

Vertikale Wurzelfrakturen als Komplikation nach lateraler Kondensation

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnheilkunde
des Fachbereichs Medizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von Stenner, Lars Christian
aus Gießen

Gießen 2010

Aus dem Medizinischen Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Poliklinik für Zahnerhaltungskunde und Präventive Zahnheilkunde
Funktionsbereich Endodontie
Universitätsklinikum Gießen und Marburg GmbH
Standort Gießen
Leiter des Funktionsbereichs: Prof. Dr. med. dent C. Koçkapan

Gutachter: Prof. Dr. C. Koçkapan
Gutachter: Prof. Dr. R. Frankenberger

Tag der Disputation: 21.06.2011

„Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbstständig ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.“

Gießen, den

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung	1
2	Literaturübersicht	3
2.1	Erstbeschreibung, Verlaufsrichtung und Klassifikation	3
2.2	Ätiologie vertikaler Wurzelfrakturen	5
2.2.1	Frakturen vitaler Zähne	5
2.2.2	Frakturen wurzelkanalbehandelter Zähne	5
2.2.3	Überblick über Frakturwerte im Allgemeinen	7
2.2.4	Aufbereitungstechnik	7
2.2.5	Füllmethode	8
2.2.6	Füllmaterial	10
2.2.7	Kraft	10
2.2.8	Kanalkonfiguration	11
2.2.9	Postendodontische Versorgung	11
2.2.10	Häufigkeitsverteilung vertikaler Wurzelfrakturen	13
2.3	Diagnose vertikaler Wurzelfrakturen	14
2.4	Prognose und Therapie vertikaler Wurzelfrakturen	15
3	Material und Methode	17
3.1	Auswahl und Voruntersuchung der Zähne	17
3.2	Festlegen der Prüfgruppen	18
3.3	Verwendete Untersuchungs- und Messmethoden	18
3.3.1	Stereomikroskop	18
3.3.2	Transillumination	19
3.3.3	Röntgenstatus	19
3.3.4	Fotodokumentation	20
3.3.5	Universaltestmaschine (Zwick®)	20
3.4	Vorversuche	21
3.5	Herstellung der Prüfkörper	22
3.6	Versuchsdurchführung	24
3.7	Statistik	26
3.8	Schematischer Versuchsablauf	27
4	Ergebnisse	28
4.1	Verwendbarkeit der Proben	28

4.2	Vergleich des Materials	31
4.3	Vergleich der Größe	31
4.4	Vergleich des Belastungsgewichts	32
4.5	Kombinationen der Einflussfaktoren	33
4.6	Klassifikation der Frakturtypen	33
4.6.1	Anzahl der Frakturlinien	33
4.6.2	Verlaufsrichtung der Frakturlinien	35
5	Diskussion	36
5.1	Methodendiskussion.....	36
5.1.1	Probenmaterial.....	36
5.1.2	Spreadermaterial.....	38
5.1.3	Aufbereitungstechnik.....	38
5.1.4	Füllmethode	39
5.1.5	Belastungsgewicht	40
5.1.6	Versuchsaufbau	40
5.1.7	Universaltestmaschine (Zwick®).....	41
5.2	Ergebnisdiskussion.....	43
5.2.1	Material	43
5.2.2	Spreadergröße.....	43
5.2.3	Belastungsgewicht	44
5.2.4	Frakturtypen und Frakturverläufe.....	48
5.2.5	Übertragbarkeit der Ergebnisse	50
5.3	Ausblick	50
5.4	Klinische Empfehlung.....	51
6	Zusammenfassung	53
7	Summary	55
8	Literaturverzeichnis	57
9	Anhang	69
9.1	Formeln	69
9.2	Chemikalienliste	69
9.3	Materialliste	69
9.4	Randomisierungsliste	72
9.5	Ergebnisliste	74
9.6	Tabellen zur Statistik	77
9.6.1	Univariate Varianzanalyse	77

9.6.2 Geschätzte Randmittel.....	78
10 Danksagung	81

1 Einleitung und Problemstellung

Die Endodontie als Spezialgebiet der konservierenden Zahnheilkunde umfasst die Prävention, Ätiologie, Diagnose und Therapie entzündlicher Veränderungen der Pulpa und des Periapex⁴⁸. Falls als Folge einer irreversiblen Entzündung der Pulpa beziehungsweise einer Pulpanekrose eine endodontische Therapie notwendig wird, gilt neben der gründlichen chemo-mechanischen Aufbereitung des Wurzelkanalsystems, der anschließenden dichten Wurzelfüllung auch dem Langzeiterfolg der Behandlung besonderes Augenmerk.

Im Bereich der Aufbereitungstechnik haben sich in den letzten Jahren mit Verwendung von Nickel-Titan-Legierungen zur Herstellung von endodontischen Aufbereitungsinstrumenten bahnbrechende neue Möglichkeiten ergeben. Die Etablierung diverser maschineller Aufbereitungssysteme erweiterte das Spektrum der Aufbereitungstechniken grundlegend. Im Bereich der chemischen Desinfektion des Wurzelkanalsystems hat die passive ultraschallaktivierte Spülung (PUI) zu einer Steigerung der Reinigungseffizienz und des Therapieerfolgs, besonders in Revisionsfällen, geführt.

Auch auf dem Gebiet der Wurzelfüllungen kann der Behandler zwischen einer Vielzahl von - zum Teil neuen - Techniken und Materialien wählen. Neben den thermoplastischen Füllmethoden nehmen noch immer kalte Kondensationstechniken mit Guttapercha, besonders die laterale Kondensation, einen erheblichen Raum im klinischen Alltag ein. Einige Autoren sind der Meinung, dass die laterale Kondensation vertikale Wurzelfrakturen als mögliche Komplikation einer Wurzelkanalbehandlung begünstigt^{62,75}. Uneinigkeit besteht hierbei in Bezug auf die Fragestellung, ob neben der beim Füllen aufgewendeten Kraft das Spreadermaterial einen Einfluss auf die Gefahr einer vertikalen Wurzelfraktur hat, da auch zum Füllen Instrumente aus den neuen Nickel-Titan-Legierungen mit ihren verbesserten Materialeigenschaften verwendet werden.

Ziel des in der Arbeit durchgeführten Versuchs soll es sein die Frage zu klären, ob die beim Füllen eines Wurzelkanals angewendete Kraft, also der auf die Kanalwand ausgeübte Druck an der Spreaderspitze, einen Einfluss auf die Entstehung vertikaler Wurzelfrakturen hat. Weiterhin sollte untersucht werden, ob die Größe des zum Füllen verwendeten Spreaders sowie dessen Material (Nickel-Titan „NiTi“ oder Edelstahl „STS“) einen Einfluss auf die Frakturresistenz wurzelkanalgefüllter Zähne ausübt.

2 Literaturübersicht

2.1 Erstbeschreibung, Verlaufsrichtung und Klassifikation

Vertikale Wurzelfrakturen stellen eine mögliche Komplikation bei Wurzelkanalbehandlungen dar. Ebenso sind sie nach traumatischen Einwirkungen auf die Zähne beschrieben. Erstmals erwähnt wurden vertikale Wurzelfrakturen im Jahr 1910 durch H. C. Register als Komplikation bei stiftverankerten prothetischen Versorgungen⁷⁴. Vertikale Wurzelfrakturen verlaufen parallel zur Wurzellängsachse und können ihren Ursprung sowohl im Bereich der Krone als auch dem der Wurzel nehmen⁷¹.

Meist sind sie in bucco-lingualer Richtung eines Zahnes^{2,20,52,58,71} mit oder ohne Beteiligung des Kanallumens orientiert¹¹¹. Sie können sich in Form einer kompletten Fraktur von einer Wurzeloberfläche zur Wurzeloberfläche der Gegenseite darstellen oder ohne Beteiligung der externen Wurzeloberfläche wurzelintern verlaufen. Die internen Wurzelfrakturen stellen die deutliche Mehrheit dar¹¹¹. In 33 % aller Fälle ist das Foramen apikale beteiligt⁴⁰. Eine Fraktur in mesio-distaler Richtung, im Bereich der dünneren Dentinwände, liegt selten vor^{67,71}. Auch nicht klar definierte Frakturverläufe sind in der Literatur beschrieben². In Abbildung 1 soll eine Übersicht über die Einteilung der Wurzellängsfrakturen gegeben werden (modifiziert nach Aesaert¹).

Tabelle 1: Einteilung vertikaler Wurzelfrakturen nach Aesaert¹

„Blind crack“:	unvollständige Längsfraktur, ein Riss, der im Inneren der Wurzel seinen Ursprung hat, aber (noch) keine Verbindung zum Parodontalspalt aufweist
<i>Wurzellängsfrakturen:</i>	
Klasse I:	komplette Längsfraktur unter Einbeziehung des Parodontalspalts
Klasse IIa:	zwei Frakturlinien, die weniger als 90° voneinander entfernt sind
Klasse IIb:	zwei Frakturlinien, die mehr als 90° voneinander entfernt sind
Klasse III:	Längsfraktur nur im apikalen Wurzelbereich

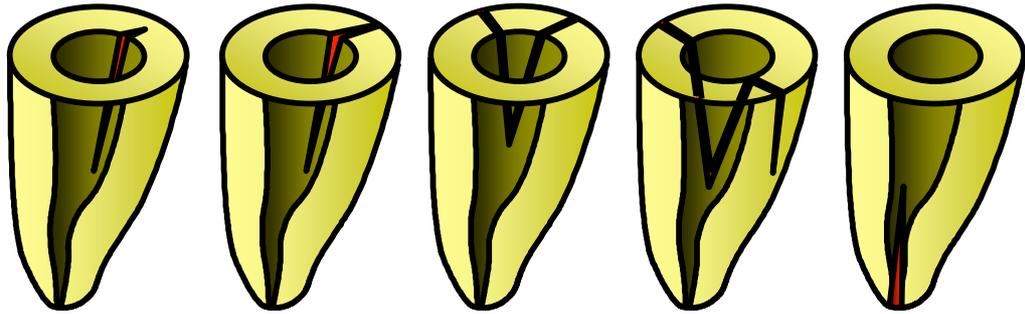


Abb. 1: Schematische Klassifikation vertikaler Wurzelfrakturen (modifiziert nach Aesaert¹)

Vertikale Wurzelfrakturen treten bevorzugt bei älteren Patienten durch iatrogene Schädigungen im Bereich der Seitenzähne auf^{99,114}. Risikofaktoren, wie Zwischenfälle beim Beißen auf harte Nahrungsbestandteile⁷⁸, eine sehr starke natürliche Interkuspitation sowie Bruxismus, sind hingegen vom Behandler nicht zu beeinflussen⁶¹. Unterschiedliche Meinungen existieren bezüglich der Lokalisation der typischen Frakturareale im Dentin. Holcomb et al. konnten in ihren Untersuchungen zeigen, dass in 87 % der Fälle die Frakturlinien tangential vom Kanal weg entlang der Grenzfläche zwischen transparenten und opaken Dentinarealen verlaufen⁴⁰. Dem widersprechen hingegen Onnink et al., die keinen Zusammenhang zwischen Frakturverlauf und Grenzen der unterschiedlich gefärbten Dentinareale feststellen konnten^{67,71}. Die Frakturlinien sind nicht notwendigerweise entlang der Dentintubuli orientiert, sondern verlaufen parallel sowie schräg zu ihnen⁶³. Laut Murgel et al. sind vielmehr der Ort und die Intensität der Kraftaufwendung entscheidender für den Frakturverlauf als die Besonderheiten der Dentinstruktur⁶³.

Die Untersuchungen verschiedener Autoren zeigen übereinstimmend, dass vor allem die Zähne von Wurzelfrakturen betroffen sind, deren vestibulo-oraler Durchmesser im Verhältnis zum mesio-distalen groß ist^{15,35,102,105}. Hierzu zählen die Wurzeln von Prämolaren (52 %), vestibuläre Wurzeln oberer Molaren (10 %) und mesiale Wurzeln unterer Molaren (24 %)¹⁰¹. Zugleich neigen stark gebogene Wurzeln vermehrt zu vertikalen Wurzelfrakturen¹⁵ ebenso wie Zähne mit zierlichen Wurzeln⁹⁸.

2.2 Ätiologie vertikaler Wurzelfrakturen

Vertikale Wurzelfrakturen wurden sowohl bei vitalen als auch bei endodontisch behandelten Zähnen beschrieben^{13,24}.

2.2.1 Frakturen vitaler Zähne

Bei der Fraktur vitaler Zähne handelt es sich vorwiegend um die Ausbreitung von Mikrorissen, die bei vorhergehender konservierender Behandlung entstanden sind und als Kronenfrakturen oder „cracked tooth syndrome“ bezeichnet werden¹⁰. Es ist auch nicht auszuschließen, dass entwicklungsbedingte Mikrorisse existieren, die zu Frakturen führen können. Die Mikrorisse breiten sich durch thermische Wechselwirkungen - die allein bei der täglichen Ernährung auftreten können - Richtung Pulpa aus und können inkomplette in vollständige vertikale Frakturen überführen³⁹. Besonders häufig treten Frakturen an Zähnen mit ausgedehnten Klasse-II-Kavitäten auf³⁷. Zähne ohne Restaurationen sowie kariöse Defekte haben eine größere Frakturresistenz, vor allem wenn sie sehr voluminös sind⁴¹.

Chan et al. beschreiben 64 Fälle vertikaler Wurzelfrakturen in nicht endodontisch behandelten Zähnen chinesischer Patienten, bei denen es allein durch Kauhabits und Bruxismus zur spontanen Fraktur von Molaren gekommen ist¹⁴. Strukturelle Unterschiede, wie zum Beispiel die Existenz der Crista transversa bei Oberkiefermolaren, haben Einfluss auf die Entstehung von Zahnfrakturen³⁹. In Bezug auf die Altersverteilung zeigt sich ein Häufigkeitsgipfel zwischen dem 50. und 59. Lebensjahr. Drei Viertel aller vertikalen Wurzelfrakturen traten bei Männern auf¹³. Weiterhin sind pathologische Wurzelfrakturen vitaler Zähne bei parodontaler Destruktion und entzündlichen externen Wurzelresorptionen beschrieben⁹⁸.

2.2.2 Frakturen wurzelkanalbehandelter Zähne

Endodontisch behandelte Zähne weisen die überwiegende Zahl an Wurzelfrakturen auf¹⁰¹. Sie machen beinahe drei Viertel aller Zähne mit Frakturen aus⁹. Bezogen auf die Gesamtzahl aller endodontisch

behandelten Zähne weisen 2 bis 5 % vertikale Wurzelfrakturen auf^{20,61,62,90,91,105,110}. Fuss et al. geben die Häufigkeit vertikaler Wurzelfrakturen von wurzelkanalbehandelten Zähnen mit 10,9 % deutlich höher an²¹. Kramer et al. untersuchten in einer Kohortenstudie mit 422 Zähnen einer kassenzahnärztlichen Praxis die Überlebenswahrscheinlichkeit endodontisch behandelter Zähne in Bezug auf vertikale Wurzelfrakturen. 24 Zähne (5,7 %) mussten aufgrund einer vertikalen Wurzelfraktur entfernt werden. Die Überlebenswahrscheinlichkeit sank in 7 Jahren auf 87 % (± 4 %). Bei Patienten über 50 Jahren und nach Abschluss der Wurzelkanalbehandlung in einer Sitzung nahm die Überlebenswahrscheinlichkeit signifikant ab⁴⁹.

Der Verlust an Zahnhartsubstanz und somit Stabilität spielt bei Frakturen eine wichtige Rolle. Dieser Stabilitätsverlust entsteht infolge der Kariesexkavation, der Präparation der Zugangskavität, der Darstellung der Kanaleingänge und letztlich der Wurzelkanalaufbereitung. Reeh et al. geben den somit entstehenden Stabilitätsverlust mit 5 % an⁷³. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass sich die Dentinhärte durch die Wurzelkanalbehandlung auch nach 5 bis 10 Jahren nur sehr gering - 3,5 % Abnahme gegenüber vitalen Zähnen⁸⁶ - beziehungsweise nicht messbar verändert^{27,55}. Der Feuchtigkeitsverlust des Dentins im Zuge der Wurzelkanalbehandlung von circa 9 % (gemessen an Hundezähnen)³⁶ beeinflusst nach Carter et al. das Frakturrisiko endodontisch behandelter Zähne und macht sie spröder als vitale¹¹. Auch Huang et al. konnten bei zunehmender Feuchtigkeitsabnahme eine Zunahme der Steifheit und Abnahme der Flexibilität des Dentins feststellen⁴². Nach Helfer et al. verlieren anteriore Zähne mehr Feuchtigkeit als posteriore³⁶. Dem widerspricht de Cleen, der keine signifikanten Unterschiede in den physikalischen Eigenschaften von Dentinproben extrahierter vitaler und avitaler Zähne feststellen konnte^{17,42}. Bei endodontisch behandelten Zähnen weist die Gruppe der 40- bis 50-jährigen ein erhöhtes Risiko für Wurzellängsfrakturen auf. Dabei ist die Gruppe der Unterkiefermolaren verstärkt von Frakturen betroffen^{59,61,114}, was höchstwahrscheinlich an den in diesem Bereich auftretenden starken Kaukräften liegt.

2.2.3 Überblick über Frakturwerte im Allgemeinen

Zunächst erfolgt ein kurzer Überblick über allgemeine Werte zur Frakturfestigkeit. Bei oberen Frontzähnen wurden Kräfte von $152 \pm 46 \text{ N}^{71}$ bis $938 \pm 180 \text{ N}^{29}$ gemessen. Bei intakten Prämolaren konnten im Oberkiefer Kräfte von 1370 N und im Unterkiefer von 1230 N bis zur Fraktur gemessen werden²³. Werden Oberkiefer- und Unterkieferprämolaren endodontisch behandelt, sinken die Frakturwerte auf $490 \pm 135 \text{ N}$ beziehungsweise $554 \pm 232 \text{ N}^{113}$. Im Unterkiefer können unbehandelte Prämolaren $698 \pm 298 \text{ N}$ und Eckzähne $566 \pm 208 \text{ N}$ widerstehen. Intakte Molaren widerstanden $341,4 \pm 106,8 \text{ N}^{41,17}$. Zähne mit einer endodontischen Zugangskavität überstehen Belastungen bis 225,5 kg, also 2255 N^{17} . Wurde die klinische Krone abgetrennt, die Zähne eingebettet und keine Instrumentierung vorgenommen, frakturierten die Zähne bei $234,8 \pm 26,6 \text{ N}^{54}$.

2.2.4 Aufbereitungstechnik

Der anatomischen Struktur der Wurzel sowie dem Kanalverlauf sollte bei der Wahl der Aufbereitungstechnik und –instrumente Beachtung geschenkt werden⁹⁶. Bei Missachtung kann das Risiko einer Fraktur unnötig erhöht werden²⁷. Auch sollte exzessives Feilen während der Aufbereitung vermieden werden⁶¹. Wilcox et al. konnten zeigen, dass beim Füllen eine Korrelation zwischen der prozentual größeren Erweiterung eines schmalen Kanallumens und dem vermehrten Auftreten vertikaler Wurzelfrakturen existiert¹¹². In ovalen Kanälen treten alle Kräfte zunächst an den mesialen und distalen Kanalwänden auf. Eine gleichmäßige Verteilung der Kräfte entsteht erst dann, wenn der gesamte Kanal annähernd kreisrund erweitert ist⁶⁷. Einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Verteilung der durch die Instrumente entstehenden Kräfte hat die vorherige sorgfältige Erweiterung des koronalen Kanaldrittels im Sinne des Preflarings. Es konnte gezeigt werden, dass sich in Kanälen, in denen Preflaring erfolgte, die Kräfte entlang des gesamten Kanals verteilten, sodass eine gleichmäßigere Kondensation des Füllmaterials erfolgen konnte und eine geringere Konzentration der Kräfte an einzelnen Stellen auftrat^{32,63}.

Auf der anderen Seite wird durch die Verwendung von Gates-Glidden-Bohrern ein erheblicher Anteil an Dentin im koronalen Bereich der Kanalwände entfernt. Dies kann dazu führen, dass die vorhandene Restdentinstärke den Kräften beim Füllen des Kanals nicht widerstehen kann und eine Wurzelfraktur resultiert⁴³. Dabei erfolgt die Reduktion der Restdentinstärke vor allem in mesio-distaler Richtung, jedoch kaum in bucco-lingualer⁶⁹. Im Gegensatz dazu bemerken Zuckerman et al., dass es bei der Verwendung von Gates-Glidden-Bohrern in mesialen Wurzeln unterer Molaren in Bezug auf die Gefahr einer Perforation zu keiner kritischen Reduktion der Restdentinstärke kommt¹¹⁵. Zähne, deren Wurzeln mit rotierenden Nickel-Titan-Instrumenten maschinell aufbereitet wurden, zeigen einen deutlich größeren Widerstand gegenüber vertikalen Wurzelfrakturen als Zähne, deren Wurzeln mit K-Feilen manuell instrumentiert wurden⁵¹. Begradigungen des Kanalverlaufs schwächen die Wurzel zusätzlich und erhöhen somit die Frakturgefahr⁷⁵.

2.2.5 Füllmethode

Das Füllen des Wurzelkanals sowie die damit verbundene Kraftaufwendung wurden als ursächlich für vertikale Wurzelfrakturen beschrieben⁶¹. Untersuchungen von Gimlin et al. konnten keinen Unterschied der Druckverhältnisse auf die Kanalwand bei vertikaler und lateraler Kondensationstechnik im Bereich von 2 mm vor der Wurzelspitze feststellen. Dennoch ist bei lateraler Kondensation ein erheblich geringerer Kraftaufwand nötig, um denselben Druck an der apikalen Kanalwand aufzubauen als bei vertikaler Kondensation²⁵. Ebenso sind die Zonen maximaler Stresserzeugung bei lateraler Kondensation nahe der Spreaderspitze und somit des Foramen apikale konzentriert, bei vertikaler Kondensation hingegen entlang des gesamten Kanalverlaufs verteilt²⁵. Die größte Krafteinwirkung tritt in dem Bereich auf, der direkt unterhalb des zu kondensierenden Füllungsmaterials liegt. Es entstehen Werte von bis zu $12,9 \text{ kgcm}^{-2}$ im Knochen und $2,4 \text{ kgcm}^{-2}$ im parodontalen Ligament¹⁰⁴. Blum et al. stellten in ihrer experimentellen Arbeit keine unterschiedlichen Krafteinflüsse beim Füllen des Kanals durch vertikale oder laterale Kondensation fest. Die von ihnen ermittelten Kräfte variieren zwischen 0,2

und 2,5 kg bei vertikaler und zwischen 0,05 und 0,6 kg bei horizontaler Belastung der Kanalwand^{7,8}.

Reuver sieht einen deutlichen Zusammenhang zwischen lateraler Kondensation und vertikalen Wurzelfrakturen⁷⁵. Ähnliche Ansichten vertrat Morfis in seiner Übersichtsarbeit aus dem Jahre 1990, als er einen signifikanten Zusammenhang zwischen der lateralen Kondensation und dem Auftreten vertikaler Wurzelfrakturen aufzeigen konnte⁶².

