

Aus dem Department für Kleintiere und Pferde  
der Veterinärmedizinischen Universität Wien

Universitätsklinik für Kleintiere, Abteilung Kleintierchirurgie  
(Leiterin: Univ.Prof. Dr.med.vet. Eva Schnabl-Feichter, Dipl. ECVS)

## **Untersuchung der Wurzelkanalgeometrie von 48 adulten Hundecanini mit Hilfe der Mikrocomputertomografie**

Diplomarbeit

Veterinärmedizinische Universität Wien

vorgelegt von

Lukas, Schwarnthorer

Wien, im September, 2023

Betreuerin: Dr. med. vet. Matthias Eberspächer-Schweda, Dipl. AVDC, FTA, ÖTK-Diplom

Univ.Prof. Dr.med.vet. Eva Schnabl-Feichter, Dipl. ECVS

Department für Kleintiere und Pferde

Abteilung Kleintierchirurgie

Veterinärmedizinische Universität Wien

BegutachterIn: Mag. Dr. med. vet. Silvio Kau, MSc., EVD SVA

## **Eigenständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die folgende Arbeit selbstständig verfasst habe, und keine anderen Hilfsmittel und Literaturstellen verwendet wurden. Die entscheidende Arbeit wurde selbst durchgeführt und alle Beteiligten wurden mit angeführt. Die Arbeit wird nicht an anderer Stelle eingereicht oder veröffentlicht.

Wien, den 07.09.2023

## Inhaltsverzeichnis

Eigenständigkeitserklärung .....	3
1. Zusammenfassung (deutsch) .....	0
2. Summary (englisch).....	0
3. Abkürzungsverzeichnis.....	0
4. Einleitung und Fragestellung.....	1
4.1. Literaturübersicht.....	1
4.1.1. Anatomie und Aufbau des Gebisses .....	1
4.1.2. Funktion .....	4
4.1.3. Behandlungsmöglichkeiten .....	6
5. Material und Methoden .....	10
5.1. Zahnauswahl .....	10
5.1.1. Probengewinnung .....	10
5.1.2. Probenlagerung .....	11
5.2. Micro-CT .....	11
5.3. AMIRA.....	11
5.4. Fiji.....	16
5.5. Excel .....	16
5.6. GraphPad Prism.....	16
6. Ergebnisse .....	17
6.1. Verhältnis Zahnlänge zu Pulpalänge.....	17
6.2. Krümmungsverhalten des Zahnes.....	18
6.3. Krümmungsverhalten der Pulpa im Alter .....	19
6.4. Vergleich der Pulpa-Volumina des OK und des UK .....	20
6.5. Pulpafläche nach Alter .....	21
6.6. Pulpafläche nach Gewicht der Hunde über 2 Jahren .....	22
6.7. <i>Circularity</i> von sechs Hunden .....	23
6.8. <i>Circularity</i> nach Gewicht.....	25
6.9. <i>Circularity</i> nach Alter.....	26
7. Diskussion .....	28
7.1. Der Caninus als Zahnmodell für den Wurzelkanal .....	28
7.2. Krümmungsverhalten des Zahns.....	29
7.3. Krümmungsverhalten der Pulpa .....	29

<b>7.4. Wurzelkanalvolumen Vergleich zwischen OK und UK .....</b>	<b>30</b>
<b>7.5. Pulpaflächen Vergleich .....</b>	<b>30</b>
<b>7.6. Circularity .....</b>	<b>31</b>
<b>7.7. Fazit und Ausblick.....</b>	<b>32</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>34</b>
<b>Abbildungs- und Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>36</b>

## 1. Zusammenfassung (deutsch)

Ungefähr ein Drittel aller Hunde erfährt mindestens einmal im Leben eine Fraktur eines oder mehrerer Zähne. (2, 3) Aufgrund der anatomisch exponierten Position ist vor allem der Eck- oder Fangzahn betroffen. (1, 4, 5) Wobei es in der Mehrheit der Fälle zu einer Eröffnung des Wurzelkanals und damit einhergehender Entzündung und Infektion kommt. (22) Aus diesem Grund sollte bei komplizierter Kronenfraktur entweder der Zahn komplett extrahiert oder aber, der infizierte Teil der Pulpa im Wurzelkanal entfernt werden, um diesen anschließend hermetisch im Sinne einer Wurzelkanalbehandlung verschließen zu können. (5, 6)

Da es sich beim Caninus um einen der funktionell und strategisch wichtigsten Zähne für den Hund handelt (1, 4, 5), empfiehlt es sich diesen zu erhalten. Für eine erfolgreiche Wurzelkanalbehandlung ist es essenziell, dass der Zugang zum Endodont, die Entfernung des infizierten Gewebes, das Füllen des Wurzelkanals und der hermetische Verschluss des Zahns, ohne Komplikationen durchgeführt werden kann. (7, 8) Zu diesem Zweck ist eine exakte Kenntnis der Wurzelkanal-Geometrie und Mikroanatomie von größter Bedeutung. Mit Hilfe des Micro-CTs ist es nun endlich möglich den Zahn in toto zu untersuchen, ohne dabei die Zahnhartsubstanz zu zerstören oder verändern zu müssen, wie dies bisher der Fall war.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungstechnik zeigen, dass es sich beim Wurzelkanal eines Hundecaninus keineswegs um einen gleichmäßig konisch verlaufenden Raum handelt, wie bisher angenommen. (9, 10) Aus diesem Grund sollten sowohl die Instrumente als auch der Prozess einer Wurzelkanalbehandlung angepasst werden, um damit die Erfolgsquote entsprechend zu erhöhen.

## 2. Summary (englisch)

Approximately one third of all dogs suffer a fracture of one or more teeth at least once in their lifetime. (2, 3) Due to its anatomically exposed position, the canine tooth is particularly affected by such trauma. (4-6) This can lead to opening of the root canal and associated inflammation and infection. For this reason, if the pulp is exposed, either the tooth should be completely extracted or the infected part of the pulp in the root canal should be completely removed and then hermetically sealed in terms of root canal treatment. (1, 6)

Since the canine tooth is one of the most functionally and strategically important teeth in the dog (4-6), it is recommended to preserve it. For successful root canal treatment, it is important that gain a proper access to the endodont, remove the infected tissue, fill the root canal, and close the tooth hermetic without any complications. (7, 8)

For this purpose, an accurate knowledge of the root canal geometry and microanatomy is of utmost importance.

The results of this study show that the root canal of a canine is by no means a uniformly conical space, as previously thought. (9, 10) For this reason, the procedure and instruments of a root canal treatment should be adapted in order to increase the success rate of a corresponding tooth-preserving measure.

### 3. Abkürzungsverzeichnis

I	Incisivus
C	Caninus
P	Prämolarer
M	Molarer
CBCT	Cone-beam Computertomographie
Micro-CT	Micro-Computertomographie
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
TCL	Tool command language
J	Jahre
SAF-Feilen	Self-adjusting file



## 4. Einleitung und Fragestellung

### 4.1. Literaturübersicht

#### 4.1.1. Anatomie und Aufbau des Gebisses

Der Kiefer eines Säugetieres trägt eine tierartspezifische Anzahl an Zähnen.

Das diphyodonte, heterodonte Gebiss des Hundes besteht aus 42 bleibenden thecodonten Zähnen. Wobei sich 20 Zähne im Oberkiefer und 22 Zähne im Unterkiefer befinden.

Dauergebiss			
3I	1C	4P	2M = 42 Zähne
3I	1C	4P	3M

Abbildung 1 Zahnformel Hund; I Incisivi, C Caninus, P Prämolare, M Molare (11)

Um eine eindeutige numerische Zuordnung der Zähne und eine Unterscheidung zwischen den Zähnen der einzelnen Quadranten zu ermöglichen, wird das modifizierte Triadan-Schema angewendet. Dieses Schema nutzt drei Ziffern, wobei die erste Ziffer (1-4) im bleibenden Gebiss immer für den angesprochenen Kieferquadranten zählt und die restlichen Zahlen den einzelnen Zähnen entsprechen, die von mesial nach distal durchnummeriert werden. (1) Also handelt es sich bei den bleibenden Eckzähnen im Oberkiefer um die Zähne 104 (rechts) und 204 (links), beziehungsweise im Unterkiefer um die Zähne 304 (links) und 404 (rechts). (12)

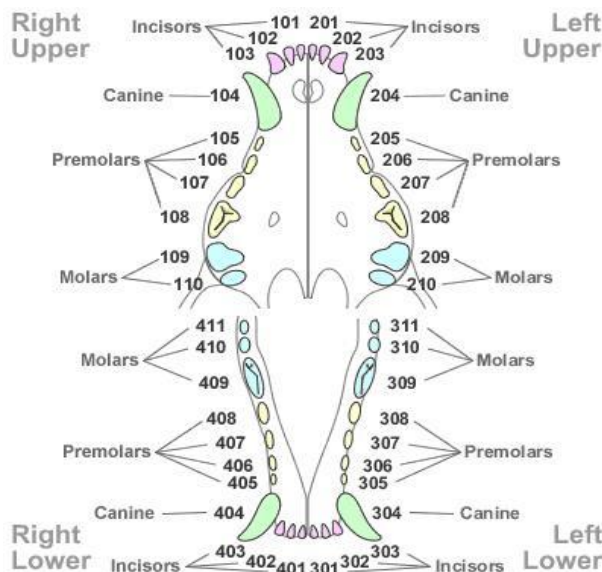


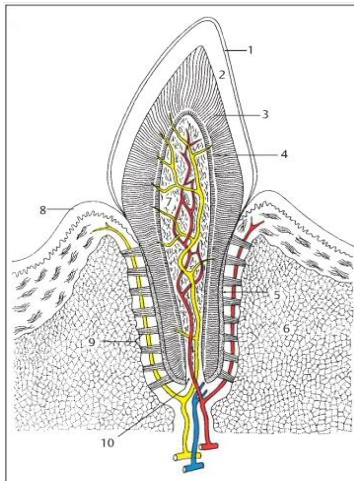
Abbildung 2 Modified Triadan System (13)

Der einzelne Zahn lässt sich in einen von außen sichtbarem Teil, der Krone, und einen klinisch nicht sichtbaren, im Kieferknochen verankerten Teil, der Wurzel, unterscheiden. Die Krone ist von Schmelz bedeckt, während die Wurzel den Zahn im Knochen mit Hilfe des Halteapparats (Parodont) fest verankert und von Wurzelzement (gehört ebenso zum Parodont) bedeckt ist. (7)

Ein Zahn besteht im Wesentlichen aus drei Hartsubstanzen: dem Zahnschmelz, dem Zahnbein (oder Dentin) und dem Wurzelzement. Wobei auf das Zahnbein der größte Anteil entfällt, und Wurzelzement und Schmelz jeweils nur eine verhältnismäßig dünne „äußere“ Schicht darstellen. Der Schmelz ist die härteste Substanz, die der Körper herzustellen vermag und etwa viermal so stabil wie das Zahnbein. Er wird im Zuge der Amelogenese gebildet und kann aufgrund des weiteren Fehlens eben dieser Zellen (Adamantoblasten) nicht mehr nachgebildet werden. Bei Fleischfressern fällt der Zahnschmelz im Vergleich zum Menschen oder zum reinen Pflanzenfresser sehr dünn aus, um eine möglichst große Flexibilität des Zahnes zu gewährleisten. Er ist bei Hunden nur 0,1 – 0,6mm stark. (1) Die Aufgabe des Zahnschmelzes ist es die Zahnkrone vor äußeren Einflüssen zu schützen. (7) Das darunterliegende Zahnbein umschließt einen Hohlraum, den Wurzelkanal. In diesem befindet sich die sogenannte Pulpa. Sie besteht aus Bindegewebe, Nerven, Blut- und manchmal Lymphgefäßen. (5) Zu Beginn der Zahneruption ist der Dentin-Anteil noch sehr gering. Allerdings befindet sich am äußeren Rand der Pulpa eine einreihige Schicht Odontoblasten, welche zeitlebens Dentin produzieren, wodurch dieser Anteil mit zunehmendem Alter immer stärker ausgebildet wird. Dies führt zu einer erhöhten Stabilität. (14) Durch die vermehrte Zubildung von Dentin wird auf der anderen

Seite auch die Pulpakammer immer enger. (7) Da dies ein, vor allem in jungen Jahren, schneller und fortlaufender Prozess ist, kann daran recht sicher das Alter abgeschätzt werden.

