

Aus der Klinik für Pferdechirurgie  
der Veterinärmedizinischen Universität Wien

(Leitung: Univ.-Prof. Dr. Florian Jenner, Dipl. ACVS Dipl. ECVS)

**Vermessungen der Dimensionen des Arcus  
terminalis und des Dichteverlaufs des umliegenden  
Knochens innerhalb des Hufbeines an den  
Vorderextremitäten vergleichend bei Pferden mit  
und ohne Hufrehe**

Diplomarbeit

Veterinärmedizinische Universität Wien

vorgelegt von

Alexandra vom Heede

Wien, November 2023

## **Betreuerin**

Ao. Univ.-Prof<sup>in</sup> Dipl.ACVS MR Dipl.ECVS MR Dr<sup>in</sup> med. vet. Theresia Licka

Universitätsklinik für Pferde, Klinische Abteilung für Pferdechirurgie

Department für Kleintiere und Pferde

Veterinärmedizinische Universität Wien

## **Gutachter**

Ao. Univ.- Prof. Dipl. ECBHM Dr. med. vet. Johann Kofler

Universitätsklinik für Wiederkäuer, Klinische Abteilung für Wiederkäuermedizin

Department für Nutztiere und öffentliches Gesundheitswesen

Veterinärmedizinische Universität Wien

# Inhalt

1. Einleitung.....	1
2. Literaturübersicht.....	3
2.1 Die Hufkapsel (Capsula unguiae).....	3
2.2 Das Hufbein (Os unguiae).....	4
2.3 Der Hufbeinträger (Apparatus suspensorius ossis unguiae).....	6
2.4 Röntgenuntersuchung des Hufes.....	7
2.5 Blutversorgung des Hufs an der Vorderextremität.....	9
3. Material und Methoden.....	11
3.1 Akquirieren der Probanden.....	11
3.2 Überprüfung der Probanden nach Studienanforderungen.....	11
3.3 Durchführung der Messungen.....	14
3.4 Statistische Auswertung.....	18
4. Ergebnisse.....	22
4.1 Vergleich der Größe des Arcus terminalis bei chronischen Hufrehe-Pferden und Podotrochlose-Pferden.....	23
4.2 Vergleich der Dichte um die Foramina nutritia bei chronischen Hufrehe-Pferden und Podotrochlose-Pferden.....	25
4.3 Einfluss des Winkels vom Hufbein in der Hufkapsel auf die Größe der Foramina nutritia und die Dichte des umliegenden Knochens.....	28
4.4 Zusammenhang zwischen Größe der Foramina, Dichte und weiteren erhobenen Parametern wie Grad der Rehe, Körpermasse und Alter.....	29
5. Diskussion.....	32
5.1 Dislokation des Hufbeins in der Hufkapsel.....	32
5.2 Zusammenhang der Dislokation des Hufbeins mit den Foraminagrößen.....	33
5.3 Zusammenhang der Dislokation des Hufbeins mit der Dichte.....	34
5.4 Zusammenhang des erhöhten digitalen Blutflusses und der verstärkten Pulsation mit den Foraminagrößen und der Dichte.....	34
5.5 Weitere Zusammenhänge.....	36
5.6 Limitationen.....	37
6. Zusammenfassung.....	39
6.1 Summary.....	40
7. Literatur.....	41
8. Abbildungen.....	44
9. Tabellen.....	45
10. Anhang.....	i

# 1. Einleitung

Nach der Kolik gilt Hufrehe als die häufigste Todesursache bei Pferden <sup>(1)</sup>. Equine Hufrehe ist eine fatale und eine in der Klinik immer stärker wahrgenommene Krankheit des Hufes. Die heutige Forschung fokussiert sich dabei vermehrt auf die pathologischen Vorgänge im Huf und versucht herauszufinden, wie die Entzündung des Hufbeinträgers im Detail abläuft <sup>(2)</sup>.

Nach aktuellem medizinischem Wissensstand ist bekannt, dass Hufrehe hauptsächlich als Folge endokrinologischer Erkrankungen mit einhergehender Hyperinsulinämie verursacht wird, aber auch durch das *Systemic Inflammatory Response Syndrome* (SIRS) oder durch Überbelastung. Weniger häufig treten traumatische Ereignisse als Ursache auf <sup>(3)</sup>.

Eine Studie aus Dänemark zeigte, dass 33 % der Pferde mit endokrinologisch ausgelöster Hufrehe innerhalb von zwölf Monaten euthanasiert werden mussten <sup>(4)</sup>. Weltweite Studien zeigen, dass die Krankheit bei 34 % der betroffenen Pferde innerhalb von zwei Jahren rezidiert <sup>(5)</sup>. Es ist daher wichtig, Hufrehe noch genauer zu verstehen, um weitere Therapiemaßnahmen zu entwickeln und mehr Pferde vor einem fatalen Ausgang der Erkrankung zu bewahren.

In der folgenden Arbeit liegt der Fokus auf zwei wichtigen pathologischen Veränderungen im Fuß des Hufrehe-Pferdes: der Dislokation des Hufbeins <sup>(6)</sup> und dem erhöhten digitalen Blutfluss mit einer verstärkten Pulsation im Zuge der akuten Entzündungsreaktion <sup>(7)</sup>. Der Blutfluss, und damit der Blutdruck, korreliert mit der Knochendichte <sup>(8)</sup>. Der Knochen passt sich dabei der auf ihn ausgeübten Belastung an und wird unter stärkerer Belastung auch stabiler <sup>(9)</sup>.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die röntgenologischen und pathologischen Veränderungen um den Arcus terminalis im Hufbein, welche mit der Erkrankung Hufrehe einhergehen, genauer zu erfassen. Der Fokus wird auf die Größe der Foramina nutritia und die umschließende Knochendichte gelegt. Zu diesem Zweck werden Größenmessungen der Foramina nutritia im Hufbein vorgenommen und die umgebende Knochendichte gemessen. Die Studie wurde anhand zweier Gruppen durchgeführt: Pferde, die an Hufrehe erkrankt waren und die Kontrollgruppe mit Pferden, die an Podotrochlose erkrankt waren.

Basierend auf dem Kenntnis der zuvor genannten Veränderungen, welche mit der Entwicklung der Krankheit einhergehen und den Reaktionen eines Knochens auf bestimmte Stimuli, wird erwartet, dass folgende zwei Phänomene auftreten: Die Foramina nutritia am Hufbein bei

Hufrehe-Pferden sind vergrößert bzw. erweitert und die Dichte des Knochens in unmittelbarer Nähe des Gefäßes ist erhöht. Diese Theorien werden anhand der folgenden Studie überprüft.

Um das Ziel dieser Arbeit zu erreichen, werden folgende Schritte durchgeführt: Die anatomischen Grundlagen für die Studie werden erläutert, anschließend folgt eine Beschreibung des Ablaufs der Studie, ihre Auswertung sowie die Interpretation der gewonnenen Ergebnisse.

## 2. Literaturübersicht

Das folgende Kapitel vermittelt die anatomischen Grundlagen dieser Arbeit. Dabei wird genauer auf die Hufkapsel, das Hufbein und den Hufbeinträger eingegangen. Die Röntgenaufnahmen am Fuß des Pferdes und die Blutgefäßversorgung des Vorderfußes werden ebenfalls näher beschrieben.

### 2.1 Die Hufkapsel (*Capsula unguiae*)

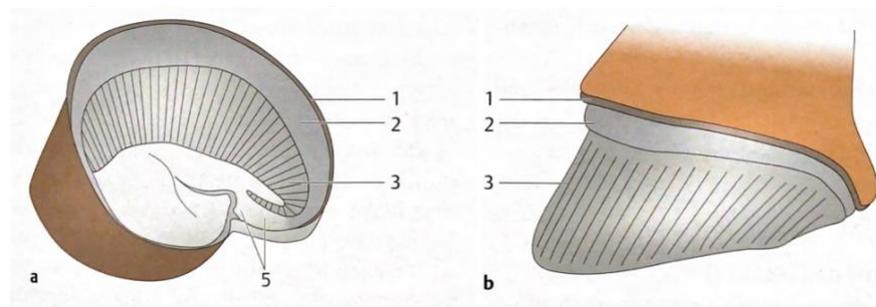
Der adspektorisch wahrnehmbare Anteil des Hufs wird als Hufkapsel bezeichnet. Diese umschließt als differenzierte Haut die tiefer befindlichen Strukturen. In ihr liegt das Hufbein, der Hufknorpel, der Hufrollenschleimbeutel, das Hufgelenk, das Strahlbein sowie zahlreiche Sehnen, Bänder, Nerven und Gefäße<sup>(10)</sup>.

Die Hufkapsel besteht aus Horngewebe. Ihre Anteile werden unterteilt in die Hufwand und einen Basisteil. Die Wand besteht aus einem Vorderteil, auch Hufriemen genannt, den Seitenanteilen sowie dem Trachtenanteil. Der Basisteil der Hufkapsel wird unterteilt in Sohlenhorn, Strahlhorn und Ballenhorn. Die Kapsel dient dem Schutz der im Huf befindlichen Strukturen sowie der Weitergabe der auf den Huf einwirkenden Kräfte. Die äußerste Schicht der Kapsel wird von den toten Zellen der Epidermis gebildet. Diese werden durch Apoptose der darunterliegenden, lebenden epidermalen Schicht kontinuierlich nachgeschoben. Die abgestorbenen Zellen formen sich zu Hornzellblockchen zusammen, bestehend aus Keratinfilamenten, welche über Disulfidbrücken mit Proteinen verbunden sind. Zusammen mit dem Zwischenzellkitt formen sie die Hornmasse<sup>(11)</sup>.

Unter der Epidermis liegt, verbunden über eine Basalmembran, die Dermis. Diese besteht aus dicht zusammengelagertem Bindegewebe. In dieser Schicht befinden sich die ernährenden Blut- und Lymphgefäße, welche auch die Epidermis mittels Diffusion versorgen. An der parietalen Oberfläche des Hufbeins ist die Subcutis nur minimal ausgebildet, palmar bildet sie das Hufkissen<sup>(12)</sup>. Die am Huf gegensätzlich zur restlichen am Körper vorkommenden Unterhaut dient der Polsterung und verhindert die Verschiebung gegenüber den anderen Schichten<sup>(11)</sup>.

Anhand anatomischer Unterschiede lässt sich das Horn an der Hufkapselwand in drei weitere Untereinheiten teilen: das Saumsegment (*Limbus*), das Kronsegment (*Corona*) und das bluttraghende Wandsegment (*Paries*)<sup>(11)</sup>.

Das Saumsegment ist das am weitesten proximal gelegene Segment und gleicht in seiner Form einem nach palmar offenem Ring. In diesem Segment befindet sich das Saumröhrenchorn. Dieses ist verglichen mit den anderen Hornarten am Huf relativ weich. Das kommt daher, dass es vor allem der Regulation des Wasserhaushalts des Hufs dient und die Fähigkeit besitzt, sich auszudehnen. Das breitere, weiter distal gelegene Kronsegment bildet das 3-schichtige Kronhorn, welches je nach anatomischer Funktion unterschiedlich große bzw. sich in der Form unterscheidende Röhren bildet. Die äußerste Schicht hat horizontalen Druck am besten Stand, die mittlere Schicht ist eine Verbindungsschicht und die innerste ist die elastischste und federt Zugkräfte ab. Das bluttraghendste Segment ist das größte, schließt distal an das Kronsegment an und reicht bis zum Rand der Sohle, siehe Abb. 1<sup>(11)</sup>.



**Abbildung 1:** Ausgeschuhter Huf<sup>(11)</sup>: Segmenteinteilung am Huf, Hornkapsel (links), Lederhautoberfläche (rechts) 1: Saumsegment, 2: Kronsegment, 3: Wandsegment, 5: Strahl-Ballensegment

## 2.2 Das Hufbein (*Os ungulare*)

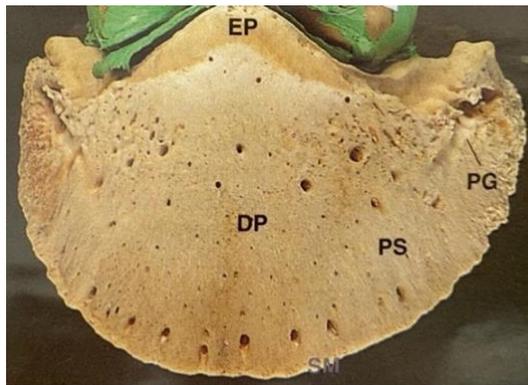
Die Vorderzehenknochen (*Ossa digitorum manus*) bestehen beim Pferd aus Fesselbein (*Os compendale*), Kronbein (*Os coronale*), Hufbein (*Os ungulare*) und drei Sesambeinen (*Ossa sesamoidea*)<sup>(13)</sup>. Der eigentliche Fuß des Pferdes umfasst den distalen Teil des Kronbeins, das Hufbein sowie das Strahlbein.

Das Hufbein der Vorderextremität wird unterteilt in eine parietale, dorsale Oberfläche (*Facies parietalis*), eine soleare, palmare Oberfläche (*Facies solearis*) und eine artikulierende Fläche (*Facies articularis*), welche wiederum in zwei funktionale Bereiche aufgeteilt ist. Eine Fläche artikuliert mit dem Kronbein und eine kleinere mit dem Strahlbein<sup>(12)</sup>. Das Aufeinandertreffen der parietalen Fläche mit der solearen Fläche wird als Tragrand (*Margo solearis*) bezeichnet. Der Tragrand weist zu beiden palmaren Rändern Hufbeinäste auf (*Processus palmaris lateralis et medialis*), welche durch die *Incisura processus palmaris* in zwei Anteile geteilt wird, einen

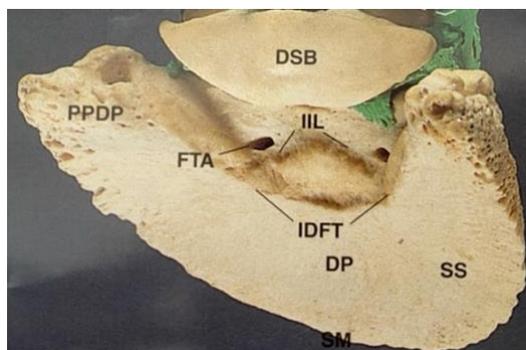
proximalen und einen distalen. Am dorsalen Rand liegen diesen Processus die Hufbeinknorpel auf. Zudem gibt es am Tragrand bei einigen Pferden noch eine in der Medianen gelegene Tragrandkerbe (*Crena marginis solearis*). Die Stelle, an der die parietale Fläche auf die artikulierende Fläche trifft, wird als Kronrand (*Margo coronalis*) bezeichnet. Am Kronrand findet sich in der Medianen dorsal der Streckfortsatz (*Processus extensorius*)<sup>(13)</sup>.

Die parietale Fläche verfügt über eine raue Oberfläche, welche einer effizienteren Verbindung mit dem anliegenden Weichteilgewebe dient, hauptsächlich der sublamellaren Dermis. Da die Dermis mit Nährstoffen versorgt werden muss, kommen zudem zahlreiche, das Hufbein perforierende Löcher an der parietalen Oberfläche vor, welche Blutgefäße führen, siehe Abb. 2. An der palmaren Fläche des Hufbeins finden sich zwei größere Foramina, welche den Eintritt der palmaren digitalen Arterien in den Knochen kennzeichnen, siehe Abb. 3<sup>(11)</sup>.

Die eintretenden Gefäße bilden den Arcus terminalis des Hufbeins. Die soleare Fläche wird durch die *Linea semilunaris* in ein größeres craniales *Planum cutaneum* und die caudal gelegene *Facies flexoria* unterteilt. An der *Facies flexoria* inseriert die tiefe Beugesehne<sup>(13)</sup>.



**Abbildung 2:** Hufbein, dorsale Ansicht<sup>(14)</sup>  
 EP: Processus extensorius, DP: distaler Phalanx,  
 PS: Wulst des Hufbeins, PG: parietaler Sulcus

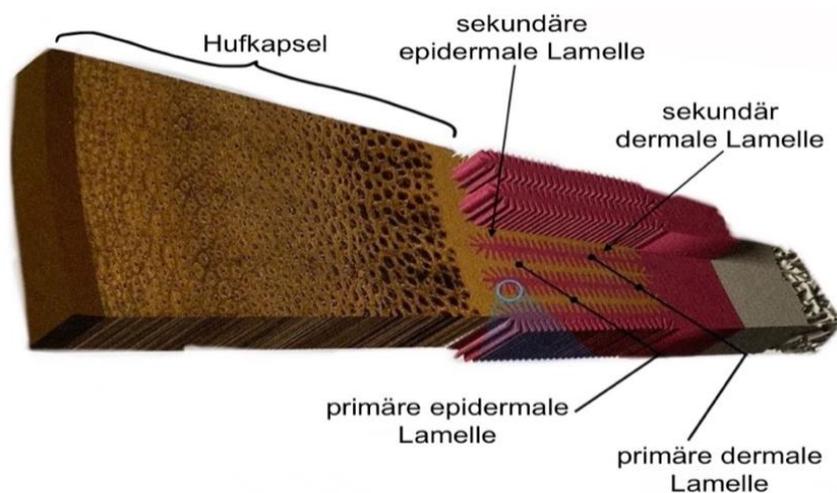


**Abbildung 3:** Hufbein, palmare Ansicht<sup>(14)</sup>  
 DSB: distales Sesambein, Strahlbein, IIL: Insertion  
 des distalen unpaaren Strahlbeinbandes, FTA:  
 Öffnung des terminalen Nerven, PPDP:  
 Hufbeinast, IDFT: Insertion der tiefen Beugesehne,  
 DP: distaler Phalanx, Hufbein, SS: Wulst  
 des Hufbeins, SM: Sohlenrand des Hufbeins

## 2.3 Der Hufbeinträger (Apparatus suspensorius ossis ungulae)

Die Verbindung zwischen der Hufkapsel und dem Hufbein wird als Hufbeinträger bezeichnet. Dieser hält das Hufbein in einer hängenden Position (Schwebeposition) und sorgt dafür, dass die Druckkraft, welche auf den Fuß kommt, in Zugkraft umgewandelt wird <sup>(12)</sup>. Da das Pferd ein Zehenspitzenrandgänger ist und die Belastung auf den Huf daher vorrangig vom Dorsalrand getragen wird, ist dieser Aufhängeapparat entscheidend für einen gesunden Huf <sup>(10)</sup>. Die Verbindung besteht hierbei zwischen der innersten Schicht der Epidermis und der äußersten Schicht der Dermis.

