenks verwendet werden. Die Distanz zwischen Mittelpunkt des Femurkopfes und des Hüftpfannenraumes wird in Relation zum Radius des Femurkopfes gesetzt.

Kongruenz

Die Kongruenz der Hüftgelenke ist ebenfalls in die Beurteilung eingeflossen. Diese wurde in der Dorsalebene evaluiert, um den Verlauf des kranialen Acetabulumrandes und des Femurkopfes zu eruieren (siehe *Abbildung 4*). Konnte der Verlauf aufgrund der Schichtdicke nicht genau beurteilt werden, wurde dies vermerkt und floss nicht mit in die Statistik ein. Die Resultate wurden mit den Ziffern 0 und 1 codiert.

u^b

- 0 = es liegt ein kongruenter Hüftgelenksspalt vor
- 1 = nicht kongruenter Hüftgelenksspalt

Form Femurkopf und Arthrotische Zubildungen

Zwei weitere Kriterien, die für jedes Hüftgelenk evaluiert wurden, sind Form des Femurkopfes und das Vorhandensein von arthrotischen Zubildungen:

- 0 = runder, regelmäßig abgesetzter Femurkopf
- 1 = abgeflachter und/ oder unregelmäßig ausgeprägter Femurkopf

Arthrotische Zubildungen sind eine bekannte Folge von Hüftdysplasie beim Hund. Osteophytäre Zubildungen an Femurkopf und/oder Acetabulum wurden wie folgt eingeteilt:

- 0 = keine oder fragliche osteophytäre Zubildungen (<1mm)
- 1 = osteophytäre Zubildungen an Femurkopf und/oder Acetabulum > 1mm



Abbildung 4: Die Beurteilung der Kongruenz der Hüftgelenke erfolgte in der koronalen CT- Rekonstruktion.

Auswertung Lumbosakraler Übergang

Für die Evaluierung des Lumbosakralen Überganges wurden 7 verschiedene Parameter mithilfe Knochen- und Weichteilfenster (KM) evaluiert und gemessen.

FCR

u^b In der vorliegenden Studie wurde das Verhältnis der Fettfläche zur Fläche des Wirbelkanals berechnet. Diese modifizierte Kenngröße wird im Folgenden als Fat-to-Canal Ratio (FCR) bezeichnet. Die Messung erfolgte auf transversalen CT-Studien in der Weichteilfensterung mit Kontrastmittel am L7 – S1 Übergang am Ort der stärksten Kompression / Einengung (zum Beispiel durch Bandscheibenprotrusion oder knöcherner Stenose durch die dorsale Lamina des S1) (siehe *Abbildung 5*). Die Berechnung lautet wie folgt:

$$\text{Fett-Kanal-Ratio (FCR)} = \frac{\text{Fläche des epiduralen Fettgewebes}}{\text{Fläche des Wirbelkanals}}$$

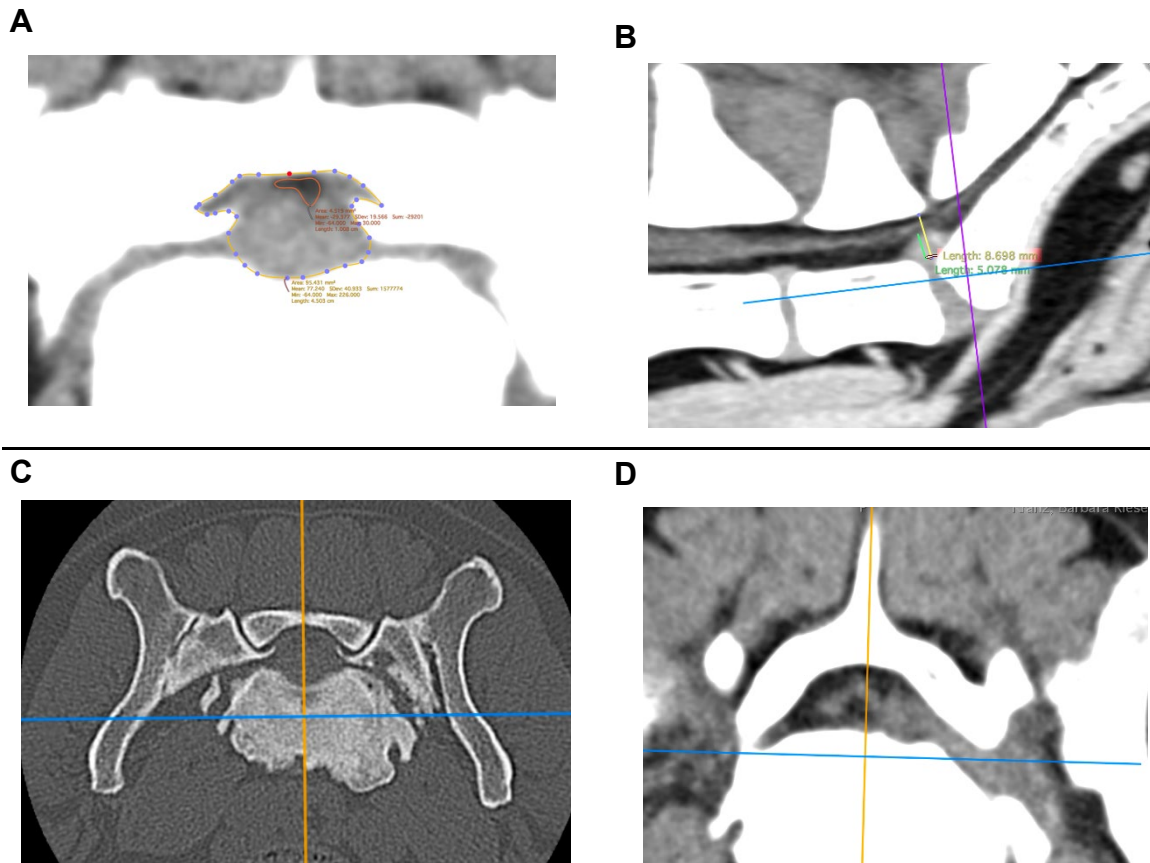


Abbildung 5: **A** Messung des FCR (Fat-to-canal ratio) im transversalen Weichteilfenster (KM) mittels manueller Flächenbestimmung von epiduralem Fett (orange) und Wirbelkanalquerschnitt (gelb mit violetten Punkten). **B** Messung des Protrusionsgrades der Bandscheibe im L7 – S1 Segment im sagittalen Weichteilfenster mittels manueller Ausmessung. Der Protrusionsgrad wurde in Prozent angegeben. **C** Beurteilung der Neuroforamina im Knochenfenster. In diesem Fall bestand eine massive Einengung der Neuroforamina beidseits durch laterale Spondylosen. **D** Transversale CT Studie im Weichteilfenster (KM) zur Beurteilung der Nervenwurzeln.

Die Messung erfolgte mithilfe der Bildbetrachtungssoftware *Horos* (Version 3.3.6, *The Horos Project*). Zur quantitativen Beurteilung der Cauda equina Kompression wurden die Fläche des Wirbelkanals sowie die Fläche des darin enthaltenen epiduralen Fettgewebes im Transversalschnitt im Bereich L7–S1 ermittelt. Hierfür wurde eine manuelle Segmentierung durchgeführt: Zunächst wurde der Wirbelkanal mit dem "Closed Polygon"- Werkzeug exakt umrandet, sodass eine zweidimensionale Fläche (in mm²) berechnet werden konnte. Im Anschluss wurde innerhalb dieser Fläche das sichtbare epidurale Fettgewebe, welches sich durch seine charakteristisch deutlich hypodense Attenuation vom umgebenden Gewebe abgrenzen ließ, ebenfalls polygonal markiert und vermessen. Die Flächenberechnungen wurden automatisiert von der Software durchgeführt und protokolliert.

Bandscheibenprotrusion

Zur quantitativen Beurteilung der Bandscheibenprotrusion im Bereich L7–S1 wurde anhand der sagittalen CT-Schnitte (Weichteilfenster KM) die relative Protrusionstiefe bestimmt. Die Auswertung erfolgte ebenfalls mittels der Bildanalyse-Software *Horos*. Hierfür wurde zunächst die vertikale Höhe des knöchernen Wirbelkanals im betroffenen Intervertebralbereich (L7–S1) auf Höhe der stärksten Protrusion mittels Lineal-Werkzeug (in mm) bestimmt. Anschließend wurde die maximale dorsale Vorwölbung des Bandscheibenmaterials in Richtung des Spinalkanals vermessen (siehe *Abbildung 6*). Der Protrusionsgrad wurde anschließend als Prozentwert berechnet, indem die Höhe der Bandscheibenprotrusion ins Verhältnis zur Höhe des Wirbelkanals gesetzt wurde:

$$\text{Protrusionsgrad (\%)} = \frac{\text{Höhe der Protrusion (mm)}}{\text{Höhe des Wirbelkanals (mm)}} \times 100$$

Neuroforamina

Die Analyse der Neuroforamina im Bereich des Lumbosakralübergangs (L7–S1) erfolgte anhand transversaler CT-Aufnahmen im Knochenfenster. Ziel war die Identifikation von knöchernen Veränderungen – insbesondere laterale Spondylosen, welche den Austrittsbereich der Spinalnerven einengen können (siehe *Abbildung 6*). In Fällen, in denen die Foramina im Knochenfenster nicht eindeutig verengt oder verändert erschienen, erfolgte eine ergänzende Beurteilung im Weichteilfenster (KM). Dies ermöglichte eine differenziertere Einschätzung der Neuroforamina in Bezug auf ihre Weite und die Darstellung des perineuralen Fettgewebes. Die Einteilung zeigt sich folgend:

- 0 = symmetrische, glatt begrenzte Foramina ohne Weichteilverdrängung
- 1 = knöchern verengte Foramina oder lokal vermehrtes Weichteilsignal, welches auf eine Kompression zurückzuführen ist

Zwischen beidseitiger oder einseitiger Einengung wurde in dieser Studie nicht differenziert.

Nervenwurzel

Die Beurteilung der Nervenwurzeln im Bereich der Cauda equina erfolgte in Transversalschnitten im Weichteilfenster (KM). In Anlehnung an die Kriterien von Lichtenhahn et al. (2020), die ursprünglich für die MRT-Bildgebung etabliert wurden [11], wurde die L7 Nervenwurzel, als auch kaudale Nervenwurzeln beurteilt. Als pathologisch gewertet wurden: Asymmetrien in Größe und Form im Querschnitt, dorsomediale Abweichungen des Nervs vom physiologischen Verlauf, deutliche Veränderungen im Querschnitt (z. B. abgeflachte, verdickte oder deformierte Wurzelkonturen), sowie der Verlust oder Einengung des perineuralen Fettgewebes (siehe *Abbildung 6*).

Lumbosakrale Übergangswirbel

Da knöcherne Anomalien wie der lumbosakrale Übergangswirbel nachweislich einen Einfluss auf die Entwicklung einer Lumbosakralen Stenose beziehungsweise Cauda equina Kompression haben [12], wurden in dieser Studie alle Probanden in LÜW-Grade eingeteilt. Hierbei bestehen verschiedene etablierte Einteilungsmöglichkeiten. In dieser Arbeit wurde die Einteilung nach der „Gesellschaft zur Förderung Kynologischer Forschung“ [13] verwendet, welche identisch zur Einteilung von M. Flückiger et al. (2009) [12] ist. Diese teilt wie folgt ein:

Grad 0: Gesund

Grad 1: Trennung der Dornfortsätze des ersten und zweiten Kreuzwirbels

Grad 2: Symmetrisch ausgeprägter Lumbosakraler Übergangswirbel

Grad 3: Asymmetrisch ausgeprägter Lumbosakraler Übergangswirbel

Die Beurteilung erfolgte in transversalen, sagittalen und koronalen CT-Schnitten im Knochenfenster (siehe *Abbildung 6*). Die Einteilung erfolgte in 3 Gruppen:

0 = gesund

1 = LÜW Grad 1

2 = LÜW Grad 2 + 3

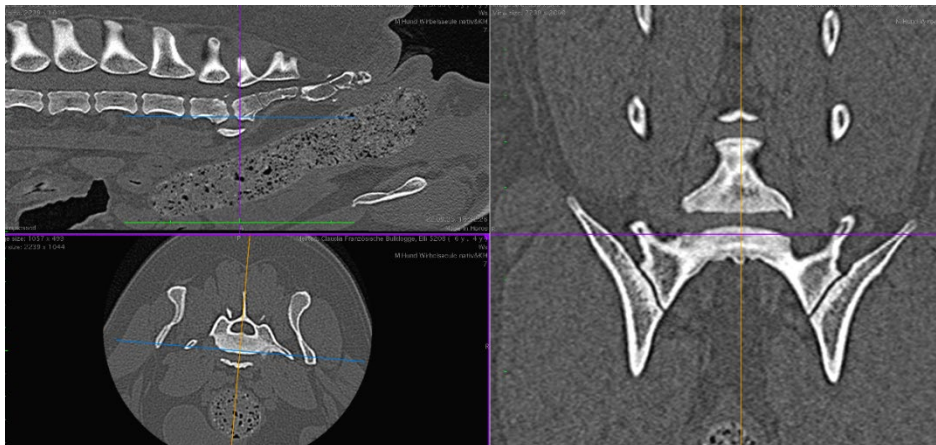


Abbildung 6: Beurteilung des LÜW-Grades. In diesem Fall handelt es sich um einen LÜW Grad 2 mit lumbalisiertem S1 mit symmetrisch vorhandenen Processi transversii und unfusioniertem Dornfortsatz.