(1, 15) Dieser Prozess ist mit ungefähr 18 Monaten fertig abgeschlossen. (14)



**3.14 Längsschnitt durch einen einfachen Zahn, schematisch**  
 1 Schmelzkutikula  
 2 Schmelz  
 3 Zahnbein  
 4 Odontoblasten  
 5 Zement  
 6 Alveolarknochen  
 7 Zahnpulpa  
 8 Zahnfleisch  
 9 Fibräe cementoalveolares  
 10 Wurzelkanal  
 rot = Arterie  
 blau = Vene  
 gelb = Nerv

Abbildung 3 Schema des Aufbaus eines Zahnes (11)

Allgemein lässt sich sagen, dass jeder Zahn mindestens so viele Wurzelkanäle besitzt, wie er Wurzeln aufweist. Der Eckzahn des Hundes hat nur eine Wurzel. Bei 96% der Hunde besteht somit auch die Pulpa aus nur einem ungeteilten Raum mit nur einem Wurzelkanal. (16)

Die Wurzelspitze bezeichnet man als Apex. Hier treten die meisten Gefäße und Nerven der Pulpa vom Knochen in den Zahn ein und umgekehrt. Diese anatomische Lokalisation nennt man auch Foramen apicale wobei dieses Foramen bei Hunden Tiere nicht immer genau auf Höhe des Apex (bei 96% im Umkreis von 0,5mm) liegt. (17) In den meisten Fällen kommt es zu einer Verschiebung des Foramens nach buccal. (16, 18) Weiters können auch Seitenkanäle auftreten an anderen anatomische Lokalisationen auftreten, welche einen hermetischen Verschluss des Zahnes (beispielsweise bei Wurzelkanalbehandlungen) erschweren. Diese Kanäle kommen bei ungefähr 60-70% der Hunde vor, und sind auf Grund ihrer Feinheit beziehungsweise ihrer anatomischen Lage, nach derzeitigem Stand der Wissenschaft, unmöglich aufzubereiten bzw. zu behandeln. (17, 18) Die Gesamtheit der feinen Nebenkanäle

im Wurzelspitzenbereich nennt man apikales Delta. Die Komplexität dieses Deltas stellt die Endodontie von Beginn an vor große Herausforderungen. (19)



Abbildung 4 Schema apikales Delta (1)

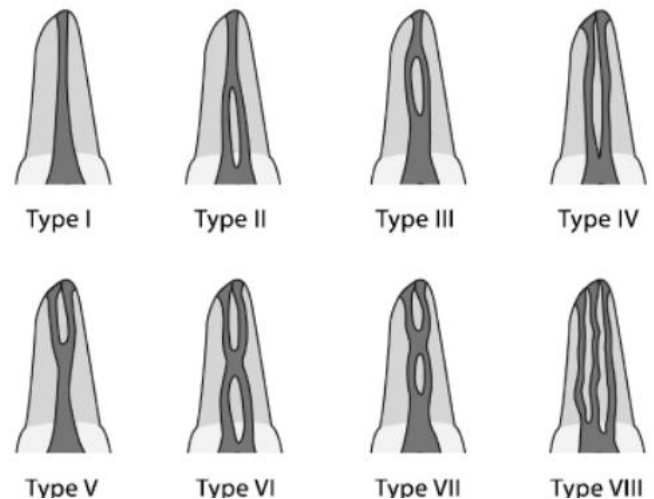


Abbildung 5 mögliche Deltaformen (6)

#### 4.1.2. Funktion

Die Hauptaufgaben der Zähne sind: Das Aufnehmen von Futter, das Ermöglichen des Schluckaktes, das Zerteilen von Nahrung in Stücke von schluckbarer Größe, das Vermischen dieser mit Speichel, was den Beginn der Verdauung darstellt. Außerdem werden die Zähne auch als Waffen und zu Schutzzwecken verwendet beziehungsweise stellen sie einen wichtigen Aspekt im Sozialverhalten dar. (20)

Das Gebiss des Hundes eignet sich aufgrund der Anordnung der Zähne und ihrer Formen, kaum zum Zermahlen von Futter. Die Hauptaufgabe besteht eher darin, die Beute zu fangen und zu töten, beziehungsweise anschließend das Fleisch vom Knochen zu reißen. (7)

Je nach Position und Form des Zahnes übt er unterschiedliche Nebenfunktionen aus.

Die in dieser Studie verwendeten Eckzähne, auch Canini genannt, besitzen eine längliche, konische Form. Die Aufgabe dieser Zähne ist es, die Beute zu fangen und festzuhalten beziehungsweise, auf Grund ihrer Länge, tief verlaufende Gefäße oder Strukturen im Beutetier zu verletzen. (20) Um die deshalb benötigte Stabilität zu gewährleisten, zählen auch die Eckzähne zu den größten Zähnen des Hundes und verfügen über eine ebenso lange Wurzel.

(9) Zudem dienen die Canini im Unterkiefer unter anderem auch als Führung für die Zunge bzw. sind für die Gestik um Mimik des Hundes wichtig (21)

Da sowohl die Canini als auch die Reißzähne die funktionell wichtigsten Zähne eines Hundes darstellen, sollte vor allem auf ihren Erhalt ein besonderes Augenmerk gelegt werden. (1, 4, 5)

Die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Hund mindestens einmal im Leben eine traumatische Verletzung dieser Zähne zu zieht, liegt laut Studien bei 26,2%. Wobei dies im Schnitt bei Hunden im Alter von 3 Jahren am öftesten der Fall ist. (2, 3)

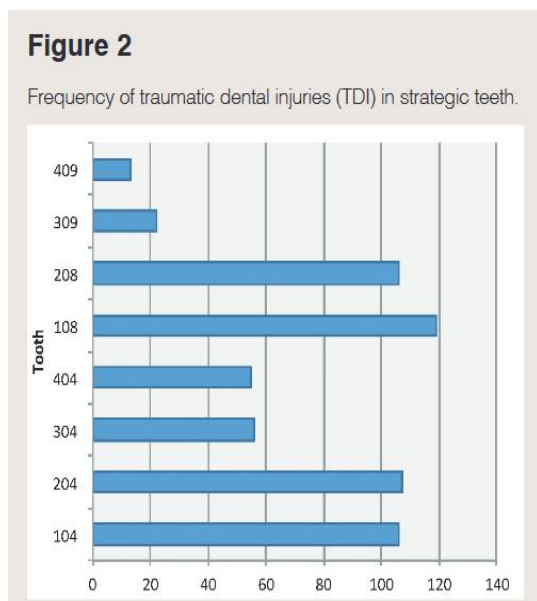


Abbildung 6: Frequency traumatic dental injuries (TDI) (22)

Da es für Tiere in der Natur nicht von Vorteil ist Schmerz zu zeigen, und die Einsicht diese Zähne meist durch die Lippen verdeckt ist, ist es schwer solche Veränderungen ohne regelmäßige Kontrollen festzustellen. Zusätzlich führt ein entzündlicher Prozess der Pulpa im Zahninneren meist zum Absterben des Nerven, wonach in gewissen Phasen kaum klinischen Symptome nachweisbar sind. (5)

Mögliche Symptome, die auf eine solche Pathologie hinweisen sind: einseitiges Kauen und damit auch einseitige Zahnbelags- und Zahnsteinbildung, Vermeiden von harten Futtermitteln, wie zum Beispiel Knochen, oder häufiges Lecken. (14)

Um festzustellen, ob ein Zahn behandelt werden muss oder nicht, wird meistens neben dem Sondieren des Zahns ein Röntgenbild in mehreren Ebenen, beziehungsweise eine *Cone-beam* Computertomographie (CBCT) gemacht, um einen möglichen entzündlichen Prozess im

Bereich der Wurzelspitze als Aufhellung des Knochens (Osteolyse) nachzuweisen. (6) Häufig ist die Zahnhartsubstanz intakt aber der Zahn zeigt eine rötliche Verfärbung. Hierbei ist zu beachten, dass laut Studien 92,2% der farbveränderten Zähne avital sein können oder werden, obwohl sie ein unauffälliges Röntgen aufweisen. (5)

Umso wichtiger ist es, diese Zähne zu behandeln, um die fortschreitende Infektion zu bekämpfen. Zudem stellen infizierte Zähne ein bakterielles Reservoir dar, welches den Körper bzw. innere Organe (vor allem Leber, Nieren und Herz) auf längere Zeit schädigt, was auch im extremen Fall zu einer Sepsis und zum Tod führen kann. (5)

Weitere Ursachen für eine Pulpitis und die Notwendigkeit einer Wurzelkanalbehandlung sind neben dem Trauma (27%): Ischämie (z.B. durch eine Thromboembolie), das Freilegen der Pulpa durch beispielsweise Karies, aber auch vermehrte Abnutzung durch Kauen an Gitter oder Steinen (Abrasion), oder durch einen Zahnfehlstellung (Attrition) und thermische Überbeanspruchung (z.B. durch rotierende Instrumente oder den Schall-/Ultraschall-Scaler beim Zahnsteinentfernen). (5, 14)

#### **4.1.3. Behandlungsmöglichkeiten**

Bei Zahnfrakturen muss generell zwischen Verletzungen der Zahnhartsubstanz mit und ohne direkter Pulpenbeteiligung unterschieden werden.

Für eine Beteiligung der Pulpa spricht einerseits, eine Blutung aus dem Zahn (auch wenn diese nur punktuell und kurzfristig sein kann), andererseits und noch viel wichtiger lässt sich eine spitze Sonde durch die Bruchfläche in den Wurzelkanal einführen. Bei Beteiligung der Pulpa spricht man von einer „komplizierten Zahnfraktur“, ansonsten von einer „unkomplizierten Zahnfraktur“. Wobei anzumerken ist, dass der Ausdruck „unkomplizierte Fraktur“ generell zu hinterfragen ist, da es auf Grund der geringen Schmelzdicke immer zu einer Beteiligung zumindest des Dentins kommt und damit auch die Gefahr besteht, dass es zu einer späteren Infektion der Pulpa kommt durch eine Immigration von Bakterien über die eröffneten Dentintubuli kommt. (1)

Sollte die Pulpa unbeteiligt sein, kann es ausreichen den gebrochenen Zahn entsprechend zu beschleifen und die Dentintubuli zu versiegeln, um ein weiteres Verletzen des Gewebes und eine bakterielle Infektion zu verhindern. (7) Wenn allerdings die Pulpa eröffnet wurde, gibt es in den meisten Fällen nur zwei Behandlungsmethoden: zum einen Zahnerhaltend, sprich eine

Wurzelkanalbehandlung als endodontische Therapie, zum anderen die Entfernung des Zahns (Extraktion). (1)

Der klare Vorteil einer Wurzelkanalbehandlung besteht darin, den Zahn funktionell zu erhalten. Außerdem ist eine Extraktion für das Tier schmerzvoller und schädigt den Kieferknochen. (5)

Generell unterscheidet man bei der endodontischen Therapie die vitale Pulpentherapie von der Wurzelkanalbehandlung. Zum Verständnis der Wichtigkeit der (micro-)anatomischen Kenntnisse diese Zähne soll im Folgenden kurz auf diese Therapieformen eingegangen werden:

Ziel der Vitalamputation (vitale Pulpentherapie) ist es die „lebende“ aber infizierte Pulpa zu erhalten. Das hat den Vorteil, dass, vor allem bei jungen Hunden, weiter Dentin gebildet werden kann, um die Festigkeit des Zahnes zu erhöhen und auch eine Ausbildung einer Wurzelspitze möglich bleibt. Die Vitalamputation kann, wenn überhaupt, nur bei unmittelbaren zeitnahen Verletzungen gelingen. Das maximale Zeitfenster im Humanbereich liegt hierfür bei 6 Stunden. Im tier Zahnmedizinischen Bereich sinkt die Erfolgsquote deutlich nach 48 Stunden. (3) Wenn eine Behandlung innerhalb dieser Zeitspanne erfolgt, liegt die Erfolgswahrscheinlichkeit allerdings bei 88%. (5)

Bei dieser Behandlungstechnik wird eine Kavität gefräst und die oberste, möglicherweise infizierte Schicht der Pulpa mit einem Bohrer abgetragen. Auf diese „Wunde“ wird ein Medikament mit hohem pH gelegt und anschließend kommt eine Unterfüllungsschicht und eine zusätzliche Deckfüllung, um einerseits den mechanischen Schutz zu gewährleisten und andererseits eine Immigration mit Bakterien und neuerliche Infektion (hermetisch) zu verhindern.

Aus diesem Grund wird die Vitalamputation vorwiegend bei Jungtieren angewendet, da bei diesen Tieren die verbesserte biologische Funktion den hohen Aufwand rechtfertigt. (3) Allerdings hat die Pulpenexstirpation (Wurzelkanalbehandlung) ein besseres *longtime outcome* als die Vitalamputation. (5)

Bei der Exstirpation wird das Pulpagewebe mit einer Nervnadel und das nekrotisch infizierte Dentin mit mehreren Feilen von verschiedener Größe entfernt. Wichtig dabei ist es, einen möglichst geraden Zugang zum apikalen Delta zu schaffen, um sämtliches Gewebe exstirpieren zu können und die Instrumente nicht in gebogener Form über zu beanspruchen. Dieser Zugang kann entweder über die Frakturstelle oder durch ein zusätzlich gebohrtes

Hilfsloch erfolgen. Wenn sich Zähne sehr stark krümmen, wie beispielsweise der Caninus, kann es auch helfen mehrere Zugänge zu bohren, um einen möglichst geraden Verlauf der Instrumente zur Wurzelspitze zu gewährleisten. (5) Allerdings schädigt das wiederum die Integrität der Zahnkrone.



Abbildung 7: Zugang zu Wurzelkanal bei einem Caninus (5)

Nach dem Entfernen des Gewebes und dem Ausfeilen des vermeintlich nekrotisch-infizierten Dentins (mechanisches Debridement) wird der Wurzelkanal geglättet, mit diversen Chemikalien gespült (chemische Debridement) und mit Papierspitzen getrocknet. Danach wird ein Wurzelzement eingebracht. Zuletzt wird das eingebrachte Material mittels Guttaperchstiften noch verdichtet (kondensiert). Aus diesem Grund ist es essenziell in jedem Arbeitsschritt die korrekte Aufbereitungslänge und die ausreichende Wurzelkanalweite zu wählen. Während sich die Länge mittels einer Röntgenaufnahme bei eingebrachter Feile leicht kontrollieren lässt, gestaltet sich eine allgemein gültige Wurzelkanalweite zu definieren, als schwierig, da sich der Wurzelkanal mit zunehmendem Alter oder nach Trauma durch die Aktivität der Odontoblasten verändert. Als Anhaltspunkt wird jene Feile als groß genug angenommen, deren Durchmesser drei ISO-Größen über der initialen Feile liegt, bei welcher eine Friktion im Wurzelkanal bemerkt wurde. Weiters muss die finale Feile drei Millimeter nach apikal gearbeitet werden.(1) Allerdings muss man darauf achten, keinesfalls den Apex zu durchstoßen. Im Zweifel ist es besser etwas zu kurz zu arbeiten, als dieses Risiko einzugehen. (14)



Obwohl im Normalfall nur der Hauptkanal behandelt werden kann, sind die Erfolgsaussichten einer Wurzelkanalbehandlung, trotz des Vorhandenseins etwaiger Nebenkanäle und des apikalen Deltas sehr hoch. (17)

Bei all diesen Techniken sollte eine Röntgenkontrolle im Abstand von 6 Monaten stattfinden, und der Zahn bei ausbleibendem Therapieerfolg, erneut behandelt oder extrahiert werden. (3)

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich aus diesem Grund mit der Wurzelkanalgeometrie von 48 Eckzähnen von 26 adulten Hunden unterschiedlicher Körpergröße und Rasse. Die Zähne wurden im Mikro-Computertomographen (Mikro-CT) vermessen, um die Unterschiede zueinander beziehungsweise zwischen den Altersstufen und Gewichtsklassen zu beschreiben, um zukünftige Anwendungen oder Instrumente möglicherweise optimieren zu können.