Das Ausmaß der Aufhängung des Hufbeins erstreckt sich über das gesamte bluttragende Wandsegment <sup>(12)</sup>. Dieses Segment besteht aus mehreren Lamellen, welche ineinander verankert sind. Die Verbindung herrscht zwischen primären und sekundären epidermalen Lamellen sowie den primären und sekundären dermalen Lamellen, siehe Abb. 4.



**Abbildung 4:** Lamellare Verbindung des Hufbeins <sup>(12)</sup>, bestehend aus Lamellen der Epidermis und Dermis

Diese Lamellen bilden ein komplexes Netzwerk aus Kollagenfasern <sup>(15)</sup>. Bei Fußung wird die Zugkraft, welche auf die Lamellen trifft, über Hemidesmosomen auf eine Basalmembran und weiter auf die Blutgefäße der Epidermis und von diesen weiter in die Hornzellen übertragen. Die Hornzellen sind über das Zwischenröhrchenhorn mit dem Kronhorn verbunden. Durch diesen Mechanismus wird die anfängliche Zugkraft, die auf das Hufbein wirkt, in Druckkraft auf den Huftrand umgewandelt. Bei Hufrehe kommt es zu einem Funktionsausfall dieses Mechanismus <sup>(10)</sup>.

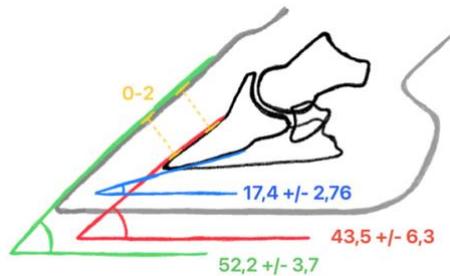
## 2.4 Röntgenuntersuchung des Hufes

Am Huf können viele verschiedene Röntgenaufnahmen gemacht werden. Je nach den zu untersuchenden Strukturen eignen sich unterschiedlichste Winkel des Zentralstrahles des Röntgengeräts und Positionen des Hufes.

Bevor eine Röntgenaufnahme des Hufs gemacht werden kann, wird dieser gereinigt, um Artefakte durch Schmutzauflagerungen zu vermeiden und eine optimale Beurteilung des Röntgenbildes zu gewährleisten. Die Röntgenaufnahmen der distalen Gliedmaße können mit einem tragbaren Röntgengerät mit mindestens 15mA geschossen werden <sup>(16)</sup>. Jede Röntgenuntersuchung der distalen Gliedmaße des Pferdes sollte mindestens eine lateromediale Aufnahme, eine horizontale dorsopalmare sowie eine schräg-dorsoproximal-palmarodistale Aufnahme beinhalten. Für die Diagnose der Hufrehe gilt die seitliche Aufnahme als essentiell, da auf dieser Aufnahme Abweichungen der Lage des Hufbeins anhand verschiedener Winkel beurteilt werden können. Jedoch liefern auch die anderen Aufnahmen wertvolle Informationen <sup>(17)</sup>.

Bei der lateromedialen Aufnahme wird der Huf des Pferdes auf einem flachen Block platziert, um die Kassette tiefer als die Sohlenfläche platzieren zu können. Der Strahlengang sollte horizontal verlaufen und im Zentrum des Hufbeins haben.

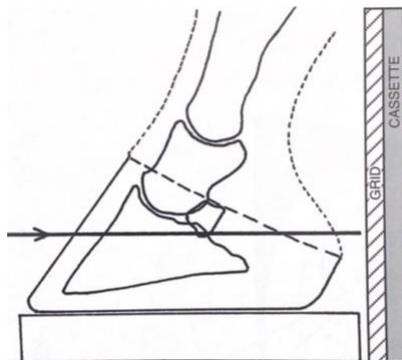
Bei Aufnahmen für die Hufrehe-Diagnostik, bei denen es wichtig ist, dass auch die Hufwand gut beurteilbar ist, ist es nötig, die Belichtungszeit zu reduzieren. Zusätzlich wird bei diesen Aufnahmen die Dorsalwand der Hufkapsel häufig mit Tape markiert. Anstelle des Tapes kann hier auch Draht verwendet werden oder Bariumpaste, wobei bei der zuletzt genannten bedacht werden muss, dass in weiterer Folge das Abtragen des Bariums unvollständig erfolgen kann und Folgeaufnahmen unter Umständen nicht möglich sind. Das Tape markiert den genauen Verlauf der Dorsalwand der Hufkapsel und erleichtert einen Vergleich zwischen dieser und der parietalen Fläche des Hufbeins <sup>(16)</sup>. Diese Flächen verlaufen bei einem gesunden Huf annähernd parallel zueinander. Ist dieser Winkel größer als  $2^\circ$  <sup>(18)</sup>, <sup>(19)</sup>, kann von einer Rotation des Hufbeins ausgegangen werden. Anhand der lateromedialen Aufnahme können weitere Winkel am Huf des Pferdes bestimmt werden. Die parietale Fläche des Hufbeins in einem gesunden Huf weist Winkel zwischen  $43,5 \pm 6,3^\circ$  <sup>(20)</sup> zum Boden auf, während die Dorsalwand der Hufkapsel zum Boden Winkel von  $52,2 \pm 3,7^\circ$  <sup>(20)</sup> aufweist. Zudem kann auch der Winkel zwischen der konkaven, parietalen solaren Oberfläche und dem Boden gemessen werden. Die physiologischen Winkel betragen  $17,4 \pm 2,76^\circ$  <sup>(17)</sup>, siehe Abb. 5.



**Abbildung 5:** Winkel mit physiologischen Werten -  
Schematische Zeichnung (nach Parks und Belknap)  
(21)

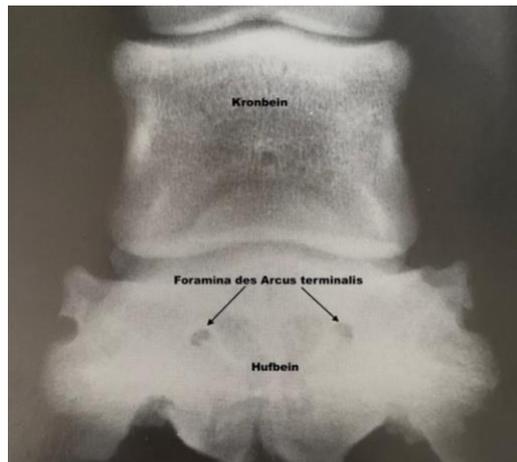
Eine mögliche Absenkung des Hufbeins wird anhand der Distanz zwischen Dorsalrand Hufkapsel und dem Processus extensorius des Hufbeins gemessen <sup>(16)</sup>. Weitere typische Befunde bei Hufrehe sind Gaseinschlüsse in der Hufwand sowie verminderte Knochendichte des Hufbeins und Umbau (Hutkrempeartig) an der dorsodistalen Spitze <sup>(3)</sup>.

Für die dorsopalmare Aufnahme werden die Gliedmaße wiederum auf einem flachen Block platziert. Dabei muss das Pferd die Gliedmaße belasten. Die Kassette wird caudal des Hufs gehalten, und der Strahl wird horizontal mittig zwischen Kronrand und Sohle ausgerichtet <sup>(16)</sup>, siehe Abb. 6.



**Abbildung 6:** Positionierung der dorso-palmare (gewichtstragende) Aufnahme des distalen Phalanx <sup>(16)</sup>

Das mit dieser Aufnahmetechnik entstandene Röntgenbild zeigt deutlich die beiden Foramina des Arcus terminalis im Hufbein, siehe Abb. 7.



**Abbildung 7:** Röntgenaufnahme der Zehe eines Pferdes im dorsopalmaren Strahlengang <sup>(16)</sup>

## 2.5 Blutversorgung des Hufs an der Vorderextremität

Das Hauptversorgungsgefäß der Zehe der Vorderextremität ist die *Arteria (A.) digitalis palmaris communis II*. Dieses Gefäß zieht der Vene-Arterie-Nerv-Regel (VAN) folgend mediopalmar auf Höhe des Carpus mit dem Nerv durch den Karpalkanal. Lateropalmar ziehen *Vena, Arteria und Nervus digitalis palmaris communis III* durch den Karpalkanal.

Auf Höhe des Fesselkopfes teilt sich die *A. digitalis palmaris communis II* in die *A. digitalis palmaris medialis et lateralis*. Der laterale Anteil nimmt die *A. digitalis palmaris communis III* auf, welche aus dem *Ramus palmaris* der *A. mediana* hervorgeht, nachdem dieser die *A. collateralis ulnaris* aufgenommen hat. Mehrere *Rami dorsales* versorgen dabei den dorsalen Anteil, da dort keine Gefäße verlaufen. Auf Höhe des Kronbeins werden die *Rami tori* nach palmar und die *A. und V. coronalis* nach dorsal entlassen. Die Hauptgefäße der lateralen und medialen Seite ziehen distal palmar in den *Canalis solearis* des Hufbeins und bilden den *Arcus terminalis*. Die lateralen Gefäße sowie der Nerv sind an der Vorderextremität deutlich schwächer ausgebildet als die medialen <sup>(10)</sup>.

Bevor das Hufbein selbst durch die entsprechenden Kanäle versorgt wird, werden Saum-, Kron- und Ballen-Strahl-Segment durch viele kleine Äste durchblutet. Diese verlaufen weiter in den *Canalis solearis* des Hufbeins und enden in einem inneren Bogen (*Arcus terminalis*). Aus diesem Endbogen werden wiederum Wand- und Sohlensegment versorgt <sup>(11)</sup>.

Der Blutfluss im Huf kann in drei verschiedene Zonen eingeteilt werden: eine proximal dorsale, eine distale dorsale und eine palmare Zone. Die Versorgung der proximal dorsalen Zone erfolgt hauptsächlich über die Koronararterie und die Dorsalarterie des Kronbeins. Diese versorgen das umliegende Gewebe und den proximalen Anteil der Dermis der Zehe. Die

distale dorsale Zone wird hauptsächlich von Gefäßen versorgt, welche aus dem *Arcus terminalis* entlassen werden und durch das Kronbein ziehen. Ein weiterer Anteil des Blutes wird von den dorsalen Arterien der Zehe geliefert. Die versorgenden Gefäße der proximalen und distalen dorsalen Zone anastomosieren in der Dermis. Die palmare Zone wird durch die palmaren Zehenarterien versorgt, und es gibt keine Anastomosen mit der dorsalen Seite. Der venöse Rückfluss verläuft parallel zu den Arterien, wobei zusätzlich stark verzweigte venöse Geflechte vorkommen <sup>(12)</sup>.

### 3. Material und Methoden

Ziel dieser Arbeit war es, die Dimensionen des Arcus terminalis bei Hufrehe-Pferden und Podotrochlose-Pferden zu vergleichen und die Dichteunterschiede des umschließenden Knochens zu erfassen.

Zur Umsetzung dieses Ziels wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt: Akquirieren von Probanden, Überprüfung der Probandenanforderungen, Durchführung der Messungen und Auswertung der Messungen.

#### 3.1 Akquirieren der Probanden

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden 200 Röntgenbilder der distalen Gliedmaße von Pferden betrachtet. Diese Röntgenbilder wurden an der Veterinärmedizinischen Universität Wien im Rahmen einer Lahmheits-Untersuchung angefertigt. Unter Verwendung des Tierspital-Informationssystems (TIS) wurden 50 Pferde mit Hufrehe und 50 Pferde mit Podotrochlose herausgefiltert. Dies geschah unter Verwendung der Reports, in denen unter der Definition „Einweisungsgrund-Entlassungsgrund“ nach einem bestimmten Zeitraum und einer entsprechenden Diagnose gefiltert wurde. Für die Hufrehe-Pferde wurde zunächst ein Zeitraum von drei Jahren festgelegt. Dieser wurde später erweitert, da keine ausreichende Anzahl an Pferden, die den Studienkriterien entsprachen, gefunden werden konnte. Für die herausgefilterten Pferde wurden die entsprechenden Röntgenbilder anschließend aus dem Programm *JiveX DICOM Viewer* exportiert.

Für die Studie wurden ausschließlich Röntgenbilder der Vorderextremität verwendet und in dem Fall, dass eine Seite stärker betroffen war als die andere, die stärker betroffene Seite ausgewählt. Es konnte davon ausgegangen werden, dass an dieser Seite auch die Veränderungen an den Knochengefäßen am deutlichsten ersichtlich waren<sup>(22)</sup>. Waren beide Vorderextremitäten im gleichen Maße betroffen, konnte das besser geeignete Röntgenbild für die Studie gewählt werden. Gut geeignete Röntgenbilder waren zunächst solche, auf denen das Hufbein einheitlich dicht erschien und keine Aufhellungen erkenntlich waren. Außerdem sollten beide Foramina gut zu identifizieren sein und einheitlich dicht erscheinen.

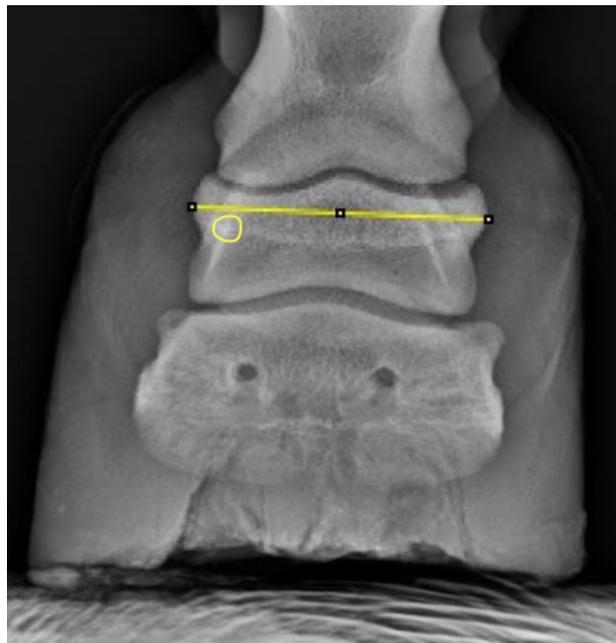
#### 3.2 Überprüfung der Probanden nach Studienanforderungen

Für die Studie wurden von jedem Pferd für die ausgewählte Extremität eine dorsopalmar sowie eine lateromediale Aufnahme betrachtet. Anhand der dorsopalmar Aufnahme wurde

mit dem Bildverarbeitungsprogramm Image J (in der Version 1.53t von den National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA), welches für Grauwert-, Längen- und Winkelmessungen verwendet wurde, zunächst für jedes Röntgenbild ein Referenzwert für weiß und schwarz festgelegt.

Die Messung für den weißen Referenzwert, somit den hellsten Punkt im Röntgenbild, erfolgte zwischen dem unteren Drittel des Fesselbeins und der Mitte des Kronbeins, siehe Abb. 8. Auf den meisten Röntgenbildern ergab sich die hellste Stelle des Bildes auf Höhe der proximalen Sesambeine. Allerdings kam es zu Abweichungen, beispielsweise, wenn das Pferd durchtrittig war. Für den schwarzen Referenzwert und somit den höchsten Grauwert im Röntgenbild wurde ein beliebiger Abschnitt am schwarzen Rand des Bildes ausgewählt, da davon ausgegangen werden konnte, dass dies die dunkelste Stelle des Röntgenbildes erfasste, siehe Abb. 9.

Für jedes Pferd wurde anhand der dorsopalmaren Aufnahme die Breite des Kronbeins gemessen. Die Breite des Kronbeins wurde an der Basis jeweils an der breitesten Stelle gemessen, siehe Abb. 8.



**Abbildung 8:** Röntgenbild der Zehe von Pferd 5 der akuten Hufrehe-Gruppe im dorsopalmaren Strahlengang, Messung des Kronbeins an der breitesten Stelle und Messung des Weißreferenzwertes am hellsten Punkt, zur Verdeutlichung der Methode (Bildgebende Diagnostik, V  
Wien,

Pferde, 2021)

Die Pferde, welche Pathologien am Kronbein aufwiesen, mussten aus der Studie ausgeschlossen werden, da nicht mehr gewährleistet werden konnte, dass die exakte Breite des Kronbeins gemessen werden konnte, beispielsweise aufgrund von Zubildungen.

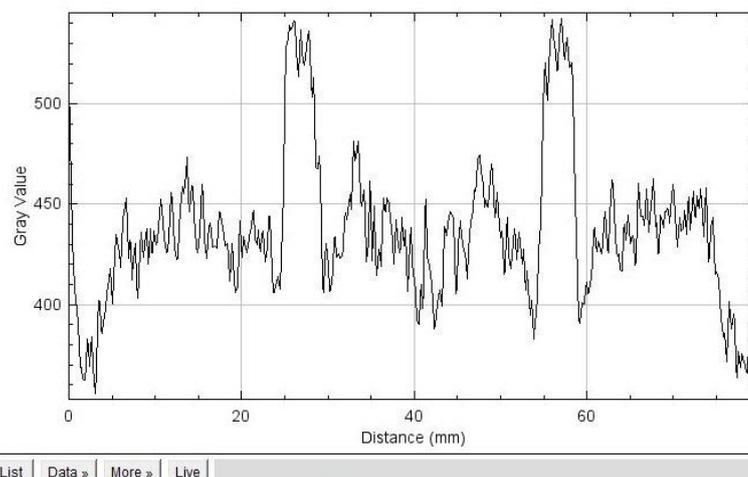
Die Grauwerte wurden im Verlauf des Hufbeins transversal durch die Foramina nutritia gemessen. Für die Messung der Grauwerte im Hufbein wurde von einem Ende des Hufbeins zum anderen eine Linie erstellt, welche durch die breitesten Stellen beider Foramina nutritia zieht, siehe Abb. 9.