Facettengelenke

Zur Beurteilung möglicher Subluxationen sowie degenerativer Veränderungen der Facettengelenke wurden transversale CT-Schnittbilder der lumbosakralen Übergangsregion analysiert. Eine Subluxation wurde definiert als deutliche Asymmetrie oder Verschiebung der Gelenkflächen zueinander mit teilweisem oder vollständigem Kontaktverlust, insbesondere bei unterschiedlicher Höhe der Gelenkflächenebenen. Degenerative Veränderungen wurden anhand von morphologischen Veränderungen wie Gelenkspaltverengung, subchondraler Sklerosierung, Osteophytenbildung sowie Irregularitäten der Gelenkflächenkanten beurteilt (siehe *Abbildung 7*).

Konformation S1

Zur Evaluation der dorsalen Lamina des ersten Sakralwirbels (S1) wurde die median-sagittale Schichtebene herangezogen, um eine standardisierte und reproduzierbare Beurteilung zu gewährleisten. Im Fokus stand die Beurteilung der Ausrichtung und Kontur der dorsalen Lamina. Eine ventrale Abkipfung der Lamina, d. h. eine kranioventrale Neigung in Richtung des Wirbelkanals, oder ein eindeutiges Hineinragen der knöchernen Struktur in das Lumen des Wirbelkanals wurde als pathologische Veränderung gewertet (siehe *Abbildung 8*).

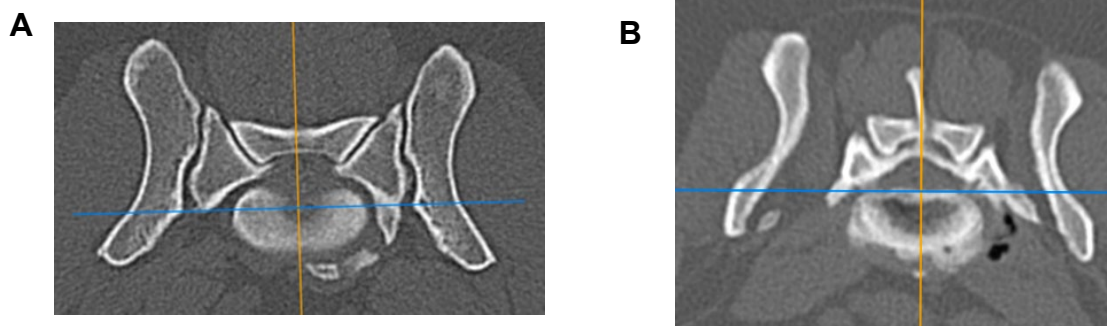


Abbildung 7: Evaluierung der Facettengelenke im Knochenfenster. A Physiologisches Facettengelenk mit kongruenten, regelmässigen Gelenkflächen. B degenerativ veränderte Facettengelenke mit unregelmässigen Gelenkflächen, die nicht durchgehend in Kontakt mit dem Sakrum stehen.

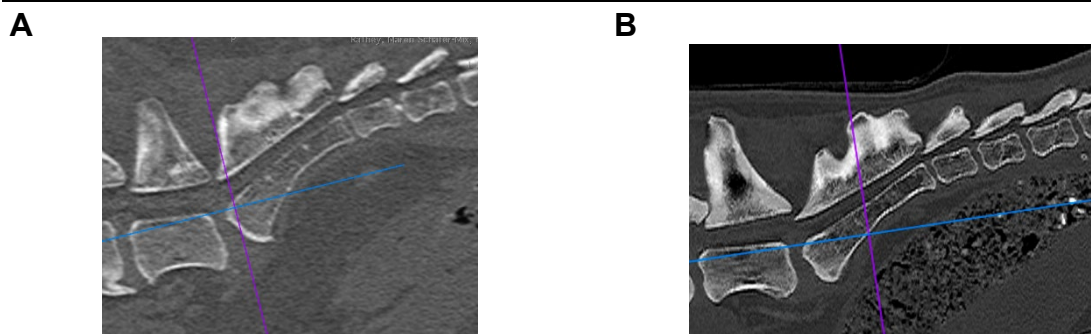


Abbildung 8: Beurteilung Konformation dorsale Lamina des S1 im Knochenfenster. Die Schnittebene liegt exakt in der Medianen. A Ein mit 0 codierter Proband, es liegt keine Einengung des Wirbelkanallumens durch kranioventrale Abkipfung des S1 vor. B Ein mit 1 codierter Proband. Im kranialen Bereich liegt eine ventrale Abkipfung der dorsalen Lamina vor.

Somit wurde für jeden Proband der FCR und Bandscheibenprotrusionsgrad bestimmt, zusätzlich wurden 4 morphologische Parameter (Neuroforamina, Nervenwurzel, Facettengelenke, S1) untersucht und jeweils dichotom nominal codiert: 0 stand für das Fehlen, 1 für das Vorhandensein einer entsprechenden Veränderung. Der Parameter Lumbosakraler Übergangswirbel wurde wie oben erwähnt codiert. Daraus ergab sich für jedes Tier ein fünfstelliger binärer Code, der die individuelle Kombination der untersuchten Merkmale abbildet. Diese Kodierung ermöglichte eine standardisierte Erfassung und weiterführende Analyse der strukturellen Veränderungen im untersuchten Bereich (siehe Tabelle im Anhang).

Statistische Auswertung

Zur Beschreibung der Studienpopulation und der erhobenen Parameter wurden zunächst deskriptive Statistiken erstellt, um absolute und relative Häufigkeiten für kategoriale Variablen sowie Mittelwerte, Standardabweichung und Medianwerte für kontinuierliche Variablen zu erfassen.

Zur Identifikation signifikanter Unterschiede zwischen zwei unabhängigen Gruppen wurde der Mann-Whitney-U-Test verwendet. Dieser nichtparametrische Test wurde eingesetzt, um Zusammenhänge zwischen kategorialen Parametern (z. B. Vorhandensein von Arthrose, Einengung der Neuroforamina, Kongruenzverhältnisse oder Kompression von Nervenwurzeln) und kontinuierlichen Messparametern (z. B. FCR, DARA, LCEA, CD oder Protrusionsgrad) zu analysieren. Die Signifikanzschwelle wurde auf $p < 0,05$ festgelegt. Zur Prüfung, ob sich die Verteilungen der Hüftparameter DARA, LCEA und CD zwischen unterschiedlichen Graden lumbosakraler Übergangswirbel (LÜW-Grad 0–3) unterscheiden, wurde der Kruskal-Wallis-Test eingesetzt.

Zur Untersuchung potenzieller Zusammenhänge zwischen spinalen Parametern und Hüftgelenksmerkmalen wurden lineare Regressionsanalysen (einfaktorielle ANOVA) durchgeführt. Dabei wurden der FCR sowie der Protrusionsgrad der Bandscheibe jeweils als abhängige Variablen definiert. Als unabhängige Variablen wurden sämtliche Hüftparameter einbezogen, darunter der LCEA, der DARA, der CD sowie weitere Messgrößen der Hüftgelenksmorphologie wie Vorhandensein von Arthrose, Inkongruenz und Form des Femurkopfes.

Ziel dieser Analysen war es, zu ermitteln, ob eine signifikante lineare Beziehung zwischen einer möglichen Cauda equina Kompression (repräsentiert durch FCR und Protrusionsgrad) und der individuellen Hüftgelenkskonfiguration der Patienten besteht. Für jede Regressionsanalyse wurde der Bestimmtheitsmaß R^2 dokumentiert, um die erklärte Varianz zu quantifizieren. Eine statistische Signifikanz wurde bei einem p -Wert $< 0,05$ angenommen.

Ergänzend zu den linearen Einzelregressionen wurde eine kanonische Korrelationsanalyse durchgeführt, um mögliche Zusammenhänge zwischen mehreren spinalen und hüftgelenksbezogenen Parametern simultan zu untersuchen. Darüber hinaus wurde ein Regressionsbaum erstellt, um potenzielle Schwellenwerte oder Interaktionen zwischen den Variablen zu identifizieren.

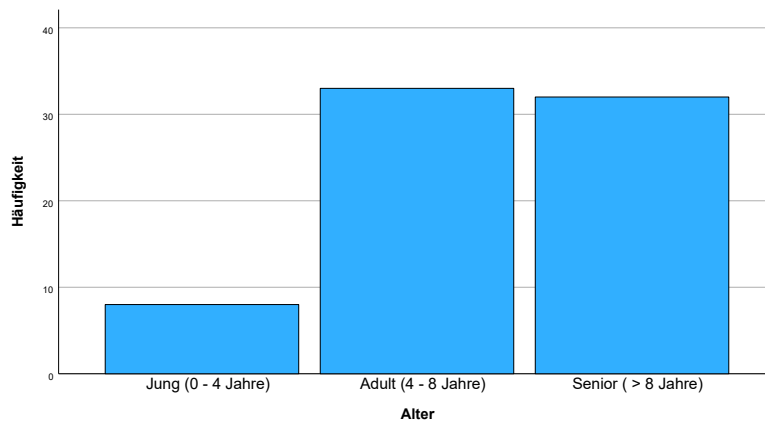
3. Ergebnisse

Studienpopulation

73 privat gehaltenen Hunden unterschiedlichster Rassen (siehe *Tabelle 1*) wurden in die Studie aufgenommen. Den größten Anteil stellten große Mischlinge mit einem Gewicht von über 20 kg mit 21,9% dar, gefolgt vom deutschen Schäferhund und der französischen Bulldogge mit jeweils 12,3%. Ebenfalls häufiger vertreten waren Labrador Retriever (6,8%), Border Collies (5,5%) sowie Schäferhund-Mischlinge, Golden Retriever, Rhodesian Ridgebacks und mittelgroße Mischlinge (jeweils 4,1%). Der Großteil der Probanden (45,2%) befand sich im adulten Alter (4 – 8 Jahre). 43,8% zählten zu Hunden, deren Alter über acht Jahre betrug. Das durchschnittliche Alter betrug 7,7 Jahre (Median 7 Jahre). Der kleinste Anteil der Probanden war jünger als vier Jahre (11%) (siehe *Grafik 1*). 56,2% der Probanden war männlich, 43,8 % war weiblich.

Rasse	Anzahl	Anteil in %
Mischling groß (>20kg)	16	21,9
Deutscher Schäferhund	9	12,3
Französische Bulldogge	9	12,3
Labrador Retriever	5	6,8
Border Collie	4	5,5
Schäferhund Mischling	3	4,1
Golden Retriever	3	4,1
Rhodesian Ridgeback	3	4,1
Mischling mittel (10 – 20 kg)	3	4,1
Königspudel	2	2,7
Pitbull Gruppe	2	2,7
Jack Russel Terrier	2	2,7
Australian Shepherd	2	2,7
Berger Blanc Suisse	1	1,4
Mops	1	1,4
Riesenschnauzer	1	1,4
Beagle	1	1,4
Eurasier	1	1,4
Strobel	1	1,4
Kleiner Münsterländer	1	1,4
Mischling klein (< 10 kg)	1	1,4
Altdeutscher Hütehund	1	1,4
Fila de Sao Miguel	1	1,4
Gesamt	73	100

Tabelle 1: Rasseverteilung in der Studienpopulation



Grafik 1: Altersverteilung in der Studienpopulation

Deskriptive Statistik

DARA

Der Mittelwert für den DARA Winkel betrug rechts $13,3^\circ$ (Median $11,0^\circ$ mit einer Standardabweichung von $10,4^\circ$) und links $15,16^\circ$ (Median $12,0^\circ$ mit einer Standardabweichung von $11,8^\circ$) (siehe Tabelle 2).

	DARA rechts	DARA links
Mittelwert	$13,3^\circ$	$15,16^\circ$
Median	$11,0^\circ$	$12,0^\circ$
Standardabweichung	10,447	11,7

Tabelle 2: Mittelwerte, Mediane und Standardabweichungen für DARA der rechten und linken Hüftgelenke.

LCEA

Der Mittelwert für den LCEA betrug rechts $92,66^\circ$ (Median $93,0^\circ$ mit einer Standardabweichung von $6,86^\circ$) und links $92,84^\circ$ (Median $93,0^\circ$ mit einer Standardabweichung von $6,944^\circ$) (siehe Tabelle 3).