## 5. Material und Methoden

### 5.1. Zahnauswahl

Es wurden ausschließlich Hundcanini zur Untersuchung herangezogen, da bei diesen Zähnen die Prävalenz von *traumatic dental injuries (TDI)* am höchsten ist (22). Für diese Diplomarbeit wurden insgesamt 48 Canini von 26 verschiedenen adulten Hunden untersucht.

Alle untersuchten Zähne wurden aus anderen medizinischen Gründen, in den meisten Fällen handelte es sich dabei um Parodontitis, mittels einer offenen chirurgischen Zahnextraktionstechnik extrahiert und erst danach für diese Studie ausgesucht. Somit bedurfte es keinen Tierversuchsantrag und die Hunde wurden durch diese Studie in keiner Weise negativ beeinflusst.

#### 5.1.1. Probengewinnung

Die Auswahl der Tiere erfolgte zufällig in der Reihenfolge in der sie auf der Zahnklinik der Veterinärmedizinischen Universität Wien vorstellig wurden.

Bei der offenen chirurgischen Methode wurde zuerst ein mukoperiostaler Schleimhautlappen oberhalb des Alveolarknochens des Caninus präpariert. Anschließend wurde dieser mit einem hochdrehendem Rosenbohrer (luftgetriebene Turbine mit ca. 280.000 Umdrehungen/min) und unter ständiger Wasserkühlung teilweise entfernt, mit dem Ziel die Caninuswurzel auf 2/3 deren Länge freizulegen. Danach wurde die nun teilweise exponierte Wurzel mittels Flügelelevatoren der Größe 4 bis 6 mobilisiert und der gesamte Eckzahn in toto extrahiert. Nach der Reinigung des Zahnfaches wurde der Alveolarknochen kürettiert und mit steriler Kochsalzlösung (NaCl 0,9%) gespült. Zuletzt wurden noch die scharfen Kanten abgerundet und die Wunde mit dem zuvor generierten Schleimhautlappen spannungsfrei verschlossen. Hierzu wurden Einzelknopfnähte mit monofilamentösem, resorbierbarem Nahtmaterial (Biosyn™ 4/0, Covidien) im Abstand von 2-3mm gelegt.

### 5.1.2. Probenlagerung

Die bereits extrahierten Zähne wurden in einer 4%-igen Formalin-Lösung fixiert und dann für die Dauer der Studie in 70% Ethanol gelagert. Für das Scannen wurden die Zähne aufrecht in ein ebenfalls mit 70% Ethanol befüllten Plastikröhrchen verbracht. Um eine eventuelle Bewegung des Zahnes im Röhrchen zu verhindern, wurde dieser zuvor mit Zellstoff umwickelt. Im Anschluss wurde das Probenröhrchen mit Parafilm versiegelt, um ein Verdunsten des Ethanols während des Scan-Vorgangs zu verhindern.

### 5.2. Micro-CT

Für diese Diplomarbeit wurden alle Zähne im Micro-CT  $\mu$ CT35 der Marke Scanco (SCANCO Medical AG, Brüttisellen, Schweiz) platziert und mit den Parametern 70 kVp und 114  $\mu$ A untersucht. Daraus wurden Digital Image and Communication in Medicine (DICOM)-Daten erstellt. Die Voxelgröße lag bei  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ .

### 5.3. AMIRA

Für die Verarbeitung der DICOM-Daten wurde die Software AMIRA 6.2 (AMIRA 6.2 Thermo scientific™ Amira Software, Thermo Fischer Scientific, Hillsborro, Oregon, USA) verwendet.

Zuerst wurden sämtliche DICOM-Bilder eines Zahnes in das Amira-Programm importiert und der gesamte Bildstapel als neues Projekt gespeichert. Der erste Arbeitsschritt bestand aus dem Glätten der Bild-Daten. Hierzu wurde ein bilateraler Filter mit den Parametern Interpretation: 3D, *Kernel size* X, Y, Z: jeweils drei und *Similarity*: 10000 verwendet. Anschließend wurde der gefilterte Bildstapel neu abgespeichert und der ursprüngliche aus Übersichtsgründen entfernt. Als nächstes wurden mit dem *Segmentation-Editor* vier verschiedene Materialien erstellt und dem jeweiligen Bereich des Zahnes zugeordnet. Alle Materialien wurden in einem *Label-Field* gespeichert. Zuerst wurde beim *thresholding tool* der *lower threshold* auf 2600 gesetzt, um das Zahnbein zu markieren, und dem Material "tooth" hinzugefügt. Etwaige Artefakte wurden durch *inverse Selection* aller *Slices* entfernt.

Um die Pulpa zu segmentieren, wurde sie mit dem *arrow selection tool* ausgewählt. Im Zuge der Minimierung von Artefakten wurde die Auswahl zuerst um drei Voxel vergrößert und

anschließend wieder um drei Voxel verkleinert. Falls bei einem frakturierten Zahn die Pulpa Kontakt zur Oberfläche hatte, oder wenn ein zu großer Kanal im apikalen Delta bestand, musste dies händisch korrigiert werden. Hierzu wurde die Pulpa dann entweder händisch rekonstruiert, beziehungsweise die Pulpa manuell auf Höhe des Deltas abgegrenzt. Letztendlich wurde die Pulpa dem Material „*pulp*“ zugewiesen.

Im nächsten Schritt wurde der Schmelz segmentiert. Um bereits eingeteilte Materialien nicht zu beeinflussen, musste sowohl das Material „*exterior*“ als auch das Material „*pulp*“ *geloocked* werden. Anschließend wurde der untere *threshold* auf 8900 gesetzt, um den Schmelz zu markieren, und die Auswahl um 8 vergrößert, um Artefakte zu minimieren. Danach wurde das Ganze dem Material „*enamel*“ zugewiesen. Da durch diesen Arbeitsschritt das Material „*tooth*“ beschnitten wurde, musste nun auch dieses Material wiederum um 8 Voxel vergrößert und neu zugewiesen werden.

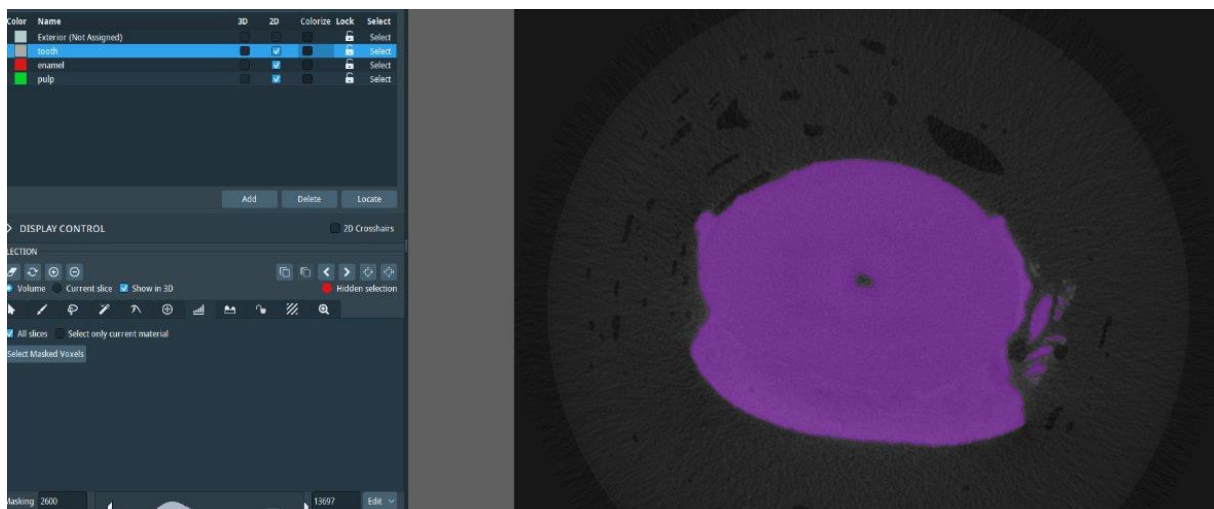


Abbildung 8 Auswahl Material „tooth“

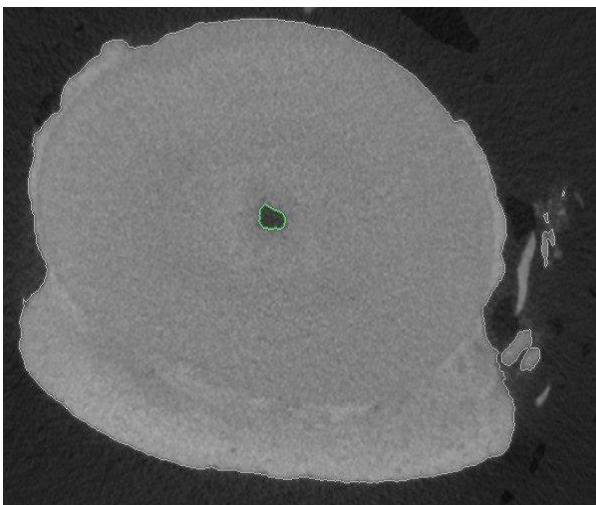


Abbildung 9 Auswahl Material „pulp“

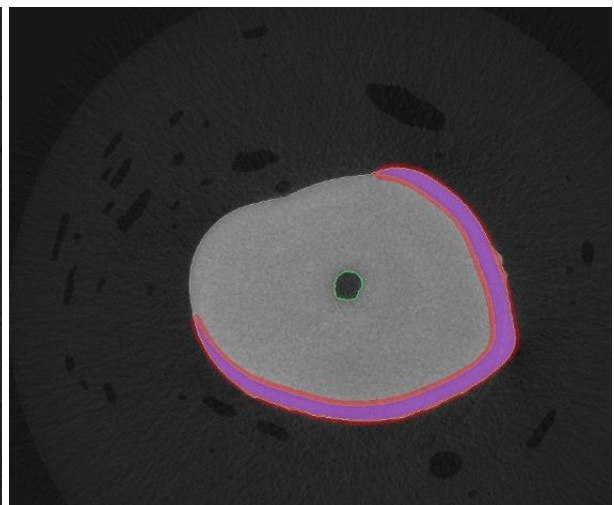


Abbildung 10 Auswahl Material „enamel“

Anschließend wurden die Grenzen erneut mit dem Tool „smooth labels“ geglättet. Hierzu wurden die Parameter „Size = 3“ und „Mode = 3D volume“ gewählt. Im nächsten Schritt wurde mit Hilfe des Programms jedes Material gemessen wonach man die folgenden statistischen Werte erhält: Volumen, mittlere Dichte, sowie die Standardabweichung. Dann wurde für jedes Material eine *Surface* erstellt. Diese wurde dann vereinfacht und bestand schlussendlich aus 200000 dreieckigen-faces. Die Oberfläche wurde dann mit den Parametern „iterations: 20“ und „lambda = 0,6“ geglättet. Danach wurde die Oberfläche erneut vereinfacht. Diesmal auf 100000 faces.

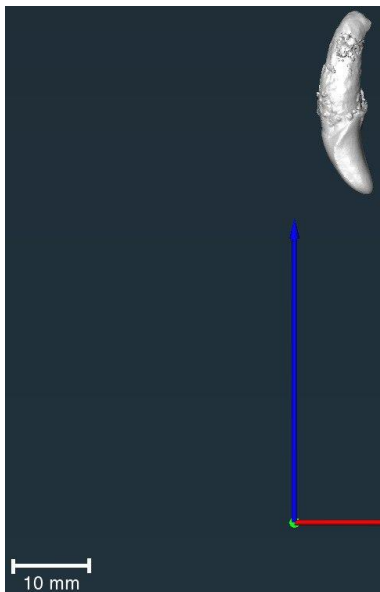


Abbildung 12 Surface tooth

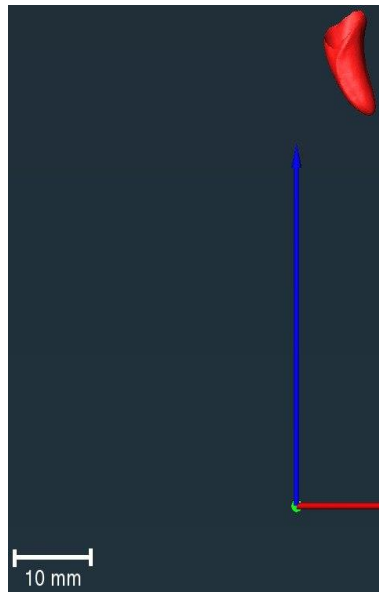


Abbildung 11 Surface enamel



Abbildung 13 Surface pulp

Als nächstes wurde ein longitudinaler Schnitt durch den Zahn auf Basis der Pulpa-Achse generiert. Hierzu wurden zuerst die *principal axes* der Pulpa ausgerichtet und kopiert. Diese wurden dann auf den gefilterten Bildstapel übertragen. Anschließend wurde der Bildstapel neu *gesampelt* mit der Referenz eines bereits vorhandenen Median-Schnitts. Die gewählte Interpolation war „Lanczos“ und der *padding value* war null. Durch diese Schritte erhielt man die Pulpa auf der medianen Höhe durch den Caninus, die auch durch den Null-Punkt verläuft. Darauffolgend wurde mit Hilfe des Programms die durchschnittliche Dicke des Schmelzes und der Pulpa ermittelt. Danach wurde eine gekrümmte Linie durch den Zahn gezeichnet, um seine gekrümmte Länge zu ermitteln. Hierzu wurden 30-50 Punkte von der Wurzel bis zur Spitze des Zahnes in der Mitte der Pulpa gesetzt, beziehungsweise in Richtung Wurzel und Spitze der Krümmung der Pulpa folgend verlängert. Das Programm verarbeitete dann diese Punkte zu einer Kurve und die Länge dieser Kurve konnte abgelesen werden. Beim Erstellen dieser gekrümmten Linie wurden die *Samples* auf 201 gesetzt. Dies ermöglichte eine Schrittgröße

von 0.5% wenn 100% die normierte gesamte Zahnlänge sind. Diese prozentuale Bezeichnung ermöglichte auch eine eindeutige Zuordnung der einzelnen Punkte. Wobei der Punkt null % dem letzten Punkt an der Wurzelspitze und der Punkt 100% dem letzten Punkt an der Spitze des Zahnes entspricht. Anschließend wurde der Zahn linear vermessen. Dies geschah auch wieder mit dem vorliegenden Programm. Dabei wurde das *measure-tool* verwendet und die gleichen Anfangs- und Endpunkte wie bei der gekrümmten Linie genutzt, allerdings wurde nun eine gerade Strecke gezeichnet und auf die Krümmung keine Rücksicht genommen.