**Abbildung 9:** Röntgenbild der Zehe von Pferd 5 der akuten Hufrehe-Gruppe im dorsopalmaren Strahlengang, Messung der Grauwerte anhand einer gezogenen Linie durch die breiteste Stelle der Foramina nutritia und Messung des Schwarzreferenzwertes an beliebigem dunklem Rand des Bildes, zur Verdeutlichung der Methode (Bildgebende Diagnostik, Wien,

Pferde, 2021)

Zur Verdeutlichung der Methode wurde die Distanz der gemessenen Grauwerte gegen die Intensität der Grauwerte geplottet, siehe Abb. 10.



**Abbildung 10:** Geplotteter Graph in ImageJ von Pferd 27 aus der Podotrochlose-Gruppe, der Grauwerte gegen die Distanz in mm, zur Verdeutlichung der Methode

Die Daten konnten zur weiteren Verarbeitung in Microsoft Excel 2016 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) übertragen werden, wenn sich die höchsten Grauwerte der Foramina nutritia deutlich vom Rest unterscheiden ließen. Anhand der Grauwerte wurde das Foramen in seiner Größe berechnet. Pferde wurden aus der Studie ausgeschlossen, wenn die Foramina bereits im Graph nicht deutlich anhand der Intensität der Grauwerte erkenntlich waren. Dies war beispielsweise der Fall, wenn das Hufbein osteolytischen Prozessen unterlag. Dieses Vorgehen wurde eingeführt, da es Datenreihen gab, bei denen keine Foramina erkannt werden konnten.

Es wurden neun Pferde der Hufrehe-Gruppe entfernt, da die Daten aufgrund der bereits beschriebenen Kriterien ausgeschlossen werden mussten. Für diese Pferde stellte sich heraus, dass radiologisch kein Hinweis auf Hufrehe vorlag.

### 3.3 Durchführung der Messungen

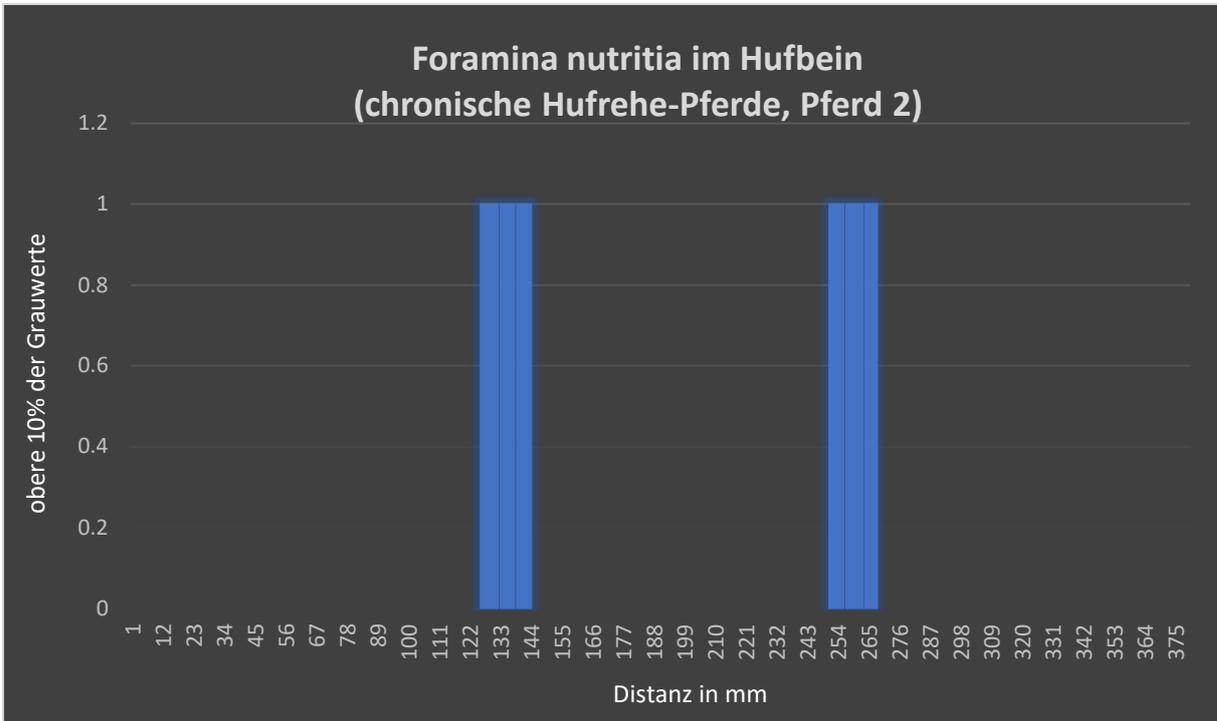
Die Daten der Grauwerte und der Distanz wurden in Excel weiterverarbeitet. Von den Grauwerten wurden gleitende Mittelwerte über jeweils neun Werte berechnet, um größere Ausreißer der Grauwerte zu glätten. Anschließend wurde für die Grauwerte das Quantil von 90 % berechnet und das gleiche für die gleitenden Mittelwerte.

Zuvor wurde das Quantil von 90 % an drei von der Studie unabhängigen Röntgenbildern festgelegt, unter Verwendung eines von Hufrehe betroffenen Pferdes, eines von Podotrochlose betroffenen Pferdes und einem Pferd ohne Hufpathologien. Das von Hufrehe betroffene und das von Podotrochlose betroffene Pferd wurden miteinbezogen, da im Folgenden genau diese Krankheiten genauer analysiert werden sollten. Die Festlegung des Quantils durch drei unabhängige Pferde sollte gewährleisten, dass mit der Festlegung dieses Quantils die Foramina in der Regel, unabhängig von der Pathologie, erfasst werden konnten.

Die einzelnen Grauwerte wurden mit dem Quantil der Mittelwerte anhand folgender Formel in Excel verglichen: =WENN(gleitender Mittelwert über Neun > Quantilmittelwert;1;0). Lag der Grauwert über dem Wert des Quantilmittelwerts wurde durch die Formel zur Verdeutlichung eine Eins geschrieben, ansonsten eine Null.

Diese Spalte wurde in Excel gegen die Distanz geplottet, auf der X-Achse die Distanz in mm, auf der Y-Achse der Wert Eins oder Null, um eine Übersicht über die Verteilung und Anzahl der berechneten Einsen zu erhalten. Die Einsen stellten die oberen 10 % der Grauwerte dar. Ergaben sich genau zwei Balken mit annähernd gleicher Distanz zur Mitte der X-Achse, konnte

sicher davon ausgegangen werden, dass es sich dabei um die beiden Foramina handelt, siehe Abb. 11.



**Abbildung 11:** Geplotteter Graph der Foramina nutritia im Hufbein, Pferd 2 der chronischen Hufrehe-Gruppe: Die obersten 10% der Grauwerte dargestellt als Wert 1 gegen die Distanz in mm in Microsoft Excel, zur Veranschaulichung der Methode, eigene Darstellung

Ergaben sich aufgrund von Hufbeinpathologien mehrere Balken, welche keinem Foramen mehr zugeordnet werden konnten, musste das Pferd aus der Studie ausgeschlossen werden. In diesen Fällen war eine Berechnung des tatsächlichen Foramens nicht mehr durchführbar.

Pferde, bei denen der Graph bestimmte Voraussetzungen erfüllte, konnten in der Studie bleiben, wie beispielsweise Pferde, bei denen die zusätzlichen Balken deutlich außerhalb der beiden Foramina lagen und die eigentlichen Foramina weiterhin klar zu identifizieren waren. Traten maximal fünf zusätzliche Balken zwischen den Foramina auf und konnten die Foramina nach wie vor deutlich identifiziert werden, konnte das Pferd ebenfalls in der Studie bleiben. In den Fällen, in denen der Balken der Foramina nicht zusammenhängend war, wurde der Anteil der dazwischenliegenden Nullen berechnet und für den Fall, dass diese unter 10 % des Foramens einnahmen, konnten sie dem Foramen zugerechnet werden. Diese Voraussetzungen wurden festgelegt, um eine Vermessung der Foramina nach wie vor ermöglichen zu können, trotz progressiver Osteolyse bei chronischer Hufrehe<sup>(22)</sup>. Ergab sich eine oder mehrere dieser Ausnahmen, wurden diese in der weiteren Berechnung korrigiert.

Erfolgte der Proband alle Voraussetzungen, konnten die Größen der beiden Foramina bestimmt werden, indem der Bereich, in dem die Einsen das Foramen kennzeichneten, nach der Länge berechnet wurde. Zusätzlich wurden im Bereich der Foramina jeweils der Mittelwert der Grauwerte sowie die Standardabweichung dieser bestimmt und vor und nach dem Foramen der Mittelwert von wiederum neun Werten aus den gleitenden Mittelwerten bestimmt, siehe Abb. 12.

Distance_(mm)	Gray_Value	gltmw9	F	G	H	I	J	K	L
35,4	8056,472	8272,563333			0	237			
35,55	8185,158	8219,502			0	238			
35,7	8208,245	8228,793			0	239			
35,85	8349,695	8293,898444			0	240			
36	8415,802	8379,972778			0	241			
36,15	8382,657	8467,276667			0	242			
36,3	8356,687	8547,631222			0	243			
36,45	8633,909	8670,046778			0	244			
36,6	8831,13	8824,180889			0	245			
36,75	8842,207	8999,679889			0	246	8996,115753		
36,9	8908,349	9173,348444			0	247			
37,05	9309,985	9315,465667			0	248			
37,2	9736,902	9438,517222			0	249			
37,35	9995,293	9528,895			0	250			
37,5	9945,674	9597,566			1	251			
37,65	9635,742	9684,196444			1	252			
37,8	9741,373	9735,062333			1	253			
37,95	9644,53	9744,044222			1	254			
38,1	9460,246	9736,812111			1	255			
38,25	9688,023	9728,853778			1	256			
38,4	9767,778	9765,710667			1	257			
38,55	9817,739	9806,867111			1	258			
38,7	9930,204	9854,420444			1	259			
38,85	9874,049	9878,732			1	260	2,55	9805,246667	234,7194318
39	9967,454	9859,776444			1	261			
39,15	10111,781	9823,030556			1	262			
39,3	10072,51	9829,571556			1	263			
39,45	9679,05	9873,681222			1	264			
39,6	9517,423	9906,431556			1	265			
39,75	9437,065	9896,571889			1	266			
39,9	9876,608	9791,160222			1	267			
40,05	10327,191	9633,506889			1	268			
40,2	10168,802	9493,715889			0	269			
40,35	9878,717	9368,633111			0	270			
40,5	9163,076	9266,722444			0	271			
40,65	8653,63	9096,278556			0	272			
40,8	8420,931	8832,440222			0	273	8852,073716		
40,95	8391,678	8608,258444			0	274			

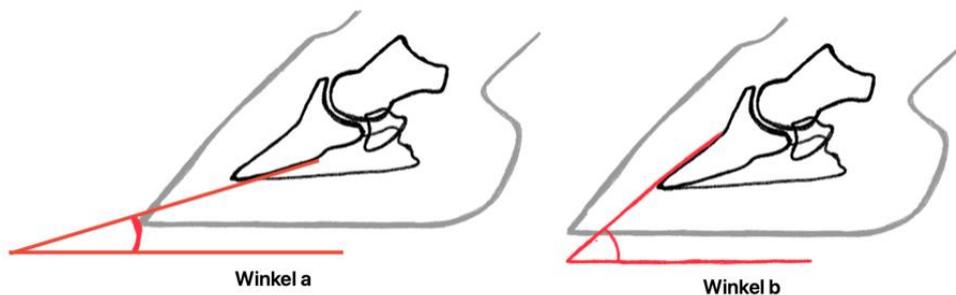
**Abbildung 12:** Ausschnitt aus Excel-Tabelle Pferd 1 aus der Gruppe der chronischen Hufrehe-Pferde: Berechnungen und Festlegung des Foramen nutritium  
 Spalte 1: Distanz in mm, Spalte 2: Grauwert, Spalte 3: gleitender Mittelwert jeweils 9 Grauwerte, Spalte H: gleitende Mittelwerte verglichen mit dem Quantilmittelwert (lag dieser dem Quantil wurde eine Eins geschrieben, lag dieser darunter eine Null), Spalte I: Anzahl der verglichenen Grauwerte, eigene Darstellung

Der prozentuale Anteil der Foramina des Hufbeins wurde über die Anzahl der Grauwerte berechnet. Diese Anzahl wurde halbiert, und somit ergab sich die annähernde Mitte zwischen den beiden Foramina. Bis zu dieser Mitte wurde die Summe der Einsen in diesem Bereich bestimmt und ebenso für die zweite Hälfte. Ergaben sich vor oder zwischen den Foramina Ausreißer durch Einsen, die kein Foramen darstellten, wurden diese in einem weiteren Schritt

von der Summe abgezogen. Dadurch wurde gewährleistet, dass andere hohe Grauwerte nicht dem Foramen zugerechnet wurden.

Befanden sich Nullen im Bereich der Foramina und wurden diese unter Beachtung der 10 % Regel zum Foramen gehalten, wurden sie wie eine Eins berechnet. Die Summe, die sich unter Beachtung dieser Regeln ergab, wurde durch die Gesamtanzahl der Werte geteilt und mit 100 multipliziert. Um die Größe der Foramina relativ zum Pferd beurteilen zu können, wurde die Breite der einzelnen Foramina durch die zuvor gemessene Breite des Kronbeins dividiert und mit 100 multipliziert.

Für jedes Pferd in der Studie wurden mit ImageJ anhand der lateromedialen Aufnahme Winkel vom Hufbein zum Boden gemessen. Dazu wurden aufgrund von Variationen der Hufbeinform zwei Winkel bestimmt. Der erste, im Folgenden als Winkel a bezeichnet, wurde zwischen der konkaven, solaren Fläche des Hufbeins und dem Boden gemessen, der zweite, im Folgenden als Winkel b bezeichnet, zwischen der dorsalen Fläche des Hufbeins und dem Boden. Zur Verdeutlichung der Messungen, siehe Abb. 13 sowie Tab. I, II und III im Anhang, unterteilt in akute Hufrehe-Pferde, chronische Hufrehe-Pferde und Podotrochlose-Pferde. Um die Anonymität der Patienten zu wahren, wurde jedem Pferd eine Nummer zugewiesen.



**Abbildung 13:** Verdeutlichung der gemessenen Winkel  
Schematische Zeichnung (nach Parks und Belknap) <sup>(21)</sup>

Die Winkelmessungen sollten eine Aussage über den Einfluss des Winkels vom Hufbein auf die Größe der Foramina erlauben, da abhängig vom Grad der Winkelungen die Ansicht auf die Foramina in der dorsopalmaralen Aufnahme stark variiert.

### 3.4 Statistische Auswertung

Um einen Vergleich der Dimensionen des Arcus terminalis bei Hufrehe-Pferden und bei Podotrochlose-Pferden zu ermöglichen, wurden die Daten mit der Software *Statistical Package of Social Science* (IBM SPSS Statistics, Armonk, NY, USA) ausgewertet.

Die erhobenen Daten wurden auf Gruppenunterschiede zwischen den Hufrehe-Pferden und den Podotrochlose-Pferden untersucht. Die Pferde der Hufrehe-Gruppe wurden weiter unterteilt in Pferde, die akut betroffen waren und solche, die chronisch betroffen waren. Dies geschah, da bei den akuten Hufrehe-Pferden von keinen stärkeren Veränderungen um den Arcus terminalis ausgegangen werden konnte und der Fokus auf die Veränderungen am Foramen gelegt wurde <sup>(22)</sup>. Daher wurden die akuten Hufrehe-Pferde für die Vergleiche zwischen der Größe der Foramina nutritia im Hufbein und den Dichteunterschieden um die Foramina ausgeschlossen. Als weitere Kontrollgruppe wäre diese Gruppe zu klein gewesen (N=6).

Hood <sup>(6)</sup> definierte 1999 akute Hufrehe als Beginn der klinischen Symptome, welche entweder in einem Zeitraum von 72h nach Erstauftreten abklingen oder aber in ein chronisches Stadium übergehen. Die ersten klinischen Anzeichen umfassen eine vermehrte digitale Pulsation der Gefäße an der Extremität, eine erhöhte Temperatur der Hufkapsel, Gewichtsverlagerungen und Lahmheit. In ein chronisches Stadium geht die Krankheit nach Fortbestehen der klinischen Symptomatik über 72h hinaus oder aber nach Verlagerung des distalen Phalanx in der Hufkapsel <sup>(6)</sup>.

Neuere Definitionen legen akute Hufrehe als eine initiale Phase fest, welche bis zu sieben Tagen andauern kann <sup>(23)</sup>.

In der vorliegenden Arbeit wurden Pferde, welche innerhalb einer Woche vorstellig geworden sind und keine Hufrehe-Vorgeschichte aufwiesen als akut gezählt. Unter Beachtung dieser Kriterien mussten von vorherigen acht Pferden dieser Gruppe zwei ausgeschlossen werden, da diese eine Hufrehe-Vorgeschichte aufwiesen und daher nur von einem akuten Schub einer chronischen Hufrehe ausgegangen werden konnte.

Zunächst wurden die Daten der Größe des Arcus terminalis miteinander verglichen. Bei diesen Werten handelte es sich um intervallskalierte Daten, da die Abstände zwischen den numerischen Werten der Skala immer gleich groß waren <sup>(22)</sup>. Zur statistischen Auswertung wurden die relativen Größen im Verhältnis zum Kronbein des Pferdes verwendet, da diese Daten am meisten Aussagekraft über eine mögliche Erweiterung des Foramens besaßen. Diese Daten standen im direkten Verhältnis zur Größe des Pferdes und erlaubten einen sinnvollen statistischen Vergleich zwischen beispielsweise einem Pony und einem Noriker. Daher wurden die Größenmessungen in mm der Foramina nutritia nicht weiter berücksichtigt,

da mit diesen Werten keine Relation zur Größe des Pferdes möglich war. Ebenfalls ausgeschlossen wurden die prozentualen Werte relativ zum Hufbein, da diese von der gemessenen Breite des Hufbeins abhängig waren und je nach Form des Hufbeins und Position der Foramina nutritia weiter proximal oder distal gemessen wurden.