	LCEA rechts	LCEA links
Mittelwert	$92,66^\circ$	$92,84^\circ$
Median	$93,0^\circ$	$93,0^\circ$
Standardabweichung	6,86	6,944

Tabelle 3: Mittelwerte, Mediane und Standardabweichungen für LCEA der rechten und linken Hüftgelenke.

CD

Der Mittelwert für den CD betrug rechts 0,15 (Median 0,13 mit einer Standardabweichung von 0,074) und links 0,12 (Median 0,12 mit einer Standardabweichung von 0,062) (siehe Tabelle 4).

	CD rechts	CD links
Mittelwert	0,15	0,12
Median	0,13	0,12
Standardabweichung	0,074	0,062

Tabelle 4: Mittelwerte, Mediane und Standardabweichungen für CD der rechten und linken Hüftgelenke.

Kongruenz, Form und Arthrotische Zubildungen

52 Probanden (75,3%) zeigten eine physiologische Kongruenz im rechten Hüftgelenk, 56 (83,5%) im linken Hüftgelenk. 17 Probanden (24,6%) zeigten dagegen einen unregelmäßigen Gelenksspalt im rechten und 11 Probanden (16,4%) im linken Hüftgelenk. 10 Messungen (4 rechts, 6 links) konnten nicht ausgewertet werden und sind somit nicht statistisch eingeflossen.

u^b

62 Probanden (84,9%) wiesen einen physiologisch runden und regelmäßigen Femurkopf rechts und 61 Probanden (83,6%) links vor. Dagegen traten bei 11 Probanden (15,1%) eine pathologische Femurkopfform rechts und bei 12 (16,4%) links auf.

52 Probanden (71,2%) wiesen keine oder nur fragliche arthrotische Zubildungen im rechten und 55 Probanden (75,3%) im linken Hüftgelenk auf. Dagegen konnten bei 21 Probanden (28,8%) im rechten und bei 18 Probanden (24,7%) im linken am Femurkopf oder am Acetabulum arthrotische Zubildungen detektiert werden (siehe Tabelle 5)

	Kongruenz R	Kongruenz L	Form R	Form L	Arthrose R	Arthrose L
0	52	56	62	61	52	55
1	17	11	11	12	21	18

Tabelle 5: Absolute Häufigkeiten der Parameter Kongruenz, Form Femurkopf und arthrotische Zubildungen; 0 = physiologisch, 1 = pathologisch

FCR und Protrusionsgrad

Der Mittelwert für den FCR betrug 0,046 (Median 0,04 mit einer Standardabweichung von 0,037).

Der Mittelwert für den Protrusionsgrad (in %) betrug 52,17 (Median 52,5 mit einer Standardabweichung von 15,66) (siehe Tabelle 6). Ein einzelner Proband konnte in diese Auswertung nicht eingeschlossen werden.

	FCR	Protrusionsgrad in %
Mittelwert	0,046	52,17
Median	0,04	52,5
Standardabweichung	0,037	15,66

Tabelle 6: Mittelwerte, Median und Standardabweichung für FCR und Protrusionsgrad.

Neuroforamina, Facettengelenke, Nervenwurzel und Konformation S1

14 Probanden (19,2%) zeigten bilateral physiologische nicht stenosierte Neuroforamina. Dagegen wiesen 59 Probanden (80,8%) uni- oder bilateral eingengte Neuroforamina auf.

55 Probanden (75,3%) wiesen physiologische Facettengelenke auf. Bei 18 Probanden (24,7%) konnten strukturelle Abnormalitäten nachgewiesen werden.

18 Probanden (25,7%) zeigten einen physiologischen Verlauf der Nervenwurzeln im lumbosakralen Bereich. Dagegen konnte bei 52 Probanden (74,2%) eine uni- oder bilaterale Verlagerung oder Kompression der Nervenwurzeln nachgewiesen werden. Bei 3 Probanden konnten die Nervenwurzeln nicht vollständig beurteilt werden, weswegen diese statistisch nicht verwertet wurden.

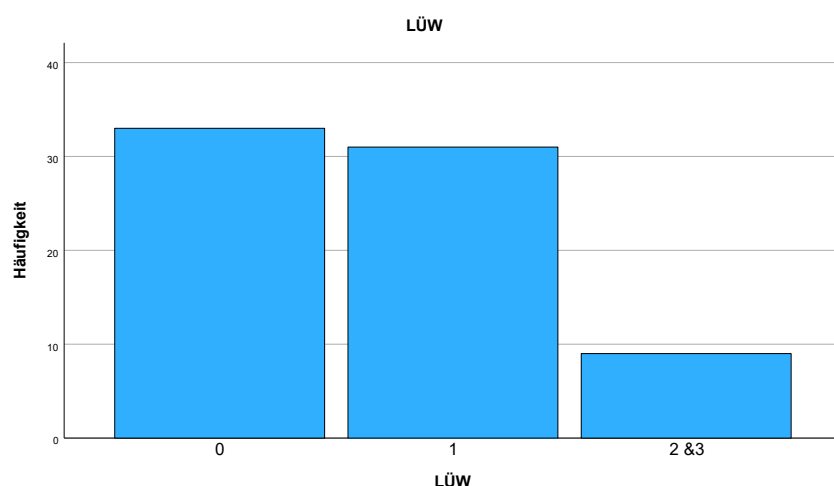
51 Probanden (69,9%) zeigten in der CT-Untersuchung keine ventrale Abkippung der dorsalen Lamina von S1, wohingegen dies bei 22 Probanden (30,1%) festgestellt werden konnte (siehe Tabelle 7).

	Neuroforamina	Facettengelenke	Nervenwurzel	S1
0	52	56	62	61
1	17	11	11	12

Tabelle 7: Absolute Häufigkeiten der Parameter Neuroforamina, Facettengelenke, Nervenwurzel und Konformation S1; 0 = physiologisch, 1 = pathologisch

Lumbosakraler Übergangswirbel

In der untersuchten Population verteilten sich die lumbosakralen Übergangswirbel (LÜW) wie folgt: 33 (45,2%) Hunde wiesen keinen Übergangswirbel (Grad 0) auf, 31 Hunde (42,4%) zeigten Grad 1 und 9 Hunde (12,3%) wurden mit Grad 2 oder 3 diagnostiziert. Aufgrund der geringen Fallzahl in den höheren Graden wurden Grad 2 und 3 zu einer gemeinsamen Gruppe zusammengefasst, um eine aussagekräftigere statistische Analyse zu ermöglichen (siehe Grafik 2). Unter den Hunden mit Grad 2 oder 3 befanden sich 2 Deutsche Schäferhunde, 3 Französische Bulldoggen, 1 Border Collie, 2 große Mischlinge sowie 1 mittelgroßer Mischling.



Grafik 2: Häufigkeitsverteilung der LÜW-Grade in der Studienpopulation.

Gruppenvergleiche

In den Gruppenvergleichen wurde auf statistisch signifikante Differenzen in der Ausprägung eines Merkmals zwischen definierten Gruppen getestet. Hierzu wurde der Mann-Whitney-U-Test oder der Kruskal-Wallis-Test verwendet (Signifikanzniveau $p < 0,05$).

Gruppe mit / ohne Arthrose:

Beim Vergleich der Hunde mit (1) und ohne (0) computerthomographisch nachweisbaren arthrotischen Veränderungen im Hüftgelenk (sowohl links als auch rechts) zeigte sich weder für den FCR noch für den Protrusionsgrad ein signifikanter Unterschied. Der Mann-Whitney-U-Test ergab für den FCR $p = 0,659$ (rechts) und $p = 0,933$ (links). Für den Protrusionsgrad lagen die p -Werte bei 0,127 (rechts) und 0,184 (links). In beiden Fällen und im Seitenvergleich konnten sich somit keine statistisch signifikanten Abweichungen zwischen den Gruppen darstellen (siehe Tabelle 8A, 8B).

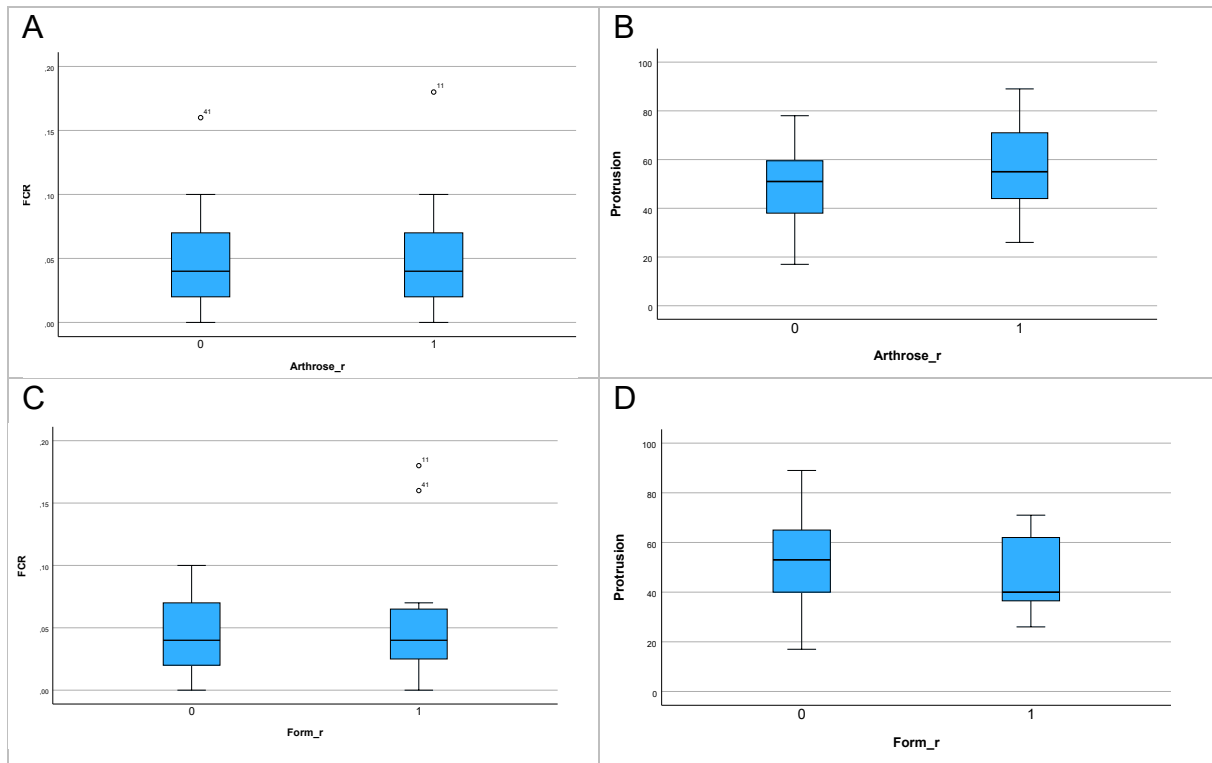


Tabelle 8: Gruppenvergleich **A** FCR bei Hunden mit oder ohne rechtsseitiger Coxarthrose (0 = keine/ marginale Arthrose, 1 = Arthrose). **B** Protrusionsgrade bei Hunden mit oder ohne rechtsseitiger Coxarthrose. **C** FCR bei Hunden mit oder ohne pathologischer Femurkopfform (0 = physiologisch, 1 = pathologisch). **D** Protrusionsgrade bei Hunden mit oder ohne pathologischer Femurkopfform.

Gruppe mit / ohne verändertem Femurkopf

Ebenso konnte beim Vergleich von Hunden mit (1) und ohne (0) von der Norm abweichender Femurkopfform kein signifikanter Unterschied in Bezug auf den FCR oder den Protrusionsgrad festgestellt werden (siehe Tabelle 8C, 8D). Die durchgeführten Mann-Whitney-U-Tests ergaben für FCR $p = 0,92$ (rechts) und $p = 0,788$ (links) und für den Protrusionsgrad $p = 0,336$ (rechts) respektiv $p = 0,555$ (links).

Gruppe mit / ohne Einengung Neuroforamina

Bei der Auswertung der DARA-Werte zeigte sich im Vergleich von Hunden mit (1) und ohne (0) Kompression der Neuroforamina ein signifikanter Unterschied für die linken Hüftgelenke. Hunde mit Kompression wiesen hier höhere DARA-Werte auf als Hunde ohne Kompression. Der Mann-Whitney-U-Test ergab hier eine Signifikanz von $p = 0,032$ (siehe Tabelle 9F).

Für die rechten Hüftgelenke hingegen konnte kein signifikanter Unterschied der DARA-Werte zwischen Hunden mit und ohne Einengung der Neuroforamen nachgewiesen werden ($p = 0,074$).