Die Vermessung der Pulpa und der Wurzel geschah analog dazu. Wobei als Grenze zwischen Wurzel und Krone der Beginn des Zahnschmelzes herangezogen wurde.



Abbildung 15 Vermessung Zahn



Abbildung 14 Vermessung Pulpa



Abbildung 16 Vermessung Wurzel

Als nächstes wurde die gekrümmte Linie mit dem Tool „smooth line set“ und 100 Wiederholungen geglättet. Anschließend wurde die Transformation des *Label-Fields* an die Transformation der Kurve angepasst. Falls diese nicht übereinstimmten, musste die Transformation zuerst vom gefilterten Bildstapel übertragen werden. Dies geschah wieder über den *Transformation-Editor* und wurde kopiert und anschließend eingefügt. Danach wurde



vom *Label-Field* mit Hilfe des *Tools „Compute“* und der „*Expression*“:  $(a==3) * 1$  die Pulpensegmentierung berechnet und extrahiert. Im Anschluss wurde ein neuer Bildstapel generiert. Hierbei wurde der „*Mode*“ auf „*extended*“ gesetzt und neu gesampelt. Bevor der erste Datensatz bearbeitet wurde, musste der Ordner für die Pulpenanalyse in Windows als Netzwerklaufwerk verbunden werden. Das war unbedingt nötig, weil das nachfolgende Amira *Tool Command language (TCL) - Script* nicht mit Pfaden arbeiten kann, in denen Leerzeichen in Ordernamen vorkommen. Im nächsten Schritt wurde die Referenz-Datei „*sphere*“ in das Projekt geladen. Danach wurde ein *TCL Command Module* generiert und der gesamte Inhalt des Referenz-Text-files hineinkopiert. Nun wurde ein Schnitt von der „*Sphere*-Datei“ generiert, wobei das „*Sampling*“ auf *grob* gesetzt wurde. Dann wurde ein *Trajectory* vom Schnitt mit der ursprünglichen gekrümmten Kurve verknüpft. Im nächsten Schritt wurde vom *Label-field*-Bildstapel eine ROI-Box erstellt und mit dem Schnitt verbunden. Von diesem Schnitt wurde jetzt mit dem *Tool „Extract Image“* ein neuer Schnitt durch die Pulpa Oberfläche generiert. Als letztes wurde das *TCL Command Modul* gestartet. Dadurch lief das Programm einmal durch die komplette Pulpa und erstellte alle 0.5% der Gesamtlänge einen neuen Schnitt normal zur gekrümmten Pulpenachse. Dies ergab einen Blick von oben auf die Fläche der Pulpa an dieser Stelle. Die so entstandenen 201 Bilder wurden automatisch in zwei Ordnern gespeichert und dabei ein *Excel-file* erstellt.

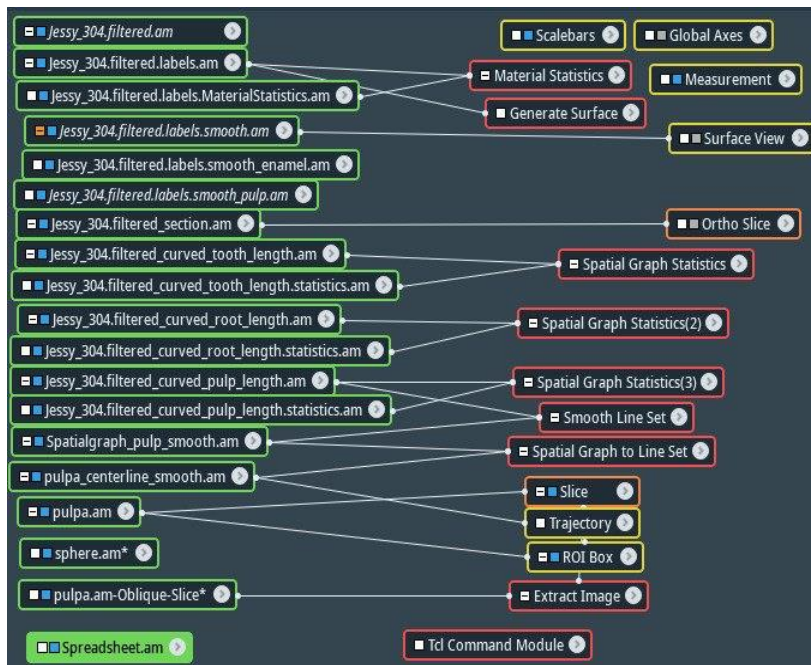


Abbildung 17 Projekt-work-flow

## 5.4. Fiji

Die weitere Verarbeitung der Daten erfolgte mit der *Open-Source-Software Fiji*. (23)

Zuerst wurde ein vorgefertigtes Skript ausgewählt und dieses gestartet. Dann wurde der von AMIRA generierte Ordner ausgewählt. Als nächstes verarbeitete Fiji die darin enthaltenen Daten und wertete diese aus. Diese Auswertung wurde dann in *einem Excel-File* gespeichert und unter dem Gesichtspunkt „*Label*“ sortiert.

## 5.5. Excel

Nun wurden sowohl die Amira- als auch die Fiji-Daten in einem *File* zusammengeführt.

Hierzu wurde das Programm Excel 2016 (Excel 15.11, Microsoft Corporation, Redmond, Washington, USA) verwendet. Die Daten wurden in ein bereits vorgefertigtes Excel-File kopiert und verknüpft.

## 5.6. GraphPad Prism

Die statistische Auswertung erfolgte mit GraphPad Prism 9 (GraphPad Prism 9, Version 9. 5. 1 (733), Jänner 26, 2023, Dotmatics, Boston, Massachusetts, USA).

In Summe wurden mit Hilfe des Programms 36 Grafiken erstellt und in weiterer Folge sowohl die *Circularity* aller Zähne eines Tieres als auch das gesamte Wurzelkanalvolumen des Oberkiefers mit jenem des Unterkiefers verglichen. Anschließend wurden die *Circularity* und die Fläche des Wurzelkanalquerschnittes in Bezug auf Alter und Gewicht der Tiere untersucht. Zum Schluss wurde noch das Verhältnis des gekrümmten und gerade gemessenen Zahnes beziehungsweise des Wurzelkanals betrachtet und der gekrümmte Kanal dem gekrümmten Zahn gegenübergestellt.



## 6. Ergebnisse

### 6.1. Verhältnis Zahnlänge zu Pulpalänge

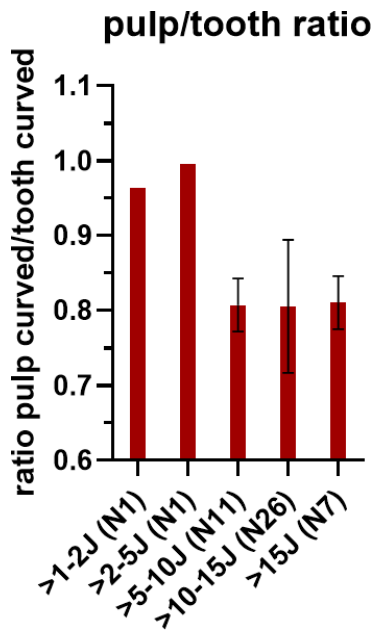


Abbildung 18 pulp/tooth length

### pulp/tooth ratio >10-15J nach Gewicht

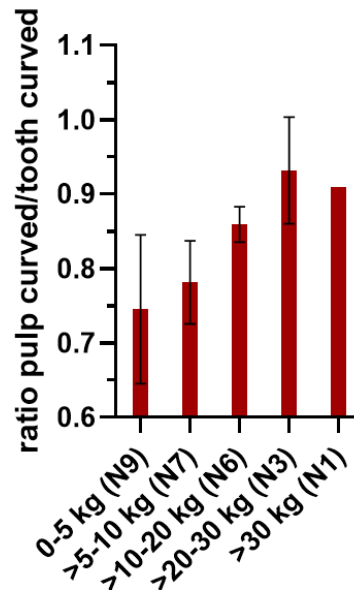


Abbildung 19 pulp/tooth length >10-15 Jahre

Das Verhältnis der gekrümmt gemessenen Länge der Pulpa zur gekrümmten Länge des Zahnes beträgt bei den jüngsten vermessenen Tieren (die Gruppe >1-2 Jahren) 0,96 und bei den zweitjüngsten 0,99. Wiederum sind keine Individuen im Bereich 0-1Jahr vertreten. Bei den 5–10-Jährigen lässt sich ein Mittelwert von 0,81  $\pm$  0,04 erkennen. Auch bei der größten Gruppe (der >10-15 Jahre alten) befindet sich der Mittelwert bei 0,81  $\pm$  0,09. Bei den > 15-Jährigen liegt das mittlere Verhältnis der beiden Längen bei 0,81  $\pm$  0,04.

Beim Gegenüberstellen der größten Gruppe unter Miteinbeziehung des Gewichts erhält man für die 0-5 kg schweren Tiere einen Mittelwert von 0,75  $\pm$  0,1. Von >5-10 kg beträgt er 0,78  $\pm$  0,06. Das mittlere Verhältnis bei der Gruppe von >10-20 kg ist 0,86  $\pm$  0,02 beziehungsweise bei der Gruppe der >20-30 kg schweren liegt er bei 0,93  $\pm$  0,07. Der Mittelwert bei der schwersten Gruppe (>30 kg) liegt bei 0,91  $\pm$  0.

## 6.2. Krümmungsverhalten des Zahnes

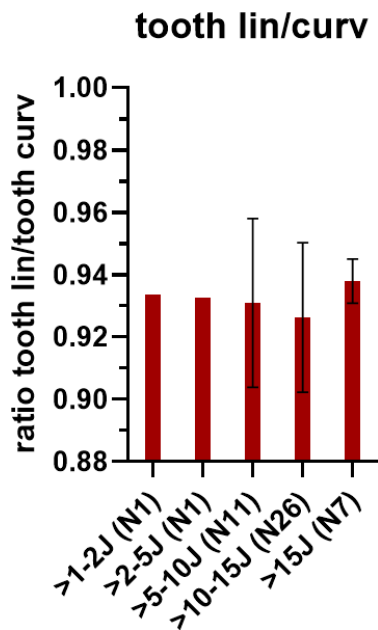


Abbildung 21 Verhältnis tooth lin/ tooth curv

**Gewicht: tooth lin/pulp curved ratio >10-15J**

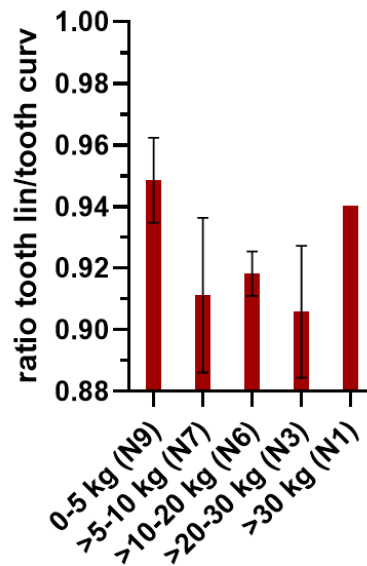


Abbildung 20 Verhältnis tooth lin/tooth curv; >10-15 J

Bei der Betrachtung des Krümmungsverhaltens eines Zahnes in Bezug auf das Alter, ließen sich durch alle Altersklassen hindurch, nur geringe Unterschiede feststellen. Das Verhältnis der Gruppe der >1–2-Jährigen und der >2-5 Jahre alten Hunde betrug jeweils 0,93 +/- 0. Bei den >5–10-Jährigen lag das Verhältnis bei 0,93 +/- 0,03 und bei der Gruppe von >10-15 Jahren betrug der durchschnittliche Wert 0,92 +/- 0,02. Nur bei der Gruppe der ältesten Tiere (>15 Jahre) war ein größerer Unterschied bemerkbar. Das Verhältnis in dieser Gruppe lag bei 0,94 +/- 0,01.

Auch hier wurde dann wieder das Gewicht als zusätzlicher Parameter bei der am stärksten vertretenen Gruppe hinzugezogen. Dabei stellte man fest, dass bei der Gruppe der leichtesten Tiere (0-5 kg) das Verhältnis bei 0,95 +/- 0,01 lag. Bei denjenigen mit einem Gewicht von >5-10 kg lag es bei 0,91 +/- 0,03. Bei der Gruppe der Mittelschweren (>10-20 kg) befand sich der Mittelwert bei 0,92 +/- 0,01. Der durchschnittliche Wert der Gruppe von >20-30 kg betrug 0,91 +/- 0,02 und bei der schwersten Gruppe (>30 kg) befand sich das durchschnittliche Verhältnis bei 0,94 +/- 0.