Da aus zwei unterschiedlichen Gruppen intervallskalierte Daten miteinander verglichen wurden, wurde der unabhängige t-Test angewandt. Die Nullhypothese des unabhängigen t-Tests besagt, dass es zwischen den Mittelwerten zweier Gruppen keinen Unterschied gibt. Somit wäre diese gleich,  $H_0: \mu_1 = \mu_2$  <sup>(24)</sup>. Die Alternativhypothese besagt, dass sich diese Mittelwerte voneinander unterscheiden,  $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$  <sup>(24)</sup>. Dabei wurden die medialen Foramina der Gruppe 2 (chronische Hufrehe-Pferde) mit den medialen Foramina der Gruppe 3 (Podotrochlose-Pferde) verglichen und ebenso die lateralen Foramina. Für die Anwendung des t-Tests mussten zunächst die Voraussetzungen für diesen Test überprüft werden <sup>(24)</sup>.

1. Es handelte sich bei den erhobenen Daten um unabhängige Messwerte. Kein Pferd der Hufrehe-Gruppe kam auch in der Podotrochlose-Gruppe vor.
2. Die abhängige Variable, also das Verhältnis zwischen der Größe des Arcus terminalis und dem Kronbein, war intervallskaliert.
3. Die unabhängige Variable war nominalskaliert und besaß zwei Ausprägungen: chronische Hufrehe oder Podotrochlose.

Die weiteren statistischen Voraussetzungen wurden in SPSS überprüft:

4. Es sollten keine Ausreißer vorliegen. In SPSS wurde ein Boxplot mit den vorhandenen Daten erstellt. Ausreißer werden in SPSS durch die Anzahl der Standardabweichungen vom Mittelwert aus bestimmt. Leichte Ausreißer werden in dem Boxplot in einem Bereich ober- oder unterhalb der Quartile durch einen Kreis dargestellt. Diese Ausreißer liegen in einem Bereich zwischen dem 1,5-fachen und 3-fachen des Interquartilsabstands. Ab dem 3-fachen des Interquartilsabstands werden die Ausreißer als extrem gewertet werden. Liegen nur leichte Ausreißer vor, kann ohne weitere Korrekturmaßnahmen fortgefahren werden.  
Für den Vergleich der Foraminagrößen ergaben sich nur leichte Ausreißer.
5. Die Gruppen stellten sich normalverteilt dar. Anhand des Shapiro-Wilk-Tests und Q-Q-Diagrammen wurde auf Normalverteilung überprüft. Der Shapiro-Wilk-Test testet auf einem Signifikanzniveau von 0,05. Liegt die berechnete Signifikanz unter einem Wert von 0,05, bedeutet dies für den Test, dass er signifikant geworden ist und die Werte nicht normalverteilt sind.

Das Q-Q-Diagramm verbildlicht die Normalverteilung anhand eines Plots. Dieser stellt die erwarteten Normalwerte gegen die beobachteten Werte dar. Die erwarteten Normalwerte bilden eine gerade, konstant ansteigende Linie, und die beobachteten Werte sollten annähernd auf dieser Linie liegen.

Würden die Datenätze keine Normalverteilung aufweisen, könnte als Alternative ein nicht-parametrisches Verfahren, der Wilcoxon-Mann-Whitney-U-Test, angewendet werden.

Die Gruppen erwiesen sich bezüglich der Foraminagrößen als normalverteilt, mit Ausnahme der Gruppe 2 des medialen Foramen.

6. Die Varianzen jeder Gruppe sind nahezu gleich. Die Varianzhomogenität oder auch Homoskedastizität wird mit dem Levene-Test der Varianzgleichheit bestimmt. Das Signifikanzniveau ist dabei ebenfalls bei 0,05.

Die Varianzen erwiesen sich homogen für die Gruppen.

Für die Analyse der Grauwerte und somit die Dichte um die Foramina nutritia mussten diese zunächst normiert werden. Dies geschah unter Verwendung des Minimal- und Maximalwertes für jedes Röntgenbild. Der minimale Wert oder Weiß-Referenzwert stellte die höchste Dichte im Röntgenbild dar und wurde als 100% angenommen. Der maximale Wert oder auch Schwarz-Referenzwert stellte 0% dar. Weiß stellte den niedrigsten Grauwert dar und schwarz den höchsten. Die Werte konnten somit durch die Differenz der einzelnen Grauwerte und dem Minimalwert relativ zur Grauwertskala passend für jedes Röntgenbild vergleichbar gemacht werden. Dies wurde durch die folgende Formel gewährleistet:

$$\frac{\text{Grauwert} - \text{Weißwert}}{\text{Schwarzwert} - \text{Weißwert}}$$

Die Berechnung wurde für die Grauwerte um die Foramina durchgeführt und die Werte in vier Spalten eingetragen: mediales Foramen/axial, mediales Foramen/abaxial, laterales Foramen/axial und laterales Foramen/abaxial, vgl. Tab. I, II und III im Anhang. Diese Werte wurden wiederum hinsichtlich der Voraussetzungen für den unabhängigen t-Test untersucht. Die Werte waren voneinander unabhängig. Die abhängige Variable, somit der Grauwert, war intervallskaliert und die unabhängige Variable war nominalskaliert mit zwei möglichen Ausprägungen, chronische Hufrehe oder Podotrochlose.

Aufgrund der fehlenden Normalverteilung der Gruppen wurde für die Dichtewerte eine nicht-parametrische Alternative des ungepaarten t-Tests gewählt, der Mann-Whitney-U-Test. Dieser überprüft sowohl Lage als auch Verteilung der Daten<sup>(25)</sup>. Daher gilt als Voraussetzung für diesen Test auch, dass die Verteilung der beiden verglichenen Gruppen annähernd gleich sein

sollte. Die Gleichverteilung beider Gruppen reduziert die Überprüfung des Tests auf die Lage der Daten. Nur wenn diese Bedingung erfüllt ist, können auch die Mediane verglichen werden.

Die Nullhypothese des Mann-Whitney-U-Tests besagt, dass die Verteilungen gleich sind, die Alternativhypothese, dass sie es nicht sind. Zur Überprüfung dieser Hypothesen arbeitet der Mann-Whitney-U-Test mit der Verwendung und dem Vergleich von Rängen.

Um den Einfluss der Winkel auf die Größe der Foramina und die Dichteunterschiede des Knochens einschätzen zu können, wurden diese mit der Spearman-Korrelation untersucht. Bei der Spearman-Korrelation handelt es sich um ein nicht-parametrisches statistisches Verfahren, mit dem unterschiedliche Stärken von Abhängigkeit untersucht werden. Die Spearman-Korrelation wurde gewählt, da kein linearer Zusammenhang zwischen den Daten festgestellt werden konnte, für welche ansonsten die Pearson-Produkt-Moment-Korrelation genutzt werden würde. Der nicht-lineare Zusammenhang wurde zunächst für alle Vergleiche in einem Streudiagramm untersucht. Das Diagramm ließ keine Beziehung zwischen den Daten vermuten.

Die Spearman-Korrelation untersucht monotone Beziehungen. Die Voraussetzungen zum Vergleich der Daten sind ordinal skalierte Daten und eine paarweise Untersuchung. Die Daten für die Winkel sowie für die Foraminagrößen und Grauwerte waren intervallskaliert und jedes Pferd stellte einen eigenen Fall dar, wodurch die Beobachtungen paarweise analysiert werden konnten. Für die Rotationswinkel der Podotrochlose-Pferde wurden jeweils  $0^\circ$  angenommen.

Für den Zusammenhang zwischen den weiteren erhobenen Parametern, wie dem Umstand, ob das Pferd Hufrehe hat und welchen Grad der Hufrehe, wieviel das Pferd wiegt und wie alt das Pferd ist, wurde das gleiche Verfahren gewählt, vgl. Tab. I, II, III im Anhang.

Die Spearman Korrelationen wurden hinsichtlich ihres Signifikanzniveaus und der Stärke des Zusammenhangs von  $p$  nach Cohen (1988) analysiert. Cohen beschreibt Zusammenhänge für einen Wert von  $|\rho| = .10$  als gering beziehungsweise schwach. Nimmt  $|\rho|$  einen Wert von  $.30$  an, wird der Zusammenhang als mittel oder moderat gewertet. Für  $p$ -Werte größer  $.50$  wird die Korrelation als stark oder groß bezeichnet.

Die Rasse und Nutzungsart wurde in einer Kreuztabelle dargestellt, um einen Überblick über die einbezogenen Pferde in dieser Studie zu erhalten. Die Nutzungsart wurde erfasst, da diese einen erheblichen Einfluss auf die Knochendichte ausüben kann <sup>(9)</sup>.

## 4. Ergebnisse

Die Daten umfassten zunächst drei verschiedene Gruppen: Die akuten Hufrehe-Pferde, die chronischen Hufrehe-Pferde und die Podotrochlose-Pferde, vgl. Tab. I, II, III im Anhang. In den folgenden Boxplots wird gezeigt, wie sich die Gruppen hinsichtlich der Foraminagröße sowie in der Dichte des Knochens um die Foramina unterschieden. Entsprechend der Beschreibung in der Methodik wurden die akuten Hufrehe-Pferde im Folgenden ausgeschlossen.

### Vergleich der Größe der Foramina nutritia im Hufbein bei Pferden mit akuter und chronischer Hufrehe sowie Podotrochlose

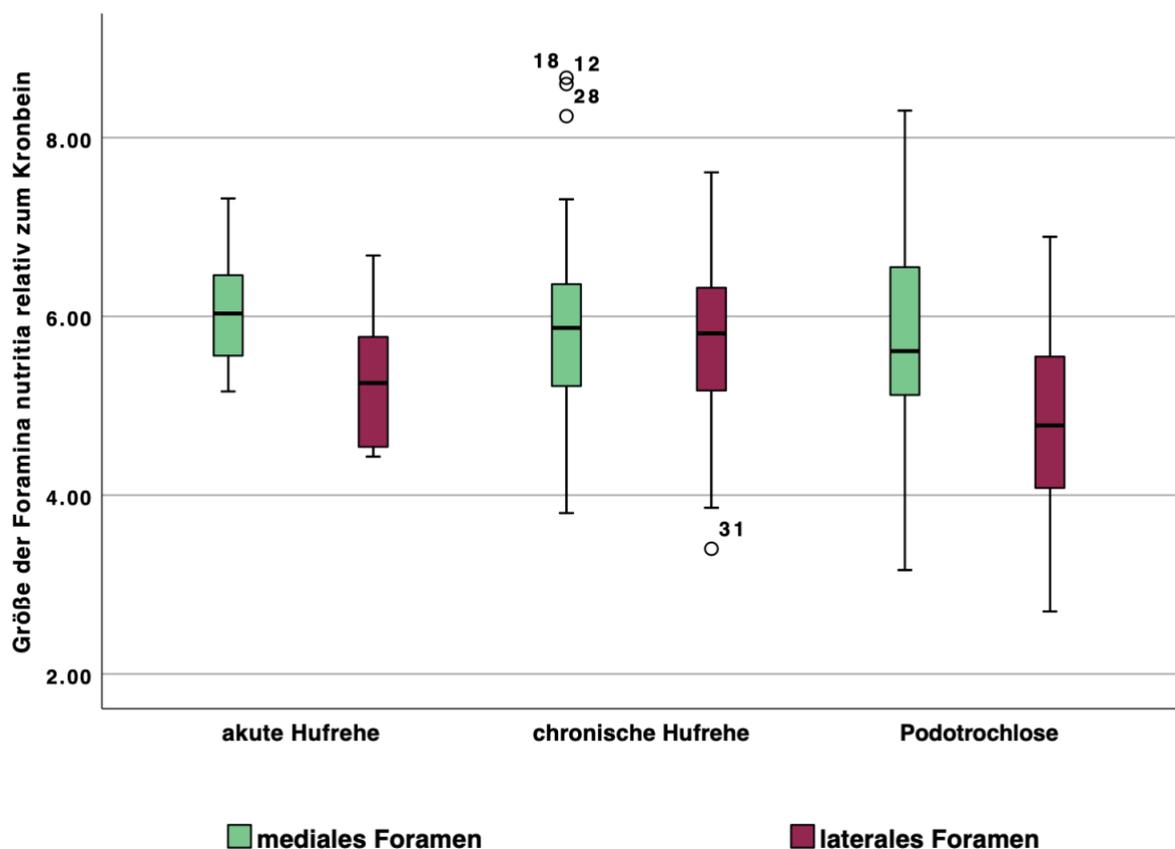


Abbildung 14

Foraminagrößenvergleich zwischen drei Gruppen, eigene Darstellung

In der Abb. 14 wird deutlich, dass sich die Werte zwischen den akuten Hufrehe-Pferden von den chronischen Hufrehe-Pferden weniger stark unterscheiden als die der Podotrochlose-Pferde. Für das mediale Foramen stellte sich die durchschnittliche Größe für die akuten Hufrehe-Pferde am höchsten dar. Auf der lateralen Seite wiesen die chronischen Hufrehe-Pferde die größten Foramina nutritia auf. Die Größe der Foramina auf der medialen und der lateralen Seite der chronischen Hufrehe-Pferde unterschieden sich zudem kaum voneinander.

Die Gruppe der Podotrochlose-Pferde wies im Vergleich zu den beiden anderen Gruppen die kleinsten Foramina auf.

Beim Vergleich der Dichte um die Foramina wurde ebenfalls festgestellt, dass die Werte der akuten Hufrehe-Pferde näher an denen der chronischen lagen und die Werte der Podotrochlose-Gruppe einen deutlichen Unterschied zu diesen beiden Gruppen aufwiesen, siehe Abb. 15. Der Unterschied zeichnete sich jedoch stärker zwischen den Podotrochlose-Pferden und den chronischen Hufrehe-Pferden ab.

**Vergleich der Dichte um die Foramina nutritia im Hufbein bei Pferden mit akuter und chronischer Hufrehe sowie Podotrochlose**

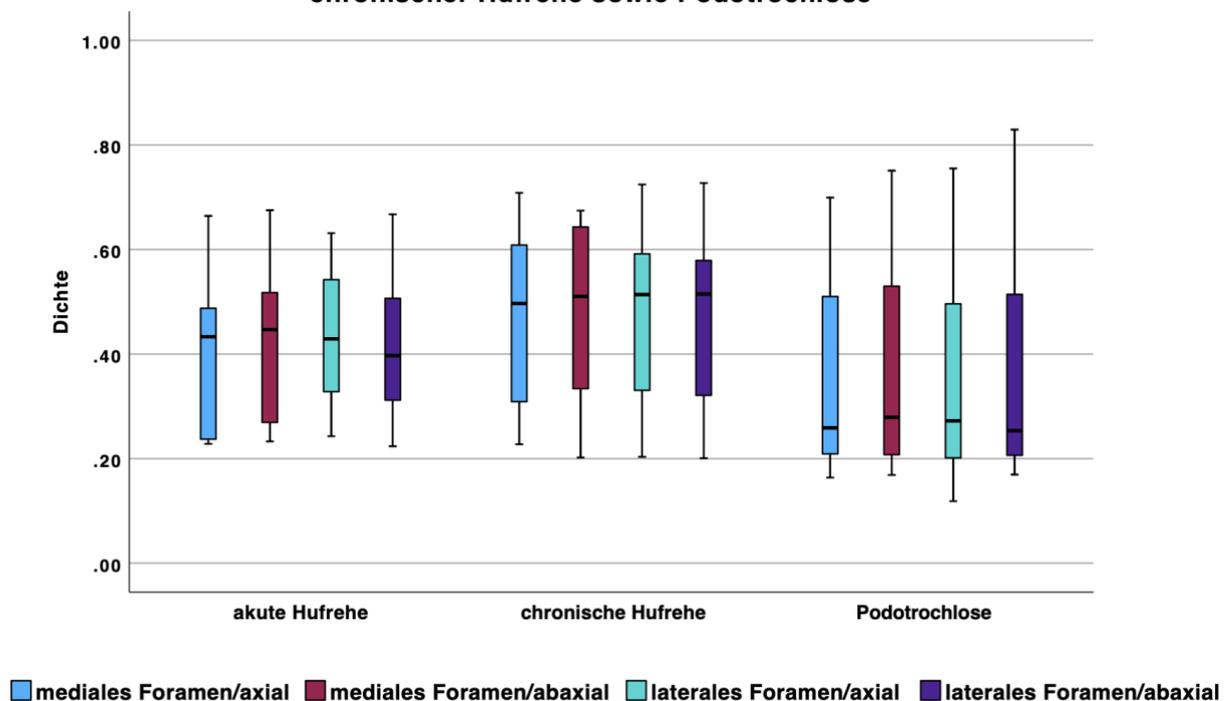


Abbildung 15

zwischen drei Gruppen, eigene Darstellung

#### 4.1 Vergleich der Größe des Arcus terminalis bei chronischen Hufrehe-Pferden und Podotrochlose-Pferden

Zur Anwendung des unabhängigen t-Tests mussten zunächst die weiteren Voraussetzungen in SPSS überprüft werden. Die Gruppen für den Vergleich der Foraminagrößen wiesen für die Gruppe der chronischen Hufrehe-Pferde am medialen Foramen drei leichte Ausreißer auf und am lateralen Foramen einen leichten Ausreißer. Da es sich nur um leichte Ausreißer handelte, konnte ohne Maßnahmen fortgefahren werden.

Die Gruppen stellten sich gem. dem Shapiro-Wilk-Test als normalverteilt dar, mit Ausnahme von Gruppe 2 für die Größe des medialen Foramen, vgl. Tab. 1.

**Tabelle 1:** Test auf Normalverteilung der Foraminagrößen der chronischen Hufrehe-Pferde und der Podotrochlose-Pferde dem Shapiro-Wilk-Test, eigene Darstellung

	Gruppe	Signifikanz
Größe mediales Foramen	2	0,033
	3	0,792
Größe laterales Foramen	2	0,764
	3	0,398

Für die Gruppe 2 lag die Signifikanz für die Größe des medialen Foramens unter einem Wert von 0,05. Damit ist der Shapiro-Wilk-Test signifikant geworden und die Daten somit nicht normalverteilt. Die anderen Gruppen wiesen alle Normalverteilung auf. Da sich der unabhängige t-Test allerdings als sehr robust gegenüber der Verletzung der Normalverteilung erweist, konnte mit den Daten wie geplant weitergerechnet werden <sup>(26)</sup>.