In Bezug auf den LCEA konnte ebenfalls beidseitig kein signifikanter Unterschied zwischen Hunden mit (1) oder ohne (0) Einengung der Neuroforamina festgestellt werden. Der Mann-Whitney-U-Test ergab $p = 0,066$ (rechts) und $p = 0,176$ (links). Beim Vergleich des CD-Index ergab sich erneut ein signifikanter Unterschied bei den linken Hüftgelenken: Hunde mit Einengung der Neuroforamina wiesen höhere CD-Werte auf als Hunde ohne Einengung. Der Mann-Whitney-U-Test ergab eine Signifikanz mit $p = 0,012$ (siehe Tabelle 9H).

Bei den rechten Hüftgelenken zwischen Hunden mit (1) und ohne (0) Einengung der Neuroforamina zeigte sich kein signifikanter Unterschied. Der Mann-Whitney-U-Test ergab hier keine statistisch signifikante Abweichung zwischen den Gruppen ($p = 0,258$).

u^b

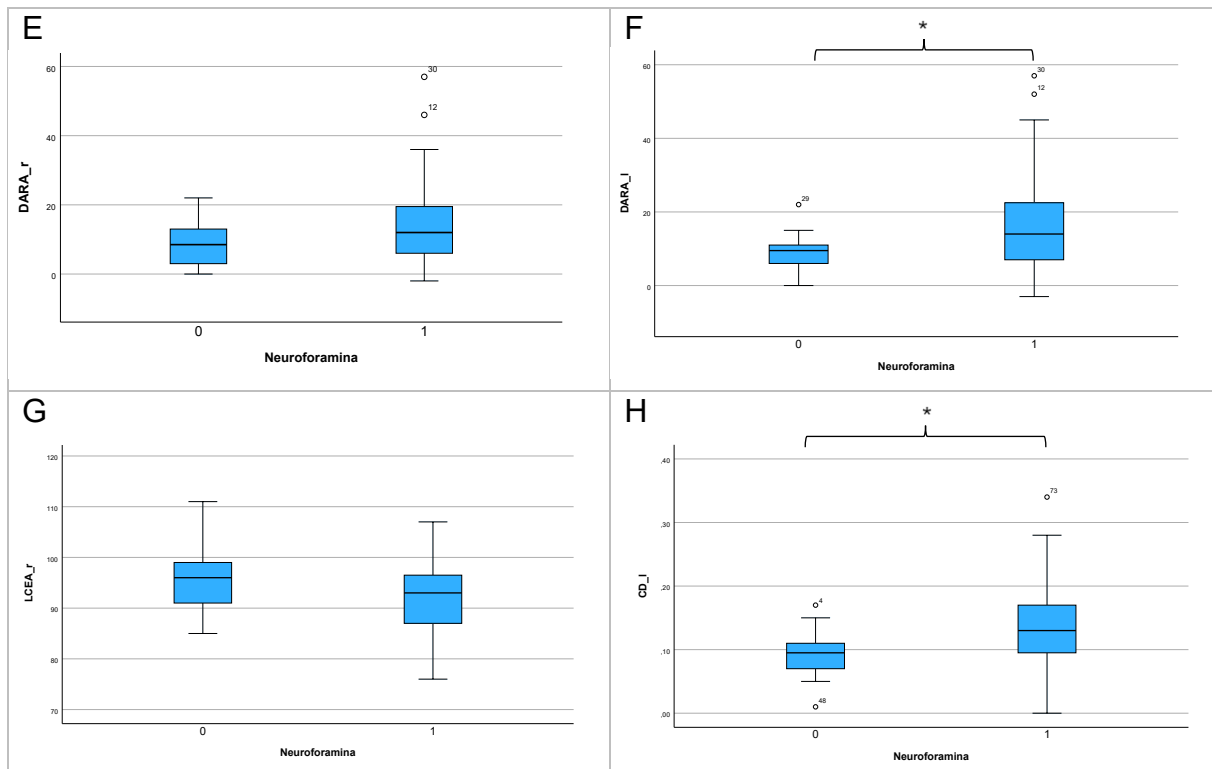


Tabelle 9: Gruppenvergleich **E** DARA der rechten Hüftgelenke bei Hunden mit (1) oder ohne (0) Einengung der Neuroforamina. **F** DARA der linken Hüftgelenke bei Hunden mit (1) oder ohne (0) Einengung der Neuroforamina. **G** LCEA der rechten Hüftgelenke bei Hunden mit (1) oder ohne (0) Einengung der Neuroforamina. **H** CD der linken Hüftgelenke bei Hunden mit (1) oder ohne (0) Einengung der Neuroforamina.

Gruppe mit / ohne Nervenwurzelkompression

Beim Vergleich von Hunden mit (1) und ohne (0) pathologische Veränderungen der Nervenwurzelkonformation (L7 oder kaudale Nervenwurzeln) zeigte sich weder für die DARA-Werte ($p = 0,353$ (rechts), $p = 0,523$ (links)), noch für die LCEA-Werte ($p = 0,563$ (rechts), $p = 0,549$ (links)) oder die CD-Werte ($p = 0,419$ (rechts), $p = 0,182$ (links)) ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen. Der Mann-Whitney-U-Test ergab somit keine statistisch signifikanten Abweichungen (siehe Tabelle 10).

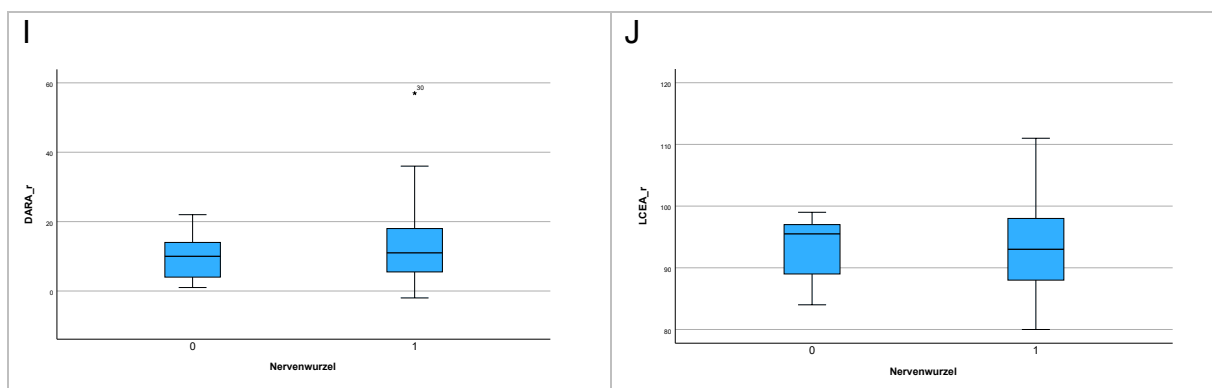


Tabelle 10: Gruppenvergleich **I** DARA der rechten Hüftgelenke bei Hunden mit (1) und ohne (0) Kompression der Nervenwurzel **J** LCEA der rechten Hüftgelenke bei Hunden mit (1) und ohne (0) Kompression der Nervenwurzeln

Gruppe mit / ohne kongruente Hüftgelenke

Beim Vergleich von Hunden mit (1) und ohne (0) kongruenten Hüftgelenken konnte weder für die FCR-Werte noch für den Protrusionsgrad ein signifikanter Unterschied festgestellt werden (siehe Tabelle 11). Der Mann-Whitney-U-Test ergab für den FCR $p = 0,695$ (rechts) und $p = 0,178$ (links) und für den Protrusionsgrad $p = 0,308$ (rechts) und $p = 0,191$ (links).

u^b

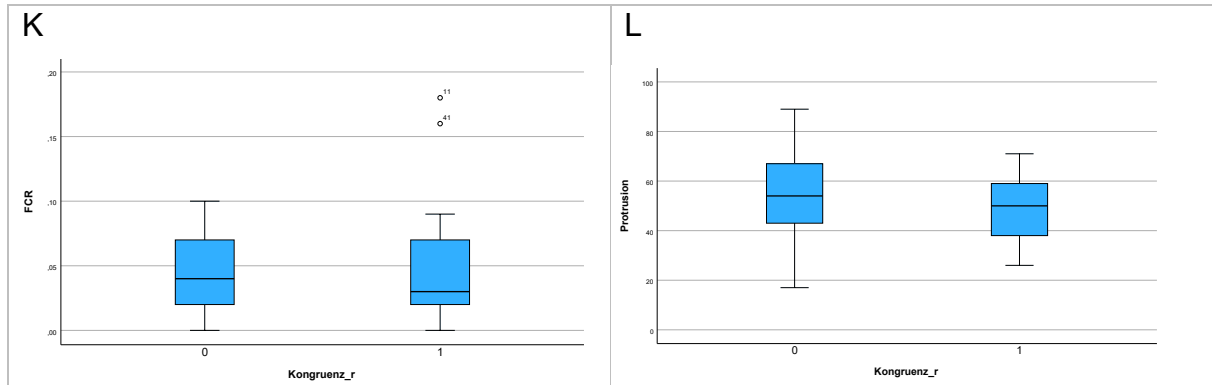
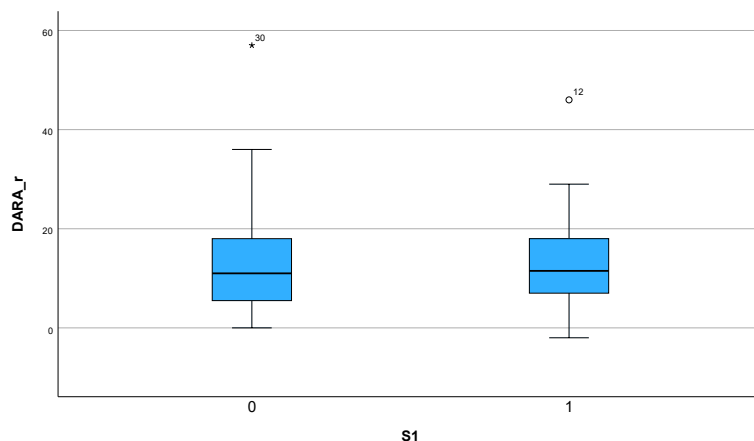


Tabelle 11: Gruppenvergleich **K** FCR bei Hunden mit (1) oder ohne (0) inkongruente rechtsseitige Hüftgelenke. **L** Protrusionsgrade bei Hunden mit (1) oder ohne (0) inkongruente rechtsseitige Hüftgelenke

Gruppe mit / ohne ventrale Abkippung von S1

Auch beim Vergleich von DARA, LCEA und CD bei Hunden mit / ohne S1 Pathologie ergab sich keine Signifikanz: Der Mann-Whitney-U Test ergab für DARA $p = 0,564$ (rechts) und $p = 0,787$ (links). Beim Vergleich der LCEA-Werte ergaben sich folgende Resultate: $p = 0,819$ (rechts) und $p = 0,332$ (links). Beim Vergleich der CD-Werte bei Hunden mit (1) und ohne (0) ventraler Abkippung von S1 ergaben sich sowohl für die rechten als auch für die linken Hüftgelenke $p = 0,947$.



Grafik 3: DARA der rechtsseitigen Hüftgelenke bei Hunden mit (1) und ohne (0) ventraler Abkippung von S1

Lumbosakrale Übergangswirbel

Die Gruppen unterschiedlicher LÜW-Grade wurden auf Unterschiede in DARA, LCEA und CD untersucht (siehe Tabelle 12). Hierzu wurde der Kruskal-Wallis-Test verwendet (Signifikanzniveau $p < 0,05$). Beim Vergleich der DARA-Werte zwischen den Gruppen ergab sich keine statistische Signifikanz $p = 0,061$ (rechts) und $p = 0,99$ (links). Damit konnte kein Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der lumbosakralen Übergangswirbel und den DARA-Werten festgestellt werden. Analog zu den DARA-Werten konnten auch für die LCEA-Werte ($p = 0,467$ (rechts) und $p = 0,885$ (links)) sowie die CD-Werten ($p = 0,973$ (rechts) und $p = 0,614$ (links)) keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen LÜW-Graden festgestellt werden.