### 6.3. Krümmungsverhalten der Pulpa im Alter

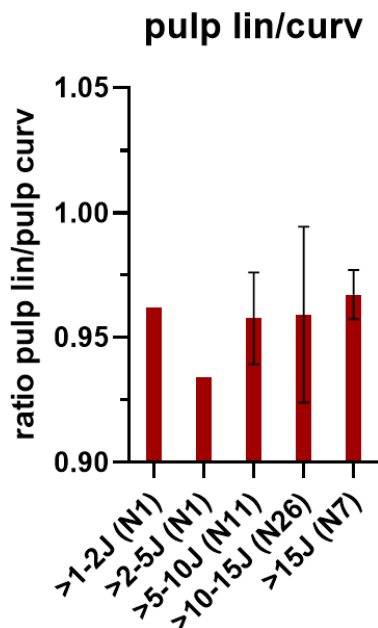


Abbildung 23 Krümmung der Pulpa

#### pulp lin/curv ratio >10-15J nach Gewicht

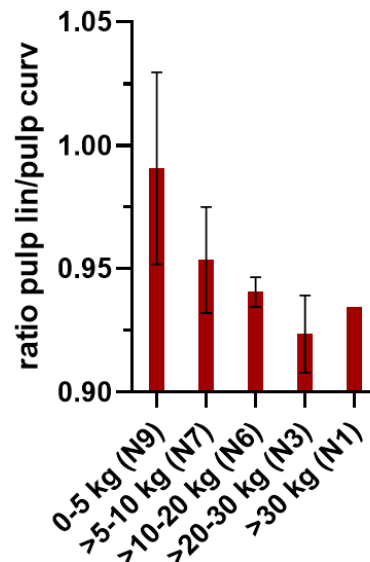


Abbildung 22 Krümmung der Pulpa; >10-15 J

Die Relation zur linear gemessenen Pulpa zu der gekrümmt gemessenen lag bei den >1-2-Jährigen bei 0,96 +/- 0 und bei den >2-5-Jährigen bei 0,93 +/- 0. Auch hier sind wieder keine Tiere in der Gruppe 0-0,5 Jahren beziehungsweise in der Gruppe >0,5-1 Jahren gemessen worden. Der Mittelwert der >5-10 Jahre alten Hunde, beläuft sich auf 0,95 +/- 0,02 und jener der >10-15 Jahre alten auf 0,96 +/- 0,04. Der durchschnittliche Wert der ältesten Gruppe (>15 Jahre) betrug 0,97 +/- 0,01.

Wenn man auch bei dieser Statistik wieder nur die größte Gruppe (>10-15 Jahre) betrachtet, und das Gewicht vergleicht, erhält man für die leichteste Gruppe (0-5 kg) einen Mittelwert von 0,99 +/- 0,04. Darauf folgte die Gruppe der >5-10 kg schweren Tiere mit einem durchschnittlichen Krümmungsverhältnis von 0,95 +/- 0,02. Bei den >10-20 kg schweren erhielt man einen Mittelwert von 0,94 +/- 0,01. Das mittlere Verhältnis der Gruppe von >20-30 kg betrug 0,92 +/- 0,02. Und bei der schwersten Gruppe (>30kg) betrug die Relation der beiden Messungen 0,93 +/- 0.

#### 6.4. Vergleich der Pulpa-Volumina des OK und des UK

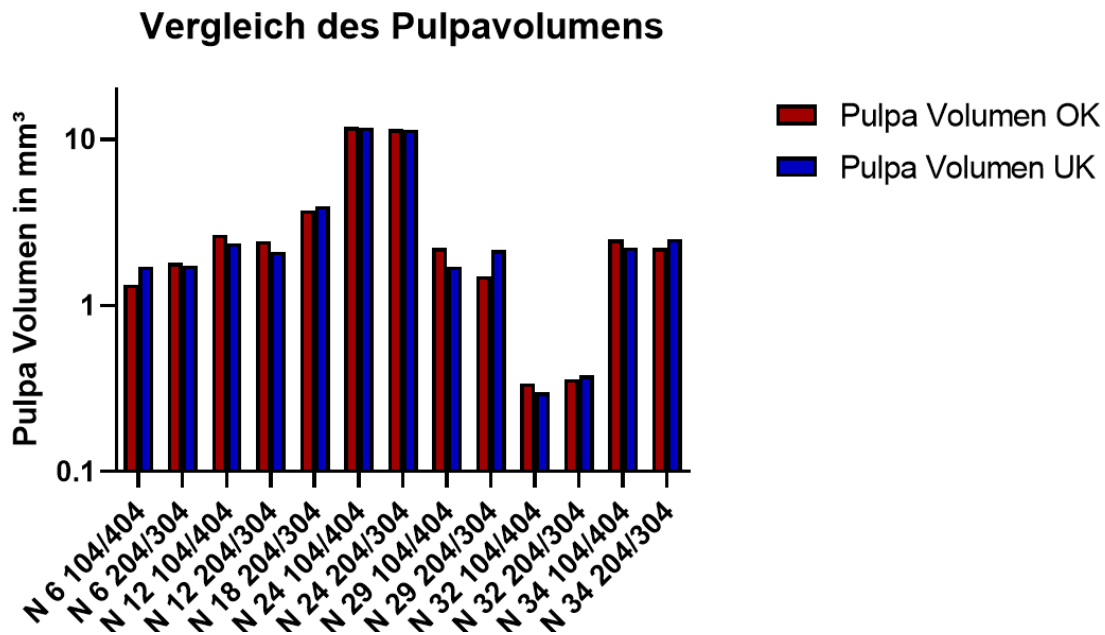


Abbildung 24 Vergleich des Pulpa-Volumens des OK und des Pulpa-Volumens des UK

Bei fünf der 13 Proben, bei denen die beiden Eckzähne einer Kieferseite vorhanden waren, stellten sich die Unterkiefer-Canini größer dar. Im Schnitt war das Volumen der Oberkiefer-Zähne bei  $3,43 \text{ mm}^3$  und jenes der Unterkiefer-Zähne bei  $3,42 \text{ mm}^3$ . Es lassen sich zwar Unterschiede zwischen den OK und den UK-Volumina feststellen. Allerdings lässt sich nicht erkennen welche Kieferhälfte ein größeres Volumen aufweist. Selbst bei ein- und demselben Individuum (also beim Vergleich von dem linken Paar mit dem rechten Paar) sind Unterschiede feststellbar. So ist beispielsweise bei den Zähnen der linken Seite des Hundes N29 der Oberkiefer Caninus um  $0,5 \text{ mm}^3$  voluminöser, aber auf der rechten Seite weist der Unterkiefer Eckzahn ein um  $0,65 \text{ mm}^3$  größeres Volumen auf.

## 6.5. Pulpafläche nach Alter

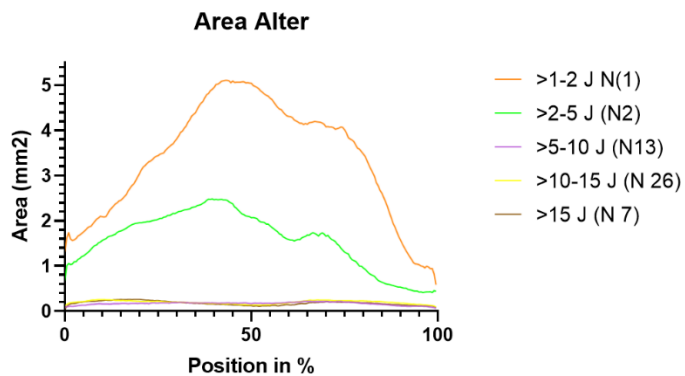


Abbildung 26 Pulpafläche Alter

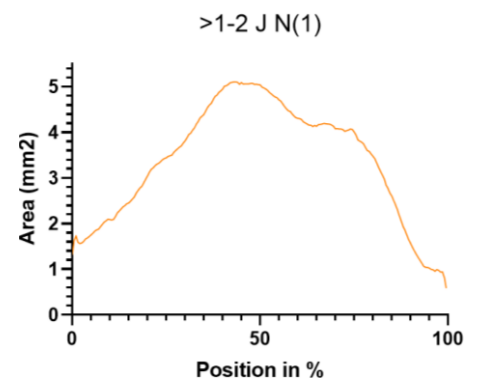


Abbildung 25 Pulpafläche Alter &gt;1-2J

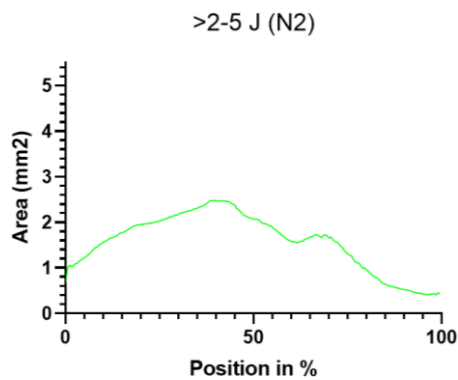


Abbildung 28 Pulpafläche Alter &gt;2-5J

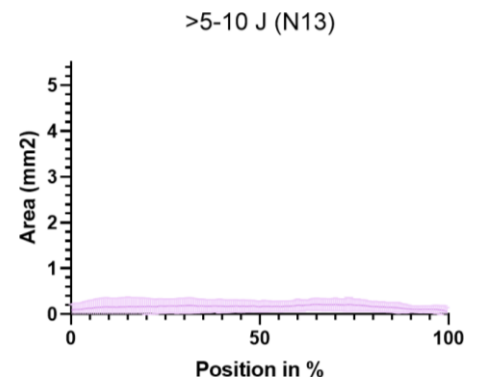


Abbildung 27 Pulpafläche Alter &gt;5-10J

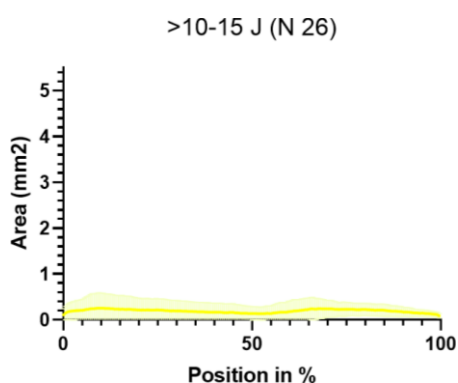


Abbildung 30 Pulpafläche Alter &gt;10-15J

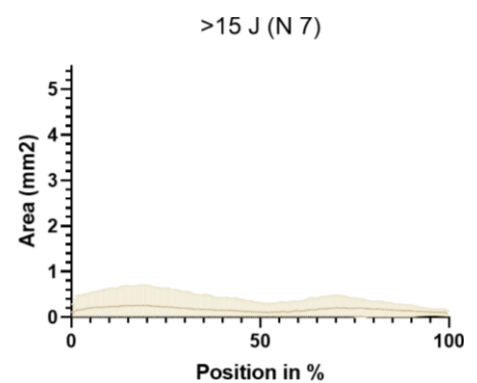


Abbildung 29 Pulpafläche Alter &gt;15J

Es zeigt sich, dass die Querschnittsfläche des Wurzelkanals stark altersabhängig ist. Während sie in den Gruppen über fünf Jahren nahezu konstant bleibt, ist sie vor allem bei den jüngeren

Tieren größer. Der durchschnittliche Wert für die Gruppe >1-2 Jahren liegt bei  $3,36 \text{ mm}^2 \pm 0$  und bei der Gruppe >2-5 Jahren liegt er bei  $1,57 \text{ mm}^2 \pm 0$ . In den älteren Gruppen wird die Fläche immer kleiner. So liegt der Mittelwert der Gruppe >5-10 Jahre bei  $0,16 \text{ mm}^2 \pm 0,14$ , bei der Gruppe >10-15 Jahre bei  $0,19 \text{ mm}^2 \pm 0,19$  und bei der Gruppe > 15 Jahre bei  $0,17 \text{ mm}^2 \pm 0,26$ .

Weiters verlaufen die Kurven der Tiere nahezu gleich. Lediglich bei den beiden jüngeren Gruppen sind Abweichungen feststellbar. Zu Beginn des Zahnes steigt die Kurve bis zum Positionspunkt von 42,5% auf  $5,1 \text{ mm}^2$  beziehungsweise auf  $2,46 \text{ mm}^2$  an, um dann bis zum 62,5%-Punkt auf  $4,18 \text{ mm}^2$  beziehungsweise  $1,58 \text{ mm}^2$  abzusinken. Anschließend wird die Fläche bei den >2–5-Jährigen wieder größer (bis zum Positionspunkt von 69% bei  $1,73 \text{ mm}^2$ ), während sie bei den >1-2 Jahre alten ein Plateau über 8,5% bei  $4,18 \text{ mm}^2$  ausbildet, und wird dann kontinuierlich bis zur Kronenspitze immer kleiner.