Für die Wahl der Füllungsinstrumente und Materialien zeigt sich, dass Nickel-Titan-Spreader in gebogenen Kanälen eine signifikant bessere Eindringtiefe als Edelstahl-Spreader gewährleisten^{6,87}. Somit dringen Nickel-Titan-Spreader bei gleichem Kraftaufwand tiefer in die Wurzelkanäle ein⁸⁵ und induzieren in gebogenen Kanälen geringeren Druck auf die Kanalwand als Edelstahl-Spreader¹⁸. Bei der Verwendung von Edelstahl-Spreadern entstehen Studien zufolge an der Kanalwand drei Areale, auf die sich bei maximaler Kraftausübung der Druck konzentriert. Diese sind zum erstens am Kanaleingang an der äußeren Kanalwand, zum zweitens im Bereich der Kanalkrümmung an der inneren Kanalwand und drittens im Bereich der Spreaderspitze erneut an der äußeren Kanalwand lokalisiert. Im Gegensatz dazu verteilen Nickel-Titan-Spreader die auftretenden Kräfte entlang der gesamten Wurzelkanalwand mit einem Maximum nahe der Spreaderspitze⁴⁴. In geraden Kanälen existiert kein Unterschied in der Eindringtiefe⁶. Um Nickel-Titan-Spreader in einen leeren Kanal bis auf 1 mm vor Arbeitslänge einzuführen, sind erheblich geringere Kräfte (0,30 kg) als beim vergleichbaren Einführen von Edelstahl-Spreadern nötig (0,59 kg). Diese setzen sich auch beim Einführen der Spreader neben dem Masterpoint fort und betragen 1,56 kg für Nickel-Titan-Spreader und 2,42 kg für Edelstahlspreader.

Die meisten vertikalen Wurzelfrakturen treten circa 1,5 mm vor dem Apex auf^{40,71}. Lertchirakarn et al. zeigten, dass sich die Spreaderspitze zu diesem Zeitpunkt durchschnittlich 5 mm vom Apex entfernt befand⁵³. Die Ergebnisse variieren je nach Zahngruppe⁷¹. Weiterhin konnte belegt werden, dass die Größe des zum Füllen benutzten Spreaders Einfluss auf

die zur vertikalen Wurzelfraktur erforderliche Kraft hat. Spreader der Größe 25, die 1 bis 2 mm kürzer als die Arbeitslänge sind, rufen keine erhöhte Frakturgefahr hervor. Dem gegenüber steigt mit zunehmender Spreadergröße die Frakturgefahr. Spreader der Größe 35 und 40 induzieren bei viel geringeren Kräften eher eine vertikale Wurzelfraktur⁷⁰. Ebenso berichten Murgel et al., dass die Gefahr der Berührung der gegenüberliegenden Kanalwand durch einen Spreader und die dadurch auftretende Keilwirkung durch das Preflaring reduziert wird⁶³. Die Eindringtiefe des Spreaders selbst hat keinen Einfluss auf die Gefahr einer vertikalen Wurzelfraktur⁴⁰.

2.2.6 Füllmaterial

Guttapercha und GuttaFlow[®] verringern das Risiko einer vertikalen Wurzelfraktur nicht. Dem gegenüber existieren unterschiedliche Meinungen, ob Füllungsmaterialien auf Kunststoffbasis, wie beispielsweise Resilon[®] und EndoRez[®], durch die Entstehung eines festen Verbunds zwischen Füllungsmaterial und Kanalwand die Frakturgefahr ungefähr halbieren³⁰ oder gar keinen stabilisierenden Einfluss haben⁷⁶. Beim Vergleich der lateralen Kondensation von Guttapercha mit thermoplastischen Materialien wie Thermafil[®] konnte gezeigt werden, dass beim Füllen mit thermoplastischen Materialien ein viel geringerer Druck in der Kanalwand entsteht als beim Einbringen der Guttaperchastifte bei der lateralen Kondensation⁸¹.

2.2.7 Kraft

Uneinigkeit besteht darüber, ob es im klinischen Alltag überhaupt möglich ist, die in vitro ermittelten für eine vertikale Wurzelfraktur nötigen Kräfte von 1,5 kg^{32,40} bis 15 kg⁷¹ am Patienten aufzubringen⁹⁹. Reuver bemerkt in seinem Artikel, dass es ihm im Selbstversuch mit einer Küchenwaage unwahrscheinlich erschien, die Kraft von 10 N, also etwa 1 kg, zu überschreiten⁷⁵. Harvey ermittelte in seiner Arbeit, dass ein Kliniker beim Füllen maximal eine Kraft von 1 bis 3 kg aufwendet³². Außerdem sei eine Kraft von maximal 3 kg ausreichend, um eine homogene Füllung des Wurzelkanals zu gewährleisten¹⁰⁰. Es gilt dabei festzuhalten, dass bei der Verwendung von Hand-Spreadern etwa doppelt so große Kräfte (2,0 bis

2,5 kg) wie bei der Verwendung von Finger-Spreadern (1,0 bis 1,4 kg) erzeugt werden können⁵³. Dies liegt daran, dass Hand-Spreader sich erst unter einer deutlich größeren Belastung verbiegen als Finger-Spreader⁵⁷. Die für eine Fraktur nötigen Kraftwerte werden jedoch nicht erreicht⁵³. Besonders in gebogenen Kanälen erzeugen Hand-Spreader einen größeren Druck auf die Kanalwand als Finger-Spreader⁶³. Die nötige Kraft zur Erzeugung von vertikalen Wurzelfrakturen variiert stark je nach der dem Test zugrunde liegenden Zahngruppe. Um die Gefahr einer vertikalen Wurzelfraktur durch zu große Kraftaufwendung zu reduzieren, sollte beim Füllen mindestens ein Abschlag von 30 % auf die für eine Fraktur nötige Kraft gewährt werden⁷¹. Die Umsetzung dieser Regel erscheint jedoch im klinischen Alltag sehr schwierig.

2.2.8 Kanalkonfiguration

Gimlin et al. vertreten die Meinung, dass nicht die Fülltechnik, sondern vielmehr die Kanalkonfiguration die im Bereich der Kanalwände entstehenden Kräfte modifiziert²⁵. Weiterhin zählen hierzu nach Pitts et al. auch der unterschiedliche Mineralisationsgrad des Wurzelzementins, Oberflächenrauigkeiten, Einziehungen und Asymmetrien⁷¹. So treten bei nicht kreisrunden Kanalquerschnitten asymmetrische Kraftverteilungen auf⁵². Durch diese werden vertikale Wurzelfrakturen begünstigt⁵². Die Gefahr einer vertikalen Wurzelfraktur nimmt mit weiter werdendem Wurzelkanal und größerer koronaler Kanalkonizität zu⁴⁰. Dem widersprechen Pitts et al., die keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der für eine Wurzelfraktur nötigen Bruchbelastung sowie der Größe der Wurzel, der Größe des aufbereiteten Kanals und der Kanalkonizität finden konnten⁷¹. Ebenso kann eine längere Wurzel größere Kräfte absorbieren, bevor es zu einer vertikalen Wurzelfraktur kommt¹⁰⁶.

2.2.9 Postendodontische Versorgung

Die postendodontische Versorgung mit Stiften kann sowohl bei der Präparation des Stiftlagers durch Schwächung der Wurzel¹⁰⁷ als auch bei einer erneuten erforderlichen Explantation des Stiftes sowie durch dessen Expansion infolge von Korrosion zu einer vertikalen Wurzelfraktur

führen^{56,60,61,79}. In Bezug auf die Korrosion ist Tamse der Meinung, dass dies eher Folge als Ursache einer vertikalen Wurzelfraktur ist⁹⁸. Belegt ist, dass bei der Implantation eines Stiftes erheblich größere Spannungen in der Wurzel auftreten, als beim Füllen des Kanals durch laterale Kondensation entstanden sind⁶⁵. Geschraubte Stifte erzeugen sehr große laterale Kräfte und können ebenso wie konfektionierte, parallelwandige, zementierte Stifte bereits bei der Insertion zur Fraktur führen³⁷. Ebenso kann eine unzureichende Passgenauigkeit des Stiftes⁶⁵ sowie seine unzureichende Dimensionierung (zu kurz, zu breit oder beides zugleich) Frakturen begünstigen⁶⁸. Stifte, die länger als die halbe Wurzellänge sind, erhöhen die Frakturgefahr minimal⁶². Zähne, die mit schmalen Edelstahlstiften versorgt wurden, sind besonders frakturresistent¹⁰⁶, ebenso Zähne, die mit adhäsiv befestigten, konfektionierten Stiften rekonstruiert wurden⁹².

Generell gilt es festzuhalten, dass endodontisch behandelte Zähne nicht routinemäßig mit Stiften versorgt werden müssen. Stifte erhöhen nicht die Frakturbeständigkeit der Zähne. Zur Erhöhung der Frakturbeständigkeit sollte vielmehr eine suffiziente prothetische Versorgung angestrebt werden⁹¹. Nicht zuletzt sind auch zahnimmanente Eigenschaften wie Alter des Zahns, Restdentinstärke, Wurzelkonfiguration und Kanalkonizität ausschlaggebend dafür, ob es bei der Stiftversorgung zu einer vertikalen Wurzelfraktur kommt⁶⁵. Auftretende Keilwirkungen durch die Versorgung endodontisch behandelter Zähne mit Inlays oder Überbelastungen durch ungenügende Pfeilerauswahl bei prothetischer Versorgung stellen einen Risikofaktor für vertikale Wurzelfrakturen dar^{12,68}.

Bei der Überkronung eines wurzelkanalbehandelten Zahnes, der zugleich mit einem Stift versorgt wird, muss darauf geachtet werden, dass bei der Präparation genügend zirkuläre Zahnhartsubstanz gefasst wird, sodass eine bessere Stabilität des Zahnes im Sinne eines „Fassreifeneffekts“ gewährleistet wird⁵. Eine Überkronung durch eine Teilkrone oder Vollkrone ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn der Zahn durch vorherige Maßnahmen in seiner Struktur bereits stark geschwächt ist. Zur Versorgung einer Trepanationsöffnung genügt ein plastisches Füllungsmaterial¹⁷. Zur

Steigerung der Retentionskräfte kann eine Erweiterung der Wurzelkanaleingänge und eine anschließende Versorgung mittels Adhäsivtechnik durchgeführt werden¹⁷.

2.2.10 Häufigkeitsverteilung vertikaler Wurzelfrakturen

Vertikale Wurzelfrakturen verteilen sich sehr unterschiedlich auf die einzelnen Zahngruppen des Ober- und Unterkiefers. Eine statistische Auswertung von 46 in der Literatur publizierten Fallberichten im Zeitraum zwischen 1966 und 2008 mit 116 Fällen vertikaler Wurzelfrakturen nach endodontischer Therapie ergab 65 Fälle im Oberkiefer und 51 Fälle im Unterkiefer (Abb. 2 und Abb. 3). Das Alter der Patienten lag in der Literatur zwischen 12 und 78 Jahren. 30 % der Frakturen traten bei Frauen, der Rest bei Männern auf.

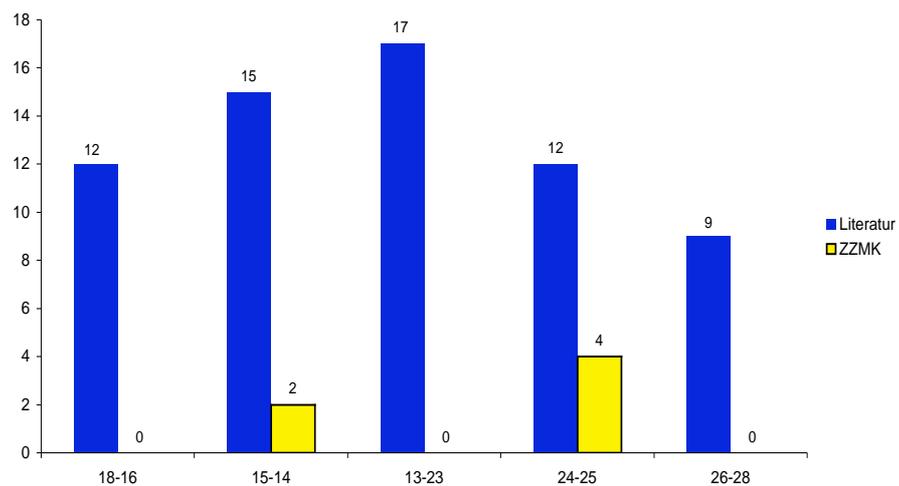
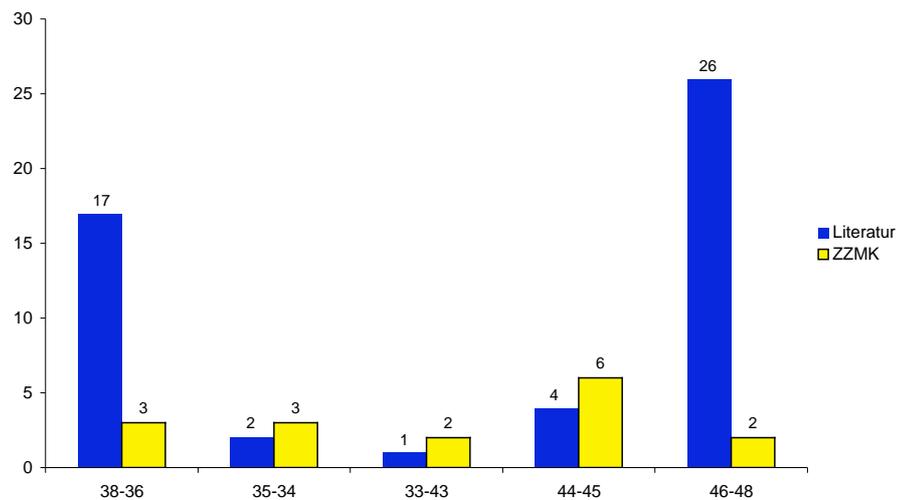


Abb. 2: Anzahl vertikaler Wurzelfrakturen im Oberkiefer⁹⁴

In einer aktuellen Arbeit haben wir eine statistische Auswertung der in der Poliklinik für Zahnerhaltung und Präventive Zahnheilkunde sowie im Funktionsbereich Endodontie des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Justus-Liebig-Universität Gießen aufgetretenen Fälle (n=22) vertikaler Wurzelfrakturen nach endodontischer Therapie zwischen den Jahren 1989 und 2010 vorgenommen (Abb. 2 und Abb. 3). Auffällig ist, dass die Oberkiefer- (27 %) und Unterkieferprämolaren (41 %) am häufigsten von vertikalen Wurzelfrakturen betroffen sind.

Abb. 3: Anzahl vertikaler Wurzelfrakturen im Unterkiefer⁹⁴

2.3 Diagnose vertikaler Wurzelfrakturen

Die Diagnose vertikaler Wurzelfrakturen ist schwierig⁹⁶. Ihr geht meist ein langer Zeitraum unklarer Beschwerden voraus, der von 3 Tagen bis zu 14 Jahren dauern kann^{34,61,62}. Vire stellte in seiner Arbeit fest, dass endodontisch behandelte Zähne mit vertikalen Wurzelfrakturen eine mittlere Überlebensrate von 20,6 Monaten haben¹¹⁰. Die Beschwerden sind oft nur flüchtig auftretend, bei der klinischen Untersuchung kaum reproduzierbar und imitieren eine Vielzahl anderer möglicher Erkrankungen wie Sinusitiden, vage Kopfschmerzen oder Ohrenscherzen⁶⁸.

Die Darstellung und Inspektion der Kanäleingänge kann hilfreich sein, um Frakturlinien zu identifizieren³⁵. Während der Wurzelkanalbehandlung und -füllung auftretende, deutlich zu hörende und zum Teil durch einen stechenden Schmerz begleitete Knackgeräusche können auf eine Wurzelfraktur hindeuten. Zusätzlich kann es zur Einblutung in den Wurzelkanal und einer abnormal großen Menge an benötigten Guttaperchastiften zum Füllen des Kanals kommen⁷².

2.4 Prognose und Therapie vertikaler Wurzelfrakturen

Die Prognose von Zähnen mit vertikalen Wurzelfrakturen ist infaust. Auch wenn einzelne Fälle einer erfolgreichen Therapie nach vertikalen Wurzelfrakturen beschrieben sind, muss der Prävention besonderes Augenmerk gelten⁴⁶. Andernfalls stellt die Extraktion in der Mehrzahl der Fälle die einzige sinnvolle Therapie dar. Für die Prognose eines Zahnes mit vertikaler Wurzelfraktur spielt die Lokalisation der Fraktur eine entscheidende Rolle. Dabei haben Zähne mit Frakturen im koronalen Drittel die schlechteste Prognose, da hier die Stabilisation des Zahnes schwierig ist. Auch das Eindringen von Keimen in den Parodontalspalt durch den Sulkus ist wahrscheinlich. Als Folge kann der entzündliche Prozess nicht zufriedenstellend beseitigt werden. Je weiter apikal die Fraktur lokalisiert ist, desto einfacher ist die Therapie und desto besser die Prognose⁸⁸.

In der Literatur existieren vielfältige Therapiekonzepte zur Erhaltung eines frakturierten Zahnes. Diese reichen von der Verwendung von Glasionomer-Sealer und $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ^{4,28,95}, dem Belassen der Fraktur und der Säureätzung^{89,109}, der Verwendung von Lasern³, Amalgam⁶⁴ bis zur Extraktion in Kombination mit adhäsivem Kleben mit Composite und anschließender Replantation^{50,66,108}. Gutmann et al. schlagen beispielsweise vor, die von einer vertikalen Wurzelfraktur betroffene Wurzel wie die übrigen Wurzeln standardisiert aufzubereiten und zu spülen. Zur Füllung sollten im apikalen Bereich thermoplastische Verfahren Verwendung finden. Anschließend sollte die Wurzelfüllung in der koronalen Hälfte oder sogar in den koronalen zwei Dritteln entfernt und der Kanal mit einem Gemisch aus Glasionomerzement und Amalgam aufgefüllt werden. Im Anschluss ist nach ihrer Aussage die Restauration mit einer Vollkrone möglich²⁸. Vertucci berichtet von dem Fall eines Patienten mit einer vertikalen Wurzelfraktur an einem oberen Prämolaren. Nach Darstellung des Frakturspalts mit Hilfe eines Mukoperiostlappens wurde dieser, da keine Separation der Fragmente festgestellt werden konnte und der Frakturspalt nicht durch die gesamte Wurzel verlief, zunächst präpariert und dann mit 20%-tiger Zitronensäure für 5 Minuten

geätzt. Anschließend wurde der Mukoperiostlappen lediglich reponiert¹⁰⁹. O'Reilly et al. beschreiben die Möglichkeit der Applikation von Endomethasone[®] und Gamma-2-freien Amalgams als Wurzelfüllung bei Zähnen mit vertikalen Wurzelfrakturen. Anschließend wurde der Zahn mit einer Dentatus-Schraube[®] und Vollkrone versorgt. Auch zwei Jahre nach Therapie lagen keine klinischen oder radiologischen Auffälligkeiten vor⁶⁴. Oliet beschreibt drei Fälle vertikaler Wurzelfrakturen, bei denen er die betreffenden Fragmente extrahiert, die Wurzelkanalbehandlung extraoral abgeschlossen und anschließend die Fragmente mit einem Cyanoacrylatzement wieder zusammengeklebt hat. Nach Replantation der Zähne erfolgte eine 30tägige Schienung. Oliet selbst extrahierte einen der Zähne und bescheinigte den beiden übrigen eine schlechte klinische Prognose⁶⁶. Kudou et al. sind der Meinung, dass im Falle einer vertikalen Wurzelfraktur der betreffende Zahn zunächst schonend extrahiert werden sollte. Anschließend entfernten sie die Wurzelfüllung und ätzten die Kanalwände mit zehnprozentiger Zitronensäure und 3%-tiger Eisenchloridlösung. Der Frakturspalt wurde mit 4-META/MMA-TBB Kunststoff Zement (Super Bond C & B[®]) versorgt. Während der Behandlung wurde darauf geachtet, dass der Zahn nicht austrocknet. Im Anschluss erfolgte die Replantation des Zahnes leicht rotiert, sodass die ursprüngliche Frakturlinie keinen Kontakt zum existierenden Knochendefekt aufwies. Die Nachuntersuchung nach 18 Monaten zeigte keine klinischen und radiologischen Auffälligkeiten⁵⁰. Trope et al. schlagen ein ähnliches Vorgehen vor. Zusätzlich zum extraoralen Kleben der Fragmente empfehlen sie das Einbringen einer GoreTex-Membran zum Decken des Knochendefekts. Ihre Kontrolle nach einem Jahr zeigte keine Auffälligkeiten¹⁰⁸.

Manche Autoren favorisieren sogar radikale chirurgische Verfahren wie eine Hemisektion oder eine Wurzelamputation^{47,75}. Eine Wurzelamputation bietet sich vor allem dann an, wenn nur eine Wurzel betroffen ist, die übrigen aber zu erhalten sind⁷⁵. Bei Frakturen, die auf den apikalen Bereich beschränkt sind, kann auch eine Wurzelspitzenresektion durchgeführt werden.

3 Material und Methode

3.1 Auswahl und Voruntersuchungen der Zähne

Für die Versuche wurden frisch extrahierte menschliche Unterkieferfrontzähne mit abgeschlossenem Wurzelwachstum und geradem Wurzelkanal verwendet. Bis zur Herstellung der Prüfkörper wurden diese in 0,1 % Thymollösung (Chem. 1) aufbewahrt. Die Zähne stammten von Personen im Alter von 14 bis 75 Jahren. Das Geschlecht der Personen fand keine Berücksichtigung. Die mündliche Einverständniserklärung der Patienten zur Verwendung ihrer Zähne für Forschungszwecke wurde, wie von der Ethik-Kommission gefordert (AZ 143/09), eingeholt.

Nach manueller Reinigung von Geweberesten mit einem Scaler (Mat. 1) wurden alle Zähne zunächst visuell untersucht. Alle Zähne mit kariösen Läsionen, Restaurationen, keilförmigen Defekten, Abrasionen oder bereits erfolgten endodontischen oder prothetischen Versorgungen wurden von vornherein ausgeschlossen. Um Zähne mit bereits existierenden Mikrorissen oder Frakturen ausschließen zu können, wurden alle unter einem Stereomikroskop bei zehnfacher Vergrößerung untersucht, zusätzlich erfolgte ein Frakturausschluss durch Transillumination.

Während aller Voruntersuchungen wurden die Zähne mit einem Gazetupfer (Mat. 2) feucht gehalten. Anschließend erfolgte die weitere Lagerung bis zur Herstellung der Proben in 0,1 % Thymollösung.

Es wurde darauf geachtet, nur Zähne mit annähernd gleicher Länge zur Gewinnung der Proben zu verwenden.