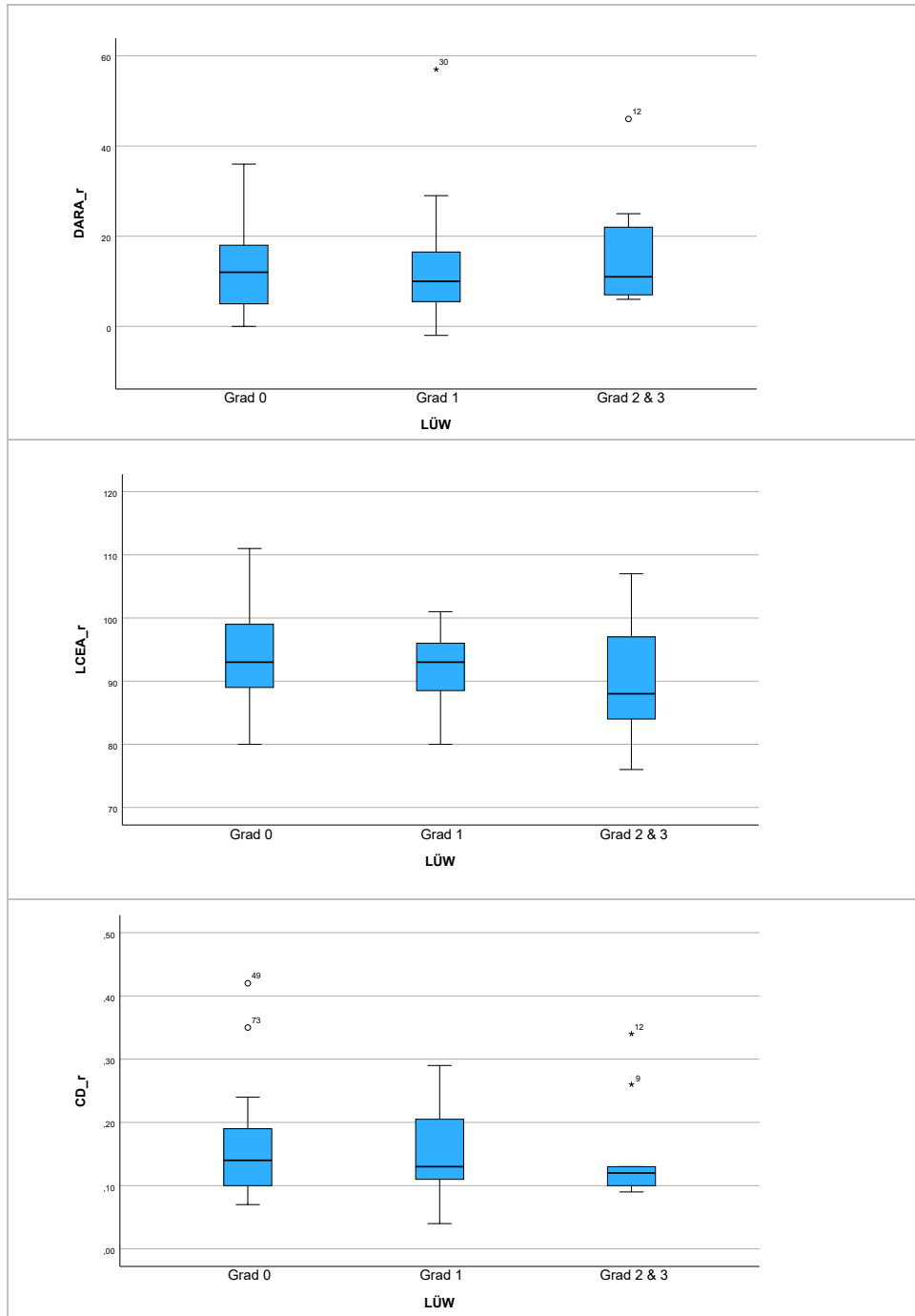
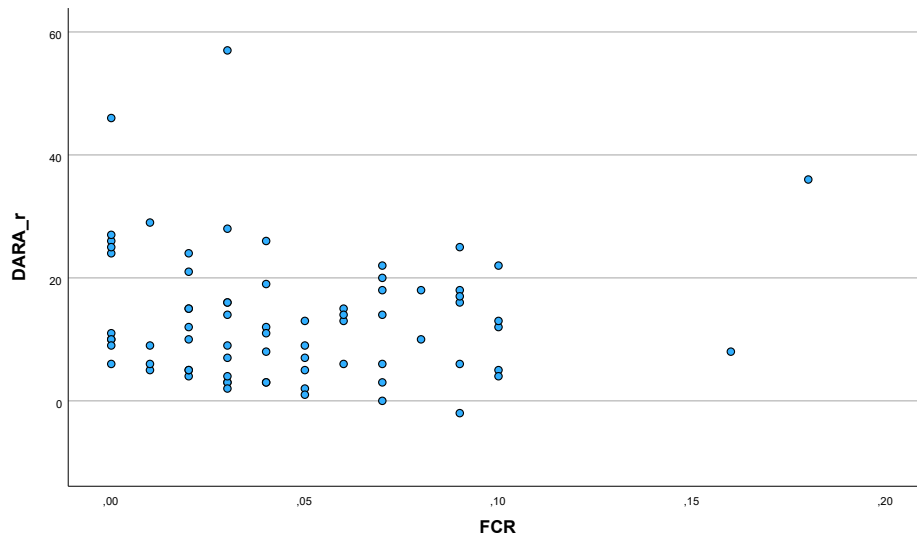


Tabelle 12: DARA, LCEA und CD bei Hunden mit LÜW Grad 0-3

Untersuchung auf linearen Zusammenhang

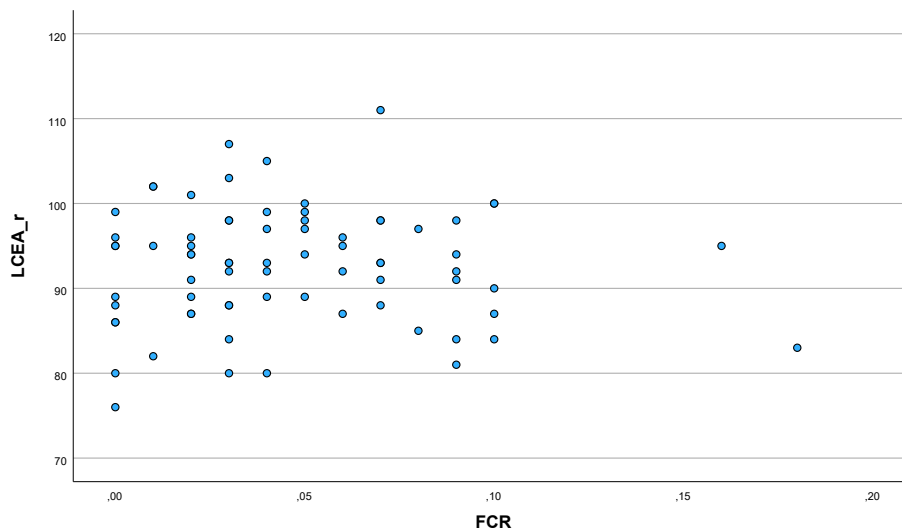
Mittels Streudiagramm wurde der Zusammenhang zwischen den FCR-Werten und den DARA-Werten dargestellt und untersucht (*siehe Grafik 4*). Es zeigt sich kein erkennbarer linearer Zusammenhang zwischen beiden Parametern. Ein Großteil der untersuchten Hüftgelenke (58,9%) weist dabei physiologische DARA-Werte bis 15° auf. 16,4% der Hüftgelenke befinden sich im leicht abnormalen Bereich von 15 – 20°. 24,6% der untersuchten Hüftgelenke weisen DARA-Werte über 20 Grad auf, einzelne Ausreißer mit sehr hohen Werten sind vorhanden, diese verteilen sich jedoch unabhängig vom FCR.

Die Analyse ergab für beide Seiten (rechts / links) ein sehr ähnliches Bild.



Grafik 4: Verteilung DARA (rechts) in Relation zu den FCR-Werten

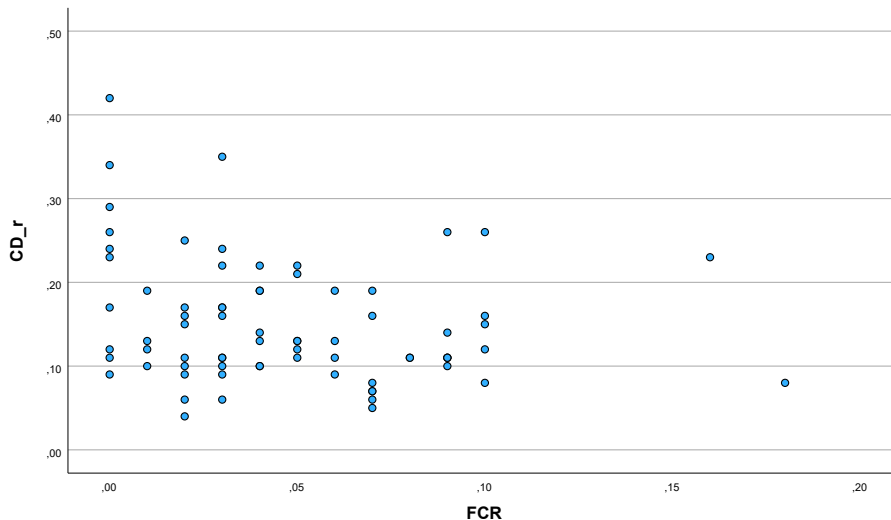
Zwischen den FCR-Werten und den LCEA-Werten konnte ebenfalls kein linearer Zusammenhang dargestellt werden (*siehe Grafik 5*). Der Großteil der untersuchten Hunde (78,7%) wies pathologische LCEA-Werte unter 99° auf. Die Analyse ergab für beide Seiten (rechts / links) ein sehr ähnliches Bild.



Grafik 5: Verteilung LCEA (rechts) in Relation zu den FCR-Werten

Zwischen den FCR-Werten und den CD-Werten konnte ebenfalls kein linearer Zusammenhang dargestellt werden (*siehe Grafik 6*). Der überwiegende Teil der untersuchten Hunde weist physiologische CD-Werte unter 0,22 auf. Die Analyse ergab für beide Seiten (rechts/ links) ein sehr ähnliches Bild.

u^b



Grafik 6: Verteilung CD (rechts) in Relation zu den FCR-Werten

Regressionsanalysen

Die multiple lineare Regressionsanalyse mit FCR als abhängige Variable und alle Hüftparameter als Einflussvariablen ergab, dass das Modell 3,9 % der Varianz des FCR erklärte ($R^2 = 0,039$). Die ANOVA zur Modellgüte war nicht signifikant ($p = 0,292$).

Auch die Regressionsanalyse ohne nominale Variablen (und somit mit DARA, LCEA und CD als Einflussvariablen) ergab keine Signifikanz ($p = 0,434$, $R^2 = 0,00$).

Die multiple lineare Regressionsanalyse mit der Diskusprotrusion als abhängige Variable und alle Hüftparameter als Einflussvariablen ergab, dass das Modell 8,5 % der Varianz der Bandscheibenprotrusion erklärte ($R^2 = 0,085$). Die ANOVA zur Modellgüte war nicht signifikant ($p = 0,153$).

Kanonische Korrelationsanalyse und Regression Tree

Bei der kanonischen Korrelationsanalyse wurden sieben Funktionen berechnet, von denen keine statistisch signifikant war ($p = 0,272$). Damit ergab sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen den beiden Variablensets (Set 1 = Hüftparameter, Set 2 = spinale Parameter).

Zur explorativen Analyse potenzieller Einflussfaktoren wurde ein Regressionsbaum (CRT) erstellt, in den alle erhobenen Variablen einbezogen wurden. Der resultierende Baum bestand lediglich aus dem Wurzelknoten (Knoten 0), wodurch keine weitere Aufspaltung der Daten erfolgte.

4. Diskussion

In dieser Dissertation wurde untersucht, ob mittels computertomographischer Befunde ein Zusammenhang zwischen Hüftgelenksdysplasie (HD) und lumbosakraler Stenose (LSS) beim Hund besteht. Dafür wurden 73 Hunde mit klinisch und bildgebend gesicherter LSS mittels Computertomographie hinsichtlich etablierter Parameter für das Hüftgelenk (DARA, LCEA, CD, Kongruenz, Femurkopfform, Arthrose) und der lumbosakralen Region (FCR, Bandscheibenprotrusion, Neuroforamina, Nervenwurzel, Facettengelenke, S1 Konformation und lumbosakralen Übergangswirbel) untersucht. Ziel war es, mögliche Zusammenhänge zwischen morphologischen Veränderungen an Hüfte und lumbosakralem Übergang zu identifizieren.

Die statistischen Auswertungen ergaben keinen signifikanten linearen Zusammenhang zwischen den Hüftparametern und den spinalen Parametern wie FCR und Protrusionsgrad. Weder die lineare Regressionsanalyse noch die kanonische Korrelationsanalyse zeigten eine Assoziation. Einzelne Gruppenvergleiche wiesen zwar einen signifikanten Unterschied auf (höhere DARA und CD-Werte der linken Hüftgelenke bei Hunden mit Neuroforamenstenose), dieser Befund konnte jedoch nicht konsistent bestätigt werden.