## 6.6. Pulpafläche nach Gewicht der Hunde über 2 Jahren

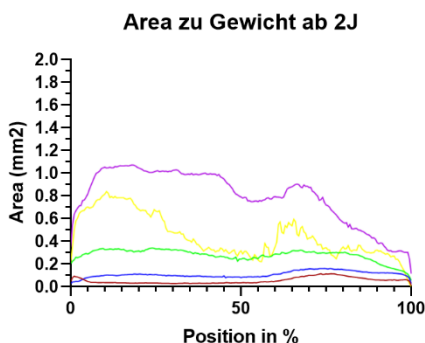


Abbildung 31 Area zu Gewicht

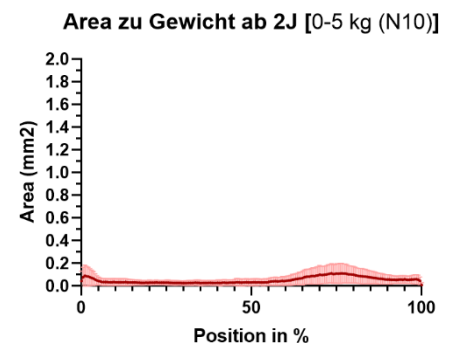


Abbildung 32 Area zu Gewicht 0-5kg

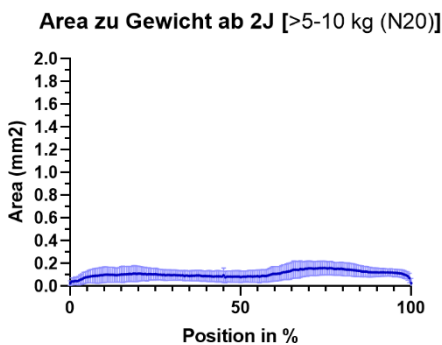


Abbildung 33 Area zu Gewicht >5-10kg

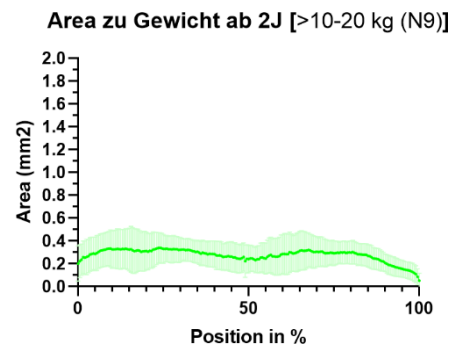


Abbildung 34 Area zu Gewicht >10-20kg

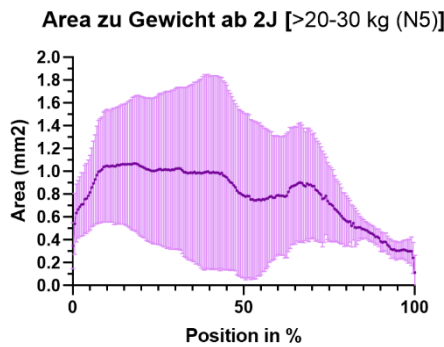


Abbildung 35 Area zu Gewicht &gt;20-30kg

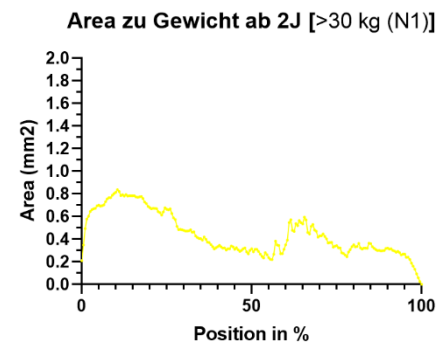


Abbildung 36 Area zu Gewicht &gt;30kg

Wenn man die Querschnitts-Fläche der Pulpa der verschiedenen Gewichtsklassen vergleicht, stellt man fest, dass mit zunehmendem Gewicht auch die Querschnittsfläche zunimmt. Die einzige Ausnahme bildet die Klasse über 30kg. Die Durchschnittliche Fläche bei der Klasse 0-5kg liegt bei  $0,05 \text{ mm}^2 \pm 0,04$ . Bei der nächstgrößeren Gruppe (>5-10kg) erhält man einen Mittelwert von  $0,11 \text{ mm}^2 \pm 0,05$ . Der Durchschnitts-Wert bei >10-20 kg liegt bei  $0,28 \text{ mm}^2 \pm 0,13$ , bei >20-30 kg liegt er bei  $0,8 \text{ mm}^2 \pm 0,48$  und bei der schwersten Kategorie (>30 kg) lässt sich ein Wert von  $0,44 \text{ mm}^2 \pm 0$  feststellen.

Ansonsten bleibt die Querschnittsfläche des Wurzelkanals bei den kleinen Hunden, über den Zahn verteilt, konstant. Lediglich eine gesteigerte Fläche um  $0,1 \text{ mm}^2$  im Bereich ab 59% ist zu erkennen.

Bei den schweren Hunden (>20-30 kg und >30 kg) fällt wiederum auf, dass die Wurzelfläche keineswegs konstant verläuft. Vielmehr steigt sie innerhalb der ersten 18% stark an, um dann bis 59% kontinuierlich zu fallen. Danach steigt sie wieder für 7,5% an, um anschließend wieder zu sinken. Dadurch ergibt sich eine Engstelle im Bereich von 35-65% bei den Hunden dieser Gruppen.

## 6.7. Circularity von sechs Hunden

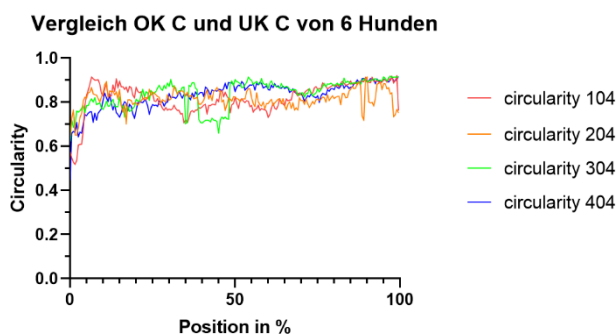


Abbildung 37 Circularity aller 4 Canini

Allgemein lässt sich sagen, dass sich die Kurven aller 4 Zähne stark ähneln. Der Mittelwert der *Circularity* lag beim Zahn 104 bei  $0,82 \pm 0,1$ ; beim Zahn 204 bei  $0,81 \pm 0,13$ . Und bei den Unterkiefer Eckzähnen 304 bei  $0,84 \pm 0,12$  beziehungsweise bei 404 bei  $0,83 \pm 0,1$ .

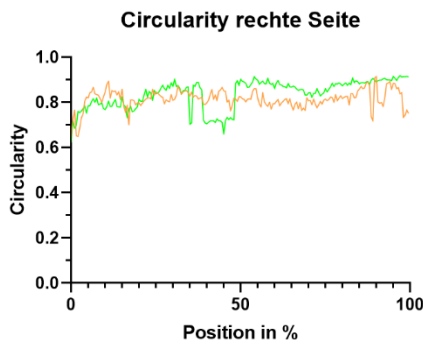


Abbildung 38 Circularity rechte Seite

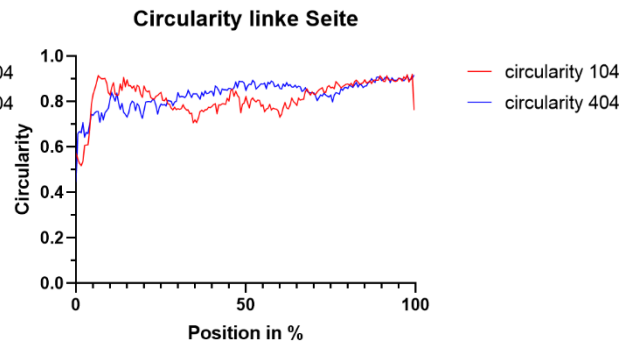


Abbildung 39 Circularity linke Seite

Allerdings fällt beim Vergleich der Eckzähne derselben Seite auf, dass jeweils der Unterkiefer Caninus eine höhere *Circularity* aufweist als sein Gegenspieler im Oberkiefer. Vor allem im Bereich von ungefähr 30%-70% der Zahnlänge (also in der Mitte des Zahnes) wird dieser Unterschied tragend. Der Unterschied beträgt jeweils 0,02 *Circularity*-Einheiten.

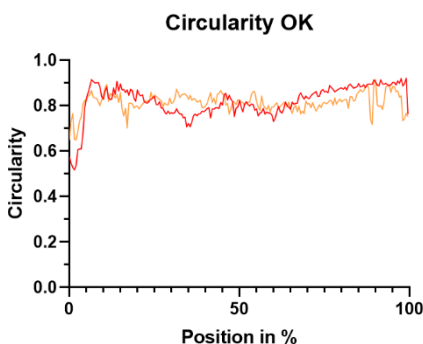


Abbildung 40 Circularity Oberkiefer

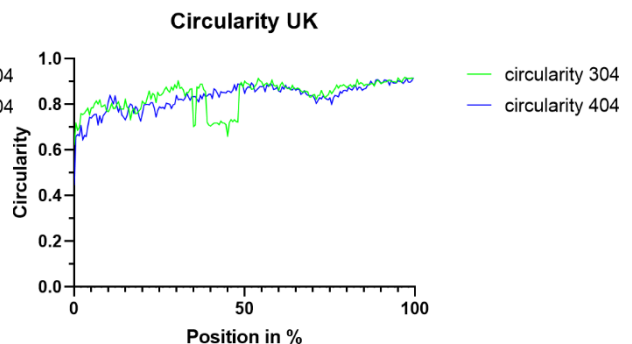


Abbildung 41 Circularity Unterkiefer

Wenn man die beiden Canini desselben Kiefers gegenüberstellt, lässt sich kein deutlicher Unterschied in der *Circularity* zwischen links und rechts erkennen.



## 6.8. Circularity nach Gewicht

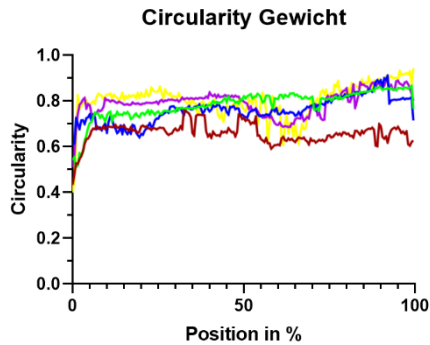


Abbildung 42 Circularity nach Gewicht

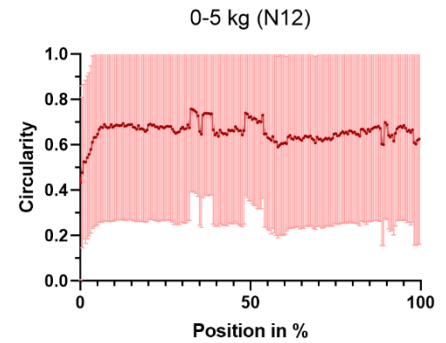


Abbildung 43 Circularity 0-5 kg

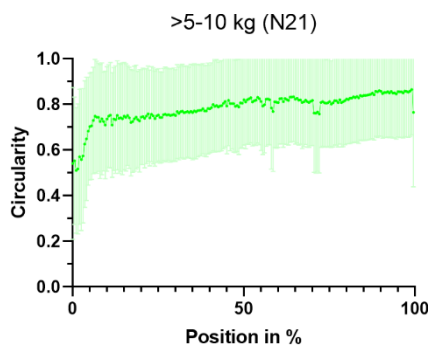


Abbildung 44 Circularity &gt;5-10 kg

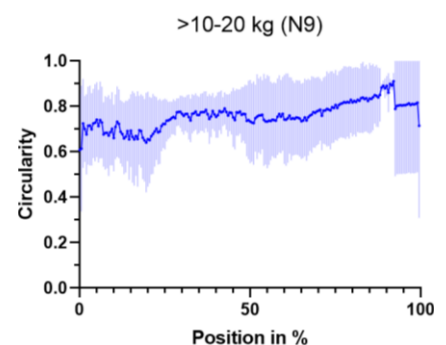


Abbildung 45 Circularity &gt;10-20 kg

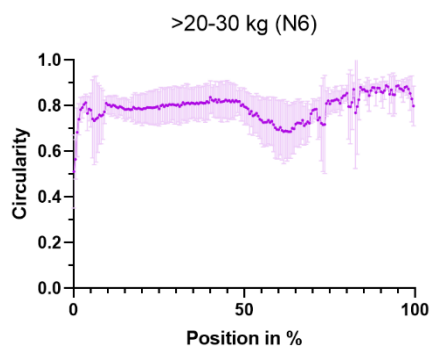


Abbildung 46 Circularity &gt;20-30 kg

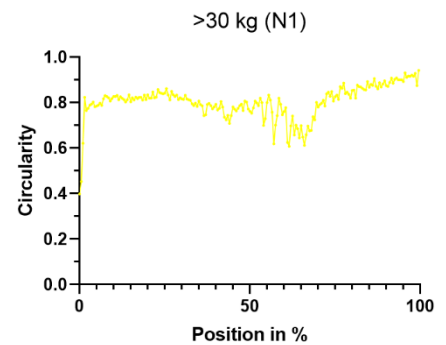


Abbildung 47 Circularity &gt;30 kg

Wenn man die Zähne aller Hunde in Gewichtsguppen einteilt, und diese Gruppen dann gegenüberstellt, so sieht man, dass sich die *Circularity* aller Gruppen sehr stark ähnelt. Lediglich die Gruppe der kleinen Hunde (0-5 kg) weist eine geringere *Circularity* auf (*Mean* 0,66 +/- 0,4). Der durchschnittliche Wert der Gruppe >5-10 kg liegt bei 0,78 +/- 0,21; bei der

Gruppe >10-20 kg bei  $0,76 \pm 0,15$ ; bei der Gruppe >20-30 kg bei  $0,79 \pm 0,08$  und bei der Gruppe der größten Hunde (>30 kg) lässt sich ein Mittelwert von  $0,80 \pm 0$  feststellen.

Weiters lässt sich sowohl bei der Gruppe der >20-30 kg schweren Tiere, als auch bei jener der > 30 kg schweren Hunde ein Einschnitt um 0,15 *Circularity*-Einheiten im Bereich bei 55% erkennen. Anschließend steigt die *Circularity* wieder an. Sie hat bei den Tieren >20-30 kg ihren maximalen Wert von  $0,89 \pm 0,02$  bei 91,5% und bei der schwersten Gruppe den Maximalwert von  $0,94 \pm 0$  bei 99,5%.