Für den Levene-Test lag die Signifikanz für das mediale Foramen bei 0,603 und für das laterale Foramen bei 0,678. Somit lagen beide Signifikanz-Werte über 0,05 und der Levene-Test ist nicht signifikant geworden. Es lag Varianzhomogenität für beide Gruppen vor.

Der unabhängige t-Test konnte also für den Vergleich der Foraminagrößen genutzt werden.

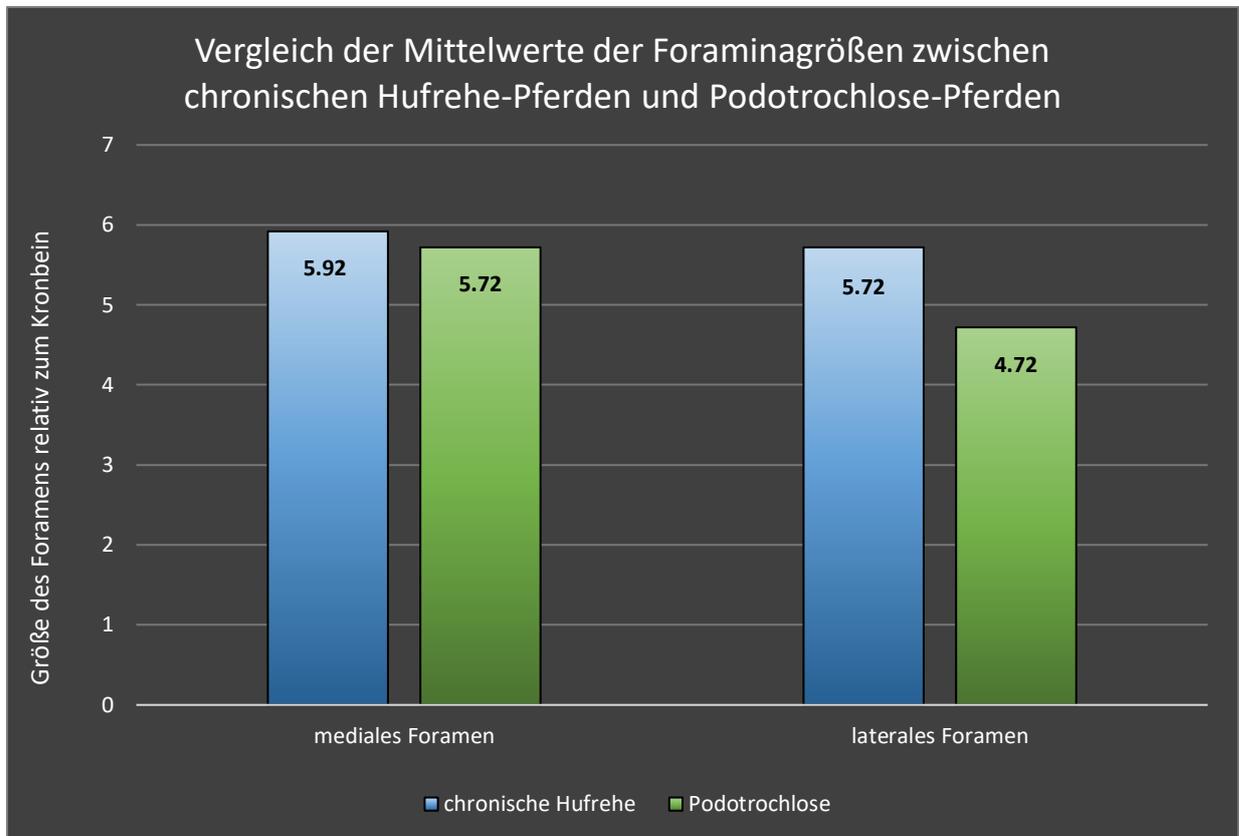
Für die Größe des medialen Foramen stellte sich kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen dar. Für das laterale Foramen stellte sich allerdings ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Foraminagrößen heraus, vgl. Tab. 2.

**Tabelle 2:** Unabhängiger t-Test zum Vergleich der Foraminagrößen des Arcus terminalis zwischen chronischen Hufrehe-Pferden und Podotrochlose-Pferden, bei gleichen Varianzen, eigene Darstellung

	Signifikanz (zweiseitiges p)
Mediales Foramen	0,433
Laterales Foramen	< 0,001

Unter Betrachtung der mittleren Differenz ergab sich für die chronische Hufrehe-Gruppe ein durchschnittlich 0,2% größeres Foramen nutritium bei einem 95%igen Konfidenzintervall der Differenzen. Für das laterale Foramen erwiesen sich die Foramina der chronischen Hufrehe-Gruppe um 1% größer als die der Podotrochlose-Gruppe. Zur Verdeutlichung des

Unterschiedes der Foraminagrößen zwischen den beiden Gruppen wurden diese in Abb. 16 dargestellt.



**Abbildung 16:** Balkendiagramm zum Vergleich der Mittelwerte der Foraminagrößen von chronischen Hufrehe-Pferden und Podotrochlose-Pferden, eigene Darstellung

## 4.2 Vergleich der Dichte um die Foramina nutritia bei chronischen Hufrehe-Pferden und Podotrochlose-Pferden

Die Daten für den Vergleich der Dichtewerte stellten sich gemäß dem Shapiro-Wilk-Test als nicht normalverteilt dar, mit Ausnahme der Gruppe 2 für die Dichte am lateralen Foramen, axial, siehe Tab. 3.

**Tabelle 3:** Test der Dichte von chronischen Hufrehe-Pferden (Gruppe 2) und Podotrochlose-Pferden (Gruppe 3) auf Normalverteilung anhand des Shapiro-Wilk-Tests, eigene Darstellung

	Gruppe	Signifikanz
mediales Foramen/axial	2	,006
	3	<,001
mediales Foramen/abaxial	2	,005
	3	<,001
laterales Foramen/axial	2	,055
	3	<,001
laterales Foramen/abaxial	2	,030
	3	<,001

Daher wurde eine nicht-parametrische Alternative zu diesem Verfahren gewählt, der Mann-Whitney-U-Test.

Der Mann-Whitney-U-Test wurde durchgeführt, um zu überprüfen, ob und wie sich die Dichtewerte um die Foramina nutritia zwischen den chronischen Hufrehe-Pferden und den Podotrochlose-Pferden unterschied. Der Kolmogorov-Smirnov-Test wurde zunächst für die Verteilung der Stichproben berechnet, vgl. Tab. 4.

**Tabelle 4:** Kolmogorov- Smirnov-Test  
Dichte um die Foramina bei chronischen Hufrehe-Pferden und Podotrochlose-Pferden, eigene Darstellung

Kolmogorov-Smirnov-Test	Kolmogorov-Smirnov-Z	Asymp. Sig. (2-seitig)
mediales Foramen/axial	0,994	0,276
mediales Foramen/abaxial	0,859	0,451
laterales Foramen/axial	0,948	0,329
laterales Foramen/abaxial	0,992	0,279

Die Berechnung der asymptotischen Signifikanz lag für jeden Bereich über 0,05. Da das Signifikanzniveau bei 5% lag, sind die Daten signifikant und gleichverteilt. Aufgrund der Gleichverteilung der Stichproben konnten die Mediane der Grauwerte im Folgenden miteinander verglichen werden. Zuvor wurde der Mann-Whitney-U-Test berechnet, vgl. Tab. 5.

**Tabelle 5:** Mann-Whitney-U-Test den Vergleich der Dichte um die Foramina bei chronischen Hufrehe-Pferden und Podotrochlose-Pferden, eigene Darstellung

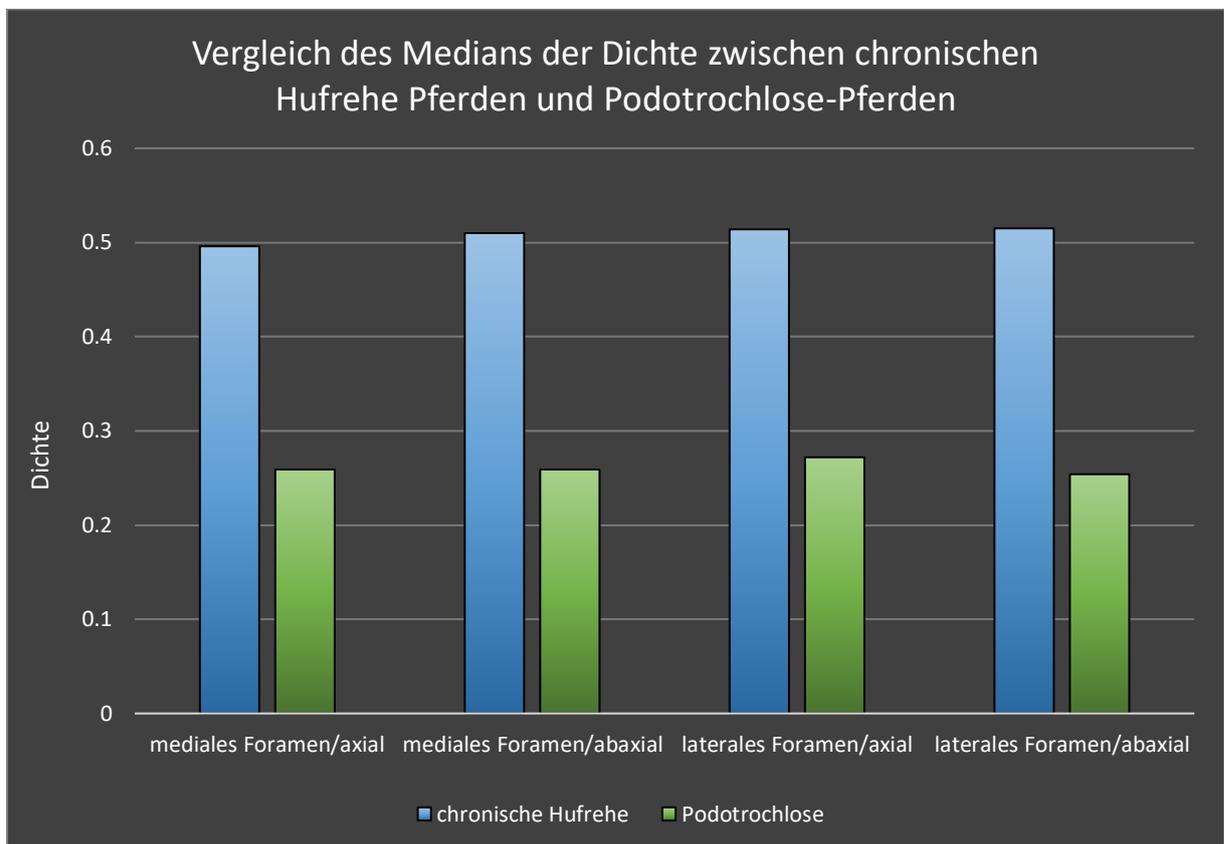
Mann-Whitney-U-Test	Exakte Signifikanz (2-seitig)
mediales Foramen/axial	<,001
mediales Foramen/abaxial	<,001
laterales Foramen/axial	<,001
laterales Foramen/abaxial	0,001

Die Ergebnisse der exakten Signifikanz lagen alle unter dem Wert 0,001 oder diesem gleich. Daraus resultiert, dass sich die Dichtewerte der chronischen Hufrehe-Pferde und der Podotrochlose-Pferde signifikant voneinander unterscheiden. Wie genau sie sich

unterscheiden, wurde anhand des Vergleichs der Medianwerte analysiert, vgl. Tab. 6 und zur Verdeutlichung Abb. 17.

**Tabelle 6:** Vergleich der Medianen der Dichtewerte zwischen chronischen Hufrehe-Pferden und Podotrochlose-Pferden, eigene Darstellung

	<b>chronische Hufrehe</b>	<b>Podotrochlose</b>
mediales Foramen/axial	0,496	0,259
mediales Foramen/abaxial	0,51	0,259
laterales Foramen/axial	0,514	0,272
laterales Foramen/abaxial	0,515	0,254



**Abbildung 17:** Balkendiagramm zum Vergleich der Medianen der Dichtewerte zwischen chronischen Hufrehe-Pferden und Podotrochlose-Pferden, eigene Darstellung

Der Vergleich der Medianwerte zwischen den beiden Gruppen zeigt für alle gemessenen Dichtewerte um die Foramina nutritia einen deutlich höheren Wert für die chronisch betroffenen Hufrehe-Pferde. Die chronisch betroffenen Hufrehe-Pferde haben folglich um den Bereich des Arcus terminalis eine höhere Dichte als die Pferde, welche von Podotrochlose betroffen sind.

### 4.3 Einfluss des Winkels vom Hufbein in der Hufkapsel auf die Größe der Foramina nutritia und die Dichte des umliegenden Knochens

Um den Einfluss des Winkels des Hufbeins auf die Foraminagrößen und die Dichtewerte einschätzen zu können, wurden die Winkel mit diesen Werten korreliert. Dies geschah unter Verwendung der Spearman Korrelation. Die Ergebnisse der Korrelationen wurden in Tab. 7 zusammengefasst.

**Tabelle 7:** Spearman- Korrelation den Zusammenhang zwischen den Abmessungen der Foramina und Dichtewerten und den Winkeln der Dorsalwand und des Sohlenkörpers und dem Boden (siehe Abb. 13), eigene Darstellung

Zusammenhang zwischen		Rotationswinkel	Winkel a	Winkel b
<b>Größe des medialen Foramen</b>	Korrelationskoeffizient	0,061	0,142	0,163
	Sig. (2-seitig)	0,564	0,180	0,123
<b>Größe des lateralen Foramen</b>	Korrelationskoeffizient	0,426**	0,167	0,355**
	Sig. (2-seitig)	< 0,001	0,114	< 0,001
<b>Dichte der med. Foramen/axial</b>	Korrelationskoeffizient	0,315**	0,247*	0,201
	Sig. (2-seitig)	0,002	0,018	0,056
<b>Dichte des med. Foramen/abaxial</b>	Korrelationskoeffizient	0,131**	0,294**	0,231*
	Sig. (2-seitig)	0,003	0,005	0,028
<b>Dichte des lat. Foramen/axial</b>	Korrelationskoeffizient	0,346**	0,272**	0,226*
	Sig. (2-seitig)	< 0,001	0,009	0,031
<b>Dichte des lat. Foramen/abaxial</b>	Korrelationskoeffizient	0,317**	0,232*	0,188
	Sig. (2-seitig)	0,002	0,027	0,075

\*\*Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant

\*Die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant

Auf einem Signifikanzniveau von 1% zeigte sich eine moderate Korrelation zwischen der Größe des lateralen Foramen und des Rotationswinkels sowie des Winkels b. Ebenfalls ergab sich eine moderate Korrelation zwischen den Dichtewerten mit dem Rotationswinkel. Eine geringe Korrelation stellte sich für die Dichte des medialen Foramen/abaxial mit dem Rotationswinkel heraus. Die Dichtewerte korrelierten gering für die Dichte des medialen Foramen/abaxial und die Dichte des lateralen Foramen/axial mit Winkel a. Auf einem Signifikanzniveau von 5% ergab sich eine schwache Korrelation zwischen den Dichtewerten des medialen Foramen/axial und dem lateralen Foramen/abaxial und dem Winkel a. Winkel b

korrelierte schwach mit der Dichte des medialen Foramen/abaxial und der Dichte des lateralen Foramen/axial.

#### 4.4 Zusammenhang zwischen Größe der Foramina, Dichte und weiteren erhobenen Parametern wie Grad der Rehe, Körpermasse und Alter

Die Zusammenhänge wurden unter Verwendung der Spearman Korrelation untersucht, da für diese kein linearer Zusammenhang festgestellt werden konnte. Für die Korrelationen wurden 59 Pferde genutzt, da nur für diese die Daten zum Vergleich vollständig vorlagen, vgl. Tab. 8.

**Tabelle 8:** Spearman-Korrelation den Zusammenhang der Größe der Foramina, der Dichtewerte um die Foramina, ob das Pferd Hufrehe hat, welchen Grad der Hufrehe das Pferd hat, wieviel das Pferd wiegt und dem Alter des Pferdes, Darstellung aus SPSS

Korrelationen zwischen		Korrelationen									
		mediales F.	laterales F.	mediales F./axial	mediales F./abaxial	laterales F./axial	laterales F./abaxial	Hufrehe	Gewicht	Grad der Hufrehe	Alter
Spearman-Rho	mediales F.	1,000	-,110	,139	,174	,130	,128	,153	-,040	-,079	,314'
	laterales F.	-,110	1,000	,236	,207	,269'	,215	,479**	-,404**	,015	,271'
	mediales F./axial	,139	,236	1,000	,972**	,971**	,956**	,358**	,071	,153	,236
	mediales F./abaxial	,174	,207	,972**	1,000	,961**	,951**	,364**	,027	,097	,255
	laterales F./axial	,130	,269'	,971**	,961**	1,000	,950**	,350**	-,004	,125	,236
	laterales F./abaxial	,128	,215	,956**	,951**	,950**	1,000	,307*	,100	,159	,219
	Hufrehe	,153	,479**	,358**	,364**	,350**	,307*	1,000	-,341**	-,124	,396**
	Gewicht	-,040	-,404**	,071	,027	-,004	,100	-,341**	1,000	,183	,071
	Grad der Hufrehe	-,079	,015	,153	,097	,125	,159	-,124	,183	1,000	,091
Alter	,314'	,271'	,236	,255	,236	,219	,396**	,071	,091	1,000	

\*. Die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant (zweiseitig).

\*\*.. Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

Die Korrelationen ergab sich auf einem Signifikanzniveau von 1% ein starker positiver Zusammenhang zwischen den Dichtewerten um die Foramina nutritia. Stieg der Dichtewert an einer Stelle an, stieg dieser auch an den anderen Stellen. Es ergab sich ein moderater, positiver Zusammenhang zwischen dem Umstand, ob das Pferd Hufrehe hat und der Größe des lateralen Foramen. Ebenfalls korrelierte der Umstand, ob das Pferd Hufrehe hat, mit den Dichtewerten um die Foramina, mit Ausnahme des lateralen Foramen/abaxial. Der Umstand, ob das Pferd Hufrehe hat und das Alter des Pferdes korrelierten ebenfalls.