3.2 Festlegen der Prüfgruppen

Für den Versuch wurden 96 Zähne auf 12 Gruppen à 8 Zähne aufgeteilt. Diese wurden bei der lateralen Kondensation mit unterschiedlichen Gewichten belastet (1 kg, 3 kg, 5 kg). Das Füllen erfolgte bei der Hälfte der Zähne mit Hilfe eines Nickel-Titan-Spreaders (NiTi) (Mat. 3) und bei der anderen Hälfte der Zähne mit Hilfe eines Edelstahl-Spreaders (STS) (Mat. 4), jeweils der Größen 25 und 30. Die sich ergebenden Kondensationsdrücke an den Spreaderspitzen betragen bei Größe 25 und einem Füllgewicht von 1 kg $49,96 \text{ Nmm}^{-2}$, bei 3 kg $149,92 \text{ Nmm}^{-2}$ und bei 5 kg $249,87 \text{ Nmm}^{-2}$. Dementsprechend ergaben sich bei der Größe 30 für 1 kg $34,7 \text{ Nmm}^{-2}$, bei 3 kg $104,1 \text{ Nmm}^{-2}$ und bei 5 kg $173,51 \text{ Nmm}^{-2}$ (Berechnung siehe unter 10.1). Diese Werte gelten aufgrund der gleichen Abmessungen an der Spreaderspitze für NiTi- und STS-Spreader.

Die 12 Prüfgruppen wurden nach folgendem Schema gekennzeichnet:

1. Kilogrammangabe (1 kg, 3 kg, 5 kg)
2. Abkürzung für Art des verwendeten Spreaders (NiTi, STS)
3. Größenangabe des Spreaders (ISO-Größe 25, 30)

Die Festlegung der Reihenfolge der Versuche und die anschließende Nummerierung der Proben erfolgte anhand einer Randomisierungsliste (siehe Kapitel 10.4).

3.3 Verwendete Untersuchungs- und Messmethoden

3.3.1 Stereomikroskop

Mit Hilfe eines Stereomikroskops (Mat. 5) wurden alle extrahierten Zähne unter zehnfacher Vergrößerung auf vorhandene Risse, kariöse Läsionen oder Anomalien in der Zahn- und Zementstruktur untersucht. Alle Zähne, die in einem der Punkte auffällig erschienen, wurden vor Versuchsbeginn verworfen.

3.3.2 Transillumination

Mit Hilfe eines Transilluminationsgeräts (Mat. 6) wurden alle Zähne sowohl in vestibulo-oraler als auch in mesio-distaler Richtung vom Apex ausgehend bis zur Schmelz-Zement-Grenze untersucht. Ziel war es, von außen nicht sichtbare zahnimmanente Risse zu identifizieren. Auch hier wurden auffällige Zähne vor Versuchsbeginn verworfen.

3.3.3 Röntgenstatus

Mit einem digitalen Röntgengerät (Mat. 7) und zugehöriger Speicherfolie (Mat. 8) wurden orthoradiale Zahnfilmaufnahmen mit Hilfe der Rechtwinkeltechnik sowohl in vestibulo-oraler als auch in mesio-distaler Richtung der Zähne angefertigt. Um eine einheitliche Vergrößerung zu gewährleisten, wurde der Abstand zwischen Strahlenaustrittsfenster und Probe konstant bei 0,05 m belassen. Zwischen Probe und Speicherfolie war kein Abstand vorhanden (Abb. 9)

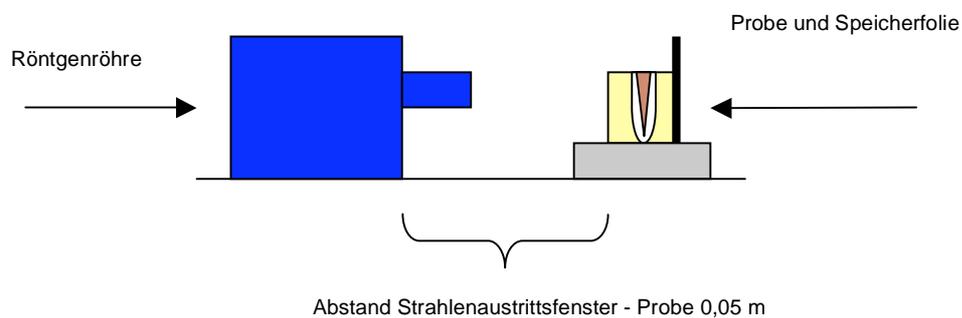


Abb. 9: Aufbau Röntgenstatus

Die Speicherfolien wurden für 0,090 Sekunden mit 60 kV und 7 mA belichtet. Röntgenaufnahmen wurden sowohl vor der Aufbereitung als auch nach der Aufbereitung zur Kontrolle des Sitzes des Spreaders im Wurzelkanal (ohne Wandkontakt) sowie nach dem Füllen in vestibulo-oraler und mesio-distaler Richtung angefertigt. Die Auswertung erfolgte mit Hilfe des Gendex Digora Scanners (Mat. 9) und des Computerprogramms VixWin pro (Mat. 10).

3.3.4 Fotodokumentation

Vor Beginn und nach Abschluss der Aufbereitung der Probenzähne erfolgte eine standardisierte Fotodokumentation zur Darstellung des nach Aufbereitung existierenden Kanalquerschnitts. Hierzu wurde mit einer digitalen Spiegelreflexkamera (Mat. 11) mit einheitlicher Vergrößerung im Abstand von 0,2 m eine Aufsichtaufnahme aller Zähne angefertigt. Belichtungszeit und Blendenzahl wurden konstant bei 1/60 Sekunde beziehungsweise 32 gehalten. Um die Kanalquerschnitte vermessen und quantifizieren zu können, wurde eine maßstäbliche Referenz in Form eines Endodontielineals (Mat. 12) angelegt. Am Ende der Versuchsdurchführung wurden die Zähne nach dem gleichen Verfahren erneut fotografiert. Zuvor wurde der entstandene Frakturspalt mit Methyleneblau (Chem. 2) angefärbt.

3.3.5 Universaltestmaschine (Zwick®)

Die Testung der Bruchfestigkeit der hergestellten Proben erfolgte in einer Universaltestmaschine (Mat. 13). Hierzu wurden die Probenkörper senkrecht in der Testmaschine befestigt und anschließend durch einen Kegel (Mat. 14, Abb. 11) bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 mmmin^{-1} bis zum Bruch belastet (Abb. 10).

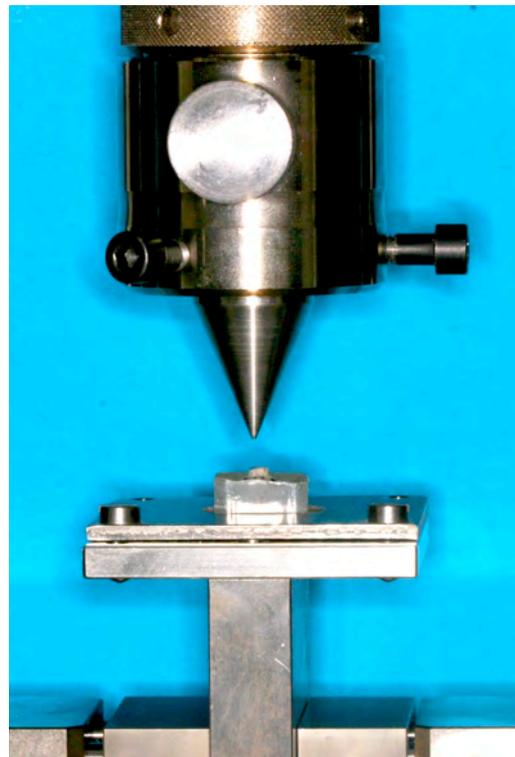


Abb. 10: Universaltestmaschine mit Probe

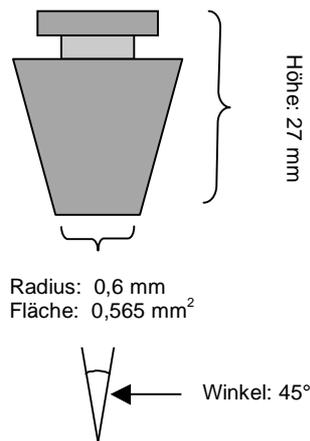


Abb. 11: Maße Kegelstumpf

Dokumentiert wurden das Kraft-Weg-Diagramm sowie die Maximalkraft zum Zeitpunkt der Probenfraktur. Die Aufzeichnung erfolgte mit der Software test-Xpert-Version 10.1 (Mat. 15).

Die Messung wurde beendet, wenn ein deutlich hörbares Knacken auftrat und simultan ein Abfall des Kraftwertes im Diagramm festgestellt werden konnte.

3.4 Vorversuche

Zunächst wurde nach einer der klinischen Situation entsprechenden und für die nachfolgende Belastung mit der Universaltestmaschine ausreichend stabilen Einbettung der Zähne gesucht. Der zuerst als Einbettung verwendete Gips erwies sich als zu brüchig. Deshalb wurde zur Einbettung schließlich ein Einbettkunststoff für anatomische Schnittpräparate (Mat. 16) gewählt. Um die Anzahl der Prüfgruppen zu reduzieren, erfolgten Vorversuche mit Füllbelastungen von 1 kg, 3 kg, 5 kg und 10 kg. Nach Auswertung der Versuche wurde die Belastung von 10 kg beim Füllen als klinisch irrelevant erachtet und somit für die Hauptversuche verworfen. Des Weiteren konnte anhand der Vorversuche gezeigt werden, dass Oberkiefer- und Unterkieferfrontzähne unterschiedlich resistent gegen Krafteinwirkungen sind. Um diesen Einflussfaktor zu eliminieren, fanden bei den Hauptversuchen nur Unterkieferfrontzähne Verwendung.

3.5 Herstellung der Prüfkörper

Zunächst wurden die Zähne mit einem Endodontiemesslineal (Mat. 12) vermessen und ihre Längen notiert. Anschließend wurden die Kronen der Zähne 2 mm oberhalb der Schmelz-Zement-Grenze mit einer diamantierten Trennscheibe (Mat. 17) unter konstanter Drehzahl mit Wasserkühlung abgetrennt (Mat. 18). Auf diese Weise wurde zugleich ein Zugang zum Wurzelkanalsystem geschaffen. Im Anschluss erfolgte eine zweite Längenmessung der Proben, um die definitive Probenlänge beziehungsweise Wurzellänge zu bestimmen. Diese wurde konstant bei 12 mm gehalten.

Nach Exstirpation der Pulpa und Aufschwemmen des Kanals mit 5,25 % Natriumhypochlorid (NaOCl) (Chem. 3) wurde durch passive Instrumentierung das Kanalsystem mit einer Kerr-Feile (K-Feile) Größe 08 und 10 (Mat. 19) bis zum anatomischen Apex erschlossen. Als Kontrolle diente die an der Wurzelspitze des Zahnes sichtbare Feilenspitze. Als Referenzpunkt wurde die plane Oberfläche der Probe, die nach Abtrennung der Krone entstanden war, gewählt und die Wurzelkanallänge durch Messen der Feile bestimmt. Die Arbeitslänge wurde einen halben Millimeter kürzer als die Wurzellänge gewählt.

Nach Auftragen einer gleichmäßigen Wachsschicht (Mat. 20) von 0,5 mm Dicke auf die gesamte Wurzeloberfläche erfolgte die Einbettung der Zähne in 2,25 cm mal 2,25 cm große, 1,8 cm hohe Plastikgefäße (Mat. 21) mit Kunststoff (Mat. 16). Den Herstellerangaben zum Mischungsverhältnis und zur Verarbeitung des Kunststoffes wurde stets Rechnung getragen. Alle Probenzähne wurden anhand ihrer Längsachsen exakt senkrecht zum Boden des Plastikgefäßes ausgerichtet, um später eine Belastung parallel zur Wurzellängsachse zu gewährleisten. Alle Zähne wurden bis zur Schmelz-Zement-Grenze eingebettet.

Nach Aushärtung des Kunststoffes, welche unter externer Wasserkühlung der Probengefäße erfolgte, wurde das Wachs ausgebrüht und die Probe erneut entfernt. Es wurde darauf geachtet, dass ein exaktes Reponieren

der Probe im Anschluss möglich war. Zur Simulation des parodontalen Ligaments wurde die Wurzeloberfläche anschließend mit einem dünnfließenden Abformsilikon (Mat. 22) beschickt und in die Probengefäße zurückgesetzt. Entstandene Pressfahnen aus Silikon wurden entfernt und Überstände des Plastikgefäßes zirkulär eingekürzt.

Nach Erstellung des in Abschnitt 3.3.3 dargestellten Röntgenstatus erfolgte die Erweiterung des koronalen Kanaldrittels durch Gates-Glidden-Bohrer der Größen I bis III (Mat. 23). Nach Aufbereitung der Kanäle mit K-Feilen der Größen 15 und 20 erfolgte im Anschluss die maschinelle Aufbereitung der Wurzelkanäle mit Hilfe des Flex-Master-Systems® (Mat. 24). Die Aufbereitung erfolgte bis zu einer Feilengröße von 02/60 und 04/40 (Mat. 25). Abschließend wurden alle Kanäle mit K-Feilen der Größen 55 und 60 manuell nachbearbeitet (Mat. 19). Zwischen den einzelnen Aufbereitungsschritten erfolgte die Spülung der Kanäle mit 2 ml 5,25 % Natriumhypochloridlösung (NaOCl) (Chem. 3), während der Aufbereitung wurde der Kanal mit NaOCl feucht gehalten. Nach Abschluss der Aufbereitung wurden die Kanäle mit 5 ml EDTA-Lösung (Chem. 4) und abschließend mit 2 ml 5,25 % NaOCl (Chem. 3) gespült und getrocknet (Mat. 26). Im Anschluss an die Aufbereitung erfolgte die Fotodokumentation des Kanalquerschnitts.

Nach Anpassen des Masterpoints aus Guttapercha (Mat. 27) wurde der Sitz des Spreaders vor dem Füllen getestet. Dieser war bis 1 mm kürzer als Arbeitslänge und drucklos und ohne Kontakt zur Kanalwand in den Kanal einführbar. Zur Kontrolle wurde der zweite Röntgenstatus erstellt (Abb. 12).

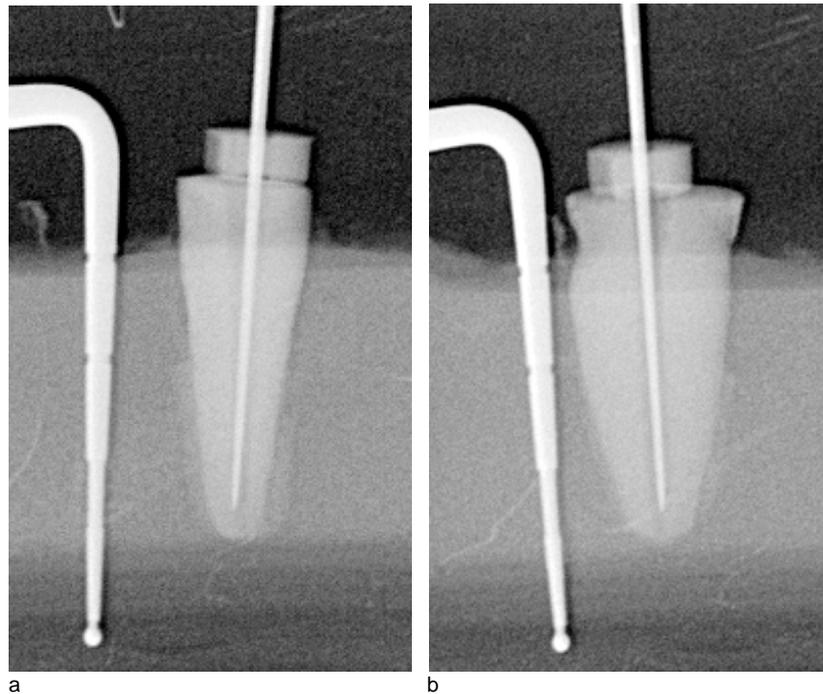


Abb.12: Röntgenstatus nach Aufbereitung, vestibulo-orale (a) und mesio-distale (b) Projektion mit eingeführten Spreader ISO 30, PA-Sonde zum Größenvergleich

3.6 Versuchsdurchführung

Das Füllen der Kanäle erfolgte durch laterale Kondensation mit Guttapercha und Sealer (Mat. 28). Um Platz für die Hilfsstifte mittels des Spreaders zu schaffen, wurde folgender selbst von mir entwickelter Versuchsaufbau verwendet (Abb. 13, 14).

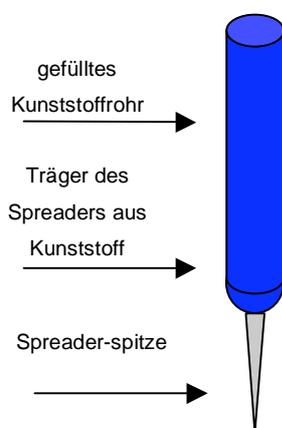


Abb. 13: Einbettung Spreader

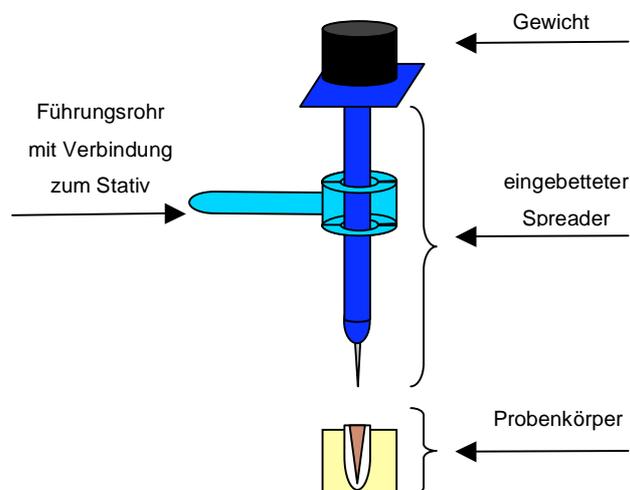


Abb. 14: vollständiger Versuchsaufbau zum definierten Füllen

Hierbei wurde der Spreader jeweils nur mit den der Versuchsgruppe entsprechenden Gewichten belastet. Es wurde darauf geachtet, dass der Spreader nicht tiefer als bis zur angebrachten Markierung (Arbeitslänge weniger 1 mm) in den Kanal eindringt. Nach Entfernen des Spreaders unter leicht drehender Bewegung wurde ein Hilfsstift der Größe ISO 15 nachgeschoben. Das Verfahren wurde so lange wiederholt, bis der Kanal vollständig gefüllt war. Zur Kontrolle der Homogenität der Wurzelfüllung wurde ein dritter Röntgenstatus angefertigt (Abb. 15).

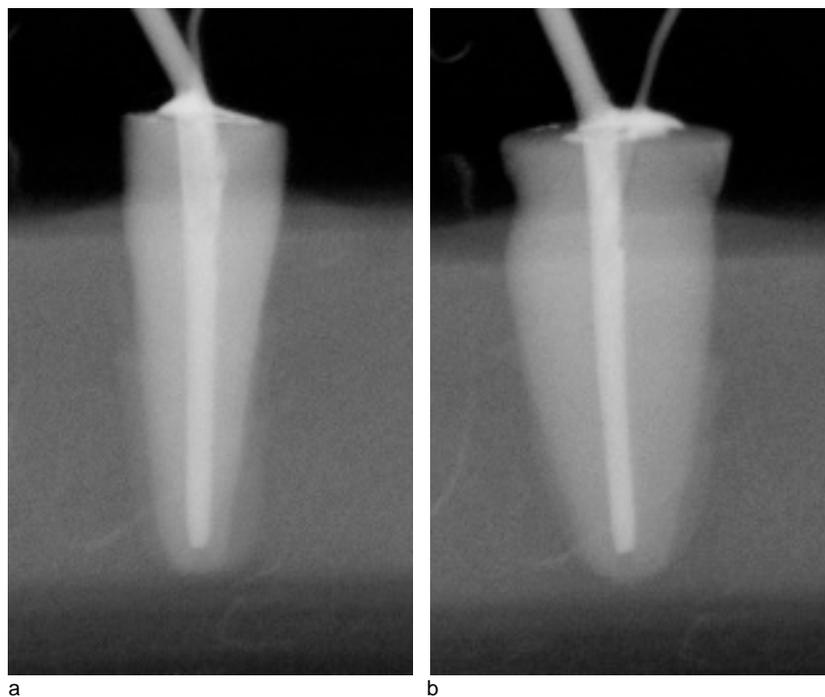


Abb. 15: Röntgenstatus nach Wurzelfüllung, vestibulo-orale (a) und mesio-distale (b) Projektion, Guttapercha-Stifte nach nicht eingekürzt

Abschließend wurden die Guttaperchastifte parallel zur planen Probenoberfläche mit Hilfe eines erwärmten Endodontieexkavators (Mat. 29) abgetrennt. Die gefüllten Proben wurden für 72 Stunden bei 37°C und 100 % Luftfeuchtigkeit zur vollständigen Aushärtung der Wurzelkanalfüllung ruhen gelassen.

Alle Zähne wurden im Anschluss in einer Universaltestmaschine (Mat. 13) mittels eines Kegels (Abb. 10) im Zentrum der Wurzelfüllung bis zur Fraktur belastet (Abb. 16, 17). Das Kraft-Weg-Diagramm und die maximal notwendige Kraft bis zur Fraktur wurden aufgezeichnet.