## 6.9. *Circularity* nach Alter

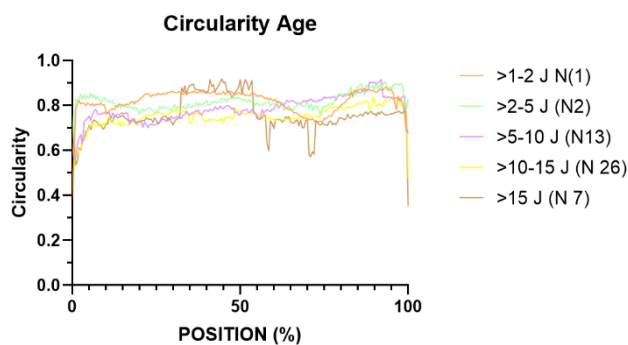


Abbildung 48 *Circularity* Alter

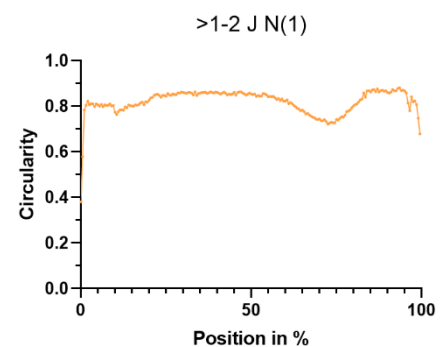


Abbildung 49 *Circularity* Alter >1-2 J

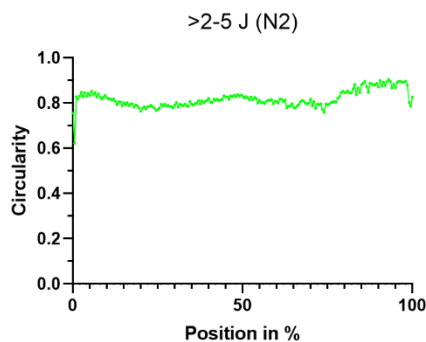


Abbildung 50 *Circularity* Alter >2-5 J

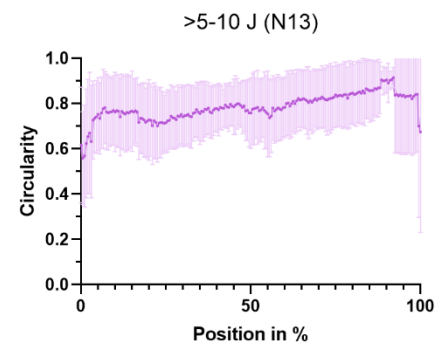


Abbildung 51 *Circularity* Alter >5-10 J

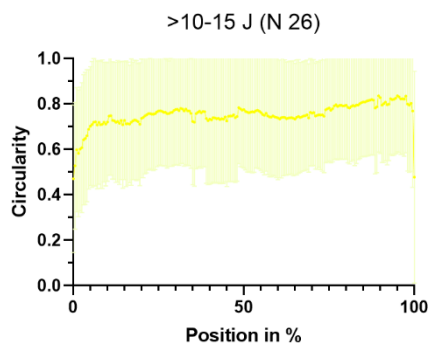


Abbildung 52 Circularität Alter &gt;10-15 J

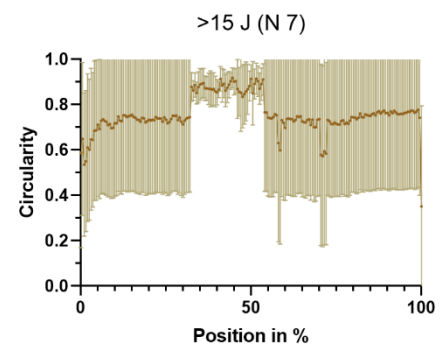


Abbildung 53 Circularität Alter &gt;15 J

Beim Betrachten der *Circularität* unter dem Aspekt des Alters des Tieres, lässt sich eine starke Ähnlichkeit in den Gruppen >2-5 Jahre (J), >5-10 J und >10-15 J erkennen. Nur die Gruppe der >1–2-Jährigen weist anfangs eine stärkere *Circularität* auf (im Bereich 15-54,5%) und anschließend einen Einschnitt mit dem Tiefpunkt von  $0,72 \pm 0$  bei 72,5%. Auch die Gruppe der >15-Jährigen zeichnet ein anderes Bild: Hier zeigt sich eine erhöhte *Circularität* im Bereich von 32-53,5% und anschließend zwei Tiefpunkte bei 58,5% beziehungsweise bei 70,5%. Der Mittelwert der >1-2-Jährigen beträgt  $0,82 \pm 0$ , jener der >2–5-Jährigen beträgt  $0,82 \pm 0$ . Bei der Gruppe der >5-10 Jahre alten lässt sich ein durchschnittlicher Wert von  $0,78 \pm 0,15$  erkennen. Der *Mean* der Gruppe von >10-15 Jahren liegt bei  $0,75 \pm 0,26$  und bei der Gruppe der >15 Jahre alten bei  $0,76 \pm 0,28$ . Die Gruppen der >0,5 Jahre alten und der 0,5–1-Jährigen sind nicht vertreten.

## 7. Diskussion

### 7.1. Der Caninus als Zahnmodell für den Wurzelkanal

Der Eckzahn eines Hundegebisses kann aufgrund seines Aufbaus mit nur einer Wurzel inklusive Wurzelkanal als Standard für einen Zahn angenommen werden. (9). Weiters sind die Canini einer der größten Zähne des Hundes (24), wodurch auch kleinere Abweichungen bemerkt werden können. Zusätzlich ist der Eckzahn einer der funktionell wichtigsten Zähne beim Fleischfresser und deshalb spielt auch seine Behandlung eine wichtige Rolle. (21)

Des Weiteren sind die Canini von Hunden auf Grund ihrer exponierten Lage besonders gefährdet durch eventuelle Traumata beschädigt zu werden. Es wurde keine Literatur gefunden, die das Verhältnis zwischen Zahnlänge und Pulpalänge beschreibt. Bei dieser Studie fiel auf, dass das Verhältnis bei den jungen Gruppen sehr nahe 1 liegt, also die Pulpalänge beinahe die gesamte Zahnlänge einnimmt und koronal nur von der Schmelzschicht und einem dünnen Dentin-Steg geschützt ist. Daraus ergibt sich, dass im Falle eines Traumas, die Beteiligung der Pulpa bei jüngeren höher ist als bei alten Tieren.

Mit zunehmendem Alter wurde das Verhältnis zwar kleiner, blieb aber zwischen 5 und 15 Jahren annähernd konstant. Das kleiner werden des Verhältnisses ist auf die Dentinbildung der Odontoblasten zurückzuführen. (1) Dies bedeutet, dass die Odontoblasten nicht nur seitlich an Wand des Wurzelkanals, sondern eben auch an der Spitze des Zahnes sitzen und somit die Pulpa nicht nur enger, sondern auch kürzer werden lassen.

Aber auch bei dieser Untersuchung waren in den beiden vorhandenen jungen Gruppen jeweils nur ein Tier und kein einziges im Bereich unter einem Jahr.

In dieser Studie wurde ebenso das Gewicht als Parameter für die Körpergröße miteinbezogen und es viel auf, dass kleine Hunde eine verhältnismäßig kürzere Pulpa haben. Dieses Verhältnis stieg mit steigendem Gewicht sukzessive an und fiel nur bei der schwersten Gruppe wieder ab. Wobei die schwerste Gruppe (>30 kg) wiederum nur aus einem Tier bestand (n=1).

Die Beißkraft eines Hundes hängt zwar in erster Linie von dessen Schädelform, aber auch von der Größe des Tieres ab. (25) Wenn somit ein großer Hund demzufolge eine höhere Beißkraft besitzt, und auch die relative Pulpa-Länge im Vergleich zu kleinen Hunden größer ist, bedeutet das für größere Hunde wiederum ein erhöhtes für eine „komplizierte“ Zahnfraktur.

## 7.2. Krümmungsverhalten des Zahns

Wie sich das Krümmungsverhalten eines Zahnes mit dem Alter eines Hundes verändert, beziehungsweise ob es Unterschiede bei der Miteinbeziehung des Gewichts beziehungsweise der Körpergröße gibt, wurde nach Wissen des Autors bis dato noch nicht wissenschaftlich dokumentiert.

In unserer Studie wiesen sämtliche Altersgruppen ein ähnliches Verhältnis von linear gemessener Zahnlänge zu gekrümmt gemessener Zahnlänge auf. Lediglich bei der Gruppe mit den ältesten Tieren war die Krümmung am geringsten.

Anschließend wurde wieder bei der Altersgruppe mit den meisten Proben (>10-15 Jahre) das Gewicht mitberücksichtigt und es stellte sich heraus, dass das Verhältnis der beiden Strecken zueinander bei den leichtesten Tieren am höchsten war. Es zeigte sich also, dass die Tiere bis fünf Kilogramm die geringste Zahnkrümmung aufwiesen, während mit zunehmendem Gewicht die Zähne sich offensichtlich stärker krümmen. Lediglich die Gruppe der schwersten Tiere (>30kg) widersprach dieser Beobachtung. Hier ließ sich wieder ein Verhältnis nahe an eins feststellen. Dies würde wiederum für einen geraderen Zahn sprechen als in den Gruppen davor. Allerdings ist zu beachten, dass diese Gruppe wiederum aus nur einem Tier bestand.

Mögliche Ursachen für das unterschiedliche Krümmungsverhalten könnten beispielsweise die stärkere Belastung bei großen Hunden sein, da diese eine höhere Beißkraft besitzen (25), oder Platzmangel, da kleine Hunde verhältnismäßig kleinere Kiefer haben.

Weiters ist auch hier wieder das Gewicht als einziger Anhaltspunkt für die Größe eines Tieres herangezogen worden.

## 7.3. Krümmungsverhalten der Pulpa

In dieser Untersuchung stellte sich heraus, dass das Verhältnis von linear gemessener Pulpa zu gekrümmter über alle Altersgruppen konstant ist. Dies ist dadurch erklärbar, dass die Odontoblasten gleichmäßig verteilt sind und der Wurzelkanal über die Zeit gleichmäßig enger wird. Das bedeutet, dass sich die Krümmung des Wurzelkanals nicht ändert. Lediglich die

Gruppe der >2 bis 5-jährigen wies ein geringeres Verhältnis auf, wobei beachtet werden muss, dass in dieser und der jüngsten Gruppe wieder jeweils nur eine Probe vorhanden.

Unter Einbeziehung des Gewichts stellte man fest, dass das Verhältnis mit zunehmendem Gewicht der Tiere abnahm. Mit anderen Worten ist bei größeren Hunden die Pulpa gekrümmter, analog zur Zahnkrümmung.

In jedem Fall bedeutet es, dass die erfolgreiche Wurzelkanalbehandlung kleiner Hunde einfacher sein sollte und unterstreicht die Wichtigkeit vor allem bei größeren Hunden sich einen geeigneten „geraden“ Zugang zu schaffen. Um trotz der Krümmung, sämtliches Material entferne, beziehungsweise die Wurzelkanäle möglichst homogen füllen zu können. (5)

#### **7.4. Wurzelkanalvolumen Vergleich zwischen OK und UK**

Es ließen sich in dieser Studie zwar Unterschiede in den Wurzelkanalvolumina der Canini des Oberkiefers, verglichen mit jenen des Unterkiefers feststellen, allerdings konnte keine Vorhersage getroffen werden, welcher Eckzahn den größeren Kanal besitzt, da sich die Ergebnisse nicht deckten. Selbst beim Vergleich der Zähne von ein und demselben Tier, waren die Ergebnisse nicht konstant. Es liegt daher nahe, dass das Volumen des Wurzelkanals, unabhängig vom Kieferquadranten, nahezu gleich groß ist. Auch die Literatur gibt keine Anhaltspunkte, dass es Unterschiede geben könnte. Die Eckzähne des Oberkiefers gelten zwar allgemein als „massiver“ (9), dies scheint jedoch keinen Einfluss auf das Volumen des Wurzelkanals zu haben. Jedoch ist auch hier wieder anzumerken, dass der Probenumfang mit nur 26 Proben sehr klein war, da nur bei 13 Hunden mehr als ein Eckzahn vorhanden war.

#### **7.5. Pulpaflächen Vergleich**

Da sich am äußeren Rand der Pulpa die Odontoblasten befinden und diese ein Hundeleben lang Dentin bilden (7), kann man davon ausgehen, dass der Wurzelkanal mit zunehmendem Alter immer kleiner wird. (1) Weiters ist die Zahnreife mit spätestens 18 Monaten erreicht. (14) Auch in dieser Studie ließ sich erkennen, dass sich die Querschnitts-Fläche des Wurzelkanals vor allem in jungen Jahren stark verändert. Während in den Gruppen >1-2

Jahre und >2-5 Jahre noch Veränderungen feststellbar waren, verliefen die Kurven aller älteren Gruppen nahezu ident.

Neben der Enge verändert sich auch die Form des Wurzelkanals mit zunehmendem Alter. Wiederum stachen die beiden jungen Gruppen hervor. Bei beiden Gruppen war eine Engstelle feststellbar, auf welche bei einer Behandlung Rücksicht genommen werden sollte. Vor allem, weil das ISO-Maß, welches die finale Feilen-Größe bestimmt, von der ersten Feile abhängt, bei der eine Friktion im Wurzelkanal feststellbar ist. (1) Der Grund für diese Engstelle könnte physiologischerweise die Schmelz-/Zementgrenze sein, aber auch ein unbekanntes Trauma von außen könnte die Odontooblasten in einem Bereich zur vermehrten Dentinproduktion (im Sinne eines Reparaturvorganges) anregen. Allerdings muss man sagen, dass in beiden der jungen Gruppen, welche die Engstelle aufweisen, jeweils nur ein Tier vertreten war.

Man nimmt an, dass der Wurzelkanal des Eckzahns konisch und konstant ohne Engstellen verläuft. (26) Dies zeigte sich zum Teil auch in unserer Studie bei der Untersuchung der Querschnittsfläche vom Wurzelkanal der über 2 Jahre alten Tiere (siehe Abb 38-44). Die Fläche unter der Kurve wurde zwar mit steigendem Gewicht immer größer, aber die Form der Kurve wies ein einheitliches Bild bei allen Klassen auf. Die Steigerung der Fläche lässt sich mit der höheren Gewichtsklasse und den damit verbundenen größeren Zähnen erklären. Nur die schwerste Gewichtsklasse wies wieder eine geringere Fläche unter der Kurve auf. Allerdings handelt es sich dabei wiederum nur um ein einziges Tier (n=1).