Die zusammenhängenden Faktoren bedeutete dies, dass beim Anstieg eines Faktors der andere auch anstieg, jedoch nicht linear.

Ein moderater, inverser Zusammenhang bestand zwischen der Größe des lateralen Foramen und dem Gewicht des Pferdes sowie dem Umstand, ob das Pferd Hufrehe hat und dem Gewicht des Pferdes. Die Tatsache, dass sich dieser Zusammenhang als invers zeigte,

bedeutete für diese Faktoren, dass sie sich negativ beeinflussen. Der Trend zeigte, dass das laterale Foramen bei Pferden mit einem geringeren Gewicht größer war und kleiner für Pferde mit einem hohen Gewicht. Für den Zusammenhang zwischen der Hufrehe und dem Gewicht zeigte sich, dass sich für die Podotrochlose-Pferde das Gewicht als höher erwies und für die chronischen Hufrehe-Pferde als geringer. Dabei kann allerdings auch nur eine Aussage über den groben Trend gemacht werden und nicht über eine exakte Verteilung der Werte.

Auf einem Signifikanzniveau von 5% stellten sich weitere Zusammenhänge der Faktoren dar. Es bestand ein moderater positiver Zusammenhang zwischen der Größe der beiden Foramina und dem Alter der Pferde. Dies galt ebenso für den Zusammenhang zwischen der Größe des lateralen Foramen und der Dichte des lateralen Foramen/axial. Die Dichte des lateralen Foramen/axial korrelierte zudem mit dem Umstand, ob das Pferd Hufrehe hatte oder nicht.

Für die Kreuztabellen zwischen der Rasse und Nutzungsart wurden die akuten und die chronischen Hufrehe-Pferde als eine Gruppe analysiert. Für die Gruppe stellte sich heraus, dass Ponys (Ponys und Shetlandponys zusammengefasst) den überwiegenden Anteil der Gruppe repräsentierten, gefolgt von Haflingern. Die Hufrehe-Pferde wurden hauptsächlich als Freizeitpferde genutzt, siehe Tab. 9.

Die Mehrzahl der Pferde in der Podotrochlose-Gruppe waren Warmblüter. Die Podotrochlose-Pferde wurden ebenfalls hauptsächlich als Freizeitpferde gehalten, siehe Tab. 10.

**Tabelle 9:** Kreuztabelle der Hufrehe-Pferde: Rasse und Nutzungsart; kA eigene Darstellung

Angabe zur Rasse,

Kreuztabelle der Hufrehe- Pferde										
Rasse	Beistell- pferd	Dressur	Freizeit	Jung- pferd	kA	Koppel- pferd	Show	Western	Zucht	Gesamt
Vollblut	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2
Araber	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2
Fjordpferd	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2
Freiberger	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Haflinger	0	1	4	0	0	0	0	1	0	6
Hannoveraner	0	1	0	0	2	0	0	0	0	3
Islandpferd	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Lipizzaner	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
M. Foxtrotter	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Noriker	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Pony	0	0	4	0	0	1	0	0	0	5
Quarter Horse	0	0	3	0	0	0	0	0	0	3
Shetlandpony	1	0	3	0	0	0	0	0	0	4
sonstige	0	0	1	0	0	0	1	0	0	2
Tinker	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Trakehner	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Warmblut	0	1	2	0	0	0	0	0	0	3
<b>Gesamt</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>26</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>39</b>

**Tabelle 10:** Kreuztabelle der Podotrochlose-Pferde: Rasse und Nutzungsart; kA eigene Darstellung

keine Angabe zur Rasse,

Kreuztabelle der Podotrochlose-Pferde											
Rasse	Dressur	Freizeit	Jung- pferd	kA	Reit- pferd	sonstige	Spring- pferd	Viel- seitigkeit	Voltigier- pferd	Western	Gesamt
Araber	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2
Hannoveraner	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Kinsky	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
KWPN	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Lippizzaner	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Oldenburger	1	0	2	1	1	0	2	0	0	0	7
Paint	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Pinto	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Pony	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Quarter Horse	0	1	1	1	1	0	0	0	0	3	7
Traber	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Trakehner	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2
Warmblut	6	7	1	2	0	0	2	2	2	0	21
Westfale	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Zangersheide	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
<b>Gesamt</b>	<b>9</b>	<b>14</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>50</b>

## 5. Diskussion

Ziel der vorliegenden Diplomarbeit war es, die offenen Veränderungen um den Arcus terminalis bei Hufrehe-Pferden zu erfassen. Zu diesem Zweck wurde die Größe der gefüßumschließenden Foramina und die umgebende Knochendichte vermessen.

Die im Zusammenhang mit dieser Studie untersuchten Hypothesen nahmen an, dass die Hufrehe-Pferde sowohl größere Foramina aufweisen würden, als auch eine höhere Dichte um die Foramina als die Kontrollgruppe. Die gemessenen Werte blieben dabei allerdings nicht unbeeinflusst von der Position des Hufbeins in der Hufkapsel.

Im Folgenden wird der Fokus auf zwei wesentliche Charakteristika der equinen Hufrehe gelegt. Diese Pathologien waren für die Analyse in der vorliegenden Arbeit entscheidend.

### 5.1 Dislokation des Hufbeins in der Hufkapsel

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigten eine positive, moderate Korrelation zwischen den gemessenen Parametern der Foraminagröße und den Winkeln sowie den Dichtewerten und den Winkeln des Hufbeins. Dies ist die Schlussfolgerung zu, dass sich mit einem Anstieg des Winkels die erhobenen Parameter ebenfalls erhöhen.

Entscheidend für die Analyse ist dabei, dass es bei der equinen Hufrehe zu einer Dislokation des Hufbeins in der Hufkapsel kommt <sup>(6)</sup>. Dieser Verlagerung des Hufbeins liegt die Schädigung des Hufbeintragers zugrunde. Verschiedene Ursachen können dabei zur Beeinträchtigung des Hufbeintragers führen.

Die von Hufrehe betroffenen Pferde können der Ätiologie nach in zwei große Gruppen unterteilt werden: Pferde, die dieses Krankheitsbild aufgrund biochemischer Ursachen entwickeln und Pferde, die durch direkte mechanische Ursachen von Hufrehe betroffen sind <sup>(27)</sup>.

Das Hufbein verändert seine Position in Abhängigkeit der betroffenen Lamellen des Hufbeintragers. Je nach Verteilung und Anzahl der geschädigten lamellaren Verbindungen kann das Hufbein nicht mehr in seiner ursprünglichen Position gehalten werden, sondern wird von den biomechanischen Kräften nach palmar gedrückt. Die treibenden Kräfte, welche das Hufbein zur Sohle drücken, sind die nicht mehr ausgeglichene Kraft des Gewichtes des Pferdes und der Zug der tiefen Beugesehne nach caudo-proximal. Drei Modelle der

Dislokation des Hufbeins werden dabei unterschieden: die Rotation, die symmetrische Absenkung sowie die asymmetrische Absenkung <sup>(28)</sup>. Die asymmetrische Absenkung nach medial wird dabei häufiger beobachtet und kommt durch eine größere Belastung der Extremität durch Außenrotation oder die Lokalisation der lamellaren Lesionen zustande <sup>(28)</sup>.

Diese Formen der Dislokation bedingen unterschiedlichste Blickwinkel auf die Foramina nutritia im Hufbein auf den Röntgenaufnahmen im dorsopalmaren Strahlengang. Prinzipiell werden die Foramina nutritia von cranial nach caudal durchleuchtet, während die Facies solearis des Hufbeins annähernd horizontal zum Boden verläuft. Dieser Winkel variiert in verschiedenen Studien bei gesunden Pferden zwischen 5,63° und 8,9° <sup>(29),(30)</sup>.

Die unterschiedlichen Winkel ergeben sich durch die variierenden Formen der Hufkapsel von Pferden, da das Hufbein in Abhängigkeit von dieser ausgerichtet ist. Leidet das Pferd unter Hufrehe, vergrößert sich der Winkel aufgrund der Rotation des Hufbeins <sup>(21)</sup>.

Bei der Podotrochlose handelt es sich um eine Erkrankung, welche ebenfalls den Fuß des Pferdes beeinträchtigt, genauer gesagt die Hufrolle. Diese Erkrankung führt jedoch zu keiner Veränderung der Position des Hufbeins. Die Pferde werden aufgrund einer Lahmheit auffällig <sup>(31)</sup>.

## 5.2 Zusammenhang der Dislokation des Hufbeins mit den Foraminagrößen

Aus der zuvor erklärten Dislokation des Hufbeins resultiert, dass der Blickwinkel auf die Foramina nutritia für jedes Pferd individuell ist und einen Einfluss auf die gemessene Größe des Foramens hat.

Die gemessenen Foraminagrößen in einem Hufbein unterschieden sich dadurch, dass das mediale Foramen das größere darstellte. Dies ist anatomisch durch die Führung des Hauptgefäßes des Vorderfußes festgelegt <sup>(10)</sup>. Auffällig war, dass sich die Foraminagrößen eines Hufbeins in der Gruppe der chronischen Hufrehe-Pferde nur gering voneinander unterschieden, in der Podotrochlose-Gruppe jedoch deutlich. Diese Annäherung der beiden Foraminagrößen der Hufrehe-Pferde könnte auf die veränderte Position des Hufbeins zurückzuführen sein. Durch einen verkippten Winkel des Hufbeins und einen daraus resultierenden schrägen Blickwinkel auf die Foramina, könnte das laterale Foramen größer erscheinen als es bei einer physiologischen Winkelung der Fall gewesen wäre und das mediale gegebenenfalls auch kleiner. Bei asymmetrischer Absenkung nach medial und einer gleichzeitigen Rotation des Hufbeins könnte es beispielsweise dazu kommen. Zudem lässt sich

durch die positive, moderate Korrelation des lateralen Foramen mit dem Rotationswinkel und dem Winkel  $\beta$  aussagen, dass mit steigendem Rotationsgrad auch das Foramen größer erscheint. Der Blickwinkel lässt das laterale Foramen größer erscheinen, je stärker das Hufbein disloziert ist.

Wird jedoch der vergleichende Boxplot, in welchem die akuten Hufrehe ebenfalls aufgeführt sind, miteinbezogen, wird es wahrscheinlicher, dass sich die Foraminagrößen der chronischen Hufrehe-Pferde aneinander angeglichen haben. Da alle akuten Hufrehe-Pferde ebenfalls eine Rotation des Hufbeins bei gleichzeitig deutlich größerem medialem Foramen aufwiesen, wird es wahrscheinlicher, dass die knöchernen Veränderungen im Sinne einer Ausdehnung des Foramens bei den chronisch betroffenen Pferden vorwiegend lateral stattgefunden haben. Dies lässt sich durch die Führung der kleineren Leitungsstrukturen auf der lateralen Seite des Vorderfußes erklären<sup>(10)</sup>. Die kleineren Gefäße werden durch das vermehrte Blutvolumen weiter gedehnt und stoßen schneller auf knöchernen Widerstand als auf der medialen Seite. Aufgrund dieser Messungen kann davon ausgegangen werden, dass sich das laterale Foramen bei den chronischen Hufrehe-Pferden immer mehr der Größe des medialen Foramen angleicht.

Bei diesen Überlegungen muss allerdings beachtet werden, dass die Abmessung der Größe des Foramens keine exakte Größe darstellt, da diese nur anhand einer einzigen Röntgenaufnahme gemessen wurde und nicht die dreidimensionale Realität abbildet.

### **5.3 Zusammenhang der Dislokation des Hufbeins mit der Dichte**

Die Ergebnisse zeigten eine positive moderate Korrelation zwischen den meisten Dichtewerten und dem Rotationswinkel. Dieses Ergebnis belegt, dass stärker von der Dislokation des Hufbeins betroffene Pferde auch größere knöcherne Veränderungen aufwiesen. Mit länger anhaltender Krankheitsdauer sind die Veränderungen im Knochen deutlicher zu sehen<sup>(21)</sup>. In der Studie von Engiles et al.<sup>(22)</sup> konnte ebenfalls eine Korrelation des klinischen Schweregrades der Hufrehe mit den pathologischen Befunden des Hufbeins festgestellt werden. Die Prognose für das Pferd geht mit der Schwere der Hufrehe und somit dem Rotationswinkel einher<sup>(16)</sup>.

### **5.4 Zusammenhang des erhöhten digitalen Blutflusses und der verstärkten Pulsation mit den Foraminagrößen und der Dichte**

Für die chronisch betroffenen Hufrehe-Pferde stellte sich für alle vier untersuchten Positionen um den Arcus terminalis die Knochendichte höher dar als bei der Kontrollgruppe der

Podotrochlose-Pferde. Dies zeigt deutlich, dass ein Umbau im Knochen insofern stattgefunden hat, als die Ränder des gefäßumgebenden Knochens verstärkt mineralisiert sind. Das Ergebnis resultiert aus folgender Kausalkette:

Das Blut ist essentiell und versorgt den Körper mit Nährstoffen, Sauerstoff, Wachstumsfaktoren sowie auch Hormonen <sup>(32)</sup>. Die Gefäße, die durch den Knochen ziehen, unterliegen dabei besonderen Bedingungen. Das Blut fließt innerhalb eines geschlossenen Systems, in welchem der Druck konstant gehalten werden muss <sup>(33)</sup>. Die versorgenden Gefäße sind in ihrer Dehnbarkeit einerseits durch die Gefäßwand selbst als auch durch den umgebenden Knochen limitiert. Erhöht sich der Druck in den Gefäßen, werden die Gefäßwände zunächst gedehnt und können weitgehend den Blutdruck regulieren und konstant halten. Besonders gut dehnbar sind Venen <sup>(33)</sup>.

Kann sich die Gefäßwand aufgrund des knöchernen Einschlusses jedoch nicht weiter dehnen und bleibt der Druck weiterhin hoch, kann dies zu einem Knochenumbau führen. Der Blutfluss, und damit der Blutdruck, korreliert mit der Knochendichte. So wurde bei einem länger anhaltenden erhöhten Blutdruck gezeigt, dass die Knochendichte des umliegenden Knochens zunimmt <sup>(8)</sup>.

Die Blutversorgung aller Knochen ist vom charakteristischen Aufbau sehr ähnlich <sup>(8)</sup>. Brookes und Revell <sup>(34)</sup> beschrieben den grundlegenden schematischen Aufbau des vaskulären Systems mit einer Hauptarterie in zentraler Position, einem kapillaren Netzwerk in der Kompakta sowie viele Sinusoide im Knochenmark. Die Versorgung des Hufes ist insofern besonders, als dass die Venen in einer Vielzahl keine Venenklappen aufweisen und die Gefäße über zahlreiche arteriovenöse Anastomosen (AVA) innerhalb der lamellaren Dermis verbunden sind. Die Richtung des Blutflusses ist somit direkt abhängig vom Druck <sup>(7)</sup>. Durch diesen speziellen anatomischen Aufbau soll die Versorgung wichtiger anatomischer Strukturen von mehreren Seiten gewährleistet werden. Der Arcus terminalis stellt dabei eine Art Verteilungszentrum im Hufbein dar <sup>(35)</sup>. Der nötige Druck zur Gewährleistung der Blutzirkulation erfolgt mit Hilfe der Kompression des umliegenden Weichteilgewebes bei Fußung des Pferdes.

Eine Studie von Mederle <sup>(36)</sup> aus dem Jahr 2015 hat sich mit den knöchernen Veränderungen vor allem im Bereich des Sulcus parietalis am Huf bei Hufrehe-Pferden beschäftigt. In einem Versuch wurden patho-anatomisch die Veränderungen am Huf analysiert. Entdeckt wurden Knochenzubildungen im Bereich des Sulcus parietalis sowie auch mehrere kleine Gefäßneubildungen. Im Zuge dessen kann man von einem unmittelbaren Zusammenhang zwischen Angiogenese und Osteogenese sprechen, da ein Knochenumbau auch immer mit

Gefäßneubau bzw. Umbau gekoppelt werden muss, um die Homöostase gewährleisten zu können<sup>(32)</sup>.

Robling und Turner<sup>(9)</sup> (2009) formulieren in ihrem Paper zudem, dass sich ein Knochen an seine auf ihn ausgeübte Belastung anpasst. Wird ein Knochen stark belastet, ist er stabiler und im Umkehrschluss schwächer, wenn er weniger belastet wird. Engiles et al.<sup>(22)</sup> untersuchten in ihrer Studie aus dem Jahr 2015 den Zusammenhang zwischen Hufrehe und der Knochendichte des Hufbeins. Die chronischen Hufrehe-Pferde zeigten histologisch im Knochen eine medulläre Entzündung und starke Osteolyse im Knochen. Zudem stellten sich Remodellierungen der Blutgefäße heraus, sie waren verdickt. In diesem Zusammenhang sprechen sie von einer periadventitialen Fibrose und/oder einer fibromyxoid-stromalen Proliferation<sup>(22)</sup>.

Aufgrund dieser Studien und anatomischer Zusammenhänge kann somit davon ausgegangen werden, dass die länger anhaltende verstärkte Pulsation der Gefäße im Huf zu einer knöchernen Reaktion führt, die sich in Form einer verstärkten Mineralisation um die Gefäße darstellt. Durch die veränderten, verdickten Gefäßwände muss das Blut zudem gegen einen erhöhten Widerstand arbeiten und der Pulsschlag wird zwangsläufig verstärkt.

Diese Zubildungen des Knochens können je nach Ausprägung den anfangs erwünschten essentiellen Blutfluss und damit die Versorgung des Knochens stark einschränken und zu einer verminderten Homöostase führen. Im Gesamtbild nimmt das Hufbein in seiner Dichte im Verlauf der Hufrehe ab.

Die vorliegenden Ergebnisse aus dieser Arbeit entsprechen somit den Erwartungen.

## 5.5 Weitere Zusammenhänge

In der Korrelationstabelle haben sich folgende weitere Zusammenhänge herausgestellt:

Die Dichtewerte um die Foramina nutritia korrelierten stark miteinander. Das lässt sich darauf zurückführen, dass auf alle Stellen des Knochens der gleiche Druck traf. Die verstärkte Pulsation des Gefäßes im Arcus terminalis scheint sich auf alle umgebenden knöchernen Strukturen auszuwirken.