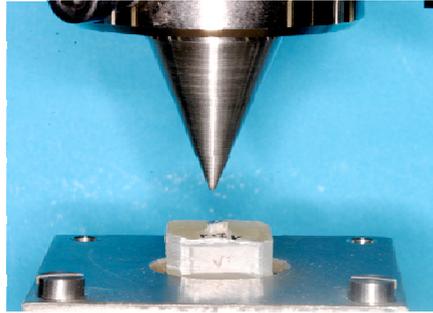


Abb. 16: Probe vor Belastung

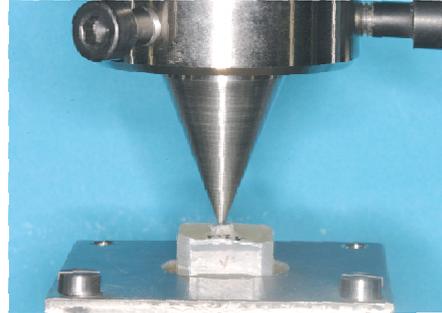


Abb. 17: Probe während Belastung

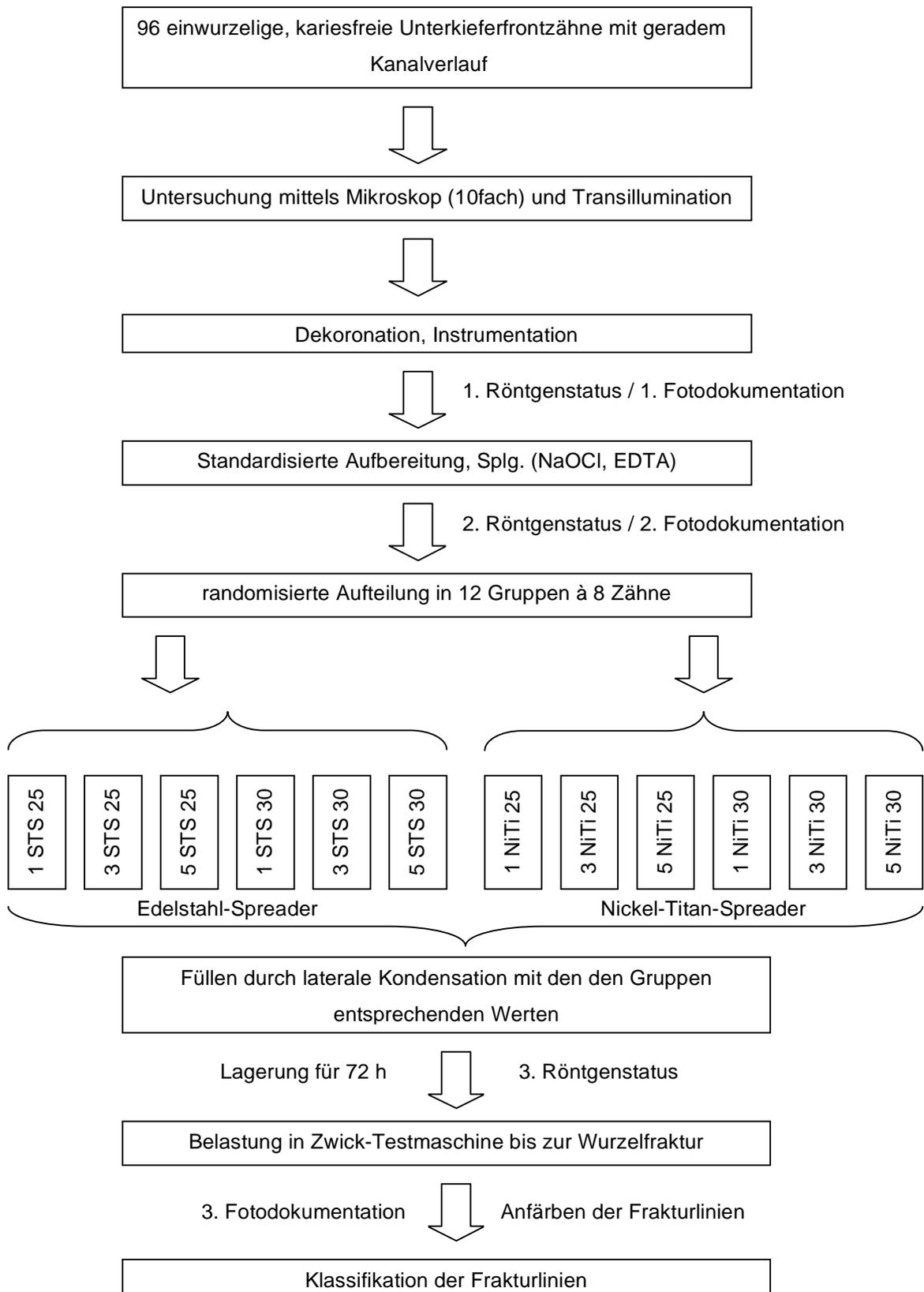
Abschließend wurden die Zähne mit Methylblau (Chem. 2) gefärbt und der Frakturspalt wurde durch Fotodokumentation festgehalten. Eine Klassifikation des Bruchspaltes erfolgte durch Beurteilung der Bruchlinien (Anzahl, Lage, eingeschlossener Winkel). Der Winkel wurde hierbei mit der Software OsiriX-Version 2.7.5 (Mat. 30) digital vermessen.

3.7 Statistik

Die statistische Auswertung erfolgte in Zusammenarbeit mit Herrn Wolfgang Pabst von der Arbeitsgruppe Medizinische Statistik der Justus-Liebig-Universität in Gießen. Bereits im Stadium der Planung des Versuchs wurde Herr Pabst miteinbezogen. Die verwendete Randomisierungsliste wurde durch ihn erstellt. Zur Auswertung der Daten wurde SPSS für Windows Version 17 verwendet. Als Methode der Wahl wurde die 3-faktorielle Varianzanalyse mit der Zielgröße „Kraft“ und den Einflussgrößen „Material“, „Instrumentengröße“ und „Belastungsgewicht“ gewählt. Das Signifikanzniveau wurde auf 0,05 festgelegt.

Die graphische Darstellung der Messwerte erfolgt mit Boxplots. Dabei werden die Kästen (Boxen) vom ersten und dritten Quartil (25. bzw. 75. Perzentil) begrenzt, wobei die innere Linie den Median darstellt. Die obere und untere äußere Linie markieren den kleinsten und größten Wert, sofern sie keine Ausreißer oder Extremwerte sind

3.8 Schematischer Versuchsablauf



4 Ergebnisse

4.1 Verwendbarkeit der Proben

Alle 96 Proben konnten zur statistischen Auswertung herangezogen werden. Weder ging eine Probe während der Versuchsdurchführung verloren, noch traten Probleme beim Aufzeichnen der Messungen auf.

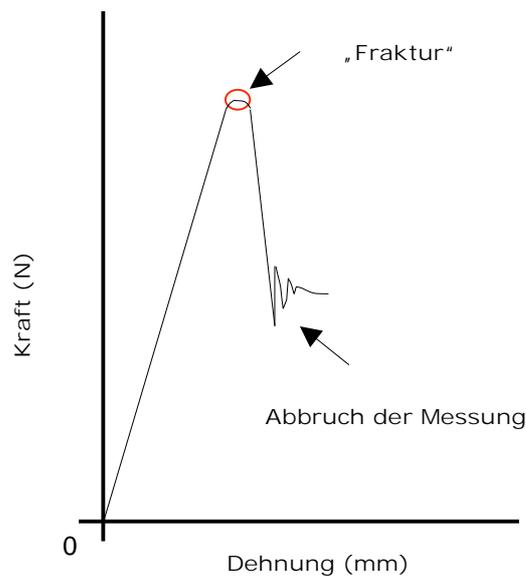


Abb. 18: schematischer Verlauf der Messkurve

Der Kurvenverlauf (Abb. 18) zeigt den zunächst linearen Anstieg der Kurve bei zunehmender Krafteinwirkung. Am durch den Kreis markierten Punkt wird die Probe maximal belastet und die „Kraft bei Fraktur“ gemessen. Der starke Abfall der Kurve in Kombination mit einem deutlichen „Knacken“ kennzeichnet die Fraktur der Probe. Im Anschluss an den scharfen Abfall der Kurve wird die Messung beendet. Das Maximum der Kurve entspricht somit der nötigen Kraft bis zum Auftreten einer Wurzelfraktur.

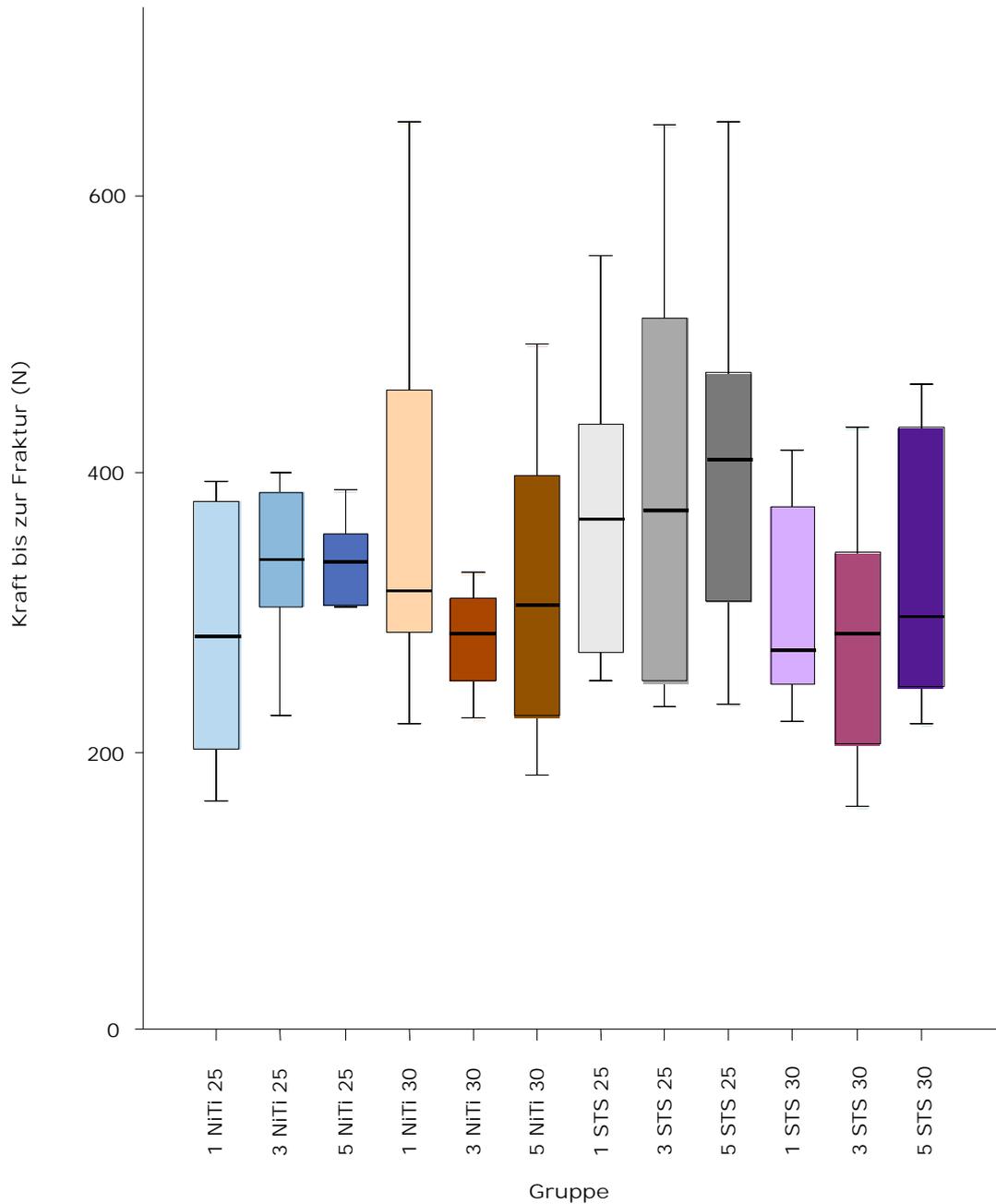


Abb. 19: Gesamtübersicht der Ergebnisse der einzelnen Gruppen, Darstellung in Box-Whisker-Plots

Abbildung 19 und Tabelle 2 zeigen eine Übersicht über alle in den einzelnen Gruppen erzielten Messwerte. Es ist kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen festzustellen.

Zur Verdeutlichung und Beantwortung bezüglich der Fragestellungen erfolgte eine differenzierte Betrachtung der Ergebnisse hinsichtlich des Spreadermaterials, der Spreadergröße und des Belastungsgewichts.

Tabelle 2: Übersicht der Messdaten der einzelnen Gruppen; Mittelwert (x), Standardabweichung (s), maximale (Max) und minimale (Min) gemessene Kraft bis zur Fraktur der Probe (in N), Stichprobenumfang (n)

Gruppe / kg	x	s	Max	Min	n
NiTi 25 (1 kg)	286,11	94,96	395,65	164,92	8
NiTi 25 (3 kg)	324,50	53,28	388,30	211,98	8
NiTi 25 (5 kg)	289,82	55,78	400,48	223,63	8
NiTi 30 (1 kg)	336,06	59,04	401,63	225,86	8
NiTi 30 (3 kg)	375,00	142,85	653,44	219,67	8
NiTi 30 (5 kg)	317,46	110,46	492,55	183,10	8
STS 25 (1 kg)	369,90	106,83	556,41	250,06	8
STS 25 (3 kg)	408,79	134,73	654,62	234,14	8
STS 25 (5 kg)	282,72	92,75	432,87	159,58	8
STS 30 (1 kg)	394,74	158,25	651,42	232,48	8
STS 30 (3 kg)	304,67	74,00	417,75	222,26	8
STS 30 (5 kg)	330,50	98,63	465,60	219,84	8

4.2 Vergleich des Materials

Beim Vergleich der beiden Spreadermaterialien (Abb. 20) zeigte sich, dass für NiTi-Spreader im Mittel $321,5 \text{ N} \pm 92,3 \text{ N}$ bis zur Fraktur nötig waren. Der Maximalwert betrug $653,4 \text{ N}$, der Minimalwert $164,9 \text{ N}$. Für STS-Spreader betrug der Mittelwert $348,6 \text{ N} \pm 117,7 \text{ N}$, der Maximalwert $654,6 \text{ N}$, der Minimalwert $159,6 \text{ N}$. Es ist kein signifikanter Unterschied feststellbar ($p=0,205$).

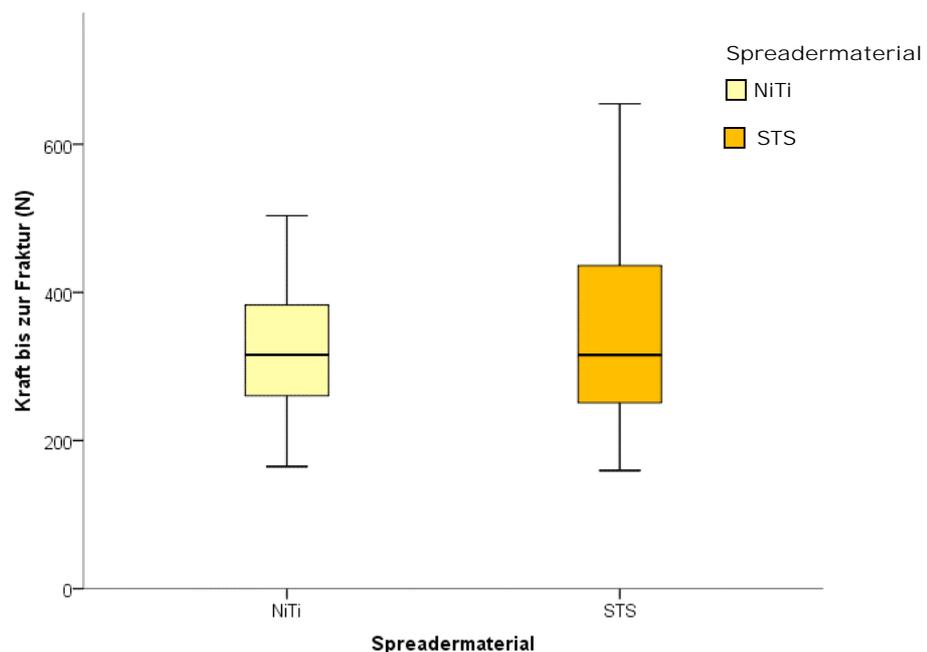


Abb. 20: Kraft bis zur Fraktur in Abhängigkeit von Spreadermaterial, Darstellung in Box-Whisker-Plots

4.3 Vergleich der Größe

Beim Vergleich der Spreadergrößen 25 und 30 (Abb. 21) wurde für die Größe 25 ein Mittelwert von $327,0 \text{ N} \pm 101,1 \text{ N}$ bei einem Maximalwert von $654,6 \text{ N}$ und einem Minimalwert von $159,6 \text{ N}$ gemessen. Für die Größe 30 betrug der Mittelwert $343,1 \text{ N} \pm 111,3 \text{ N}$, der Maximalwert $653,4 \text{ N}$ und der Minimalwert $183,1 \text{ N}$. Es war kein signifikanter Unterschied feststellbar ($p=0,45$).

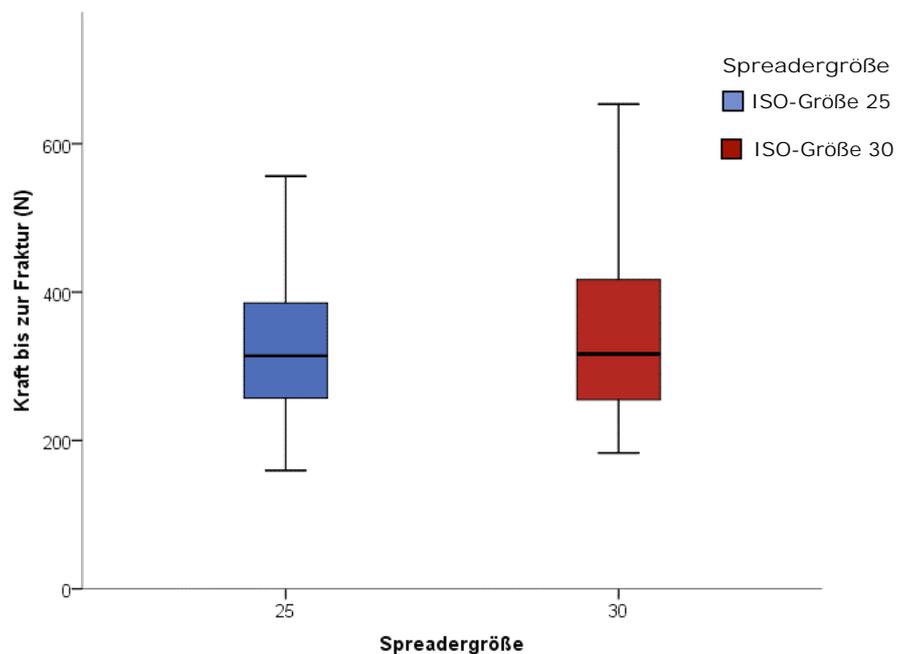


Abb. 21: Kraft bis zur Fraktur (N) in Abhängigkeit von der Spreadergröße ohne Berücksichtigung der Materialien, Darstellung in Box-Whisker-Plots

Bei differenzierterer Betrachtung der Frakturwerte bezogen auf Spreadergröße und Spreadermaterial, also der Kombination „Material und Größe“, konnte ebenso kein signifikanter Unterschied festgestellt werden ($p=0,213$).

4.4 Vergleich des Belastungsgewichts

Bezüglich der verschiedenen Belastungsgewichte bei der lateralen Kondensation (Abb. 22) wurde bei einem Kilogramm ein Mittelwert von $346,7 \text{ N} \pm 113,0 \text{ N}$, ein Maximalwert von $651,4 \text{ N}$ und ein Minimalwert von $165,0 \text{ N}$ gemessen. Bei drei Kilogramm wurde ein Mittelwert von $353,2 \text{ N} \pm 111,0 \text{ N}$ gemessen. Der Maximalwert betrug $654,6 \text{ N}$, der Minimalwert $212,0 \text{ N}$. Fünf Kilogramm Belastung bei der lateralen Kondensation ergaben einen Mittelwert bis zur Fraktur von $305,1 \text{ N} \pm 89,4 \text{ N}$, ein Maximum von $492,6 \text{ N}$, ein Minimum von $159,6 \text{ N}$. Es ist kein signifikanter Unterschied feststellbar ($p=0,139$).

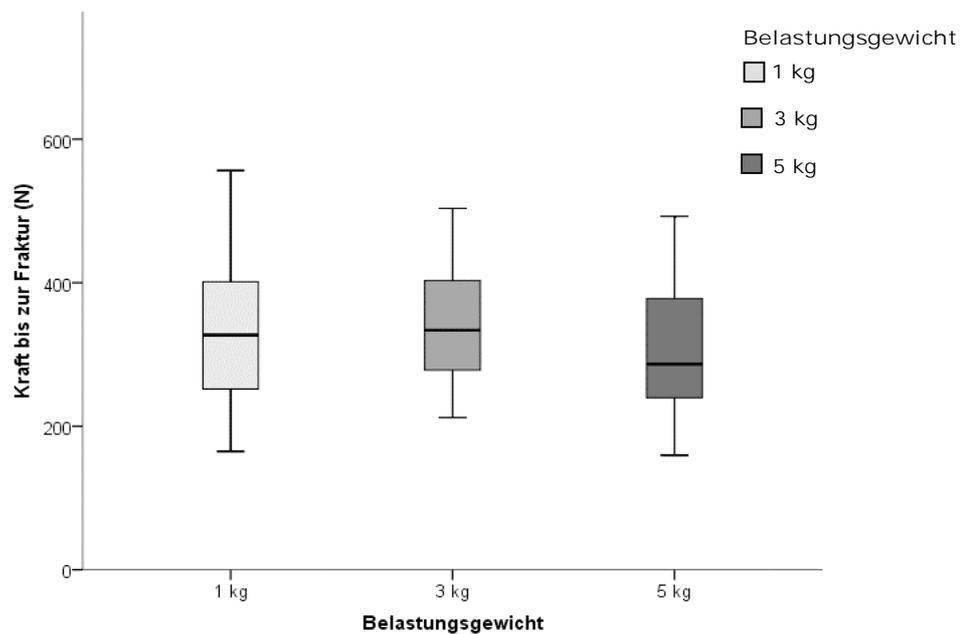


Abb. 22: Kraft bis zur Fraktur (N) in Abhängigkeit vom Belastungsgewicht; Darstellung in Box-Whisker-Plots

4.5 Kombinationen der Einflussfaktoren

Auch die Kombinationen „Material und Gewicht“ ($p=0,342$), „Größe und Gewicht“ ($p=0,364$) sowie „Material und Größe und Gewicht“ ($p=0,224$) ergaben keinen Unterschied.

4.6 Klassifikation der Frakturtypen

4.6.1 Anzahl der Frakturlinien

Es konnten nach Auswertung aller 96 Proben vier unterschiedliche Frakturtypen festgestellt werden. Ihre Verteilung zeigt Abbildung 23.

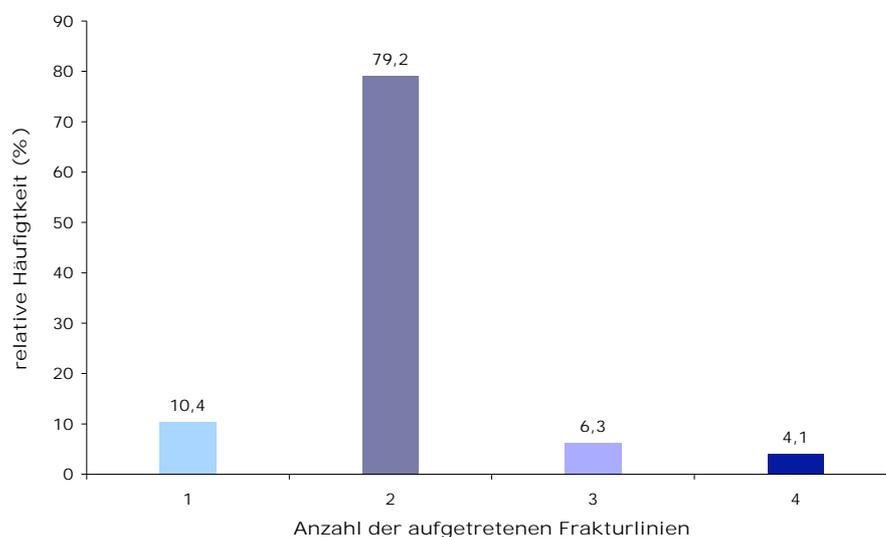


Abb. 23: Prozentuale Häufigkeit der Anzahl der Frakturlinien (n=96)

Die nachfolgenden Abbildungen sollen die Einteilung der Frakturverläufe an Beispielen verdeutlichen (Abb. 24 a-d).