Die Studienpopulation erlaubt mit 73 Probanden differenzierte Auswertungen, stellt jedoch für die Statistik kein übergroßes Kollektiv dar. Es sind viele unterschiedliche Rassen eingeschlossen, bei denen bekannte prädisponierte Rassen wie Schäferhund, Border Collie, Labrador Retriever und große Mischlinge besonders häufig auftreten. Es sind jedoch auch kleinere, weniger typische Rassen wie französische Bulldogge, Jack Russel Terrier oder Pitbull vertreten. Gerade die französische Bulldogge erscheint überproportional, was an einer gewissen Überrepräsentation in der Klinikpopulation liegen kann. Bei dieser Rasse besteht bekanntlich eine hohe Inzidenz an Wirbelsäulenproblemen (Hemivertebrae, Keilwirbel, degenerative Bandscheibenerkrankungen) [14], wodurch eine LSS mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht der einzige Befund und Grund von lumbosakralen Schmerzen und somit Inkludierung in die Studie sein mag. Die Geschlechtsverteilung ist ausgewogen, wobei männliche Hunde um 12,4% häufiger vertreten waren. Diese Tendenz korreliert mit aktuellen Erkenntnissen, bei denen männliche Hunde doppelt so häufig an Lumbosakraler Stenose erkranken können als weibliche Hunde [12]. Die Mehrheit der in der Studie eingeschlossenen Hunde war mittelalt bis alt (> 4 Jahre), lediglich 11% der Tiere waren jünger als 4 Jahre. Dieses Altersprofil entspricht dem typischen klinischen Erscheinungsbild der lumbosakralen Stenose, die in der erworbenen Form im Schnitt im Alter von 6 – 7 Jahren symptomatisch wird [6]. Eine Ausnahme stellt die kongenitale Form der lumbosakralen Stenose dar, die bereits im Alter von 3 Jahren symptomatisch werden kann [6]. In Anbetracht dessen, dass Tierbesitzer nicht direkt beim Auftreten der ersten Symptome einen Tierarzt oder gar Spezialisten konsultieren, ist es plausibel, dass in dieser Studienpopulation auch durchaus ältere Tiere vorhanden sind.

Der Dorsal Acetabular Rim Angle (DARA) erwies sich in der vorliegenden Studie als robuster Parameter zur Beurteilung der Hüftgelenksmorphologie. Ein wesentlicher Vorteil liegt darin, dass der Messwert im Gegensatz zu anderen Winkeln der Hüftgelenksdiagnostik weitgehend unabhängig von der Lagerung des Patienten ist und somit keine lagerungsbedingten Messfehler zu erwarten sind [10]. Dies erhöht

u^b

die Reliabilität der Messung insbesondere in retrospektiven Studien, in denen eine standardisierte Positionierung der Patienten nicht in allen Fällen vollständig gewährleistet werden kann. Die Mehrzahl der Probanden zeigte DARA-Werte im physiologischen Bereich (bis 20°). Einzelne Ausreißer mit pathologischen Werten deutlich über 20° wurden beobachtet, diese traten jedoch unabhängig von den übrigen erhobenen spinalen Parametern auf. Diese sind teilweise erklärbar durch die Zusammensetzung der Studienpopulation: Da der überwiegende Anteil der Hunde mittelgroßer bis großer Rassen angehören, welche bekanntermaßen ein erhöhtes Risiko für die Entwicklung einer Hüftdysplasie aufweisen [6], ist das Auftreten einzelner hoher DARA-Werte innerhalb der Kohorte nicht überraschend, sondern vielmehr populationsbedingt plausibel. Die beobachtete rechtsschiefe Verteilung mit höheren Mittelwerten im Vergleich zum Median unterstreicht, dass extreme Einzelwerte das Gesamtergebnis beeinflussen können.

Bei der Auswertung zeigte sich ein signifikanter Unterschied der DARA-Werte in den linken Hüftgelenken zwischen Hunden mit und ohne Einengung der Neuroforamina ($p = 0,032$). Für die rechten Hüftgelenke konnte hingegen kein statistisch signifikanter Unterschied festgestellt werden ($p = 0,074$). Dieses Ergebnis wirft die Frage auf, ob der gefundene Zusammenhang tatsächlich biologisch relevant ist oder ob es sich um einen Zufallsbefund im Sinne eines Alpha-Fehlers handelt. Da in der vorliegenden Arbeit zahlreiche Hypothesentests durchgeführt wurden, erhöht sich das Risiko, mindestens einen falsch positiven Zusammenhang zu identifizieren („multiple testing problem“). Insbesondere wenn ein signifikanter Effekt nur einseitig (links, aber nicht rechts) auftritt, sollte das Ergebnis vorsichtig interpretiert werden. Eine klinisch oder pathophysiologisch plausible Erklärung für eine ausschließlich linksseitige Assoziation besteht nicht, sodass es sich wahrscheinlich um ein zufallsbedingtes Resultat handelt. Darüber hinaus konnte für den DARA kein signifikanter Unterschied zwischen verschiedenen Graden lumbosakraler Übergangswirbel (LÜW) festgestellt werden – die bekanntermaßen einen Risikofaktor für die Entwicklung einer Lumbosakralen Stenose darstellen [12]. Die Erkenntnis, dass DARA auch bei Fehlen eines LÜW denen der Probanden mit LÜW gleicht, spricht gegen eine echte Signifikanz. Außerdem konnte weder bei Hunden mit oder ohne ventrale Abkippung von S1 noch mit oder ohne Nervenwurzelkompression ein signifikanter Unterschied in den DARA-Werten festgestellt werden. Auch in den Regressionsanalysen ließ sich kein linearer Zusammenhang zwischen den DARA-Werten und den spinalen Parametern FCR oder Protrusionsgrad nachweisen.

Insgesamt ist daher davon auszugehen, dass das gefundene signifikante Ergebnis eher explorativen Charakter hat und nicht als Beweis für einen kausalen Zusammenhang zwischen DARA und Neuroforamenenge gewertet werden sollte. Zukünftige Studien mit größeren Fallzahlen und gezielten Hypothesenprüfungen wären erforderlich, um die Beobachtung zu bestätigen oder zu widerlegen, gerade mit dem Hinblick darauf, ob unilaterale Neuroforamenstenose mit einer ipsilateralen reduzierten acetabulären Überdachung einhergeht.

Der LCEA diene in dieser Studie zur Evaluierung der dorsalen Überdachung des Femurkopfes, welche maßgeblich zur Beurteilung des Hüftgelenkes beiträgt. In dieser Studie zeigte ein Großteil der Hunde einen pathologischen LCEA $< 99^\circ$, im Durchschnitt erreichten die Probanden nur einen LCEA von rund 92° . Der Referenzwert von 99° wurde in Anlehnung an Fujiki et al. gewählt, weil dieser nicht

rassespezifisch ist. Eine andere Studie wertet jedoch Hüftgelenke mit einem LCEA von $>94,2^\circ$ bereits als physiologisch [8]; sie bezieht sich auf rassespezifische Werte des Border Collies. Dies lässt die Frage aufkommen, wie sinnvoll ein nicht rassespezifischer LCEA ist, weil dieser im Zweifelsfall nichtzutreffend für bestimmte Probanden (wie zum Beispiel französische Bulldogge) ist. Man könnte für jede einzelne Rasse den spezifischen LCEA bestimmen, was jedoch in dieser Studie den zeitlichen Rahmen überschritten hätte und womöglich auch dadurch erschwert worden wäre, dass für weitaus nicht alle Rassen ein LCEA-Referenzwert bekannt ist. Eine alternative Erklärung für die niedrigen LCEA-Werte wäre, dass die untersuchten Probanden tatsächlich als HD positiv gewertet werden könnten, was jedoch damit verworfen werden kann, dass sich kein linearer Zusammenhang zwischen LCEA und FCR oder Protrusionsgrad der Bandscheibe nachweisen ließ. Des Weiteren zeigen die Probanden größtenteils physiologische DARA und CD-Werte.

Der CD wurde in dieser Studie zur quantitativen Erfassung der Hüftgelenkslaxizität herangezogen. Der Mittelwert lag rechts bei 0,15 und links bei 0,12, womit der überwiegende Teil der Hunde Werte im physiologischen Bereich unterhalb des in der Literatur beschriebenen Cut-offs von 0,22 erreichte. Diese Beobachtung deutet daraufhin, dass ein Großteil der untersuchten Probanden trotz bestehender Lumbosakraler Stenose keine ausgeprägte Hüftgelenkslaxizität im Sinne einer Hüft dysplasie aufwies. Interessanterweise zeigte sich in den Gruppenvergleichen ein signifikanter Unterschied der CD-Werte in den linken Hüftgelenken bei Hunden in Bezug auf Neuroforaminalstenose ($p = 0,012$). Tiere mit Foraminalstenose wiesen hierbei höhere CD-Werte auf als solche ohne Einengung (uni- oder bilateral). Ein vergleichbarer Effekt konnte in den rechten Hüftgelenken jedoch nicht nachgewiesen werden. Dieser einseitige Zusammenhang ist pathophysiologisch schwer erklärbar und sollte daher vorsichtig interpretiert werden. Darüber hinaus konnte in den weiteren Analysen weder lineare Zusammenhänge zwischen den CD-Werten und spinalen Parametern (FCR, Protrusionsgrad) noch signifikante Unterschiede in Abhängigkeit von LÜW oder S1 Konformation festgestellt werden. Insgesamt erscheint der CD daher in dieser Arbeit zwar als stabiler Parameter zur Beschreibung der Hüftgelenkskonfiguration, jedoch ohne systematische Assoziation zur lumbosakralen Pathologie.

Die morphologischen Parameter Arthrose, Gelenkkongruenz und Femurkopfform zeigten in der untersuchten Population eine gewisse Häufung pathologischer Befunde. So wiesen rund ein Viertel der Probanden arthrotische Zubildungen oder Inkongruenzen des Gelenkspalts auf, und bei etwa 15 % der Hunde wurden abgeflachte bzw. irreguläre Femurköpfe dokumentiert. Diese Veränderungen entsprechen dem typischen Bild sekundärer degenerativer Gelenkerkrankungen im Rahmen einer chronischen Hüft dysplasie und sind vor allem bei mittelgroßen bis großen Rassen mit zunehmendem Alter häufig anzutreffen.

In den statistischen Gruppenvergleichen zeigte sich jedoch, dass weder das Vorhandensein von Arthrose noch eine inkongruente Gelenkstellung oder eine pathologische Femurkopfform einen signifikanten Einfluss auf die spinalen Parameter FCR oder Protrusionsgrad hatten. Auch lineare Zusammenhänge zwischen diesen Hüftmerkmalen und der lumbosakralen Pathologie konnten nicht festgestellt werden. Damit deutet die vorliegende Arbeit darauf hin, dass morphologische Spätfolgen der Hüft dysplasie wie Arthrose zwar ein relevantes klinisches Problem darstellen, jedoch keine direkte Assoziation mit dem Ausmaß der lumbosakralen Stenose aufweisen.

u^b

Zu berücksichtigen ist hierbei, dass die genannten Parameter stark alters- und belastungsabhängig sind und daher interindividuell große Unterschiede bestehen können. Zudem sind sie im Vergleich zu den Winkelmessungen (DARA, LCEA) weniger sensitiv für subtile Veränderungen in der Gelenkmorphologie. Ihre Aussagekraft liegt daher eher in der qualitativen Beschreibung des degenerativen Gelenkstatus, während ein Zusammenhang zur Pathophysiologie der Lumbosakralregion anhand der vorliegenden Daten nicht gestützt werden konnte.

Die Auswertung des Fat-to-Canal Ratios (FCR) ergab in der vorliegenden Studie einen mittleren Wert von 0,046 und einen Median von 0,04. Referenzwerte sind für diesen Parameter noch nicht etabliert, auffallend ist jedoch, dass ein Großteil der Probanden (97,2%) mit gesicherter Lumbosakraler Stenose einen FCR unter 0,11 aufwies. Je geringer der Wert, desto stärker die Verdrängung des epiduralen Fettes um die Cauda equina. Dieser Befund legt nahe, dass ein FCR von 0,11 in dieser Studie als praktischer Schwellenwert (Cut-off) für das Vorliegen einer relevanten Einengung des Wirbelkanals im lumbosakralen Bereich gewertet werden kann. Es muss jedoch betont werden, dass dieser Wert zunächst populationsspezifisch ist und im Rahmen einer heterogenen, retrospektiven Kohorte ermittelt wurde. Daher besitzt der Cut-off explorativen Charakter und sollte in zukünftigen Studien mit größeren und rassespezifisch differenzierten Kollektiven prospektiv validiert werden, bevor er als diagnostischer Referenzwert etabliert werden kann.