Die positive Korrelation zwischen dem Umstand, ob das Pferd Hufrehe hat und der Größe des lateralen Foramen sowie den Dichtewerten um die Foramina, bestärkt die Annahme der Hypothesen der vorliegenden Arbeit.

Die Korrelation zwischen dem Umstand, ob das Pferd Hufrehe hat und dem Alter lässt sich dadurch erklären, dass mit zunehmendem Alter die Prädisposition eines Pferdes steigt, an *pituitary pars intermedia dysfunction* (PPID, Cushing) zu erkranken. Diese endokrinologische Krankheit stellt einen starken Risikofaktor für Hufrehe dar. 21 – 30 % der Pferde ab einem Alter von >15 Jahren erkranken an PPID. Davon entwickeln wiederum 30 % Hufrehe<sup>(3)</sup>.

Der Zusammenhang zwischen der Größe des lateralen Foramen und dem Gewicht des Pferdes korrelierte negativ. Wie im vorigen Abschnitt erläutert, reagiert Knochen auf Druck mit Umbaureaktionen. Je schwerer das Pferd ist, desto mehr Druck lastet auf dem Hufbein. Das Gewicht korrelierte wiederum invers mit dem Umstand, ob das Pferd Hufrehe hat. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass es dem Pferd im Verlauf der Krankheit schlecht geht und es daher generell weniger Nahrung aufnimmt.

Die Kreuztabellen wiesen für die Hufrehe-Gruppe als häufigste Pferde Ponys auf. In einer Studie von Geor<sup>(37)</sup> aus dem Jahr 2010 wurde entdeckt, dass Ponys häufiger von chronischer Hufrehe betroffen sind als andere Rassen. Die Überrepräsentation dieser Rasse ist am wahrscheinlichsten mit einer unpassenden Fütterung verbunden. Zu kohlenhydratreiche Nahrung sorgt für einen erhöhten Insulinspiegel. Ein dauerhaft zu hoher Insulinspiegel verursacht wiederum eine Dysregulation in den Organen, und in Folge eine Insulinresistenz. Eine Insulinresistenz des Körpers bedingt den Anstieg des Insulins durch die  $\beta$ -Zellen des Pankreas, welche gegenüberlich zum Menschen beim Pferd nicht zur Erschöpfung neigen. Für das Pferd resultiert daraus eine dauerhafte Hyperinsulinämie, welche wie zuvor beschrieben die Hauptursache für Hufrehe darstellt<sup>(38)</sup>.

Die überwiegende Rasse bei den gemessenen Podotrochlose-Pferden waren Warmblüter. In der Literatur werden als überrepräsentierte Rassen dieser Krankheit europäische Warmblüter, englische Vollblüter und Quarter horses genannt. Das hängt vermutlich mit der Hufform dieser Rassen zusammen. Quarter horses und Warmblüter haben verglichen mit ihrem Körper relativ schmale, große Hufe. Englische Vollblüter hingegen besitzen flache Hufe, neigen aber häufig zu dorsopalmarer Imbalance<sup>(39)</sup>.

## 5.6 Limitationen

Für die vorliegende Arbeit wurden einige Parameter nicht erhoben, anhand derer noch genauere Korrelationen und Aussagen möglich gewesen wären.

Die Nutzungsart der einzelnen Pferde wurde erfasst, jedoch lag keine genaue Dokumentation darüber vor, in welchem Ausmaß und wo die Pferde bewegt wurden. Das Ausmaß der Bewegungen sowie der Untergrund haben jedoch maßgeblichen Einfluss auf die Dichte des Hufbeins <sup>(20)</sup>. Zudem lag keine Dokumentation über eventuell vorausgegangene Hufkorrekturen oder Konsultationen eines Hufschmieds vor, welche erheblichen Einfluss auf die Form des Hufes und somit auf die Lage des Hufbeins in der Hufkapsel haben.

Das Gewicht der Pferde wurde bei vielen erfasst, jedoch nicht bei allen. Mit der alleinigen Angabe des Gewichts lässt sich allerdings auch keine genaue Aussage darüber treffen, ob das Pferd adipös war oder eher abgemagert, da jedes Pferd für seinen Rassestandard zu groß oder zu klein sein kann. Um einen sinnvollen Zusammenhang mit der Prädisposition für Hufrehe herstellen zu können, wäre deshalb die Angabe des Body-Condition-Scores sinnvoller gewesen.

Die Absenkung des Hufbeins wurde nicht erfasst, lediglich die Rotation. Ersteres hätte genauere Analysen ermöglichen können, inwiefern die Größe der Foramina speziell von einer asymmetrischen Absenkung des Hufbeins abhängig war.

Die Normalisierung der Foraminagrößen lieferte zwar vergleichbare Werte zwischen den verschiedensten Rassen, jedoch kann auch bei diesen Messungen das Verhältnis zwischen Kronbein und der Breite der Foramina nutritia sehr verschieden sein. Daher ist diese Methode nicht sehr exakt.

## 6. Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die röntgenologischen und pathologischen Veränderungen um die Foramina nutritia im Hufbein von Hufrehe-Pferden zu erfassen und zu analysieren. Die Größe der Foramina im Hufbein sowie die Dichte um diese wurde gemessen. Des Weiteren wurde die Rotation des Hufbeins erfasst. Die Studie wurde anhand zweier Gruppen durchgeführt: Pferde, die an Hufrehe erkrankt waren und der Kontrollgruppe mit Pferden, die an Podotrochlose erkrankt waren. Für jedes Pferd wurden zudem weitere Daten wie Alter, Rasse, Nutzungsart, Grad der Hufrehe und Gewicht erfasst.

Für den Vergleich der Foraminagrößen und Dichtewerte wurden die Hufrehe-Pferde in akut und chronisch betroffene unterteilt. Die zu vergleichenden Gruppen bestanden aus sechs akut betroffenen Hufrehe-Pferden, 33 chronisch betroffenen und 50 Podotrochlose-Pferden. Nur die chronisch betroffenen Pferde wurden anschließend mit den Podotrochlose-Pferden verglichen. Die Winkelkorrelationen mit den Foraminagrößen und Dichtewerten wurden wiederum für alle Pferde gleichermaßen durchgeführt.

Die Foraminagrößen der Hufrehe-Pferde erwiesen sich als größer im Vergleich zu der Podotrochlose-Gruppe. Für das laterale Foramen konnte ein statistisch signifikant größeres Foramen nachgewiesen werden. Dieses bleibt allerdings nicht unbeeinflusst von der Winkelung des Hufbeins in der Hufkapsel. Die Dichtewerte um die Foramina nutritia stellten sich in der Gruppe der Hufrehe-Pferde allesamt signifikant höher dar. Mit besonderem Fokus auf eine häufigere asymmetrische, mediale Absenkung des Hufbeins bleibt offen, inwiefern diese Auswirkungen auf die gemessenen Foraminagrößen hat.

Die vorliegende Arbeit lieferte Erkenntnisse über die Veränderungen, welche im Hufbein um den Arcus terminalis bei Hufrehe-Pferden stattfinden. Die Erkenntnisse können Grundlagen weiterer wissenschaftlicher Arbeiten darstellen und zu nützlich Radiologen weitere Anhaltspunkte in der Diagnostik der Hufrehe ermöglichen.

## 6.1 Summary

The aim of this study was to identify and analyse the radiological and pathological changes around the vessels of the distal phalanx due to Laminitis. The size and the density of the Foramina nutritia of the coffin bone were measured. In addition, the rotation of the distal phalanx was evaluated. This study was conducted between two different groups: horses that suffer from Laminitis and horses ill with navicular syndrome. For each horse additional parameters were evaluated like age, breed, kind of use, degree of laminitis and weight.

For the comparison between the sizes of the Foramina and the density of the bone, the horses were split in acute and chronic cases of laminitis. The groups were composed of six horses with acute laminitis, 33 horses with chronic laminitis and 50 horses with navicular syndrome. Then just the chronic cases and the navicular syndrome horses were compared. The correlations between the angles of the distal phalanx and the size of the foramina as well as the bone density were analysed for all horses.

The foramina sizes were bigger in the group of the laminitis horses. The lateral foramen was significantly bigger, although the sizes were affected by the angle of the coffin bone. The density of the bone was significantly higher in all positions measured. With particular focus on a more frequently asymmetrical displacement of the distal phalanx to the medial side it remains unclear how far these had an impact on the measured sizes of the foramina.

This study provides insights into changes that take place in the distal phalanx around the terminal arch when the horse suffers from laminitis. These perceptions might be useful as a basis for more scientific work and offer further evidence for radiological laminitis diagnostics.

## 7. Literatur

- (1) Sladky P. Hoffnung für Hufrehe-Patienten [Internet]. 2018/19 [zitiert 14. August 2023]. Verfügbar unter: <https://www.tieraerzteverlag.at/vetjournal/hufrehe-patienten>
- (2) Rumfola E., Banse H. E., Atkins M., McGowan C. M., Ireland J. L. Approaches to Endocrinopathic Laminitis in the Field: Results of a Survey of Veterinary Practitioners in North America; *Journal of Equine Veterinary Science*. 2022; 110: 103856. DOI: 10.1016/j.jevs.2021.103856
- (3) Grenager N. S., Endocrinopathic Laminitis; *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice*. 2021; 3(3): 619–638. DOI: 10.1016/j.cveq.2021.08.001
- (4) Luthersson N., Mannfalk M., Parkin T., Harris P. Laminitis Risk Factors and Outcome in a Group of Danish Horses; *Journal of Equine Veterinary Science*. 2017; 53: 68–73. DOI: 10.1016/j.jevs.2016.03.006
- (5) de Laat M. A., Reiche D.B., Sillence M. N., McGree J. M. Incidence and Risk Factors for Recurrence of Endocrinopathic Laminitis in Horses; *Journal of Veterinary Intern Medicine*. 2019; 33: 1473–1482. DOI: 10.1111/jvim.15497
- (6) Hood D. M., Laminitis in the Horse; *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice*. 1999; 15(2): 287–294. DOI: 10.1016/s0749-0739(17)30145-1
- (7) Peroni J. F., Eades S. C., Bailey S. R. Hemodynamic Events in Laminitis. In: Belknap J. K., Geor, R. J., Hrsg. *Equine Laminitis*. 1. Auflage. Ames, Iowa: John Wiley & Sons; 2017. S. 75–76.
- (8) McCarthy I. The Physiology of Bone Blood Flow: A Review; *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 2006; Volume 88-A: Supplement 3. DOI: 10.2106/JBJS.F.00890
- (9) Robling and Turner. Mechanical Signaling for Bone Modeling and Remodeling, *Critical Reviews in Eukaryotic Gene Expression*. 2009; 19(4): 319-338. DOI: 10.1615/critreveukargeneexpr.v19.i4.50
- (10) Budras K., Röck S. *Atlas der Anatomie des Pferdes*. 6. Auflage. Hannover: Schlütersche Verlag; 2009. S. 8, 10, 26–29.
- (11) Ruthe H. *Der Huf*. 6. Auflage. Stuttgart: Enke Verlag; 2012. S. 75–94, 103–108, 241–248.
- (12) Parks A. H. Anatomy and Function of the Equine Digit, in: *Equine Laminitis*. In: Belknap J. K., Geor, R. J., Hrsg. *Equine Laminitis*. 1. Auflage. Ames, Iowa: John Wiley & Sons; 2017. S.13–18.
- (13) König H., Liebich H. *Anatomie der Haus- und Nutztiere*. 3. Auflage. Stuttgart: Schattauer Verlag; 2005. S. 156–159.
- (14) Pollitt C. *Farbatlas Huf: Anatomie und Klinik*. Deutsche Auflage, Bearbeitung durch Budras K.-D., Hertsch B., Hannover: Schlütersche GmbH; 1999. S. 13.

- (15) Pollitt C. C. Lamellar Function at the Cellular Level, in: Belknap J. K., Geor, R. J., Hrsg. Equine Laminitis. 1. Auflage. Ames, Iowa: John Wiley & Sons; 2017. S. 22.
- (16) Butler J. A., Colles C. M., Dyson S. J., Kold S. J., Poulos P. W. Clinical Radiology of the Horse. 2. Auflage. Oxford: MPG Books Ltd.; 2000. S. 27–31, 36, 58–61.
- (17) Sherlock C., Parks A. Radiographic and Radiological Assessment of Laminitis. Equine Veterinary Education; 2013; 25 (10): 524–535.
- (18) Goulet C., Olive J., Rossier Y., Beauchamp G. Radiographic and Anatomic Characteristics of Dorsal Hoof Wall Layers in Nonlaminitic Horses. Veterinary Radiology & Ultrasound. 2015; 56 (6): 589–594.
- (19) Grundmann I. N. M., Drost W. T., Zekas L. J., Belknap J. K., Garabed R. B., Weisbrode S.E., Parks A. H., Knopp M. V., Maierl, J. Quantitative Assessment of the Equine Hoof Using Digital Radiography and Magnetic Resonance Imaging. Equine Vet Journal. 2015; 47(5): 542–547.
- (20) Dyson S. J., Tranquile C. A., Collins S. N., Parkin T. D., Murray R. C. External Characteristics of the Lateral Aspect of the Hoof Differ Between Non-lame and Lamé Horses. Vet Journal. 2011; 190: 364–371.
- (21) Parks A. H., Belknap J. K. Diagnostic Imaging. In: Belknap J. K., Geor, R. J., Hrsg. Equine Laminitis. 1. Auflage. Ames, Iowa: John Wiley & Sons; 2017. S. 228–236.
- (22) Engiles J. B., Galantino-Homer H. L., Boston R., McDonald D., Dishowitz M., Hankenson K. D. Osteopathology in the Equine Distal Phalanx Associated with the Development and Progression of Laminitis. Vet Pathol. 2015; 52(5): 928–944.
- (23) Van Eps A.W. Acute Laminitis: Medical and Supportive Therapy. Vet Clin North Am Equine Pract. 2010; 26(1): 103–14. DOI: 10.1016/j.cveq.2009.12.011.
- (24) Herzog M. H., Francis G., Clarke A. Understanding Statistics and Experimental Design – How to Not Lie with Statistics. Springer; 2019. S. 33, 52, 56, 57.
- (25) Hart A. Mann-Whitney Test is not just a Test of Medians: Differences in Spread can be Important. British Medical Journal. 2001; 323(7309): 391–393.
- (26) Rasch D., Guiard, V. The Robustness of Parametric Statistical Methods. Psychology Science. 2004; 46 (2): 175–208.
- (27) Merritt J., Davies H., Parks A. H. Digital Biomechanics Relevant to Laminitis. In: Belknap J. K., Geor, R. J., Hrsg. Equine Laminitis. 1. Auflage. Ames, Iowa: John Wiley & Sons; 2017. S. 39.
- (28) Parks A. H. Structural Dynamics of Displacement of the Distal Phalanx. In: Belknap J. K., Geor, R. J., Hrsg. Equine Laminitis. 1. Auflage. Ames, Iowa: John Wiley & Sons; 2017. S. 176–180.
- (29) Dyson S. J., Tranquile C. A., Collins S. N., Parkin T. D., Murray R. C. An Investigation of the Relationships between Angles and Shapes of the Hoof Capsule and the Distal Phalanx. Equine Vet Journal. 2011; 43(3): 295–301. DOI: 10.1111/j.2042-3306.2010.00162.x

- (30) Smith S. S., Dyson S. J., Murray R. C., Weekes J. Is there an Association between Distal Phalanx Angles and Deep Digital Flexor Tendon Lesions? In: AAEP Annual Convention – Denver by American Association of Equine Practitioners, 2004.
- (31) Osborn M. L., Cornille J. L., Blas-Machado U., Uhl E. W. The Equine Navicular Apparatus as a Premier Enthesis Organ: Functional implications. Wiley Periodicals LLC. *Veterinary Surgery*. 2021; 50: 713–728. DOI: 10.1111/vsu.13620
- (32) Peng Y, Wu S, Li Y, Crane J. L. Review Type H Blood Vessels in Bone Modeling and Remodeling. *Theranostics*. 2020; 10(1): 426-436. DOI: 10.7150/thno.34126
- (33) Laroche M. Intraosseous Circulation from Physiology to Disease, Éditions Scientifiques et Médicales Elsevier SAS. 2002; 69: 262–269. DOI: 10.1016/s1297-319x(02)00391-3
- (34) Brookes M, Revell W. J. The Blood Supply of Bone: Scientific Aspects. New York: Springer Science & Business Media; 2012. S. 7–22.
- (35) Pollitt C. The Illustrated Horse's Foot – A Comprehensive Guide. St. Louis, Missouri: Elsevier-Verlag; 2016. S. 72-73.
- (36) Mederle C. Zusammenhang von Veränderungen der knöchernen Strukturen des Hufbeins beim Englischen Vollblut und dem Auftreten von Hufrehe [Dissertation]. München: Ludwig-Maximilians-Universität; 2015.
- (37) Geor R. J. Current Concepts on the Physiology of Pasture-associated Laminitis. *Veterinary Clinics of North American Equine Practice*. 2010; 26: 265–276. DOI: 10.1016/j.cveq.2010.06.001
- (38) Burns T. A., Toribio R. E. Metabolic Syndrome in Humans and Horses: The Relationship Between Obesity and Insulin Resistance. In: Belknap J. K., Geor, R. J., Hrsg. *Equine Laminitis*. 1. Auflage. Ames, Iowa: John Wiley & Sons; 2017. S. 151.
- (39) Dyson S., Murray R., Schramme M., Blunden T. Current Concepts of Navicular Disease. *Equine Veterinary Education*. 2011; 23(1): 27–39.