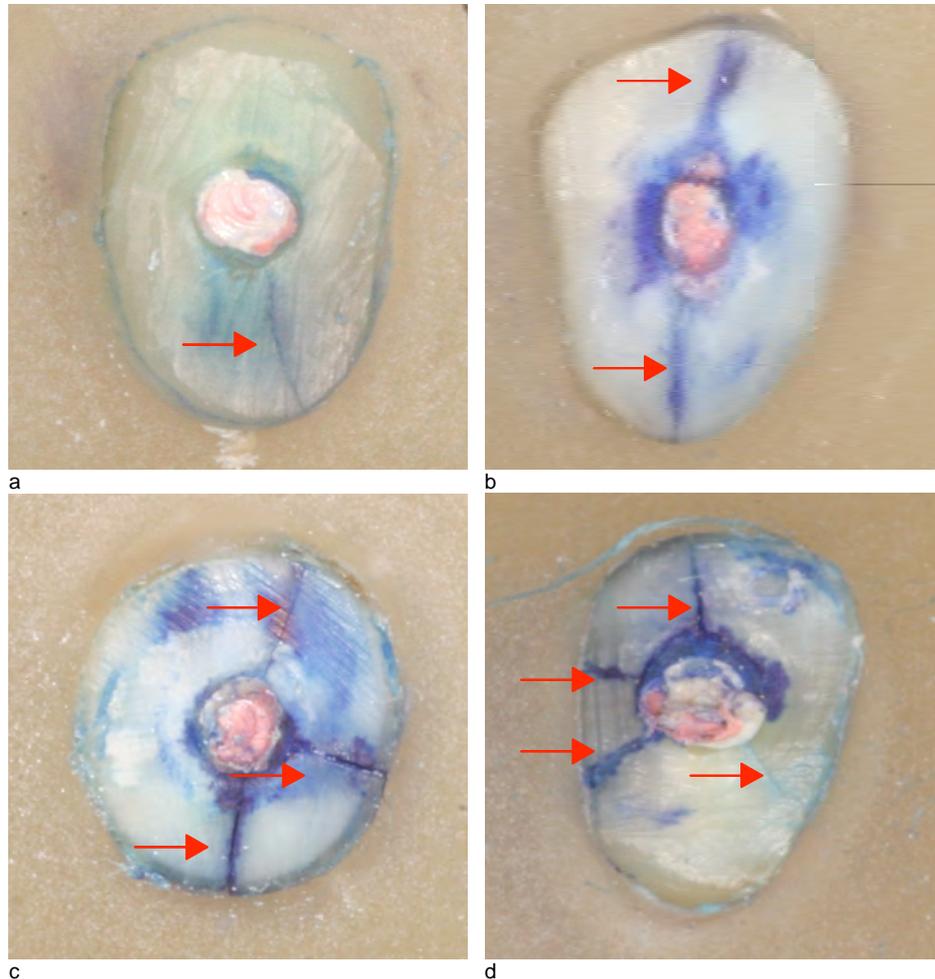


Abb. 24: Beispiele der gefundenen Frakturverläufe; eine vollständige Frakturlinie (a), zwei vom Kanal ausgehenden vollständige Frakturlinien (b), drei vom Kanal ausgehende vollständige Frakturlinien (c), vier vom Kanal ausgehende vollständige Frakturlinien (d), Färbung: Methylenblau

Mehr als vier unabhängig voneinander existierende Frakturlinien wurden nicht gefunden. Im überwiegenden Teil der Fälle fand man zwei Frakturlinien. Hier wurde der Winkel zwischen den zwei Linien gemessen. Der kleinste Winkel betrug $60,1^\circ$ und der größte Winkel 180° .

4.6.2 Verlaufsrichtung der Frakturlinien

Neben den komplexen Frakturverläufen (drei und vier Frakturlinien) wurde besonderes Augenmerk auf die Zähne mit zwei Frakturlinien gelegt (65,6 % aller Proben, n=96). Hierbei kam jede vorstellbare Kombination vor. Bei den 76 Proben (zwei Frakturlinien) traten am häufigsten Verläufe in vestibulo-oraler Richtung (82,9 %, n=76) auf. Mesio-distale Verläufe traten isoliert nur zweimal, in Kombination mit anderen Verläufen sechs weitere Male auf. Alle übrigen Verlaufsrichtungen traten nur vereinzelt auf (Abb. 25).

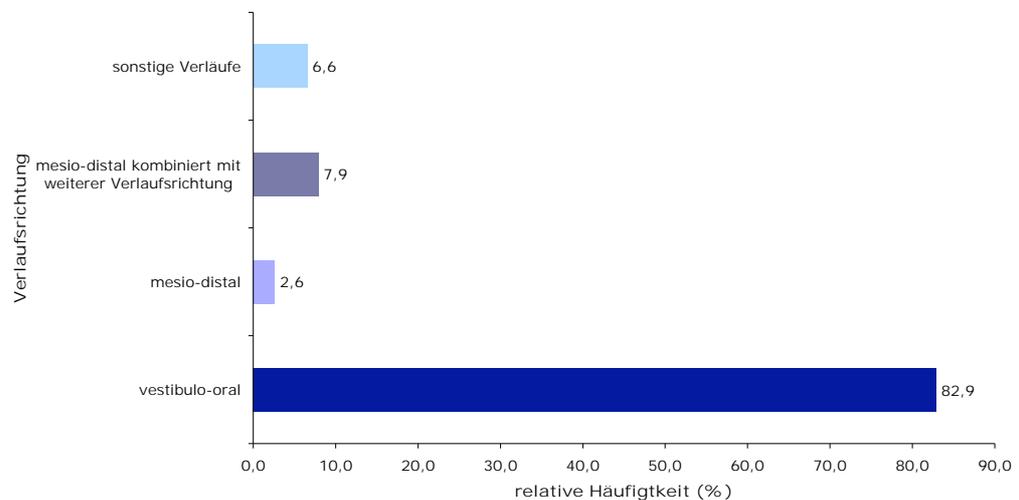


Abb. 25: Orientierung und Häufigkeit der Frakturverläufe bei zwei Frakturlinien (n=76)

5 Diskussion

5.1 Methodendiskussion

Da die geplante Versuchsreihe aus ethischen Gründen nicht am Patienten durchgeführt werden konnte, musste versucht werden die klinische Situation im Modell möglichst exakt nachzubilden. Manche Autoren bevorzugen eine vollständige Simulation anhand von Modellen ohne die Verwendung von natürlichen Zähnen^{32,44} oder ziehen Finite-Elemente-Analysen zur Berechnung heran⁵². In dieser Studie wurden hingegen extrahierte menschliche Zähne in einem klinischen Modell benutzt. Folglich sind die erzielten Ergebnisse nicht in ihren absoluten Werten, aber dennoch tendenziell auf den klinischen Alltag übertragbar. Weiterhin kann an Hand der Ergebnisse eine für den Praktiker hilfreiche Empfehlung zur Minimierung des Risikos der Entstehung vertikaler Wurzelfrakturen gegeben werden.

5.1.1 Probenmaterial

Zur Versuchsdurchführung wurden kariesfreie, einwurzelige Unterkieferfrontzähne mit abgeschlossenem Wurzelwachstum und geraden Kanalverlauf verwendet⁴⁰. Es wurde besonderer Wert darauf gelegt, dass die Zähne keinerlei Risse, Strukturanomalien oder Zeichen von Vorbehandlungen aufwiesen. Verschiedene Autoren weisen nämlich darauf hin, dass jede Art der Vorbehandlung oder Strukturanomalie zum Teil erheblichen Einfluss auf die Frakturfestigkeit der Zähne hat^{24,53,70}. Kleine, bereits existierende Mikrorisse im Dentin führen, sobald sie sich ausbreiten und das Wurzelzement an einer oder zwei gegenüberliegenden Wurzelflächen erreichen, zu Frakturen^{46,67}. Im Gegensatz dazu können starke Abrasionen zu einer Erhöhung der Frakturresistenz führen²³. Zähne mit mo- oder mod-Kavitäten weisen höhere Frakturraten auf^{31,73}. Exzessive kariöse Läsionen oder großer Dentinverlust im Bereich der Krone können prädisponierende Faktoren für Wurzelfrakturen sein^{16,19,20,46,98}. Um die oben aufgeführten Risikofaktoren auszuschließen wurden die Zähne entsprechend anerkannter Methodik unter einem

Stereomikroskop betrachtet^{16,40,53,54,57,67,70,71,103} und zusätzlich mit Hilfe der Transillumination^{16,40,41,57,67,71} untersucht. Strittig bleibt bei restaurationslosen Zähnen, ob nicht die Tatsache, dass Wurzelkanalbehandlungen im klinischen Alltag vor allem an Zähnen mit ausgedehnten kariösen Läsionen oder Vorbehandlungen durchgeführt werden müssen, vernachlässigt wird.

Frontzähne wurden aufgrund ihrer guten Beschaffungsmöglichkeit gewählt. Der klinische Aspekt, dass Wurzelkanalbehandlungen selten an Frontzähnen, meist im Rahmen der Therapie eines Frontzahntraumas, durchgeführt werden, musste vernachlässigt werden. Die bereits erschienenen Veröffentlichungen verwenden überwiegend einwurzelige Zähne. Eine explizite Trennung nach Zahngruppen erfolgt nur teilweise^{16,30,103}. Andere Studien begrenzen die Auswahl auf Frontzähne aus beiden Kiefern oder auf Unterkieferfrontzähne^{40,54,67,70}.

Die in der Literatur erschienenen Fallberichte und Übersichtsarbeiten¹⁰¹ sowie die Fallzahlen des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Justus-Liebig-Universität Gießen zeigen jedoch, dass vor allem Prämolaren und erste untere Molaren zu vertikalen Wurzelfrakturen neigen⁹⁴.

Im Versuch wurden nur Zähne einer Zahngruppe, nämlich Unterkieferfrontzähne, verwendet. Somit sollte eine möglichst große Homogenität des Probenmaterials gewährleistet werden. Dimension, Wurzelmorphologie, Wurzelquerschnitt und Frakturresistenz konnten somit annähernd konstant gehalten werden. Die Zahnlänge wurde konstant gehalten, da auch sie die Entstehung von Wurzelfrakturen beeinflussen^{80,103}. Längere Wurzeln können durchschnittlich größere Kräfte absorbieren als kürzere¹⁰⁶. Eine veröffentlichte Studie ging sogar soweit, die Masse der Zähne volumetrisch zu bestimmen, da voluminösere Zähne höhere Frakturresistenzen aufweisen⁴¹. Trotz aller Voruntersuchungen und Ausschlusskriterien muss beachtet werden, dass alle Zähne minimale strukturelle Unterschiede aufweisen, die die Messergebnisse beeinflussen können. Das können neben

Dentinbildungsstörungen auch unterschiedliche Dentindicken sowie Mineralisationswerte sein. Die für die Lagerung der Zähne verwendete Thymollösung beeinflusst die Härte der Proben nicht und ist in der Literatur anerkannt^{16,41,54,70}.

5.1.2 Spreadermaterial

Zum Füllen wurden handelsübliche Spreader verwendet. Die Auswahl der Größen 25 und 30 erfolgte nach eigenen Erfahrungen im klinischen Alltag. Die Wahl der verschiedenen Materialien (NiTi und STS) basiert auf der Studie von Joyce et al., die zeigte, dass bei einer Kraft von 20 N STS-Spreader völlig andere Areale maximaler Kraftkonzentration aufweisen als NiTi-Spreader. NiTi-Spreader verteilen die Kräfte auf die gesamte Kanalwand und beugen so der Entstehung vertikaler Wurzelfrakturen vor⁴⁴. Zusätzlich lassen sich NiTi-Spreader mit weniger Kraftaufwand tiefer in die Kanäle einführen als STS-Spreader. Dies ist vor allem beim Füllen gebogener Kanäle von Vorteil⁸⁵.

Um ein optimales Füllergebnis zu erzielen, wurde ein leicht konisches Spreaderdesign und kein stark konischer oder flach endender Spreader verwendet²². Das Spreaderdesign hat Einfluss auf die Homogenität der Wurzelkanalfüllung, scheint aber keinen Einfluss auf die Entstehung vertikaler Wurzelfrakturen zu haben⁶³. Basierend auf dem klinischen Alltag in unserer Abteilung wurden Fingerspreader verwendet. Manche Autoren favorisieren hingegen Handspreader zur lateralen Kondensation^{53,40}. Murgel et al. konnten zeigen, dass bei der Verwendung von D11-Handspreadern zwar größere Spannungsspitzen auftraten, die Häufigkeit vertikaler Wurzelfrakturen dadurch aber nicht beeinflusst wurde⁶³. Zusätzlich führen D11-Handspreader zu größeren Deformationen der Wurzeln als ein B-Finger-Plugger¹⁶. Die Belastungswerte, die an der Wurzeloberfläche gemessen wurden, waren generell niedrig, für Handspreader allerdings 5 mal größer als für Fingerspreader⁵³.

5.1.3 Aufbereitungstechnik

Zur Aufbereitung wurde das FlexMaster-System[®] verwendet. Durch die maschinelle Aufbereitung konnten signifikant weniger Kanalverlegungen, eine bessere Zentrierung des Instruments im Kanal und ein geringerer und

gleichmäßigerer Dentinabtrag im gesamten Kanalverlauf erzielt werden^{26,82-84}. Das FlexMaster-System[®] bietet zusätzlich die Möglichkeit, mit Hilfe von großen Feilen (bis ISO-Größe 70 bei 2% Konizität) auch in weitlumigen Kanälen einen ausreichenden Substanzabtrag zu erzielen. Dies erwies sich gerade bei der Verwendung von Frontzähnen als sehr hilfreich, da nahezu die gesamte Kanalwand erreicht und aufbereitet werden konnte.

Im klinischen Alltag ist die vorherige Instrumentierung des gesamten Kanals mit kleinen Instrumenten sowie ein koronales Preflaring nötig, um eine erfolgreiche maschinelle Aufbereitung zu gewährleisten (Verhinderung der Stufenbildung und Instrumentenfraktur)⁷⁷. Dieses Vorgehen wurde auch für den Versuch gewählt. Alle Wurzelkanäle wurden standardisiert bis zu ISO-Größe 60 aufbereitet, um die Ergebnisse nicht durch die gewählten unterschiedlichen Aufbereitungsgrößen zu beeinflussen. In der Literatur werden verschiedene Endgrößen bei der Aufbereitung beschrieben. Diese variieren von ISO-Größe 30^{53,54}, teils bei Unterkieferfrontzähnen⁵², bis ISO-Größe 70⁷¹. Trabert zeigte, dass Zähne mit kleinerer Aufbereitungsgröße größere Kräfte absorbieren können¹⁰⁶. Allerdings sollte die Aufbereitung das Einführen des Spreaders ohne Wandkontakt bis auf 1 mm vor Arbeitslänge ermöglichen⁵⁷, um eine dichte Obturation des Wurzelkanals zu erreichen. Dass dies im vorliegenden Versuch möglich war, belegte die nach Abschluss der Aufbereitung mit eingeführtem Spreader durchgeführte Röntgenkontrollaufnahme.

5.1.4 Füllmethode

Bei der Auswahl der Fülltechnik standen neben der lateralen Kondensation auch thermoplastische Füllmethoden zur Auswahl. Da vertikale Wurzelfrakturen vor allem im Zusammenhang mit der lateralen Kondensation beschrieben werden, wurde diese Füllmethode gewählt. Zusätzlich konnten Blum et al. anhand eines Endogramms zeigen, dass kein Unterschied in der Stresserzeugung im apikalen Bereich des Wurzelkanals zwischen lateraler und warmer vertikaler Kondensation besteht⁷. Die Kombination aus Guttapercha und AH plus[®] gilt auch heute

noch als Goldstandard bei der lateralen Kondensation⁴⁵. Deshalb kam diese im vorliegenden Versuch zur Anwendung.

Nach dem Füllen wurden die Proben 72 h bei 37° C und 100 % Feuchtigkeit gelagert, um eine ausreichende Aushärtung des Sealers zu erreichen. Laut Herstellerangaben genügt hierzu bereits eine Abbindezeit von mindestens 8 h bei 37° C. In den existierenden Versuchen sind Abbindezeiten von 24 h^{30,41,43}, 72 h⁵⁴ bis zu 2 Wochen beschrieben^{2,103}.

5.1.5 Belastungsgewicht

Harvey et al. konnten in ihrem photoelastischen Modell bei 6 verschiedenen Behandlern eine Belastung von 1,0 bis 3,0 kg bei der lateralen Kondensation feststellen³². Lindauer et al. beschreiben Füllgewichte von 1 kg, 3 kg, 4,5 kg und 7,5 kg⁵⁷. Reuver gibt zu bedenken, dass er es nach einem Selbstversuch an einer elektronischen Küchenwaage für unwahrscheinlich hält, Kräfte von mehr als 1 kg aufzubringen⁷⁵. Der Wert von 3 kg wird mehrfach genannt^{16,67}.

Aufgrund dieser Erkenntnisse erfolgten Vorversuche mit Belastungsgewichten von 1 kg, 3 kg, 5 kg und 10 kg. Dabei stellte sich heraus, dass eine suffiziente Füllung mit einem Gewicht von 10 kg nicht möglich war, da sich hierbei sowohl NiTi- als auch STS-Spreader beim kleinsten Wandkontakt verbogen und somit unbrauchbar wurden. Deshalb erfolgte die Durchführung der Hauptversuche mit 1 kg, 3 kg und 5 kg als Belastungsgewichten.

5.1.6 Versuchsaufbau

In der Literatur liegt kein einheitliches Einbettungskonzept für die Proben vor. Zur Simulation des parodontalen Ligaments werden überwiegend dünnfließende Silikone verwendet^{54,57,70,71,103}. Die Simulation des Knochens erfolgt durch die Einbettung in Gips²³ oder Zement³⁸. Diese Materialien erwiesen sich in den Vorversuchen bei Belastung in der Zwick-Testmaschine jedoch als zu brüchig. Deshalb wurde nach einem Alternativpräparat gesucht. Letztlich zur Anwendung kam ein von Soros et al. und Piskin et al. beschriebener Aufbau, der Silikon zur Darstellung des parodontalen Ligaments und Kunststoff zur Simulation des Knochens verwendet. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass das Modell der

klinischen Situation sehr nahe kommt und die Ergebnisse übertragbar sind^{70,93}. Im vorliegenden Versuch wurden Panasil contact plus x-light[®] und Technovit 4004[®] verwendet.

Wie der Literatur zu entnehmen ist wurde im Gegensatz zum vorliegenden Versuch das Füllen des Wurzelkanals zum Teil direkt in der Universaltestmaschine durchgeführt⁴⁰. Ein sehr langsames Einführen des Spreaders mit einer geringen kontinuierlichen Vorschubgeschwindigkeit erscheint klinisch nicht realistisch. Im klinischen Alltag richtet sich die Vorschubgeschwindigkeit des Spreaders vielmehr nach dem Gegendruck im Kanal und nimmt somit verschiedene Werte an. Es gilt zu beachten, dass keine Veröffentlichung existiert, die nachweisen kann, dass die Vorschubgeschwindigkeit des Spreaders eine Bedeutung für die Entstehung vertikaler Wurzelfrakturen hat. Entscheidend ist vielmehr, ob der Spreader mit oder ohne Kontakt zur Kanalwand vorgeschoben wird. Bei Kontakt treten Druckspitzen auf, die Frakturentstehungen beschleunigen können. Dies wurde in dem vorliegenden Versuch durch Aufbereitungstechnik und koronales Preflaring verhindert.

5.1.7 Universaltestmaschine (Zwick[®])

Zur Belastung der Proben wurde ein speziell für den Versuch angefertigter Kegelstumpf verwendet. Verschiedene Autoren favorisieren die Verwendung eines Hand-^{30,32,51,53} oder Fingerspreaders^{53,71,75}. In allen Studien variieren die ISO-Größen der verwendeten Instrumente stark. Vereinzelt sind auch Fingerpluggen⁵⁴ und Stahlkugeln zur Belastung beschrieben²³. In der Arbeit von Piskin et al. wird eine Belastung durch einen Zylinder mit einer Grundfläche von 4 mm^2 ⁷⁰, bei Teixeira et al. mit einem Zylinder mit dem Radius 2 mm ausgeübt¹⁰³. Dies soll der klinischen Situation eines inserierten Wurzelstiftes entsprechen. Die Verwendung von Füllinstrumenten wie Spreadern und Pluggern zum Erzeugen vertikaler Wurzelfrakturen erscheint vor dem Hintergrund, dass vertikale Wurzelfrakturen meistens erst mit einer gewissen Latenz nach Abschluss der eigentlichen Wurzelkanalbehandlung auftreten, nicht sinnvoll. Es gilt zu gewährleisten, dass bei der Untersuchung nur die Wurzelfüllung und nicht der umgebende Zahn mitbelastet wird. Die Wurzelfüllung sollte

senkrecht und in toto belastet werden. Die von uns gewählte Aufbereitung bis ISO-Größe 60 apikal bedeutet, dass 0,5 mm vor Apex der Durchmesser des Kanalquerschnitts 0,6 mm beträgt. Aus diesem Grund wurde eine Kegelgrundfläche ebenso von 0,6 mm Durchmesser gewählt.

Dass vertikale Wurzelfrakturen im Alltag durch Wechselbelastungen auftreten, die zu einer Ausbreitung bereits existierender Mikrorisse führen, konnte bisher experimentell nicht nachvollzogen werden und musste auch im vorliegenden Experiment unberücksichtigt bleiben. Auch thermische Effekte in der Mundhöhle fördern nachweislich das Risswachstum³⁹. Die hier durchgeführte einmalige Belastung bis zur Fraktur entspricht dem klinischen Fall des einmaligen Beißens auf harte Nahrung^{97,114}, was in der Folge zur vollständigen Fraktur der Wurzel führt. Dass dies tatsächlich passieren kann, legen klinische Fallberichte nahe. Im hier beschriebenen Versuch wurde eine Vorschubgeschwindigkeit von 1 mmmin^{-1} gewählt. Die Literaturangaben variieren von $0,5 \text{ mmmin}^{-1}$ ^{54,70}, 1 mmmin^{-1} ^{2,103}, 10 mmmin^{-1} ³⁰ bis zu 50 mmmin^{-1} ⁷¹.