Zur objektiven Beurteilung einer Kompression der Cauda equina sind in der Literatur verschiedene Parameter beschrieben. Mukherjee et al. (2017) [5] etablierten den sogenannten Fat Area Ratio (FAR), welcher das Verhältnis des epiduralen Fettanteils zur Wirbelkörperfläche beschreibt. Ein verminderter FAR deutet auf eine Reduktion des epiduralen Fettanteils im Verhältnis zur knöchernen Größe hin und wurde im Rahmen dessen Arbeit als Indikator für eine mögliche Kompression der Cauda equina interpretiert. Der FAR kann im Mittel Werte zwischen 0 und 0,35 annehmen [5]. FAR diente als Grundlage für die in dieser Studie generierte FCR (Fat-to-Canal Ratio). Statt die Fläche des epiduralen Fetts in Relation mit der Wirbelkörperfläche zu beurteilen, schien es sinnvoller, in dieser Studie die Fläche des epiduralen Fetts mit der Fläche des Wirbelkanals an der Stelle der stärksten Kompression zu beurteilen, um das Ausmaß der Kompression besser darstellen zu können. Der FAR nach Mukherjee et al. ist für den Labrador Retriever validiert, was diesen Parameter jedoch in der vorliegenden Studie durch eine hohe Varianz an Rassen nicht optimal nutzbar machte.

Die lineare Regressionsanalyse (ANOVA) mit FCR als zu erklärender Variable stellte sich als nicht signifikant ($p = 0,292$) heraus. Somit lässt sich äußern, dass die lineare Kombination der untersuchten Prädiktoren (Hüftparameter) keine signifikante Vorhersagekraft für den FCR besitzt.

Mittels Regression tree wurde versucht, Einflussfaktoren auf die zu erklärende Variable FCR zu finden. Der dadurch entstehende Baum besaß jedoch 0 Knoten, was daraufhin deutet, dass keiner der erhobenen Prädiktoren einen ausreichend starken Beitrag zur Differenzierung der Zielvariable (FCR) leistete, um eine sinnvolle Aufteilung zu generieren. Der Regressionsbaum ergab somit keine weitere Teilgruppen mit verbesserter Vorhersagekraft.

Die Diskusprotrusion hat in der vorliegenden Dissertation die Funktion, eine Cauda equina Kompression besser qualitativ darzustellen. Der mittlere Protrusionsgrad der Bandscheibe im Bereich L7 – S1 betrug 52% mit einer relativ homogenen Verteilung um diesen Mittelwert. Damit lag bei nahezu allen untersuchten Hunden eine relevante Vorwölbung der Bandscheibe vor, was im Einklang mit der klinischen Diagnose einer lumbosakralen Stenose steht. Die deutliche Protrusion über die Hälfte der Wirbelkanalhöhe hinaus verdeutlicht, dass die Bandscheibe in der Mehrzahl der Fälle eine zentrale Rolle in der Pathophysiologie der Erkrankung spielt, in dem sie maßgeblich zur Verdrängung des epiduralen Fettgewebes und zur Einengung der nervalen Strukturen beiträgt.

In den Gruppenvergleichen zeigten sich jedoch keine signifikanten Unterschiede des Protrusionsgrades in Abhängigkeit von den Hüftparametern (DARA, LCEA, CD) oder den morphologischen Kriterien wie Arthrose, Kongruenz oder Femurkopfform. Auch die Regressionsanalysen bestätigten, dass der Protrusionsgrad nicht durch die Hüftgelenkskonfiguration vorhergesagt werden konnte ($R^2 = 0,085$; $p = 0,153$). Somit ergab sich kein Hinweis auf eine systematische Assoziation zwischen Hüftdysplasie und dem Ausmaß der Bandscheibenprotrusion.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Diskusprotrusion in erster Linie Ausdruck einer lokal degenerativen Veränderung im lumbosakralen Übergang ist und weniger durch biomechanische Einflüsse aus der Hüftregion moduliert wird.

In der vorliegenden Studie wiesen 54% der Probanden einen Lumbosakralen Übergangswirbel auf (Grad 1 - 3). In einer retrospektiven Studie von Flückiger et al. (2006) [12] zeigten 16,3 % der Hunde mit klinisch diagnostiziertem CES (Cauda equina Syndrom) ein LTV (Lumbal Transitional Vertebra), während dieser nur bei 3,5 % der radiologisch untersuchten Kontrolltiere ohne neurologische Symptome vorlag. Deren Analyse ergab, dass das Vorliegen eines LTV das Risiko für die Entwicklung eines CES um das Achtfache erhöht. Dies lässt sich mit den Ergebnissen dieser Studie vereinbaren, in der über die Hälfte der Probanden mit diagnostizierter Lumbosakraler Stenose einen LÜW vorwies.

Eine weitere Studie von Flückiger et al. (2016) [15] untersuchte den Einfluss von lumbosakralen Übergangswirbeln auf die Hüftgesundheit von Hunden, in dem 4000 Röntgenbilder retrospektiv ausgewertet wurden. Diese wurden ursprünglich zur HD-Diagnostik von der Dysplasie Kommission der Vetsuisse der Universität Zürich ausgewertet. Eine asymmetrische Ausprägung des lumbosakralen Übergangswirbels schien eine einseitige dysplastische Hüftentwicklung begünstigen: Bei deutlich asymmetrischen LÜW-Typen fand Flückiger et al. eine signifikant schlechtere Hüftkonformation auf der Seite mit intermediär/sakral geformtem Querfortsatz ($p < 0,01$), was u. a. über eine Rotation/Elevation des Beckens und daraus resultierende verminderte acetabuläre Überdachung erklärt wird; der Seitenunterschied entsprach im Mittel bis zu einer FCI-Gradstufe. Diese Konstellation ist nicht zwangsläufig mit einer lumbosakralen Stenose vergesellschaftet, markiert aber eine spezielle Ausnahme, in der die Morphologie des lumbosakralen Überganges und Hüftgelenksdysplasie funktionell aufeinander einwirken können, obwohl sie im Regelfall als unabhängige Entitäten zu betrachten sind.

Eine Limitation stellt in dieser Dissertation das Fehlen einer Kontrollgruppe dar. Es wurden nur Hunde mit gesicherter LSS untersucht, wodurch die Vergleichsbasis mit gesunden Hunden fehlt. Dies reduziert die Aussagekraft zu kausalen Zusammenhängen. Die Durchführung einer prospektiven Studie mit Kontrollgruppe wäre von großem Interesse, um die Ergebnisse dieser Dissertation zu validieren.

Ein weiterer limitierender Faktor der vorliegenden Untersuchung war die unterschiedliche Schichtdicke der CT-Aufnahmen, die zwischen 0,5 und 3 mm variierte. Diese Heterogenität hatte direkte Auswirkungen auf die Auswertbarkeit der Bilddaten in sagittalen oder dorsalen Rekonstruktionen. Während bei dünneren Schichtdicken (0,5–1 mm) eine präzisere Darstellung der anatomischen Strukturen und somit eine verlässlichere Messung in allen multiplanar rekonstruierten Ebenen möglich war, führten größere Schichtdicken (bis 3 mm) zu einer Reduktion der Detailgenauigkeit. Dadurch war die Beurteilbarkeit einzelner Parameter eingeschränkt und in manchen Fällen sogar nicht mehr möglich. Diese technische Variabilität erschwert die Vergleichbarkeit der Ergebnisse innerhalb der Studienpopulation und stellt eine relevante methodische Limitation dar, die bei der Interpretation der Resultate berücksichtigt werden muss.

Ein weiterer Aspekt, der die Aussagekraft der Ergebnisse beeinflusst, betrifft die Methodik der Messung des epiduralen Fettgewebes. Diese wurde händisch durchgeführt und erfolgte nicht computergestützt. Zudem wurde auf die Messung der Hounsfield-Einheiten verzichtet. Dadurch war es zwar möglich, die Flächenanteile des Fettgewebes im Wirbelkanal darzustellen, jedoch nicht, die Gewebsdichte objektiv zu quantifizieren. Somit bleibt eine gewisse Subjektivität in der Beurteilung bestehen, die die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Messungen einschränken kann.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Befunderhebung und Bildauswertung nach einer Trainingsphase ausschließlich durch die Autorin durchgeführt. Zwar wurden einzelne Fragestellungen in Rücksprache mit einer geboardeten Radiologin diskutiert, jedoch erfolgte keine systematische Zweitbeurteilung des gesamten Bildmaterials. Dadurch besteht ein potenzielles Risiko von Beobachterbias und interindividuellen Bewertungsunterschieden, die bei einer unabhängigen Doppelbefundung hätten abgefangen werden können. Diese Einschränkung sollte bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden, auch wenn durch die enge Abstimmung mit der Radiologie eine gewisse Qualitätssicherung gewährleistet war.

5. Fazit und Ausblick

u^b

Die vorliegende Untersuchung konnte trotz umfassender Analyse etablierter und neu entwickelter CT-Parameter keinen systematischen Zusammenhang zwischen Hüftgelenksdysplasie und lumbosakraler Stenose beim Hund nachweisen. Weder lineare Regressionsanalysen noch Gruppenvergleiche zeigten konsistente Assoziationen zwischen Hüftparametern wie DARA, LCEA oder CD und spinalen Kriterien wie FCR, Diskusprotrusion oder Neuroforaminaenge.

Diese Ergebnisse sprechen dafür, dass es sich bei den Erkrankungen überwiegend um eigenständige pathologische Prozesse handelt, die zwar in derselben klinischen Population auftreten können, jedoch nicht direkt miteinander verknüpft sind. Die Arbeit liefert somit wichtige Evidenz, dass die HD nicht als Risikofaktor für die Entwicklung einer LSS betrachtet werden sollte.

Für die Zukunft erscheint es sinnvoll, größere, rassespezifisch homogenere Populationen einzuschließen und prospektive Studien mit Kontrollgruppen durchzuführen, um die hier gewonnenen Erkenntnisse weiter zu validieren. Von Interesse könnte des Weiteren die Untersuchung von Asymmetrischen LÜW und das Auftreten von lumbosakraler Stenose sein.

6. Literaturverzeichnis

- u^b**
- [1] Carballo O, Frederick SW, Keys DA, Moore SA, Giles JT. Preliminary evaluation of a novel method for computed tomography quantification of lumbosacral articular process displacement in dogs with and without degenerative lumbosacral stenosis. *Frontiers in veterinary science* 2024;11:1436299.
 - [2] Alilovic I, Rukavina D, Ajanovic A, Eterovic T, Milosevic H, Ohran H et al. Breed-specific evaluation of serum biochemical markers in canine hip dysplasia observed in a Tornjak dog population. *American journal of veterinary research* 2023;84(11).
 - [3] Ardicli S, Yigitgor P, Babayev H, Ozen D, Bozkurt B, Senturk N et al. The markers of the predictive DNA test for canine hip dysplasia may have a stronger relationship with elbow dysplasia. *Heliyon* 2024;10(18):e37716.
 - [4] Ramirez O, Thrall DE. A review of imaging techniques for canine cauda equina syndrome. *Veterinary radiology & ultrasound* 1998;39(4):283–96.
 - [5] Mukherjee M, Jones JC, Holásková I, Raylman R, Meade J. Phenotyping of lumbosacral stenosis in Labrador retrievers using computed tomography.
 - [6] Tilley LP, Smith FWK, Sleeper MM, Brainard BM (eds.). *Blackwell's five-minute veterinary consult: Canine and feline*. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell; 2021.
 - [7] Flückiger MA, Damur-Djuric N, Hässig M, Morgan JP, Steffen F. A lumbosacral transitional vertebra in the dog predisposes to cauda equina syndrome. *Veterinary radiology & ultrasound the official journal of the American College of Veterinary Radiology and the International Veterinary Radiology Association* 2006;47(1):39–44.
 - [8] Kishimoto M, Yamada K, Pae S-H, Muroya N, Watarai H, Anzai H et al. Quantitative evaluation of hip joint laxity in 22 Border Collies using computed tomography. *The Journal of veterinary medical science* 2009;71(2):247–50.
 - [9] Fujiki M, Misumi K, Sakamoto H. Laxity of canine hip joint in two positions with computed tomography. *The Journal of veterinary medical science* 2004;66(8):1003–6.
 - [10] Ballegeer EA. Computed Tomography of the Musculoskeletal System. *The Veterinary clinics of North America. Small animal practice* 2016;46(3):373-420, v.
 - [11] Lichtenhahn V, Richter H, Gödde T, Kircher P. Evaluation of L7-S1 nerve root pathology with low-field MRI in dogs with lumbosacral foraminal stenosis. *Veterinary surgery VS* 2020;49(5):947–57.
 - [12] Flückiger M, Geissbühler U, Lang J. Lumbosakrale Übergangswirbel: Welche Bedeutung haben sie für die Gesundheit von betroffenen Hunden? *Schweizer Archiv für Tierheilkunde* 2009;151(3):133–5.
 - [13] gkf - Gesellschaft zur Förderung Kynologischer Forschung. Übergangswirbel bei der Zucht berücksichtigen: Abschlussbericht 2018; 2018.
 - [14] Decker S de, Rohdin C, Gutierrez-Quintana R. Vertebral and spinal malformations in small brachycephalic dog breeds: Current knowledge and

remaining questions. Veterinary journal (London, England 1997)
2024;304:106095.