Allerdings ließ sich bei allen Gruppen eine Steigerung der Querschnitts-Fläche ab 60% und bei schwereren Tieren auch eine Engstelle davor (im Bereich der Zement-Schmelz-Grenze) erkennen. Daher sollte man besonders diese Bereiche bei einer Wurzelkanalbehandlung beachten.

## 7.6. Circularity

Bei Canini wird grundsätzlich von einer im Querschnitt runden Pulpa ausgegangen. (10) In unserer Studie war allerdings meistens ein mehr oder weniger, ellipsenförmiger Querschnitt erkennbar. Wobei sich der Wurzelkanal der Eckzähne des Unterkiefers runder darstellte als

jene des Oberkiefers. Dies könnte daran liegen, dass die Eckzähne des OK stärker gekrümmt sind. Außerdem gelten die Canini des OK allgemein als größer und voluminöser.(9)

Weiters stellte sich heraus, dass der Querschnitt mit zunehmendem Alter immer weniger rund wird. So wiesen die Tiere in den jungen Gruppen eine höhere *Circularity* auf, als jene in den älteren. Der Grund hierfür könnte sein, dass die Odontoblasten, welche ein ganzes Leben lang Dentin bilden (und dadurch die Pulpa immer kleiner werden lassen) (7), nicht streng zirkulär angeordnet sind. Allerdings bestanden, die beiden jüngsten Gruppen aus jeweils nur einem Tier und die juvenilen Gruppen, waren nicht vertreten.

Das Gewicht, also die Größe der Hunde wies in dieser Studie keinen Einfluss in Bezug auf die *Circularity* auf. Die Hunde aller Gewichtsklassen hatten einen ähnlichen Querschnitt des Wurzelkanals. Allerdings ist anzumerken, dass in unserer Untersuchung, das Gewicht als einziger Parameter für die Größe herangezogen, und der Ernährungszustand außer Acht gelassen wurde.

## 7.7. Fazit und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass in jungen Jahren die Wahrscheinlichkeit einer offenen = "komplizierten" Zahnfraktur, aufgrund der Mikroanatomie deutlich erhöht scheint.

Außerdem wurde bewiesen, dass es immer wieder zu Engstellen kommen kann und der Wurzelkanal nur in den seltensten Fällen kreisrund ist. Zusätzlich verläuft der Wurzelkanal nicht immer konisch (wie bisher angenommen (9)) und zeigt durchaus nennenswerte Unterschiede, die es bei erfolgreicher Behandlung zu beachten gilt. Aus diesem Grund könnte eine ISO genormte Feile mit definierter Konizität eventuell nicht die gewünschte Wirkung erzielen. Mit Hilfe der vorliegenden Forschungsergebnisse könnten die nötigen ISO-Größen errechnet werden, welche die gesamte *Circularity* bzw. deren äußeren Rand berührt und damit zu einem vollständigen Abrieb der Dentinwand in Form der Feilenkonizität erfolgt. Es darf allerdings bezweifelt werden, dass diese Feilengrößen den Standardprozedere entsprechen. Eine mögliche Alternative könnten hier noch viel mehr die *self-adjusting files (SAF)* sein (27).

Als weiteres Ergebnis dieser Studie konnte dargestellt werden, dass sich die Krümmung der Pulpa, nach der Größe der Hunde abhängig variiert und auf diesem Gesichtspunkt bei der Behandlung ein Augenmerk liegen sollte. Vielmehr sollten in Zukunft die Stahlfeilen mit



eingeschränkter Elastizität dem Nickel-Titan Instrumenten vor allem bei stark gekrümmten Wurzelkanälen Platz machen.

Um eine genauere Vorhersage der angesprochenen Parameter treffen zu können, sollte allerdings die Anzahl der Individuen pro Gruppe erhöht werden.

In dieser Studie wurden vorwiegend Zähne älterer adulter Tiere verwendet. Da der Prozess der Zahnreife vor allem in jungen Monaten einer sehr starken Entwicklung unterworfen ist und sich der Wurzelkanal vor allem in dieser Zeit stark verändert (14), müssten Zähne junger Hunde getrennt untersucht werden um auch über diese Gruppe gültige Aussagen treffen zu können. Eine andere Möglichkeit zur Verschärfung dieser Studie, wäre eine Vergrößerung der Stichprobe, da es zwei Altersgruppen mit jeweils nur einem und eine Gewichtsklasse mit nur einem Tier gab.

Ein weiterer möglicher Zugang wäre es die Zähne nicht zuvor zu extrahieren, sondern vollständige Kopfscans von Tieren mit anderen Zahn- oder Kieferproblemen auszuwerten.

## Literatur

1. Eickhoff M. Zahn- und Kieferheilkunde bei Klein- und Heimtieren. 1. Auflage. Stuttgart: Enke; 2013. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:24-epflicht-1941151>.
2. Juriga S, Bilyard K. Working Dog Dentistry. *Vet Clin North Am Small Anim Pract* 2021; 51(4):779–802. doi: 10.1016/j.cvsm.2021.04.002.
3. Lobprise HB, Hrsg. Small animal dentistry. Third edition. Chichester: Wiley Blackwell; 2021. (Blackwell's five-minute veterinary consult).
4. Bilyard KR, Mullaney SB, Henry TJ. Prevalence and etiology of dentoalveolar trauma in 1,592 United States military working dogs: A 1-year retrospective study. *Front Vet Sci* 2022; 9:1102424. doi: 10.3389/fvets.2022.1102424.
5. Niemiec BA. Fundamentals of endodontics. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice* 2005; 35(4):837-68, vi. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195561605000264>.
6. Vertucci FJ. Root canal morphology and its relationship to endodontic procedures. *Endodontic Topics* 2005; 10(1):3–29. Verfügbar unter: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1601-1546.2005.00129.x>.
7. Fahrenkrug P. Handbuch der Zahnbehandlung in der Kleintierpraxis: Aulendorf/Württ. : Albrecht GmbH & Co. KG; 1984. Verfügbar unter: <https://permalink.obvsg.at/UVW/AC01075000>.
8. Gorrel C. Zahnmedizin bei Klein- und Heimtieren. 1. Aufl. München, Jena: Elsevier, Urban und Fischer; 2006.
9. Nickel R, Schummer A, Seiferle E, Hrsg. Lehrbuch der Anatomie der Haustiere. 9., unveränd. Aufl. Stuttgart: Parey; 2004. (Lehrbuch der Anatomie der Haustiere/ Richard Nickel; August Schummer; Eugen Seiferle ; Bd. 2).
10. Müller A, Hrsg. Kleintierzahnheilkunde: Modul 1. Berlin: Veterinärspiegel-Verl.; 2010. (intermedtv). Verfügbar unter: <http://media.obvsg.at/AC08353825-4001>.
11. Salomon F-V, Geyer H, Gille U, Hrsg. Anatomie für die Tiermedizin. 2 ed. Stuttgart: Enke; 2008.
12. Floyd MR. The modified Triadan system: nomenclature for veterinary dentistry. *J Vet Dent* 1991; 8(4):18–9.
13. Modified Triadan System: Tooth Numbering in the Dog; 2007 [Stand: 05.04.2023]. Verfügbar unter: <https://www.rvc.ac.uk/Review/Dentistry/Basics/triadan/dog.html#>.
14. Williams CA. Endodontics. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice* 1986; 16(5):875–93. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195561686503065>.
15. Masson E, Hennet PR, Calas PL. Apical root canal anatomy in the dog. *Endodontics & dental traumatology* 1992; 8(3):109–12. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1289068/>.

16. Plascencia H, Cruz Á, Palafox-Sánchez C-A, Díaz M, López C, Bramante C-M et al. Micro-CT study of the root canal anatomy of maxillary canines. *J Clin Exp Dent* 2017; 9(10):e1230-e1236. doi: 10.4317/jced.54235.
17. Uchiyama M, Anzai M, Yamamoto A, Uchida K, Utsuno H, Kawase Y et al. Root canal system of the maxillary canine. *Okajimas Folia Anat Jpn* 2011; 87(4):189–93. doi: 10.2535/ofaj.87.189.
18. Versiani MA, Pécora JD, Sousa-Neto MD. Microcomputed tomography analysis of the root canal morphology of single-rooted mandibular canines. *Int Endod J* 2013; 46(9):800–7. doi: 10.1111/iej.12061.
19. Grande NM, Plotino G, Gambarini G, Testarelli L, D'Ambrosio F, Pecci R et al. Present and future in the use of micro-CT scanner 3D analysis for the study of dental and root canal morphology. *Ann Ist Super Sanita* 2012; 48(1):26–34. doi: 10.4415/ann\_12\_01\_05.
20. Fagan DA. Diagnosis and treatment planning. *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice* 1986; 16(5):785–99. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3490034/>.
21. Crofts SB, Smith SM, Anderson PSL. Beyond Description: The Many Facets of Dental Biomechanics. *Integr Comp Biol* 2020; 60(3):594–607. doi: 10.1093/icb/icaa103.
22. Soukup JW, Hetzel S, Paul A. Classification and Epidemiology of Traumatic Dentoalveolar Injuries in Dogs and Cats: 959 Injuries in 660 Patient Visits (2004-2012). *J Vet Dent* 2015; 32(1):6–14. doi: 10.1177/089875641503200101.
23. Schindelin J, Arganda-Carreras I, Frise E, Kaynig V, Longair M, Pietzsch T et al. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nat Methods* 2012; 9(7):676–82. doi: 10.1038/nmeth.2019.
24. Arola DD, Gao S, Zhang H, Masri R. The Tooth: Its Structure and Properties. *Dental clinics of North America* 2017; 61(4):651–68. Verfügbar unter: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5774624/>.
25. Brassard C, Merlin M, Guintard C, Monchâtre-Leroy E, Barrat J, Bausmayer N et al. Bite force and its relationship to jaw shape in domestic dogs. *J Exp Biol* 2020; 223(Pt 16). Verfügbar unter: <https://journals.biologists.com/jeb/article/223/16/jeb224352/223640/Bite-force-and-its-relationship-to-jaw-shape-in#10096444>.
26. König HE, Hrsg. Anatomie der Haussäugetiere: Lehrbuch und Farbatlas für Studium und Praxis ; Ausgabe in einem Band ; mit 53 Tabellen. 3., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart, New York: Schattauer; 2004.
27. Metzger Z. The self-adjusting file (SAF) system: An evidence-based update. *J Conserv Dent* 2014; 17(5):401–19. doi: 10.4103/0972-0707.139820.

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1 Zahnformel Hund; I Incisivi, C Caninus, P Prämolare, M Molare (11).....	1
Abbildung 2 Modified Triadan System (13) .....	2
Abbildung 3 Schema des Aufbaus eines Zahnes (11).....	3
Abbildung 4 Schema apikales Delta (1).....	4
Abbildung 5 mögliche Deltaformen (6).....	4
Abbildung 6: Frequency traumatic dental injuries (TDI) (22).....	5
Abbildung 7: Zugang zu Wurzelkanal bei einem Caninus (5).....	8
Abbildung 8 Auswahl Material "tooth" .....	12
Abbildung 9 Auswahl Material „pulp“ .....	12
Abbildung 10 Auswahl Material „enamel“ .....	12
Abbildung 12 Surface enamel .....	13
Abbildung 11 Surface tooth.....	13
Abbildung 13 Surface pulp .....	13
Abbildung 15 Vermessung Pulpa.....	14
Abbildung 14 Vermessung Zahn.....	14
Abbildung 16 Vermessung Wurzel.....	14
Abbildung 17 Projekt-work-flow.....	15
Abbildung 18 pulp/tooth length.....	17
Abbildung 19 pulp/tooth length >10-15 Jahre .....	17
Abbildung 21 Verhältnis tooth lin/tooth curv; >10-15 J .....	18
Abbildung 20 Verhältnis tooth lin/ tooth curv .....	18
Abbildung 23 Krümmung der Pulpa; >10-15 J.....	19
Abbildung 22 Krümmung der Pulpa.....	19
Abbildung 24 Vergleich des Pulpa-Volumens des OK und des Pulpa-Volumens des UK .....	20
Abbildung 26 Pulpafläche Alter >1-2J .....	21
Abbildung 25 Pulpafläche Alter .....	21
Abbildung 28 Pulpafläche Alter >5-10J .....	21
Abbildung 27 Pulpafläche Alter >2-5J .....	21
Abbildung 30 Pulpafläche Alter >15J.....	21
Abbildung 29 Pulpafläche Alter >10-15J.....	21
Abbildung 31 Area zu Gewicht .....	22
Abbildung 32 Area zu Gewicht 0-5kg .....	22
Abbildung 33 Area zu Gewicht >5-10kg.....	22
Abbildung 34 Area zu Gewicht >10-20kg .....	22
Abbildung 35 Area zu Gewicht >20-30kg .....	23
Abbildung 36 Area zu Gewicht >30kg .....	23
Abbildung 37 Circularity aller 4 Canini .....	23
Abbildung 38 Circularity rechte Seite .....	24
Abbildung 39 Circularity linke Seite .....	24
Abbildung 40 Circularity Oberkiefer.....	24
Abbildung 41 Circularity Unterkiefer .....	24
Abbildung 42 Circularity nach Gewicht .....	25

Abbildung 43 Circularity 0-5 kg .....	25
Abbildung 44 Circularity >5-10 kg.....	25
Abbildung 45 Circularity >10-20 kg.....	25
Abbildung 46 Circularity >20-30 kg.....	25
Abbildung 47 Circularity >30 kg .....	25
Abbildung 48 Circularity Alter.....	26
Abbildung 49 Circularity Alter >1-2 J .....	26
Abbildung 50 Circularity Alter >2-5 J .....	26
Abbildung 51 Circularity Alter >5-10 J .....	26
Abbildung 52 Circularity Alter >10-15 J.....	27
Abbildung 53 Circularity Alter >15 J.....	27