Dass es im Verlauf der Belastung zu einer Wurzelfraktur kam, wurde anhand des Auftretens eines deutlich hörbaren Knackens sowie des Absinkens der Belastungswerte im Messdiagramm festgestellt. Viele Autoren verbinden eine Fraktur mit dem Auftreten eines Knackens^{30,57,70,71,103}. Zusätzlich sprechen manche von einer Fraktur, sobald der Belastungswert generell⁷⁰ oder um mehr als 25 % absinkt^{30,103}. Wenn der Spreader beim Füllen des Kanals plötzlich sehr tief in den gefüllten Kanal eingeführt werden kann, wird dies ebenfalls als Zeichen für eine Fraktur angesehen⁵⁷. Pitts et al. weisen allerdings darauf hin, dass in ihrer Studie trotz deutlich hörbaren Knackens während der Belastung nur 88 % der Zähne bei der Nachuntersuchung vollständige vertikale Frakturen aufwiesen⁷¹.

5.2 Ergebnisdiskussion

5.2.1 Material

Die Kraftaufwendung von $321,5 \text{ N} \pm 92,3 \text{ N}$ bei NiTi-Spreadern und $348,6 \text{ N} \pm 117,7 \text{ N}$ bei STS-Spreadern führt nicht zu einem signifikanten Unterschied bei der Frakturresistenz. In der Literatur wird wiederholt beschrieben, dass NiTi-Spreader, besonders bei kleinen ISO-Größen, mit weniger Kraftaufwand in den Kanal eindringen⁸⁵. Anders stellte sich dies bei gebogenen Kanälen dar. Dort sind NiTi-Spreader STS-Spreadern noch deutlicher überlegen⁸⁷. Es ist anzunehmen, dass aufgrund der Wahl gerader Kanäle keine Unterschiede zwischen den Materialien festgestellt werden konnten. Die Befunde stehen in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Berry et al., die experimentell feststellten, dass in geraden Kanälen kein Unterschied in der Eindringtiefe und der verwendeten Kraft zwischen den verschiedenen Materialien besteht⁶. Es ist zu vermuten, dass die zunehmende Steifheit der Spreader bei steigender Größe, besonders bei STS-Spreadern, im vorliegenden Experiment keinen Einfluss auf die Ergebnisse ausübte.

5.2.2 Spreadergröße

Bezüglich der Spreadergröße fand sich ebenfalls kein signifikanter Unterschied zwischen den getesteten Gruppen. Vielmehr lässt sich anhand der ermittelten Werte die Tendenz ablesen, dass bei Verwendung größerer Spreader die Gefahr einer vertikalen Wurzelfraktur sinkt ($327,0 \text{ N} \pm 101,1 \text{ N}$ für ISO-Größe 25 und $343,1 \text{ N} \pm 111,3 \text{ N}$ für ISO-Größe 30). Dies könnte damit zusammenhängen, dass die gewählten Spreadergrößen im Verhältnis zur Aufbereitungsgröße von ISO-Größe 60 sehr klein sind. Somit kann durch die Verwendung von Spreadern der ISO-Größe 30 eine dichtere Füllung bei geringer Gefahr des Kanalwandkontaktes erzielt werden. Weiterhin ist bekannt, dass kleinere Spreader zum Teil nicht den notwendigen apikalen Druck erzeugen, um eine ausreichende Deformation des Masterpoints und der Hilfsstifte hervorzurufen. Folglich kann keine apikal dichte Füllung erzielt werden⁸. Dies verringert die Erfolgsaussichten nach einer Wurzelkanalbehandlung deutlich.

Wie bereits beschrieben, existieren in der Literatur stark differierende Angaben zur verwendeten Spreadergröße. Im klinischen Alltag hängt die Wahl des Spreaders und somit seine Größe entscheidend von der Wurzelkanalkonfiguration und den persönlichen Vorlieben des Behandlers ab. Lertchirakarn et al. benutzten zum Füllen beispielsweise einen Fingerspreader der ISO-Größe 25⁵⁴. Manche Studien umgehen die Frage der definitiven Spreadergröße und verwenden zur erstmaligen Kondensation des Masterpoints einen deutlich größeren Spreader als im weiteren Verlauf des Füllens⁷⁰. Dies scheint jedoch wegen der schlechten Reproduzierbarkeit wenig sinnvoll. Bestehende Studien zeigen, dass Zähne, die durch laterale Kondensation mit Guttapercha und einem Spreader ISO-Größe 20 gefüllt wurden, einer Belastung $90,2 \text{ N} \pm 13,9 \text{ N}$ (maximal $105,1 \text{ N}$, minimal 68 N) widerstehen³⁰. Unterkieferfrontzähne, die mit einem Spreader ISO-Größe 25 durch laterale Kondensation gefüllt wurden (Guttapercha und AH plus[®]), überstehen $246,9 \text{ N} \pm 23,6 \text{ N}$ ⁵⁴. Piskin fand beim Füllen mit einem Spreader der Größe 25 abweichende Werte von $128 \text{ N} \pm 22,9 \text{ N}$. Im Vergleich dazu frakturierten nicht instrumentierte Zähne bei Werten von $153,4 \text{ N} \pm 7,2 \text{ N}$. In den Gruppen, die mit Spreader der ISO-Größe 40 und 35 initial kondensiert wurden, sanken die Frakturwerte signifikant ($99,6 \text{ N} \pm 20,7 \text{ N}$ und $104,3 \text{ N} \pm 30,8 \text{ N}$)⁷⁰.

Alle in der Literatur gefundenen Werte liegen deutlich unter den im eigenen Versuch ermittelten Durchschnittswerten. Eine mögliche Erklärung könnte das verwendete Einbettverfahren, nämlich in Kunststoff statt in Gips, sein. Wie bereits erwähnt, hatte sich im Vorversuch gezeigt, dass Gips nicht die nötige Druckfestigkeit aufweist, um den Kräften in der Universaltestmaschine zu widerstehen. Vielmehr brach in den Vorversuchen das Einbettungsmaterial vor der Entstehung vertikaler Wurzelfrakturen.

5.2.3 Belastungsgewicht

In der bisher veröffentlichten Literatur existieren keine Artikel, die darüber berichten, dass Proben mit vorher festgelegten Kondensationskräften gefüllt wurden. Zwar liegen einige Untersuchungen vor, die die bis zur Fraktur verschiedener Zahngruppen nötigen Kräfte ermittelt haben, doch

zeigen auch diese Ergebnisse kein einheitliches Bild. Zum direkten Vergleich der Ergebnisse können die Studien von Lertchirakarn et al. aus den Jahren 1999⁵³ und 2003⁵², die sich auf Unterkieferfrontzähne beziehen, sowie die Studie von Dang aus dem Jahre 1989¹⁶, die sich auf einwurzelige Zähne bezieht, herangezogen werden. Dang stellte fest, dass bei einwurzeligen Zähnen bei einer Kondensationskraft von 3 kg keine Wurzelfrakturen bei lateraler Kondensation erzeugt werden können¹⁶. Ebenso konnten Omnink et al. bei einer Kondensationskraft von maximal 3 kg keine vollständigen Wurzelfrakturen oder mit der Wurzeloberfläche kommunizierende, unvollständige Wurzelfrakturen bei Unterkieferfrontzähnen finden⁶⁷. Dies stimmt mit den erzielten Ergebnissen überein. Bei keiner der aufgewendeten Kräfte entstand während des Füllens eine Wurzelfraktur. Messungen von Lertchirakarn et al. ergaben, dass zum Füllen eines Wurzelkanals Kondensationskräfte zwischen 1,0 kg mit einem Fingerspreader und 2,2 kg mit einem Handspreader nötig sind, um eine dichte Füllung des Kanals zu erreichen⁵³. Die im vorliegenden Versuch verwendeten Werte von 5 kg werden laut bisher erschienener Literatur im klinischen Alltag nicht erreicht. Die von Endodontologen aufgewendeten Kräfte variieren zwischen 1 und 3 kg³².

Die Ergebnisse einer Finite-Element-Analyse zeigen, dass bei direktem Spreaderkontakt zur Kanalwand bei unteren Frontzähnen eine Belastung des Spreaders mit durchschnittlich 7,46 kg nötig ist, um eine vertikale Wurzelfraktur zu erzeugen⁵². Dies wird durch die Studie von Holcomb et al. unterstützt. Sie fanden heraus, dass Unterkieferfrontzähne bei einer durchschnittlichen Kondensationskraft von 7,08 kg \pm 2,58 kg frakturieren. Minimal waren hierbei 1,5 kg, maximal 13,7 kg nötig. 13% der Proben frakturierten bei 3 kg, 22% bei 5 kg⁴⁰. Die Studie geht weiter davon aus, dass die Frakturen während des Füllens auftreten. Die Spreader wurden, im Gegensatz zur vorliegenden Studie, immer bis 2 mm vor Arbeitslänge eingeführt. Dies wurde bis zur Fraktur wiederholt. Eine Möglichkeit zur Aushärtung der Wurzelfüllung war somit nicht gegeben⁴⁰. Den Schwachpunkt der Studie stellt der mangelnde klinische Bezug dar. Im klinischen Alltag wird ein Spreader nur solange und soweit in den Kanal

eingeführt, bis eine dichte Wurzelfüllung erreicht ist. Ein ständiges Einführen des Spreaders bis 2 mm vor Arbeitslänge erscheint nicht sinnvoll. Des Weiteren erscheint die in der Testmaschine verwendete Vorschubkraft von 5 cmmin^{-1} als sehr schnell im Vergleich zum klinischen Alltag⁴⁰. Die im Versuch ermittelten Frakturwerte bei einer Kondensationskraft von 1 kg von $346,7 \text{ N} \pm 113,0 \text{ N}$ stehen im kompletten Gegensatz zu den von Lertchirakarn et al. ermittelten Werten ($62 \text{ N} \pm 15 \text{ N}$). Diese wurden aber nach zweimaligem Füllen der Proben ermittelt, was den Schluss nahelegt, dass durch zweimaliges Füllen und anschließendes Revidieren der ersten Füllung der Zahn zusätzlich geschwächt wurde. Außerdem wurde nach dem zweiten Füllen die Probe direkt ohne vollständiges Aushärten der Wurzelfüllung, belastet. Ähnlicher sind die erzielten Ergebnisse von Saw et al.⁸¹. Diese konnten zeigen, dass bei der lateralen Kondensation mit einer Kondensationskraft von $2,46 \text{ kg} \pm 0,3 \text{ kg}$ zum Erzeugen einer vertikalen Wurzelfraktur an Oberkieferfrontzähnen durchschnittlich 161 N nötig sind. Auch hier variieren die Werte stark zwischen 49 und 250 N ⁸¹. In der Studie von Reuver konnte gezeigt werden, dass nach koronaler Entfernung der Wurzelfüllung auch bei ausschließlicher apikaler Belastung durch einen Spreader der ISO-Größe 40 keine signifikant anderen Frakturwerte auftraten⁷⁵.

Wiederholt wird die Frage aufgeworfen, welche Kondensationskraft nötig ist, um eine dichte apikale Füllung zu erzielen. Diese ist neben dem klinischen Aspekt eines dichten Verschlusses des Wurzelkanals nach apikal auch für die homogene Stabilisierung des gesamten Zahnes nötig. Es konnte gezeigt werden, dass bereits mit 1 kg Kondensationskraft eine dichte apikale Füllung in geraden Kanälen gewährleistet werden kann³³. Interessant ist auch die Lokalisation der Areale des maximalen Druckes bei zunehmenden Kondensationskräften. So zeigen Modelle mit und ohne Preflaring, dass der maximale Druck im apikalen Knochen bei einer Erhöhung der Kondensationskraft nur unmerklich ansteigt. Der Druck bleibt jedoch bei Modellen ohne Preflaring auch während des Füllens länger und stärker im apikalen Bereich konzentriert. Bei Modellen mit vorherigem Preflaring verteilt sich der Druck besser auf den gesamten Kanal. Die Druckspitzen wandern beim Füllen nach koronal³². Dies lässt

den Schluss zu, dass unterschiedliche Kondensationskräfte jeweils nur einen minimal unterschiedlichen apikalen Druck erzeugen und somit auch ein ähnliches Risiko für die Entstehung von Wurzelfrakturen darstellen. Dies kann durch die sehr ähnlichen Ergebnisse aller hier untersuchten Gruppen gestützt werden. Weiterhin scheint eine Kondensationskraft von 3 kg ausreichend für eine homogene Wurzelfüllung zu sein.

Diverse Studien existieren zur Frakturresistenz mesialer Wurzeln von Unterkiefermolaren. Die Frakturwerte werden mit 70 N⁵⁷ bis 157 N⁵¹ angegeben. Leider sind diese Ergebnisse nicht ohne weiteres auf den eigenen Versuch übertragbar. Auch der verwendete Sealer hat entscheidenden Einfluss auf die Frakturresistenz gefüllter Zähne. Im Gegensatz zu Karapinar⁴⁵, der als Sealer AH plus[®] favorisiert, fanden Apicella et al. heraus, dass Guttapercha in Kombination mit Roth's 801 Sealer[®] den größten Kräften standhielt (546,7 N ± 206,9 N)². Weiterhin konnte gezeigt werden, dass Füllungsmaterialien auf Kunststoffbasis (z.B. Resilon[®]) einen deutlich stabilisierenden Effekt aufweisen¹⁰³. So wurde bei lateraler Kondensation von Guttapercha mit AH plus[®] bei einwurzeligen Zähnen ein Frakturwert von 391,51 N ± 146,79 N, bei vertikaler Kondensation ein Wert von 392,37 N ± 77,03 N erreicht¹⁰³. Dies stimmt mit den von uns ermittelten Werten von 321,5 N ± 92,3 N für NiTi- und 348,6 N ± 117,7 N für STS-Spreader nahezu überein. Bei Resilon[®] hingegen stiegen die Werte auf 504,22 N ± 195,94 N bei lateraler und auf 498,23 N ± 135,32 N bei vertikaler Kondensation an¹⁰³.

Um nochmals die Schwierigkeiten der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die klinische Situation herauszustellen, soll die Studie von Soros et al. zitiert werden. In dieser wurden Zähne von Ziegen zum einen im natürlichen Kiefer und zum anderen in künstlichen Sockeln aufbereitet und frakturiert. Aufgrund der Streuung der Ergebnisse kommt der Autor der Studie abschließend zu dem Urteil, dass alle bisher beschriebenen Modelle zur Simulation einer vertikalen Wurzelfraktur den klinischen Alltag nicht genügend abbilden können⁹³.

5.2.4 Frakturtypen und Frakturverläufe

Die Klassifikation der Frakturtypen erfolgt in der Literatur nach unterschiedlichen Kriterien. Hauptsächlich wird eine Einteilung zwischen reinen Kronen- und Wurzelfrakturen vorgenommen. Zusätzlich kann eine Klassifikation nach der Verlaufsrichtung erfolgen. So existieren vertikale und schräge Frakturverläufe mit und ohne Beteiligung der Pulpa sowie horizontale Frakturverläufe im zervikalen, mittleren oder apikalen Wurzeldrittel⁹⁷.

In unserem Versuch erfolgte die Einteilung nach den Verlaufsrichtungen. Unterschieden wurde zwischen vestibulo-oralem und mesio-distalem Verlauf. Zusätzlich wurde die Anzahl der Frakturlinien dokumentiert. Dies geschah, um feststellen zu können, welche Areale des Dentins bei einer Kraftwirkung von kanalintern nach außen besonders gefährdet sind.

In einer Finite-Elemente-Analyse zeigten Lertchirakarn et al., dass bei einer Belastung von 60 N 4 bis 5 mm vor Apex die größten Kraftwerte in vestibulo-oraler Richtung auftraten. Zusätzlich traten die höchsten Spannungswerte bei Unterkieferfrontzähnen mit ovalen oder bandförmigen Kanälen, in vestibulo-oraler Richtung im Inneren des Wurzelkanals und nicht an der Wurzeloberfläche auf⁵². Es ist davon auszugehen, dass Frakturen an der Kanalinnenwand ihren Ursprung nehmen.

Bei unbehandelten Prämolaren stellte Geurtsen vor allem Höckerfrakturen fest. Vertikalfrakturen kamen nur zu 37 % vor. Zwischen mesio-distalem und vestibulo-oralem Verlauf wurde nicht unterschieden²³. Frakturen, die ihren Ausgangspunkt apikal haben, sind meist vestibulo-oral orientiert. Im Gegensatz dazu sind kombinierte Kronen-Wurzelfrakturen meist mesio-distal ausgeprägt¹¹¹. Neben Hauptfrakturen, die vom Kanal bis zur Wurzeloberfläche laufen, werden häufig zusätzlich Infrakturen beobachtet¹¹¹.

Meine Versuchsreihe ergab, dass beim Auftreten vertikaler Wurzelfrakturen zum überwiegenden Teil zwei Frakturlinien entstehen (79,2 %). Allerdings konnten auch bis zu vier Frakturlinien festgestellt

werden. Was die Orientierung der Frakturlinien zueinander betraf, zeigte sich ein relativ weites Spektrum. Neben sehr eng benachbarten Verläufen (eingeschlossener Winkel $60,1^\circ$) wurden auch exakt gegenüberliegende Verläufe (180°) festgestellt. Der Mittelwert von $161,7^\circ$ zeigt deutlich, dass eine Tendenz zu weiter entfernt voneinander verlaufenden Frakturlinien besteht. Die verschiedenen Verlaufsrichtungen könnten damit zusammenhängen, dass Frakturlinien nicht generell in Verlaufsrichtung der Tubuli orientiert sind⁶³.

Lagen zwei Frakturlinien vor, so waren diese zu 82,9 % in vestibulo-oraler Richtung orientiert. Auch die Literatur bestätigt die überwiegend vestibulo-orale Verlaufsrichtung. Lertchirakarn et. al beschreiben zu 67,5 % Frakturen in vestibulo-oraler Richtung. Mesio-distale Frakturen traten nur in 32,5 % der Fälle auf. Zusätzlich wiesen 42,5 % der Zähne weitere Frakturlinien auf⁵⁴. In einer weiteren Untersuchung konnten sie speziell bei Unterkieferfrontzähnen feststellen, dass 80 % aller Frakturen in vestibulo-oraler Richtung verliefen⁵³. Holcomb et al. beobachteten sogar ausschließlich vestibulo-orale Frakturverläufe. Zusätzlich fanden sie bei 28 % der Proben zusätzlich mesio-distale Infrakturen. Diese kommunizieren meist mit Wurzeleinziehungen und nicht mit dem apikalen Anteil der vestibulo-oralen Frakturen⁴⁰. Auch bei Oberkieferfrontzähnen, Ober- und Unterkiefereckzähnen werden zu 75 % vestibulo-orale Frakturverläufe beobachtet⁷¹. Nach Apicella et al. frakturierten 78 % aller Zähne in vestibulo-oraler Richtung. Die übrigen 22 % frakturierten in verschiedenen Richtungen².

Die Frage, ob die Aufbereitungstechnik (per Hand oder maschinell) Einfluss auf den Verlauf der Frakturlinien hat, konnte in der Literatur nicht beantwortet werden⁵¹. Auch die Ausbreitung in apiko-koronaler Richtung hängt anscheinend nicht von der Aufbereitungstechnik ab. Es konnten nämlich keine Unterschiede in der Ausdehnung nach apikal zwischen manuell und maschinell aufbereiteten Zähnen festgestellt werden⁵¹. Murgel und Walton stellten fest, dass die Frakturen meist apikal ihren Ursprung nehmen und sich nach koronal fortsetzen⁶³, nicht selten vollständig vom Apex bis nach cervikal¹¹¹. Dieser Aspekt wurde in der

vorliegenden Arbeit nicht untersucht. Prinzipiell ist aber davon auszugehen, dass vertikale Wurzelfrakturen apikal entstehen. Telli et al. belegten, dass bei lateraler Kondensation die größte Kraft nahe der Spreaderspitze, also nahe dem Foramen, auftritt¹⁰⁴.

5.2.5 Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die im Versuch erzielten Ergebnisse sind nur bedingt auf andere Zahngruppen übertragbar. Dies liegt daran, dass jede Zahngruppe spezielle morphologische Eigenschaften aufweist. Neben augenscheinlichen Unterschieden wie Zahnlänge, Wurzellänge, Wurzeldurchmesser, Wurzelkrümmung und Wurzelanzahl existieren auch auf mikroskopischer Ebene erkennbare Unterschiede in der Mineralisation, Struktur und Organisation der Tubuli in den verschiedenen Zahnhartsubstanzen. Dieser Effekt wird durch die interindividuellen Unterschiede in der Zahnschicht der Spender zusätzlich verstärkt. Bereits während der Vorversuche wurde deutlich, dass obere Frontzähne deutlich größere Kräfte absorbieren können als untere Frontzähne. Dennoch sollte bedacht werden, dass mit unteren Frontzähnen sehr fragile und zierlich dimensionierte Zähne zur Gewinnung der Proben verwendet wurden. Davon, dass sich die erzielten Ergebnisse in Zähnen mit gekrümmten Wurzelkanälen ähnlich darstellen, kann, wie bereits dargelegt, nicht ausgegangen werden.

5.3 Ausblick

In Zukunft wäre es wünschenswert, den hier verwendeten Versuchsaufbau noch stärker am klinischen Alltag zu orientieren. Hierzu wäre es nötig, die klinische Latenz bis zum Auftreten einer Wurzelfraktur zu simulieren. Klinisch spielen vor allem Alterungsprozesse des Füllmaterials sowie thermische und kausfunktionelle Wechselwirkungen eine entscheidende Rolle bei der Ausbreitung der Mikrorisse. Dies könnte beispielsweise durch Thermocycling oder eine Kausimulation nachgestellt werden.

Eine Verwendung anderer Zahngruppen zur besseren Übertragbarkeit der Ergebnisse wäre wünschenswert. So könnten neben Oberkieferfrontzähnen auch Prämolaren und Molaren im selben Versuchsaufbau getestet werden. Besonders interessant wären Untersuchungen an Zähnen mit gekrümmten Wurzeln. Die Literatur beschreibt übereinstimmend, dass NiTi-Spreader in gebogenen Kanälen deutliche Vorteile beim Füllen gegenüber von STS-Spreader aufweisen. Dies sollte Inhalt zukünftiger Versuche sein.

Da bei der Literaturrecherche im Zuge der Ergebnisdiskussion deutlich wurde, dass die Wahl des Füllungsmaterials beziehungsweise des Sealers eine Rolle bei der Frakturresistenz spielt, sollte dieser Aspekt in zukünftigen Forschungen ebenso Berücksichtigung finden. Neben der herkömmlichen Methode der lateralen Kondensation sollten die neueren thermoplastischen Fülltechniken in die Untersuchungen mit einbezogen werden. Die Verwendung größerer Kondensationskräfte erscheint nicht sinnvoll, da im vorliegenden Versuch, wie auch in der Literatur beschrieben mit Kräften von weniger als 5 kg dichte Wurzelfüllungen zu erzielen sind. Größere Kräfte sind somit klinisch nicht notwendig.

Ein interessanter Aspekt zukünftiger Forschung stellt die Größe der verwendeten Spreader dar. Hier gilt es festzustellen, ob größere Spreader, die in die Nähe der apikalen Aufbereitungsgröße von ISO-Größe 60 kommen, das Risiko vertikaler Wurzelfrakturen erhöhen. Ebenso gilt es, dem in der Literatur beschriebenen Aspekt, dass kleinere Spreader ein kleineres Risiko für vertikale Wurzelfrakturen bergen, aber gleichzeitig keine dichte Füllung des Kanals zulassen sollen, nachzugehen.