- [15] Flückiger MA, Steffen F, Hässig M, Morgan JP. Asymmetrical lumbosacral transitional vertebrae in dogs may promote asymmetrical hip joint development. Veterinary and comparative orthopaedics and traumatology V.C.O.T 2017;30(2):137–42.

u^b

7. Anhang - Rohdaten

Hüftparameter

Proband Nr.	DARA rechts < 15 - 20° normal	DARA links	LCEA rechts ≥99° normal	LCEA links	CD rechts < 0,22 normal	CD links	Kongruenz Hüftgelenk rechts 0: kongruent 1: inkongruent	Kongruenz links	Form Femurkopf rechts 0: rund, regelmässig 1: abgeflacht und/oder unregelmässig	Form Femurkopf links	arthrotische Zubildungen rechts 0: keine 1: arthrotische Veränderungen an Femurkopf und /oder Acetabulum	arthrotische Zubildungen links
1	15	12	92	93	0,19	0,23	0	0	0	0	0	0
2	28	21	84	93	0,24	0,18	1	0	1	0	1	0
3	13	15	95	94	0,09	0,14	0	0	0	0	0	0
4	14	11	93	93	0,08	0,17	0	0	0	0	0	0
5	12	12	95	96	0,06	0,02	1	1	0	0	1	1
6	12	12	92	96	0,19	0,17	0	0	0	0	0	0
7	15	16	87	90	0,09	0,09	1	nicht auswertbar	1	1	1	1
8	24	24	80	88	0,29	0,19	1	0	0	0	0	0
9	22	24	84	82	0,26	0,11	0	0	0	0	0	0
10	2	8	99	95	0,22	0,11	0	0	0	0	0	0
11	36	35	83	80	0,08	0,04	1	1	1	1	1	1
12	46	52	76	74	0,34	0,28	1	1	1	1	1	1
13	16	16	88	89	0,17	0,1	0	0	0	0	0	0
14	1	1	98	99	0,21	0,11	0	0	0	0	0	0
15	10	14	88	98	0,12	0,08	0	0	0	0	1	0
16	5	7	100	105	0,12	0,1	0	0	0	0	0	0
17	9	9	94	99	0,11	0,12	0	0	0	0	0	1
18	29	44	82	78	0,12	0,07	0	1	0	1	0	1
19	12	27	87	88	0,08	0,16	0	0	0	0	1	0
20	16	17	88	86	0,22	0,12	0	0	0	0	0	0
21	9	12	95	96	0,19	0,05	0	0	0	0	0	0
22	11	11	93	90	0,19	0,23	nicht auswertbar	nicht auswertbar	0	0	0	0
23	26	16	80	90	0,1	0,21	1	0	1	1	1	1
24	3	4	103	96	0,17	0,17	0	0	0	0	0	0
25	11	9	95	103	0,09	0,14	1	1	0	0	0	0

u^b

26	20	35	91	79	0,07	0,07	1	1	1	1	1	1
27	6	16	94	95	0,11	0,09	0	0	0	0	0	0
28	24	19	94	91	0,17	0,16	0	0	0	0	1	1
29	22	22	93	92	0,06	0,09	0	0	0	0	0	0
30	57	57	80	80	0,06	0,2	1	1	1	1	1	1
31	16	20	91	91	0,14	0,16	nicht auswertbar	Nicht auswertbar	0	0	0	0
32	5	6	100	100	0,15	0,06	0	0	0	0	0	0
33	14	15	93	93	0,11	0,14	0	0	0	0	0	0
34	19	27	89	85	0,14	0,16	0	0	1	1	0	0
35	26	28	86	85	0,24	0,17	0	0	0	0	0	0
36	15	28	89	93	0,25	0,24	1	1	0	0	0	0
37	14	24	87	87	0,13	0,06	1	0	1	1	1	1
38	13	22	90	92	0,12	0,12	nicht auswertbar	nicht auswertbar	0	0	0	0
39	21	20	87	88	0,16	0,1	0	0	0	0	0	0
40	4	6	100	99	0,16	0,07	nicht auswertbar	Nicht auswertbar	0	0	0	0
41	8	9	95	92	0,23	0,1	1	0	1	1	0	0
42	18	24	88	91	0,05	0,9	0	1	0	0	0	1
43	6	5	95	101	0,23	0,14	0	0	0	0	0	0
44	10	8	96	91	0,17	0,14	0	0	0	0	0	0
45	0	6	111	103	0,07	0,06	0	0	0	0	1	1
46	18	13	85	89	0,11	0,08	0	0	0	0	0	0
47	25	20	81	90	0,11	0,13	1	nicht auswertbar	0	0	1	0
48	8	10	99	98	0,13	0,01	0	0	0	0	0	0
49	27	45	99	76	0,42	0,27	1	1	1	1	1	1
50	4	14	96	95	0,15	0	0	0	0	0	0	0
51	7	3	107	98	0,1	0,18	0	0	0	0	0	0
52	5	4	102	100	0,1	0,12	0	0	0	0	0	0
53	7	6	97	94	0,13	0,11	0	0	0	0	0	0
54	25	22	86	87	0,11	0,11	0	0	0	0	1	0
55	3	7	92	90	0,16	0,13	0	0	0	0	0	0
56	3	7	105	102	0,1	0,05	0	0	0	0	1	1
57	10	10	91	91	0,11	0,1	0	0	0	0	0	0
58	5	12	94	95	0,1	0,18	0	0	0	0	0	0
59	3	1	97	98	0,22	0,19	0	0	0	0	0	0
60	4	5	98	96	0,11	0,11	0	0	0	0	0	0

61	9	11	89	91	0,26	0,11	0	0	0	0	1	0
62	-2	-3	98	99	0,26	0,18	1	0	0	0	1	1
63	10	4	97	99	0,11	0,15	0	0	0	0	0	0
64	18	23	84	84	0,1	0,17	0	0	0	0	0	0
65	6	1	192	101	0,13	0,11	0	0	0	0	0	0
66	9	8	98	102	0,09	0,06	0	0	0	0	0	0
67	13	15	89	89	0,13	0,12	0	0	0	0	1	0
68	3	0	98	103	0,19	0,08	0	0	0	0	0	0
69	17	14	92	93	0,11	0,09	0	0	0	0	0	0
70	5	5	101	99	0,04	0,07	0	0	0	0	0	0
71	6	7	98	105	0,16	0,17	0	0	0	0	0	0
72	6	7	96	101	0,11	0,11	0	0	0	0	1	1
73	2	10	93	93	0,35	0,34	1	1	0	1	0	1

Parameter Lumbosakraler Übergang

Proband Nr.	FCR Fat Canal Ratio	Bandscheiben- konstitution prozentualer Anteil der Protusion an Wirbelkanaldurchmesser	Einengung Neuroforamina sowohl einseitig als auch beidseitig 0: nein 1: ja	Subluxation / deg. Veränderungen Facettengelenk 0: nein 1: ja	LÜW 0: Grad 0 1: Grad 1 - 3	Kompression Nervenwurzel/ dorsale Verlagerung L7 oder kaudale NW 0: nein 1: ja	Konformation dorsale Lamina S1 0: normal 1: ventrale Abkipfung / Stufenbildung
1	0,06	38	1	0	0	1	0
2	0,03	54	1	0	0	1	0
3	0,06	45	1	0	0	1	0
4	0,07	60	0	0	1	1	1
5	0,02	71	1	0	1	0	1
6	0,04	54	1	1	0	0	0
7	0,02	39	1	0	0	1	0
8	0	30	1	0	1	nicht auswertbar	0
9	0,1	nicht auswertbar	1	1	3	0	1
10	0,05	72	0	0	0	0	0
11	0,18	65	1	0	0	1	0
12	0	59	1	1	2	nicht auswertbar	1
13	0,03	37	1	1	0	0	1

u^b

14	0,05	58	1	0	0	0	0
15	0	72	1	1	3	1	1
16	0,05	66	1	0	0	1	0
17	0,05	69	1	0	1	1	0
18	0,01	59	1	1	1	nicht auswertbar	1
19	0,1	89	1	0	0	1	0
20	0,03	69	1	0	1	1	1
21	0,01	54	1	0	1	0	1
22	0,04	38	1	1	0	1	0
23	0,04	38	1	1	0	1	0
24	0,03	78	1	0	0	1	0
25	0	27	1	0	2	1	1
26	0,07	69	1	0	0	1	0
27	0,09	33	1	0	1	1	0
28	0,02	86	1	1	0	1	0
29	0,07	46	0	0	1	0	0
30	0,03	26	1	0	1	1	0
31	0,09	52	1	0	0	1	0
32	0,1	56	1	1	0	1	1
33	0,03	33	1	0	0	1	0
34	0,04	35	1	0	0	1	0
35	0	17	1	0	1	1	0
36	0,02	50	1	1	1	1	0
37	0,06	40	1	0	1	0	0
38	0,1	40	1	0	0	1	0
39	0,02	51	1	0	0	1	0
40	0,1	39	1	1	0	1	0
41	0,16	32	0	0	0	1	0
42	0,07	76	1	0	1	0	0
43	0	56	1	0	1	1	0
44	0	70	1	0	1	0	1
45	0,07	55	0	0	0	1	0
46	0,08	63	0	0	0	1	0
47	0,09	59	1	0	1	1	0
48	0,04	53	0	0	1	1	0

u^b

49	0	71	1	0	0	1	1
50	0,02	51	1	0	1	0	0
51	0,03	29	1	1	2	1	1
52	0,01	72	1	0	0	1	0
53	0,05	33	1	0	2	1	0
54	0	80	1	0	2	1	1
55	0,03	32	1	0	1	1	1
56	0,04	47	0	1	0	1	0
57	0,02	40	0	0	1	1	0
58	0,02	65	1	0	1	1	1
59	0,04	43	1	0	1	0	0
60	0,03	68	1	0	1	0	0
61	0	50	0	0	1	1	0
62	0,09	44	1	1	1	1	1
63	0,08	58	0	0	1	0	0
64	0,09	69	1	0	2	1	1
65	0,01	38	1	0	3	1	0
66	0,03	43	1	0	0	1	1
67	0,05	45	0	0	1	0	1
68	0,07	47	0	0	1	1	0
69	0,09	45	1	0	1	1	0
70	0,02	57	0	0	1	1	1
71	0,07	53	1	1	0	0	0
72	0,06	39	1	1	0	0	0
73	0,03	59	1	1	0	1	0

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Menschen bedanken, die zum Gelingen dieser Dissertation in besonderem Maße beigetragen haben.

u^b

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. med. vet. Franck Forterre für die Übernahme der Betreuung dieser Arbeit sowie für die Möglichkeit, diese Dissertation an der Kleintierklinik Bern anzufertigen. Ebenso danke ich Dr. med. vet. Christina Precht für die kompetente fachliche Begleitung, die stets offene Kommunikation und die freundliche Unterstützung während der gesamten Bearbeitungszeit.

Für die Bereitstellung der klinischen Daten sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen danke ich Dr. med. vet. Dipl. ECVS Kai Morich ganz herzlich. Die Durchführung dieser retrospektiven Studie wäre ohne seine Unterstützung nicht möglich gewesen.

Ein besonderer Dank gilt auch meinem Lebenspartner Elias – für seine beständige Unterstützung, seinem offenen Ohr, seine Geduld und all das, was er Tag für Tag für uns tut. Ohne ihn wäre diese Zeit nicht die Gleiche gewesen.

Von Herzen danke ich auch meinen Eltern, die immer an mich glauben und hinter mir stehen – in allen Lebenslagen. Meinem Stiefvater, der als Mathematiker ein wertvoller Ansprechpartner bei der statistischen Auswertung dieser Arbeit war, danke ich ganz besonders für seine Zeit, Geduld und Expertise.

Eigenständigkeitserklärung

u^b

Ich, erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäss aus Quellen entnommen wurden, habe ich als solche gekennzeichnet.
Mir ist bekannt, dass andernfalls der Senat gemäss Artikel 36 Absatz 1 Buchstabe r des Gesetzes über die Universität vom 5. September 1996 und Artikel 69 des Universitätsstatuts vom 7. Juni 2011 zum Entzug des Dokortitels berechtigt ist. Für die Zwecke der Begutachtung und der Überprüfung der Einhaltung der Selbständigkeitserklärung bzw. der Reglemente betreffend Plagiate erteile ich der Universität Bern das Recht, die dazu erforderlichen Personendaten zu bearbeiten und Nutzungshandlungen vorzunehmen, insbesondere die Dissertation zu vervielfältigen und dauerhaft in einer Datenbank zu speichern sowie diese zur Überprüfung von Arbeiten Dritter zu verwenden oder hierzu zur Verfügung zu stellen.

Bern, 21.10.2025

Ort, Datum



Unterschrift Doktorand*in