## 8. Abbildungen

<b>Abbildung 1:</b> Ausgeschuhter Huf.....	4
<b>Abbildung 2:</b> Hufbein, dorsale Ansicht.....	5
<b>Abbildung 3:</b> Hufbein, palmare, schräge Ansicht.....	5
<b>Abbildung 4:</b> Lamellare Verbindung des Hufbeintellers.....	6
<b>Abbildung 5:</b> Winkel mit physiologischen Werten.....	8
<b>Abbildung 6:</b> Positionierung für die dorso-palmare (gewichtstragende) Aufnahme des distalen Phalanx.....	8
<b>Abbildung 7:</b> Röntgenaufnahme der Zehe eines Pferdes im dorsopalmaren Strahlengang.....	9
<b>Abbildung 8:</b> Röntgenbild.....	12
<b>Abbildung 9:</b> Röntgenbild.....	13
<b>Abbildung 10:</b> Geplotteter Graph in ImageJ.....	13
<b>Abbildung 11:</b> Geplotteter Graph der Foramina nutritia im Hufbein.....	15
<b>Abbildung 12:</b> Ausschnitt aus Excel-Tabelle.....	16
<b>Abbildung 13:</b> Verdeutlichung der gemessenen Winkel.....	17
<b>Abbildung 14:</b> Boxplot für den Foraminagrößenvergleich.....	22
<b>Abbildung 15:</b> Boxplot für den Dichtevergleich.....	23
<b>Abbildung 16:</b> Balkendiagramm.....	25
<b>Abbildung 17:</b> Balkendiagramm.....	27

**Abbildung 1** aus: Ruthe H. Der Huf. 6. Auflage. Stuttgart: Enke Verlag; 2012. S. 85, Abbildung 4.22 a und b

**Abbildung 2 und 3** aus: Pollitt C. Farbatlas Huf: Anatomie und Klinik. Deutsche Auflage, Bearbeitung durch Budras K.-D., Hertsch B., Hannover: Schlütersche GmbH; 1999. S. 13 Abbildung B und C

**Abbildung 4** aus: Parks A.H. Anatomy and Function of the Equine Digit. In: Belknap J. K., Geor, R. J., Hrsg. Equine Laminitis. 1. Auflage. Ames, Iowa: John Wiley & Sons; 2017. S. 18 Abbildung 3.9

**Abbildung 5 und 13** aus: Parks A. H., Belknap J. K. Diagnostic Imaging. In: Belknap J. K., Geor, R. J., Hrsg. Equine Laminitis. 1. Auflage. Ames, Iowa: John Wiley & Sons; 2017. S. 228 Abbildung 27.3 b).

**Abbildung 6** aus: Butler J. A., Colles C. M., Dyson S. J., Kold S. J., Poulos P. W. Clinical Radiology of the Horse. Second edition. Oxford: MPG Books Ltd; 2000. S. 31 Abbildung 2.3

**Abbildung 7** aus: Butler J. A., Colles C.M., Dyson S. J., Kold S. J., Poulos P. W. Clinical Radiology of the Horse. Second edition. Oxford: MPG Books Ltd; 2000. S. 36 Abbildung 2.7

## 9. Tabellen

<b>Tabelle 1:</b> Test auf Normalverteilung der Foraminagrößen .....	24
<b>Tabelle 2:</b> Unabhängiger t-Test für den Vergleich der Foraminagrößen des Arcus terminalis .....	24
<b>Tabelle 3:</b> Test der Dichte von chronischen Hufrehe-Pferden (Gruppe 2) und Podotrochlose-Pferden (Gruppe 3).....	25
<b>Tabelle 4:</b> Kolmogorov- Smirnov-Test.....	26
<b>Tabelle 5:</b> Mann-Whintey-U-Test .....	26
<b>Tabelle 6:</b> Vergleich der Medianen der Dichtewerte .....	27
<b>Tabelle 7:</b> Spearman- Korrelation .....	28
<b>Tabelle 8:</b> Spearman-Korrelation .....	29
<b>Tabelle 9:</b> Kreuztabelle der Hufrehe-Pferde.....	31
<b>Tabelle 10:</b> Kreuztabelle der Podotrochlose-Pferde.....	31

## 10. Anhang

**Tabelle I**, Anhang: Übersichtstabelle der akuten Hufrehe-Pferde: Angaben für jedes gemessene Pferd: der Reihe nach durchnummeriert, Gruppe 1: Gruppe der akuten Hufrehe-Pferde, Größe des medialen Foramen, Größe des lateralen Foramen, Dichtewerte des medialen Foramen/axial und abaxial, Dichte des lateralen Foramen/axial und abaxial, Hufrehe: 1=akutes Stadium der Hufrehe, Rasse, Nutzungsart, Winkel a, Winkel b und den Rotationswinkel

Akute Hufrehe-Pferde														
Pferd	Gruppe	Größe mediales Foramen	Größe laterales Foramen	Dichte med.For. axial	Dichte med.For. abaxial	Dichte lat.For. axial	Dichte Lat. For. abaxial	Hufrehe	Rasse	Gewicht	Nutzungsart	Winkel a	Winkel b	Rotationswinkel
1	1	6,46	6,68	0,49	0,51	0,54	0,51	1	Haflinger	498	Freizeit	24,50	58,43	7,9
2	1	5,56	5,77	0,66	0,68	0,63	0,67	1	Warmblut	kA	Dressur	20,34	52,86	6,9
3	1	5,16	4,54	0,23	0,23	0,24	0,22	1	Freiberger	458	Jungpferd	24,16	59,38	7,5
4	1	7,32	4,40	0,38	0,41	0,41	0,37	1	Warmblut	564	Freizeit	19,59	59,41	7
5	1	6,01	5,63	0,24	0,27	0,33	0,31	1	sonstige	kA	Show	27,76	60,55	20
6	1	6,05	4,88	0,47	0,52	0,45	0,42	1	Pony	kA	Freizeit	24,14	57,18	6,2

**Tabelle II, Anhang:** Übersichtstabelle der chronischen Hufrehe-Pferde: Angaben für jedes gemessene Pferd: der Reihe nach durchnummeriert, Gruppe 2: Gruppe der chronischen Hufrehe-Pferde, Größe des medialen Foramen, Größe des lateralen Foramen, Dichtewerte des medialen Foramen/axial und abaxial, Dichte des lateralen Foramen/axial und abaxial, Hufrehe: 2= chronisches Stadium der Hufrehe, Rasse, Nutzungsart, Winkel a, Winkel b und den Rotationswinkel

Chronische Hufrehe-Pferde														
Pferd	Gr.	Mediales Foramen	Laterales Foramen	Med.For. axial	Med. For abaxial	Lat. For. axial	Lat. For. abaxial	Hufrehe	Rasse	Gewicht	Nutzungsart	Winkel a	Winkel b	Rotationswinkel
7	2	5,53	6,18	0,53	0,56	0,57	0,55	2	Shetlandpony	179	Freizeit	26,25	58,53	13
8	2	4,3	6,4	0,55	0,52	0,58	0,54	2	Fjordpferd	489	Zucht	19,64	64,95	11,5
9	2	5,98	5,18	0,56	0,62	0,55	0,54	2	sonstige	585	Freizeit	21,28	58,41	17,2
10	2	5,53	6,27	0,60	0,66	0,62	0,62	2	Shetlandpony	116	Beistellpferd	18,48	63,23	9,7
11	2	4,41	6,51	0,50	0,52	0,50	0,51	2	Haflinger	kA	Dressur	19,4	53,34	8
12	2	8,6	5,24	0,29	0,25	0,29	0,26	2	Shetlandpony	kA	Freizeit	20,95	87,38	33
13	2	6,43	5,26	0,36	0,33	0,45	0,29	2	Shetlandpony	185	Freizeit	26,15	68,16	27
14	2	6,58	3,98	0,61	0,63	0,59	0,58	2	M. Foxtrotter	505	Freizeit	24,65	52,62	5,8
15	2	7,31	4,88	0,65	0,67	0,63	0,66	2	Hannoveraner	530	Dressur	18,26	52,55	7,7
16	2	3,8	7,38	0,35	0,38	0,39	0,36	2	engl. Vollblut	kA	Freizeit	16,01	46,13	5
17	2	6,17	5,92	0,45	0,48	0,51	0,44	2	Pony	370	Freizeit	18,68	61,09	13,8
18	2	8,67	3,86	0,51	0,61	0,55	0,59	2	Hannoveraner	640	kA	17,93	55,51	11
19	2	5,87	5,87	0,68	0,65	0,65	0,64	2	Hannoveraner	587	kA	26,73	56,36	13
20	2	6,05	5,4	0,69	0,67	0,57	0,57	2	Quarter horse	548	Freizeit	16,55	52,87	6,8
21	2	5,94	5,31	0,32	0,34	0,31	0,31	2	Tinker	520	kA	18,61	54,99	5
22	2	5,76	6,18	0,65	0,67	0,57	0,57	2	Warmblut	468	Freizeit	29,07	61,01	8,4
23	2	5,26	4,76	0,23	0,23	0,22	0,20	2	Araber	412	Zucht	23,37	54,59	5
24	2	6,1	4,63	0,67	0,67	0,65	0,68	2	Lipizzaner	550	Show	27,59	66,4	10
25	2	6,4	6,65	0,71	0,67	0,72	0,73	2	Araber	443	Freizeit	21,68	52,75	5
26	2	5,11	6,04	0,67	0,66	0,72	0,68	2	Haflinger	450	Freizeit	20,97	58,83	6
27	2	5,22	6,16	0,33	0,30	0,32	0,30	2	Noriker	657	Freizeit	13,7	52,11	7,5
28	2	8,24	7,41	0,61	0,60	0,61	0,57	2	Pony	255	Freizeit	31,55	59,12	7,3
29	2	5,48	5,05	0,31	0,37	0,34	0,28	2	Pony	195	Freizeit	33,39	64,26	6
30	2	5,11	5,11	0,29	0,37	0,29	0,34	2	arab. Vollblut	538	Freizeit	26,79	62,94	7
31	2	6,36	3,4	0,30	0,30	0,33	0,32	2	Trakehner	570	Dressur	21,98	56,54	12
32	2	6,64	6,32	0,28	0,32	0,31	0,25	2	Pony	148	Koppelpferd	13,12	56,61	9
33	2	5,83	5,42	0,53	0,51	0,51	0,55	2	Quarter horse	kA	Freizeit	18,74	61,63	12
34	2	4,99	7,13	0,27	0,33	0,33	0,32	2	Islandpferd	320	Freizeit	12,07	54,93	14,3
35	2	5,98	5,81	0,37	0,44	0,39	0,41	2	Quarter horse	457	Freizeit	19,2	55,29	1,8
36	2	5,02	5,17	0,30	0,35	0,34	0,35	2	Haflinger	kA	Freizeit	26,17	64,42	12
37	2	6,09	5,67	0,61	0,61	0,64	0,57	2	Haflinger	447	Freizeit	21,45	59,5	3,5
38	2	4,62	6,46	0,23	0,20	0,20	0,20	2	Fjordpferd	437	Freizeit	14,5	61,72	14,7
39	2	5,82	7,61	0,49	0,49	0,52	0,51	2	Haflinger	450	Western	28,65	67,39	5,5

**Tabelle III**, Anhang: Übersichtstabelle der Podotrochlose-Pferde: Angaben für jedes gemessene Pferd: der Reihe nach durchnummeriert, Gruppe 3: Gruppe der Podotrochlose-Pferde, Größe des medialen Foramen, Größe des lateralen Foramen, Dichtewerte des medialen Foramen/axial und abaxial, Dichte des lateralen Foramen/axial und abaxial, Hufrehe: 0 = keine Hufrehe, Rasse, Nutzungsart, Winkel a, Winkel b und den Rotationswinkel

Podotrochlose-Pferde														
Pferd	Gr.	Mediales Foramen	Laterales Foramen	Med.For. axial	Med. For abaxial	Lat. For. axial	Lat. For. abaxial	Hufrehe	Rasse	Gewicht	Nutzungsart	Winkel a	Winkel b	Rotationswinkel
40	3	5,89	4,58	0,55	0,63	0,49	0,46	0	Traber	kA	kA	20,25	56,10	0
41	3	7,08	5,58	0,48	0,46	0,48	0,49	0	Warmblut	548	Springpferd	16,26	52,06	0
42	3	6,76	5,59	0,30	0,29	0,31	0,27	0	Warmblut	633	Springpferd	13,71	51,58	0
43	3	5,82	3,25	0,57	0,54	0,49	0,58	0	Zangersheide	565	Vielseitigkeit	16,93	45,00	0
44	3	5,24	5,04	0,58	0,54	0,58	0,63	0	Warmblut	576	Voltigierpferd	14,41	43,99	0
45	3	6,55	2,94	0,69	0,75	0,76	0,83	0	Trakehner	510	Vielseitigkeit	11,12	43,14	0
46	3	6,5	4,87	0,67	0,67	0,63	0,61	0	Hannoveraner	kA	Freizeit	24,21	52,61	0
47	3	5,55	4,29	0,51	0,56	0,55	0,54	0	Pony	423	Reitpferd	14,68	43,84	0
48	3	5,14	5,14	0,70	0,70	0,70	0,65	0	Warmblut	622	Freizeit	17,13	48,58	0
49	3	4,81	5,77	0,63	0,66	0,64	0,63	0	Westfale	540	Freizeit	27,02	63,07	0
50	3	5,91	4,23	0,27	0,27	0,28	0,28	0	Pinto	545	Dressur	11,46	48,80	0
51	3	6,79	3,64	0,17	0,17	0,18	0,19	0	Warmblut	513	Freizeit	9,60	47,04	0
52	3	3,16	4,69	0,21	0,20	0,19	0,17	0	Warmblut	kA	Dressur	16,16	52,57	0
53	3	5,6	5,6	0,22	0,22	0,21	0,22	0	Hannoveraner	530	Freizeit	22,35	56,65	0
54	3	6,58	4,32	0,25	0,25	0,25	0,23	0	Oldenburger	kA	Jungpferd	10,65	50,16	0
55	3	5,32	5,32	0,33	0,34	0,32	0,26	0	Lippizzaner	586	Dressur	8,14	44,45	0
56	3	5,12	4,91	0,19	0,22	0,22	0,21	0	Oldenburger	530	Reitpferd	16,95	53,41	0
57	3	4,54	4,68	0,44	0,48	0,42	0,40	0	Warmblut	kA	Dressur	13,75	48,60	0
58	3	6,76	5,02	0,42	0,46	0,44	0,43	0	Oldenburger	kA	Jungpferd	16,53	45,24	0
59	3	8,3	3,58	0,23	0,28	0,33	0,21	0	Quarter Horse	472	Western	28,82	54,56	0
60	3	6,45	5,45	0,23	0,20	0,20	0,19	0	Quarter Horse	kA	Freizeit	18,59	52,18	0
61	3	3,64	3,64	0,19	0,22	0,17	0,17	0	Paint	418	Freizeit	21,38	47,66	0
62	3	7,1	4,53	0,36	0,39	0,35	0,38	0	Warmblut	kA	Dressur	24,35	55,55	0
63	3	4,28	4,28	0,50	0,48	0,46	0,47	0	Warmblut	604	kA	12,84	48,23	0
64	3	5,59	4,08	0,17	0,18	0,18	0,19	0	Warmblut	485	Jungpferd	19,62	53,90	0
65	3	3,96	3,96	0,50	0,52	0,54	0,51	0	Warmblut	715	Voltigierpferd	17,01	43,10	0
66	3	5,16	5,55	0,24	0,21	0,22	0,21	0	Warmblut	kA	Dressur	19,51	50,17	0
67	3	5,58	5,58	0,64	0,53	0,54	0,51	0	Quarter horse	kA	Jungpferd	14,49	45,67	0
68	3	5,84	6,07	0,21	0,19	0,22	0,22	0	Arab. Vollblut	422	sonstiges	13,54	45,99	0
69	3	6,45	3,43	0,23	0,21	0,12	0,25	0	Trakehner	550	Vielseitigkeit	18,93	54,03	0
70	3	5,24	5,45	0,53	0,61	0,56	0,66	0	Oldenburger	471	Dressur	19,64	50,66	0
71	3	6,75	5,01	0,19	0,25	0,19	0,22	0	Warmblut	450	Dressur	20,07	57,70	0

72	3	5,25	4,24	0,21	0,20	0,20	0,19	0	Warmblut	kA	Vielseitigkeit	13,22	51,44	0
73	3	5,11	5,32	0,58	0,57	0,65	0,65	0	Warmblut	550	Freizeit	17,34	50,95	0
74	3	6,68	5,67	0,20	0,19	0,19	0,18	0	Warmblut	kA	Freizeit	22,49	48,91	0
75	3	6,72	5,86	0,45	0,49	0,46	0,50	0	Warmblut	kA	Freizeit	8,04	46,14	0
76	3	4,3	6,89	0,59	0,63	0,65	0,67	0	Araber	kA	Freizeit	15,99	48,96	0
77	3	3,44	3,82	0,22	0,20	0,20	0,19	0	Warmblut	602	Freizeit	13,69	44,30	0
78	3	6,29	4,34	0,21	0,21	0,20	0,18	0	Warmblut	kA	Freizeit	14,44	44,09	0
79	3	7,64	5,23	0,17	0,19	0,18	0,17	0	Warmblut	kA	Vielseitigkeit	15,93	49,95	0
80	3	5,62	2,7	0,25	0,23	0,24	0,23	0	KWPN	kA	Dressur	13,79	49,48	0
81	3	5,99	5,59	0,63	0,67	0,66	0,62	0	Warmblut	kA	kA	21,87	56,87	0
82	3	5,1	4	0,22	0,19	0,21	0,21	0	Oldenburger	511	Springpferd	5,75	43,51	0
83	3	5,89	4,26	0,20	0,22	0,23	0,27	0	Kinsky	kA	Freizeit	23,94	49,74	0
84	3	5,51	3,45	0,24	0,25	0,22	0,21	0	Quarter horse	kA	Westernpferd	20,79	54,70	0
85	3	5,36	4,02	0,25	0,27	0,26	0,22	0	Quarter horse	kA	Westernpferd	15,94	45,91	0
86	3	5,09	4,89	0,29	0,28	0,29	0,26	0	Oldenburger	kA	kA	19,20	53,16	0
87	3	7,92	4,3	0,21	0,23	0,20	0,21	0	Oldenburger	570	Springpferd	17,80	53,60	0
88	3	6,25	5,58	0,26	0,28	0,25	0,24	0	Quarter horse	kA	kA	18,73	54,84	0
89	3	4,37	5,61	0,16	0,17	0,18	0,18	0	Quarter horse	457	Reitpferd	18,47	46,95	0