5.4 Klinische Empfehlung

Abschließend soll für den endodontisch tätigen Zahnarzt eine Empfehlung zur Vermeidung von Wurzelfrakturen gegeben werden. Generell ist die Verwendung von NiTi-Spreader zu empfehlen, da sich diese bei einer zu großen Kraftaufwendung verbiegen und somit eine unkontrollierte

Krafteinwirkung auf das apikale Parodont und den Wurzelkanal nahezu unmöglich machen. Dass sie bei gebogenen Kanälen tiefer in den Kanal eindringen, ist unstrittig⁸⁷. Bei geraden Kanälen kann ohne Risiko die Empfehlung von STS-Spreader gegeben werden. Hierbei sollte jedoch darauf geachtet werden, dass die Kondensationskräfte 5 kg nicht übersteigen, da sonst ein erhöhtes Risiko für vertikale Wurzelfrakturen besteht. Kondensationskräfte in dieser Höhe scheinen, auch vor dem Hintergrund der existierenden Literatur, zum dichten und homogenen Füllen eines Kanals nicht nötig zu sein. Zur Sicherheit ist es jedem Behandler zu empfehlen, seine eigene Kondensationskraft zu überprüfen. Die kann zum Beispiel an einer handelsüblichen Küchenwaage erfolgen. Trotz aller Risiken sollte auf eine dichte und homogene Füllung Wert gelegt werden. Schließlich ist bekannt, dass eine dichte Füllung entscheidend für den langfristigen Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung ist.

6 Zusammenfassung

In der aktuellen Literatur existieren verschiedene Fallberichte über vertikale Wurzelfrakturen endodontisch behandelter Zähne, die als Komplikation nach lateraler Kondensation auftreten können. Diese führen in der überwiegenden Zahl der Fälle zur Extraktion des betroffenen Zahnes.

Als Material für endodontische Aufbereitungs-, aber auch Füllinstrumente stehen sowohl Edelstahl- als auch Nickel-Titan-Legierungen zur Verfügung. Letztere werden seit einigen Jahren vermehrt verwendet. Studien belegen, dass Nickel-Titan-Spreader (NiTi) die Zahnwurzel einem erheblich geringeren Stress beim Füllen der Wurzelkanäle aussetzen als Edelstahlspreader (STS). Der Frage, ob durch die Verwendung von NiTi-Spreadern als Ersatz für Edelstahlspreader das Risiko vertikaler Wurzelfrakturen als Komplikation nach der lateralen Kondensation bei der Verwendung verschiedener Kondensationskräfte und verschiedener Spreadergrößen gesenkt werden kann, sollte in dieser Studie nachgegangen werden.

Sechsendneunzig einwurzelige, kariesfreie Unterkieferfrontzähne mit geraden Kanälen wurden nach Ausschluss von Mikrorissen (Mikroskop, Transillumination) randomisiert auf zwölf Versuchsgruppen verteilt. Nach dem Abtrennen der klinischen Krone, dem Erschließen des Kanalsystems und dem Einbetten der Wurzeln in ein Modell zur Simulation des Zahnhalteapparats wurden die Kanäle standardisiert mit dem FlexMaster-System[®] (bis 02/60) und anschließend manuell mit K-Feilen (ISO-Größe 55 und 60) aufbereitet. Die laterale Kondensation erfolgte in jeweils drei Gruppen mit Kondensationskräften von 1, 3 oder 5 kg. Die Kondensation wurde entweder mit einem STS- oder einem NiTi-Spreader der ISO-Größen 25 oder 30 durchgeführt. Nach 72 h Lagerung erfolgte die Belastung der Wurzelfüllungen bis zur Fraktur der Proben durch einen Kegel in einer Zwick-Testmaschine. Die maximale Belastungskraft (N), die

zur Fraktur führte, wurde gemessen. Anschließend wurden die Frakturlinien mit Methylenblau angefärbt und klassifiziert.

Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Gruppen festgestellt. Die gemessenen Frakturwerte (MW \pm SD) ergaben für NiTi-Spreader $321,5 \pm 92,3,0$ N bei einem Maximum von 653,4 N und einem Minimum von 165,0 N. Für STS-Spreader wurden $348,6 \pm 117,7$ N, ein Maximum von 654,6 N und ein Minimum von 159,6 N gemessen.

Für Spreader der ISO-Größe 25 zeigten sich Werte von $327,0 \pm 101,1$ N, bei einem Maximum von 654,6 N und einem Minimum von 159,6 N. Für Spreader der ISO-Größe 30 wurden Werte von $343,1 \pm 111,3$ N mit einem Maximum von 653,4 N und einem Minimum von 183,1 N ermittelt.

Die Untersuchung der Kondensationskräfte lieferte für die 1 kg-Gruppe einen Mittelwert von $346,7 \pm 113,0$ N, bei einem Maximum von 651,4 N und einem Minimum von 165,0 N. Für die 3 kg-Gruppe ergaben sich $353,2 \pm 111,0$ N, ein Maximum von 654,6 N und ein Minimum von 212,0 N. In der 5 kg-Gruppe konnten $305,1 \pm 89,4$ N, ein Maximum von 492,6 N und ein Minimum von 159,6 N gemessen werden.

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass die Verwendung von NiTi-Spreader im Vergleich zu Edelstahlspreadern in geraden Kanälen von Unterkieferinzisivi bei Kondensationskräften von 1, 3 und 5 kg nicht zu einer Veränderung des Frakturrisikos bei der lateralen Kondensation führt.

7 Summary

In the current literature various case reports exist about vertical root fracture of endodontically treated teeth as complication of lateral condensation. Mostly, this complication leads to the extraction of the respective tooth. Two types of instruments for the preparation and filling of root canals are normally used during the endodontic treatment: stainless steel and nickel titanium alloys. The latter ones became more and more popular in the last years, since studies have shown that spreaders made by nickel-titanium-alloy produce much less stress during filling of root canals than spreaders made by stainless steel. Whether the risk of vertical root fractures as a complication of lateral condensation can be reduced by the use of various condensation forces and spreader sizes should be investigated in the present study.

Ninety-six single rooted, caries free lower incisors with straight root canals were divided randomly into twelve groups. Micro- fractures were excluded by thorough control under a microscope and by transillumination. The clinical crowns were separated, following, the root canal was instrumented and the teeth were embedded into a special model for simulation of the periodontal ligament. All teeth were treated in a standardised manner by using the FlexMaster-System[®] (up to 02/60) and K-files (size 55 and 60). Lateral condensation was performed in three groups with condensation forces of 1, 3 or 5 kg using a STS- and a NiTi-spreader, respectively, with a size of 25 or 30. After storage of all teeth for 72 h the root fillings were stressed with a cone until fracture in a material testing machine (Zwick[®]). The maximal load (N) at fracture was recorded. Afterwards, the fracture lines were stained with methylene blue and classified.

No significant differences between groups were found. The recorded fracture loads (mean \pm SD) were 321.5 ± 92.3 N (maximum 653.4 N; minimum 164.9 N) for the NiTi-spreader and 348.6 ± 117.7 N (maximum 654.6 N; minimum 159.6 N) for the STS-spreader.

For spreader with a size of 25 loads of 327.0 ± 101.1 N (maximum 654.6 N; minimum 159.6 N) were detected. The spreader with a size of 30 showed $343.1 \pm 111,3$ N (maximum 653.4 N; minimum 183.1 N).

Considering the different condensation forces $346.7 \pm 113,0$ N (maximum 651.4 N; minimum 165.0 N) for 1 kg, 353.2 ± 111.0 N (maximum 654.6 N; minimum 212.0 N) for 3 kg and 305.1 ± 89.4 N (maximum 492.6 N; minimum 159.6 N) for 5 kg were detected.

In conclusion, there is no indication that the use of NiTi-spreader in comparison to stainless steel spreader decreases the risk of vertical root fractures in straight root canals of lower jaw's incisors as a complication of lateral condensation regarding condensation forces of 1, 3 and 5 kg.

8 Literaturverzeichnis

1. Aesaert G. Lassen sich Zähne mit vertikaler Wurzelfraktur erhalten? *Endodontie* 2001;10:163-176.
2. Apicella M. J., Loushine R. J., West L. A. und Runyan D. A. A comparison of root fracture resistance using two root canal sealers. *Int Endod J* 1999;32:376-380.
3. Arakawa S., Cobb C. M., Rapley J. W., Killoy W. J. und Spencer P. Treatment of root fracture by CO₂ and Nd:YAG lasers: an in vitro study. *J Endod* 1996;22:662-667.
4. Barkhordar R. A. Treatment of vertical root fracture: a case report. *Quintessence Int* 1991;22:707-709.
5. Barkhordar R. A., Radke R. und Abbasi J. Effect of metal collars on resistance of endodontically treated teeth to root fracture. *J Prosthet Dent* 1989;61:676-678.
6. Berry K. A., Loushine R. J., Primack P. D. und Runyan D. A. Nickel-titanium versus stainless-steel finger spreaders in curved canals. *J Endod* 1998;24:752-754.
7. Blum J. Y., Machtou P. und Micallef J. P. Analysis of forces developed during obturations. Wedging effect: Part I. *J Endod* 1998;24:217-222.
8. Blum J. Y., Machtou P. und Micallef J. P. Analysis of forces developed during obturations. Wedging effect: Part II. *J Endod* 1998;24:223-228.
9. Burke F. J. Tooth fracture in vivo and in vitro. *J Dent* 1992;20:131-139.
10. Cameron C. E. Cracked-Tooth Syndrome. *J Am Dent Assoc* 1964;68:405-411.

11. Carter J. M., Sorensen S. E., Johnson R. R., Teitelbaum R. L. und Levine M. S. Punch shear testing of extracted vital and endodontically treated teeth. *J Biomech* 1983;16:841-848.
12. Chan C. P., Chang S. H., Huang C. C., Wu S. K. und Huang S. K. Cutaneous sinus tract caused by vertical root fracture. *J Endod* 1997;23:593-595.
13. Chan C. P., Lin C. P., Tseng S. C. und Jeng J. H. Vertical root fracture in endodontically versus nonendodontically treated teeth: a survey of 315 cases in Chinese patients. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1999;87:504-507.
14. Chan C. P., Tseng S. C., Lin C. P., Huang C. C., Tsai T. P. und Chen C. C. Vertical root fracture in nonendodontically treated teeth - a clinical report of 64 cases in Chinese patients. *J Endod* 1998;24:678-681.
15. Cohen S., Blanco L. und Berman L. Vertical root fractures: clinical and radiographic diagnosis. *J Am Dent Assoc* 2003;134:434-441.
16. Dang D. A. und Walton R. E. Vertical root fracture and root distortion: effect of spreader design. *J Endod* 1989;15:294-301.
17. de Cleen M. J. H. Richtlinien zur Restauration wurzelkanalbehandelter Zähne. *Endodontie* 1994;4:289-297.
18. Dwan J. J. und Glickman G. N. 2-D photoelastic stress analysis of Ni-Ti and stainless-steel finger spreaders during lateral condensation. *J Endod* 1995;21:221.
19. Felton D. A., Webb E. L., Kanoy B. E. und Dugoni J. Threaded endodontic dowels: effect of post design on incidence of root fracture. *J Prosthet Dent* 1991;65:179-187.

20. Fuss Z., Lustig J., Katz A. und Tamse A. An evaluation of endodontically treated vertical root fractured teeth: impact of operative procedures. *J Endod* 2001;27:46-48.
21. Fuss Z., Lustig J. und Tamse A. Prevalence of vertical root fractures in extracted endodontically treated teeth. *Int Endod J* 1999;32:283-286.
22. Gani O., Visvisian C. und de Caso C. Quality of apical seal in curved canals using three types of spreaders. *J Endod* 2000;26:581-585.
23. Geurtsen W. und Jupitz G. Fracture resistance of human premolar with regard to morphological factors. *Zahnärztl Welt* 1991;100:98-99.
24. Gher M. E., Jr., Dunlap R. M., Anderson M. H. und Kuhl L. V. Clinical survey of fractured teeth. *J Am Dent Assoc* 1987;114:174-177.
25. Gimlin D. R., Parr C. H. und Aguirre-Ramirez G. A comparison of stresses produced during lateral and vertical condensation using engineering models. *J Endod* 1986;12:235-241.
26. Glossen C. R., Haller R. H., Dove S. B. und del Rio C. E. A comparison of root canal preparations using Ni-Ti hand, Ni-Ti engine-driven, and K-Flex endodontic instruments. *J Endod* 1995;21:146-151.
27. Gutmann J. L. The dentin-root complex: anatomic and biologic considerations in restoring endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent* 1992;67:458-467.
28. Gutmann J. L. und Rakusin H. Endodontic and restorative management of incompletely fractured molar teeth. *Int Endod J* 1994;27:343-348.
29. Guzy G. E. und Nicholls J. I. In vitro comparison of intact endodontically treated teeth with and without endo-post reinforcement. *J Prosthet Dent* 1979;42:39-44.

30. Hammad M., Qualtrough A. und Silikas N. Effect of new obturating materials on vertical root fracture resistance of endodontically treated teeth. *J Endod* 2007;33:732-736.
31. Hansen E. K. und Asmussen E. In vivo fractures of endodontically treated posterior teeth restored with enamel-bonded resin. *Endod Dent Traumatol* 1990;6:218-225.
32. Harvey T. E., White J. T. und Leeb I. J. Lateral condensation stress in root canals. *J Endod* 1981;7:151-155.
33. Hatton J. F., Ferrillo P. J., Jr., Wagner G. und Stewart G. P. The effect of condensation pressure on the apical seal. *J Endod* 1988;14:305-308.
34. Haueisen H., Ratka-Krüger P. und Heidemann D. Diagnostik vertikaler Wurzelfrakturen endodontisch behandelte Zähne. *Dtsch Zahnärztl Z* 1999;54:249-252.
35. Haueisen H., Ratka-Krüger P. und Heidemann D. Mögliche Ursachen und Auswirkungen vertikaler Wurzelfrakturen - zwei Falldarstellungen. *Endodontie* 1997:295-305.
36. Helfer A. R., Melnick S. und Schilder H. Determination of the moisture content of vital and pulpless teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1972;34:661-670.
37. Helft M. und Marshak B. Split root: a common cause of undiagnosed or misdiagnosed pain. *Quintessence Int Dent Dig* 1981;12:1031-1036.
38. Hernandez R., Bader S., Boston D. und Trope M. Resistance to fracture of endodontically treated premolars restored with new generation dentine bonding systems. *Int Endod J* 1994;27:281-284.
39. Hiatt W. H. Incomplete crown-root fracture in pulpal-periodontal disease. *J Periodont* 1973;44:369-379.

40. Holcomb J. Q., Pitts D. L. und Nicholls J. I. Further investigation of spreader loads required to cause vertical root fracture during lateral condensation. *J Endod* 1987;13:277-284.
41. Howe C. A. und McKendry D. J. Effect of endodontic access preparation on resistance to crown-root fracture. *J Am Dent Assoc* 1990;121:712-715.
42. Huang T. J., Schilder H. und Nathanson D. Effects of moisture content and endodontic treatment on some mechanical properties of human dentin. *J Endod* 1992;18:209-215.
43. Isom T. L., Marshall J. G. und Baumgartner J. C. Evaluation of root thickness in curved canals after flaring. *J Endod* 1995;21:368-371.
44. Joyce A. P., Loushine R. J., West L. A., Runyan D. A. und Cameron S. M. Photoelastic comparison of stress induced by using stainless-steel versus nickel-titanium spreaders in vitro. *J Endod* 1998;24:714-715.
45. Karapinar Kazandag M., Sunay H., Tanalp J. und Bayirli G. Fracture resistance of roots using different canal filling systems. *Int Endod J* 2009;42:705-710.
46. Kfir A., Zukerman O., Tamse A. und Fuss Z. Vertikale Wurzelfrakturen bei wurzelkanalbehandelten Zähnen - Ätiologie, Diagnose und Therapie. *Endodontie* 2002;11:115-121.
47. Kielbassa A. M., Helwig E. und Attin T. Differentialdiagnostische Probleme im Zusammenhang mit einer Fistelbildung nach Kronen-Wurzel-Fraktur eines wurzelkanalbehandelten Seitenzahnes. *Endodontie* 1995;2:107-119.
48. Koçkapan C. Curriculum Endodontie. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH, 2003.

49. Kramer E., Robra B. P., Walther W. und Heners M. Vertikale Wurzelfrakturen an endodontisch behandelten Zähnen. Dtsch Zahnarztl Z 2008;63:330-336.
50. Kudou Y. und Kubota M. Replantation with intentional rotation of a complete vertically fractured root using adhesive resin cement. Dent Traumatol 2003;19:115-117.
51. Lam P. P., Palamara J. E. und Messer H. H. Fracture strength of tooth roots following canal preparation by hand and rotary instrumentation. J Endod 2005;31:529-532.
52. Lertchirakarn V., Palamara J. E. und Messer H. H. Finite element analysis and strain-gauge studies of vertical root fracture. J Endod 2003;29:529-534.
53. Lertchirakarn V., Palamara J. E. und Messer H. H. Load and strain during lateral condensation and vertical root fracture. J Endod 1999;25:99-104.
54. Lertchirakarn V., Timyam A. und Messer H. H. Effects of root canal sealers on vertical root fracture resistance of endodontically treated teeth. J Endod 2002;28:217-219.
55. Lewinstein I. und Grajower R. Root dentin hardness of endodontically treated teeth. J Endod 1981;7:421-422.
56. Linaburg R. G. und Marshall F. J. The diagnosis and treatment of vertical root fractures: report of case. J Am Dent Assoc 1973;86:679-683.
57. Lindauer P. A., Campbell A. D., Hicks M. L. und Pelleu G. B. Vertical root fractures in curved roots under simulated clinical conditions. J Endod 1989;15:345-349.

58. Llana-Puy M. C., Forner-Navarro L. und Barbero-Navarro I. Vertical root fracture in endodontically treated teeth: a review of 25 cases. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2001;92:553-555.
59. Lommel T. J., Meister F., Gerstein H., Davies E. E. und Tilk M. A. Alveolar bone loss associated with vertical root fractures. Report of six cases. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1978;45:909-919.
60. Meister F., Jr., Lommel T. J., Gerstein H. und Bell W. A. An additional clinical observation in two cases of vertical root fracture. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1981;52:91-96.
61. Meister F. J., Lommel T. J. und Gerstein H. Diagnosis and possible causes of vertical root fractures. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1980;49:243-253.
62. Morfis A. S. Vertical root fractures. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1990;69:631-635.
63. Murgel C. A. und Walton R. E. Vertical root fracture and dentin deformation in curved roots: the influence of spreader design. *Endod Dent Traumatol* 1990;6:273-278.
64. O'Reilly P. M. Management of a vertically fractured endodontically treated tooth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1985;60:208-211.
65. Obermayr G., Walton R. E., Leary J. M. und Krell K. V. Vertical root fracture and relative deformation during obturation and post cementation. *J Prosthet Dent* 1991;66:181-187.
66. Oliet S. Treating vertical root fractures. *J Endod* 1984;10:391-396.
67. Onnink P. A., Davis R. D. und Wayman B. E. An in vitro comparison of incomplete root fractures associated with three obturation techniques. *J Endod* 1994;20:32-37.

68. Peciuliene V. und Rimkuvienė J. Vertical root fractures in endodontically treated teeth: a clinical survey. *Stomatologija* 2004;6:77-80.
69. Pilo R. und Tamse A. Residual dentin thickness in mandibular premolars prepared with gates glidden and ParaPost drills. *J Prosthet Dent* 2000;83:617-623.
70. Piskin B., Aydin B. und Sarikanat M. The effect of spreader size on fracture resistance of maxillary incisor roots. *Int Endod J* 2008;41:54-59.
71. Pitts D. L., Matheny H. E. und Nicholls J. I. An in vitro study of spreader loads required to cause vertical root fracture during lateral condensation. *J Endod* 1983;9:544-550.
72. Pitts D. L. und Natkin E. Diagnosis and treatment of vertical root fractures. *J Endod* 1983;9:338-346.
73. Reeh E. S., Messer H. H. und Douglas W. H. Reduction in tooth stiffness as a result of endodontic and restorative procedures. *J Endod* 1989;15:512-516.
74. Register H. C. The physico-prosthetic crown and bridge, with reference to fundamentalis, *The Dental Cosmos* 1910;52:973-981.
75. Reuver H. Vertikale Wurzelfrakturen nach Anwendung der lateralen Kondensationstechnik. *Endodontie* 1996;5:207.
76. Ribeiro F. C., Souza-Gabriel A. E., Marchesan M. A., Alfredo E., Silva-Sousa Y. T. und Sousa-Neto M. D. Influence of different endodontic filling materials on root fracture susceptibility. *J Dent* 2008;36:69-73.
77. Roland D. D., Andelin W. E., Browning D. F., Hsu G. H. und Torabinejad M. The effect of preflaring on the rates of separation for

- 0.04 taper nickel titanium rotary instruments. J Endod 2002;28:543-545.
78. Rosen H. Cracked tooth syndrome. J Prosthet Dent 1982;47:36-43.
79. Rud J. und Omnell K. A. Root fractures due to corrosion. Diagnostic aspects. Scand J Dent Res 1970;78:397-403.
80. Sagsen B., Er O., Kahraman Y. und Akdogan G. Resistance to fracture of roots filled with three different techniques. Int Endod J 2007;40:31-35.
81. Saw L. H. und Messer H. H. Root strains associated with different obturation techniques. J Endod 1995;21:314-320.
82. Schäfer E. Wurzelkanalaufbereitungen. Dtsch Zahnarztl Z 2000;55:730-740.
83. Schäfer E. und Lohmann D. Efficiency of rotary nickel-titanium FlexMaster instruments compared with stainless steel hand k-Flexofile - Part 1. Shaping ability in simulated curved canals. Int Endod J 2002;35:505-513.
84. Schäfer E. und Lohmann D. Efficiency of rotary nickel-titanium FlexMaster instruments compared with stainless steel hand K-Flexofile - Part 2. Cleaning effectiveness and instrumentation results in severely curved root canals of extracted teeth. Int Endod J 2002;35:514-521.
85. Schmidt K. J., Walker T. L., Johnson J. D. und Nicoll B. K. Comparison of nickel-titanium and stainless-steel spreader penetration and accessory cone fit in curved canals. J Endod 2000;26:42-44.
86. Sedgley C. M. und Messer H. H. Are endodontically treated teeth more brittle? J Endod 1992;18:332-335.

87. Shull C. C., Loushine R. J. und West L. A. OR 25 A comparison of nickel titanium versus stainless steel spreaders in curved canals. J Endod 1997;23:255.
88. Sibley L. C. Management of root fracture. Oral Surg Oral Med Oral Pathol 1960:1475-1484.
89. Sinai I., Seltzer S., Soltanoff W., Goldenberg A. und Bender I. B. Biologic aspects of endodontics. II. Periapical tissue reactions to pulp extirpation. Oral Surg Oral Med Oral Pathol 1967;23:664-679.
90. Sjogren U., Hagglund B., Sundqvist G. und Wing K. Factors affecting the long-term results of endodontic treatment. J Endod 1990;16:498-504.
91. Sorensen J. A. und Martinoff J. T. Intracoronar reinforcement and coronal coverage: a study of endodontically treated teeth. J Prosthet Dent 1984;51:780-784.
92. Sornkul E. und Stannard J. G. Strength of roots before and after endodontic treatment and restoration. J Endod 1992;18:440-443.
93. Soros C., Zinelis S., Lambrianidis T. und Palaghias G. Spreader load required for vertical root fracture during lateral compaction ex vivo: evaluation of periodontal simulation and fracture load information. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2008;106:e64-70.
94. Stenner L. und Koçkapan C. Vertikale Wurzelfrakturen - eine Übersicht. Endodontie 2010;im Druck.
95. Stewart G. G. Clinical application of glass ionomer cements in endodontics: case reports. Int Endod J 1990;23:172-178.
96. Stewart G. G. The detection and treatment of vertical root fractures. J Endod 1988;14:47-53.

97. Talim S. T. und Gohil K. S. Management of coronal fractures of permanent posterior teeth. J Prosthet Dent 1974;31:172-178.
98. Tamse A. Ätiologie, Diagnose und Behandlung vertikaler Wurzelfrakturen bei endodontisch behandelten Zähnen. Endodontie 1994;3:175-184.
99. Tamse A. Iatrogenic vertical root fractures in endodontically treated teeth. Endod Dent Traumatol 1988;4:190-196.
100. Tamse A. Vertical root fractures in endodontically treated teeth: diagnostic signs and clinical management. Endodontic Topics 2006;13:84-94.
101. Tamse A., Fuss Z., Lustig J. und Kaplavi J. An evaluation of endodontically treated vertically fractured teeth. J Endod 1999;25:506-508.
102. Tamse A., Zilburg I. und Halpern J. Vertical root fractures in adjacent maxillary premolars: an endodontic-prosthetic perplexity. Int Endod J 1998;31:127-132.
103. Teixeira F. B., Teixeira E. C., Thompson J. Y. und Trope M. Fracture resistance of roots endodontically treated with a new resin filling material. J Am Dent Assoc 2004;135:646-652.
104. Telli C., Gulkan P. und Gunel H. A critical reevaluation of stresses generated during vertical and lateral condensation of gutta-percha in the root canal. Endod Dent Traumatol 1994;10:1-10.
105. Testori T., Badino M. und Castagnola M. Vertical root fractures in endodontically treated teeth: a clinical survey of 36 cases. J Endod 1993;19:87-91.

106. Trabert K. C., Caput A. A. und Abou-Rass M. Tooth fracture--a comparison of endodontic and restorative treatments. *J Endod* 1978;4:341-345.
107. Trope M. und Ray H. L. J. Resistance to fracture of endodontically treated roots. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1992;73:99-102.
108. Trope M. und Rosenberg E. S. Multidisciplinary approach to the repair of vertically fractured teeth. *J Endod* 1992;18:460-463.
109. Vertucci F. J. Management of a vertical root fracture. *J Endod* 1985;11:126-131.
110. Vire D. E. Failure of endodontically treated teeth: classification and evaluation. *J Endod* 1991;17:338-342.
111. Walton R. E., Michelich R. J. und Smith G. N. The histopathogenesis of vertical root fractures. *J Endod* 1984;10:48-56.
112. Wilcox L. R., Roskelley C. und Sutton T. The relationship of root canal enlargement to finger-spreader induced vertical root fracture. *J Endod* 1997;23:533-534.
113. Wu M. K., van der Sluis L. W. und Wesselink P. R. Comparison of mandibular premolars and canines with respect to their resistance to vertical root fracture. *J Dent* 2004;32:265-268.
114. Yeh C. J. Fatigue root fracture: a spontaneous root fracture in non-endodontically treated teeth. *Br Dent J* 1997;182:261-266.
115. Zuckerman O., Katz A., Pilo R., Tamse A. und Fuss Z. Residual dentin thickness in mesial roots of mandibular molars prepared with Lightspeed rotary instruments and Gates-Glidden reamers. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2003;96:351-355.

9 Anhang

9.1 Formeln zur Berechnung der an der Spreaderspitze wirkenden

Drücke:

I. $F_g = m \cdot g$

II. $A = \pi \cdot r^2$

III. $P = F_g \div A$

> $P = (m \cdot g) \div (\pi \cdot r^2)$

F_g : Gewichtskraft (N)

m : Masse (kg), hier Belastungsgewichte beim Füllen

g : Gravitationskraft (ms^{-2})

A : Flächeninhalt (mm^2)

r : Radius an Spreaderspitze (mm)

P : Druck (Nmm^{-2})

9.2 Chemikalienliste

- | | |
|---------|---|
| Chem. 1 | Thymol Pulver, Art.-Nr. 89330, Fluka Chemie AG, Buchs, CH |
| Chem. 2 | Methylenblaupulver für Mikroskopie, Art.-Nr. 115943, 1%-Lösung, Merck KGaA, Darmstadt, D |
| Chem. 3 | Stammlösung NaOCl, 12%, Art.-Nr. 9062.3, Carl Roth GmbH & Co. KG, Karlsruhe, D |
| Chem. 4 | Natrium-EDTA-Lösung, 16%, CH.-B.: D-20090630-05, Apotheke des Uniklinikums Gießen-Marburg, Marburg, D |

9.3 Materialliste

- | | |
|--------|--|
| Mat. 1 | Scaler Anterior, SH 6 / 77, Hu-Friedy Chicago, N. Rockwell, USA |
| Mat. 2 | Mulltupfer, Wilh. Weisweiler GmbH & Co. KG, Münster, D |
| Mat. 3 | NiTi Spreader Gr. 25 (Lot. 0907000776) und Gr. 30 (Lot. 0810003327), Länge 25 mm, VDW GmbH, München, D |

- Mat. 4 Antaeos Finger Spreader Gr. 25 (Lot. 0807000776) und Gr. 30 (Lot. 0804000463), Länge 25 mm, VDW GmbH, München, D
- Mat. 5 Stereomikroskop Stemi SV 6, Carl Zeiss AG, Oberkochen, D
- Mat. 6 Diagnodent 2095, KaVo Dental GmbH, Biberach / Riß, D
- Mat. 7 Digitales Röntgengerät Kavo IneXam 3510, KaVo Dental GmbH, Biberach / Riß, D
- Mat. 8 Speicherfolie Digora, 3 x 4 cm, KaVo Dental GmbH, Biberach / Riß, D
- Mat. 9 Gendex Digora Scanner, Gendex Dental Systems, Hamburg, D
- Mat. 10 VixWin pro, Version 1.5f, Gendex Dental Systems, Hamburg, D
- Mat. 11 Canon EOS 10D digital, Canon Inc., Tokyo, J
- Mat. 12 Endodontisches Messlineal, CLR 6, Hu-Friedy Co., Inc., Zweigniederlassung Deutschland Leimen, D
- Mat. 13 Universal-Prüfmaschine 1454, Zwick / Roell, Ulm, D
- Mat. 14 Kegelmessstumpf, V2A-Stahl, Maße siehe Abb. 3, Oskar Schaumburg GmbH, Wuppertal, D
- Mat. 15 test Xpert, Version 10.1, Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, D
- Mat. 16 Technovit 4004, HeraeusKulzer GmbH, Wehrheim, D
- Mat. 17 HORICO H 352 220 (Lot. 21782), Hopf. Ringleb & Co. GmbH & Cie., Berlin, D
- Mat. 18 KaVo / EWL K9, KaVo Dental GmbH, Biberach / Riß, D
- Mat. 19 Antaeos Flexicut Files Gr. 08 (Lot. 0811310608), Gr. 10 (Lot. 0708002373), Gr. 15 (Lot. 0706000296), Gr. 20 (Lot. 0705002884), Gr. 55 (Lot. 0605001277) und Gr. 60 (Lot. 205a031199), Länge 25 mm, VDW GmbH, Wehrheim, D
- Mat. 20 Modellierwachs rosa Spezialqualität 2500g, 1,50 mm, Sommer (Lot. 126762), Pluradent AG & Co. KG, Offenbach, D
- Mat. 21 Universal Biopsieprobengefäße, Lager des Universitätsklinikums Gießen und Marburg, Gießen, D
- Mat. 22 Panasil contact plus x-light (Lot. 90741), Kettenbach GmbH & Co. KG, Eschenburg, D

- Mat. 23 Gates Glidden Typ „G“ 180 RF, Länge 15 mm, Gr. 50 (Lot. 552020), Gr. 70 (Lot. 579203) und Gr. 90 (Lot. 941933), Gebr. Brasseler GmbH und Co. KG, Lemgo, D
- Mat. 24 E-Master, VDW GmbH, München, D
- Mat. 25 FlexMaster NiTi Files, Gr. 02/15 (Lot. 0812310618), Gr. 02/20 (Lot. 0901310623), Gr. 02/25 (Lot. 0901310623), Gr. 02/30 (Lot. 0812310620), Gr. 02/35 (Lot. 0901310623), Gr. 02/40 (Lot. 0901310623), Gr. 02/45 (Lot. 0812310620), Gr. 02/50 (Lot. 0811310605), Gr. 02/60 (Lot. 0812310602), Gr. 04/15 (Lot. 0803310556), Gr. 04/20 (Lot. 0901310623), Gr. 04/25 (Lot. 0711310516), Gr. 04/30 (Lot. 0812310618), Gr. 04/35 (Lot. 0901310623) und Gr. 04/40 (Lot. 0810310610), Länge 21 mm, VDW GmbH, München, D
- Mat. 26 roeko Papierspitzen, Gr. 15 – 40 (Lot. 103052), Länge 27 mm, Coltène / Whaledent, Langenau, D
- Mat. 27 Guttapercha points Gr. 15 (Lot. 010908), Gr. 20 (Lot. 020408) und Gr. 60 (Lot.010309), DENTSPLY DeTrey GmbH, Konstanz, D
- Mat. 28 AH Plus (Lot. 0901001246), DENTSPLY DeTrey GmbH, Konstanz, D
- Mat. 29 Endoexkavator, EXCGL2, Hu-Friedy Chicago, N. Rockwell, USA
- Mat. 30 OsiriX Version 2.7.5, Open Source Software, OsiriX Foundation

9.4 Randomisierungsliste

Abkürzungen:

Inst.-Größe: Größe des verwendeten Spreaders

Bel.-Gewicht: Kondensationsgewicht (kg)

NiTi: Nickel-Titan

STS: Edelstahl

Probe	Material	Inst.-Größe	Bel.-Gewicht
1	NiTi	25	1
2	NiTi	25	3
3	STS	30	3
4	NiTi	30	3
5	NiTi	30	1
6	NiTi	25	5
7	NiTi	25	1
8	NiTi	25	1
9	STS	25	1
10	STS	30	1
11	STS	30	1
12	NiTi	30	5
13	STS	25	3
14	NiTi	30	3
15	NiTi	25	3
16	NiTi	30	3
17	NiTi	30	5
18	STS	30	1
19	NiTi	30	1
20	NiTi	25	3
21	NiTi	25	5
22	NiTi	30	5
23	STS	25	5
24	STS	25	3
25	STS	30	3
26	NiTi	30	3
27	STS	25	1
28	STS	25	5
29	NiTi	30	5
30	STS	30	3
31	STS	30	1
32	STS	25	5
33	STS	30	1
34	NiTi	25	3
35	NiTi	30	1
36	STS	30	1

37	STS	25	1
38	STS	25	3
39	STS	30	5
40	NiTi	25	1
41	STS	25	3
42	STS	30	5
43	NiTi	25	1
44	NiTi	25	3
45	NiTi	30	1
46	NiTi	25	5
47	STS	30	1
48	NiTi	25	5
49	STS	30	5
50	NiTi	30	1
51	NiTi	30	5
52	STS	30	3
53	STS	25	5
54	STS	25	5
55	STS	25	1
56	STS	30	5
57	STS	30	3
58	STS	25	3
59	STS	30	3
60	STS	30	1
61	NiTi	30	5
62	NiTi	30	1
63	NiTi	30	3
64	NiTi	30	5
65	NiTi	30	1
66	NiTi	25	3
67	NiTi	25	1
68	STS	25	1
69	NiTi	30	3
70	NiTi	30	5
71	NiTi	25	1
72	NiTi	25	1
73	STS	25	5
74	NiTi	25	5
75	STS	30	5
76	NiTi	25	5
77	NiTi	30	3
78	NiTi	25	3
79	STS	25	5
80	STS	25	1
81	STS	30	3
82	STS	25	1
83	STS	30	5
84	NiTi	30	1

85	STS	25	5
86	STS	30	5
87	STS	25	3
88	STS	25	1
89	NiTi	25	5
90	NiTi	25	5
91	STS	25	3
92	STS	25	3
93	STS	30	3
94	NiTi	30	3
95	NiTi	25	3
96	STS	30	5

9.5 Ergebnisliste

Abkürzungen:

Inst.-Größe: Größe des verwendeten Spreaders

Bel.-Gewicht: Kondensationsgewicht (kg)

NiTi: Nickel-Titan STS: Edelstahl

Kraft: Kraft bei Fraktur (N)

Rohdaten 1 NiTi 25:

Probe	Zahn	Material	Inst.-Größe	Bel.-Gewicht	Kraft
1	1	NiTi	25	1	164,92
2	40	NiTi	25	1	376,64
3	43	NiTi	25	1	251,81
4	67	NiTi	25	1	315,39
5	71	NiTi	25	1	395,65
6	72	NiTi	25	1	382,29
7	111	NiTi	25	1	165,74
8	112	NiTi	25	1	236,45

Rohdaten 3 NiTi 25:

Probe	Zahn	Material	Inst.-Größe	Bel.-Gewicht	Kraft
9	2	NiTi	25	3	211,98
10	20	NiTi	25	3	305,11
11	34	NiTi	25	3	351,65
12	44	NiTi	25	3	358,77
13	66	NiTi	25	3	329,29
14	101	NiTi	25	3	388,30
15	102	NiTi	25	3	345,80
16	114	NiTi	25	3	305,11

Rohdaten 5 NiTi 25:

Probe	Zahn	Material	Inst.-Größe	Bel.-Gewicht	Kraft
17	6	NiTi	25	5	328,26
18	21	NiTi	25	5	400,48
19	46	NiTi	25	5	282,01
20	48	NiTi	25	5	223,63
21	76	NiTi	25	5	233,69
22	98	NiTi	25	5	291,32
23	110	NiTi	25	5	268,39
24	116	NiTi	25	5	290,80

Rohdaten 1 NiTi 30:

Probe	Zahn	Material	Inst.-Größe	Bel.-Gewicht	Kraft
25	5	NiTi	30	1	313,98
26	19	NiTi	30	1	357,14
27	50	NiTi	30	1	388,12
28	62	NiTi	30	1	401,63
29	65	NiTi	30	1	225,86
30	106	NiTi	30	1	385,71
31	109	NiTi	30	1	296,22
32	118	NiTi	30	1	319,81

Rohdaten 3 NiTi 30:

Probe	Zahn	Material	Inst.-Größe	Bel.-Gewicht	Kraft
33	4	NiTi	30	3	316,92
34	26	NiTi	30	3	418,37
35	63	NiTi	30	3	290,91
36	69	NiTi	30	3	503,62
37	77	NiTi	30	3	280,98
38	94	NiTi	30	3	219,67
39	105	NiTi	30	3	653,44
40	122	NiTi	30	3	316,09

Rohdaten 5 NiTi 30:

Probe	Zahn	Material	Inst.-Größe	Bel.-Gewicht	Kraft
41	17	NiTi	30	5	349,57
42	29	NiTi	30	5	415,93
43	61	NiTi	30	5	262,79
44	64	NiTi	30	5	194,61
45	70	NiTi	30	5	492,55
46	108	NiTi	30	5	383,29
47	119	NiTi	30	5	183,10
48	120	NiTi	30	5	257,83

Rohdaten 1 STS 25:

Probe	Zahn	Material	Inst.-Größe	Bel.-Gewicht	Kraft
49	9	STS	25	1	422,71
50	27	STS	25	1	450,21
51	37	STS	25	1	262,04
52	55	STS	25	1	250,06
53	68	STS	25	1	282,45
54	80	STS	25	1	556,41
55	82	STS	25	1	400,97
56	117	STS	25	1	334,36

Rohdaten 3 STS 25:

Probe	Zahn	Material	Inst.-Größe	Bel.-Gewicht	Kraft
57	13	STS	25	3	276,87
58	24	STS	25	3	467,80
59	58	STS	25	3	475,82
60	91	STS	25	3	357,67
61	92	STS	25	3	654,62
62	99	STS	25	3	234,14
63	107	STS	25	3	338,33
64	113	STS	25	3	465,09

Rohdaten 5 STS 25:

Probe	Zahn	Material	Inst.-Größe	Bel.-Gewicht	Kraft
65	28	STS	25	5	221,54
66	32	STS	25	5	310,22
67	53	STS	25	5	262,01
68	54	STS	25	5	312,64
69	73	STS	25	5	190,12
70	85	STS	25	5	159,58
71	103	STS	25	5	432,87
72	124	STS	25	5	372,81

Rohdaten 1 STS 30:

Probe	Zahn	Material	Inst.-Größe	Bel.-Gewicht	Kraft
73	10	STS	30	1	481,89
74	11	STS	30	1	251,67
75	18	STS	30	1	300,05
76	36	STS	30	1	232,48
77	47	STS	30	1	248,82
78	115	STS	30	1	449,16
79	121	STS	30	1	651,42
80	123	STS	30	1	542,43

Rohdaten 3 STS 30:

Probe	Zahn	Material	Inst.-Größe	Bel.-Gewicht	Kraft
81	3	STS	30	3	373,50
82	25	STS	30	3	279,44
83	52	STS	30	3	222,26
84	57	STS	30	3	378,85
85	59	STS	30	3	417,75
86	81	STS	30	3	262,33
87	93	STS	30	3	266,65
88	97	STS	30	3	236,58

Rohdaten 5 STS 30:

Probe	Zahn	Material	Inst.-Größe	Bel.-Gewicht	Kraft
89	39	STS	30	5	439,27
90	42	STS	30	5	219,84
91	49	STS	30	5	318,09
92	56	STS	30	5	465,60
93	75	STS	30	5	279,15
94	96	STS	30	5	245,57
95	100	STS	30	5	249,80
96	104	STS	30	5	426,66

9.6 Tabellen zur Statistik

Abkürzungen

Inst.-Größe: Größe des verwendeten Spreaders

Bel.-Gewicht: Kondensationsgewicht (kg)

NiTi: Nickel-Titan

STS: Edelstahl

Kraft: Kraft bei Fraktur (N)

n: Anzahl

9.6.1 Univariate Varianzanalyse

Zwischensubjektfaktoren

		N
Material	NiTi	48
	STS	48
Inst.-Größe	25	48
	30	48
Bel.-Gewicht	1	32
	3	32
	5	32

Tests der Zwischensubjekteffekte

Abhängige Variable: Kraft

Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Korrigiertes Modell	162843,486	11	14803,953	1,372	0,201
Konstanter Term	1,078*10 ⁷	1	1,078*10 ⁷	998,656	0,000
Material	17576,553	1	17576,553	1,629	0,205
Inst.-Größe	6217,499	1	6217,499	0,576	0,450
Bel.-Gewicht	43589,258	2	21794,629	2,020	0,139
Material * Inst.-Größe	16979,844	1	16979,844	1,574	0,213
Material * Bel.-Gewicht	23479,962	2	11739,981	1,088	0,342
Inst.-Größe * Bel.-Gewicht	22092,817	2	11046,409	1,024	0,364
Material * Inst.-Größe * Bel.-Gewicht	32907,554	2	16453,777	1,525	0,224
Fehler	906325,175	84	10789,585		
Gesamt	1,184*10 ⁷	96			
Korrigierte Gesamtvariation	1069168,661	95			

9.6.2 Geschätzte Randmittel

1. Material

Abhängige Variable: Kraft

Material	Mittelwert	Standardfehler	95%-Konfidenzintervall	
			Untergrenze	Obergrenze
NiTi	321,492	14,993	291,677	351,307
STS	348,554	14,993	318,739	378,369

2. Inst.-Größe

Abhängige Variable: Kraft

Inst.-Größe	Mittelwert	Standardfehler	95%-Konfidenzintervall	
			Untergrenze	Obergrenze
25	326,975	14,993	297,161	356,790
30	343,071	14,993	313,256	372,886

3. Bel.-Gewicht

Abhängige Variable: Kraft

Bel.-Gewicht	Mittelwert	Standardfehler	95%-Konfidenzintervall	
			Untergrenze	Obergrenze
1	346,703	18,362	310,187	383,218
3	353,241	18,362	316,725	389,756
5	305,126	18,362	268,610	341,641

4. Material * Inst.-Größe

Abhängige Variable: Kraft

Material	Inst.-Größe	Mittelwert	Standardfehler	95%-Konfidenzintervall	
				Untergrenze	Obergrenze
NiTi	25	300,145	21,203	257,981	342,309
	30	342,839	21,203	300,675	385,004
STS	25	353,806	21,203	311,641	395,970
	30	343,302	21,203	301,138	385,467

5. Material * Bel.-Gewicht

Abhängige Variable: Kraft

Material	Bel.-Gewicht	Mittelwert	Standardfehler	95%-Konfidenzintervall	
				Untergrenze	Obergrenze
NiTi	1	311,085	25,968	259,444	362,726
	3	349,751	25,968	298,110	401,391
	5	303,641	25,968	252,000	355,281
STS	1	382,321	25,968	330,680	433,961
	3	356,731	25,968	305,091	408,372
	5	306,611	25,968	254,970	358,251

6. Inst.-Größe * Bel.-Gewicht

Abhängige Variable: Kraft

Inst.-Größe	Bel.-Gewicht	Mittelwert	Stand.-fehler	95%-Konfidenzintervall	
				Untergrenze	Obergrenze
25	1	328,006	25,968	276,366	379,647
	3	366,647	25,968	315,006	418,288
	5	286,273	25,968	234,632	337,914
30	1	365,399	25,968	313,759	417,040

	3	339,835	25,968	288,194	391,476
	5	323,978	25,968	272,337	375,619

7. Material * Inst.-Größe * Bel.-Gewicht

Abhängige Variable: Kraft

Material	Inst.- Größe	Bel.- Gewicht	Mittelwert	Stand.- fehler	95%-Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
NiTi	25	1	286,111	36,725	213,080	359,142
		3	324,501	36,725	251,470	397,532
		5	289,822	36,725	216,792	362,853
	30	1	336,059	36,725	263,028	409,090
		3	375,000	36,725	301,969	448,031
		5	317,459	36,725	244,428	390,490
STS	25	1	369,901	36,725	296,870	442,932
		3	408,792	36,725	335,762	481,823
		5	282,724	36,725	209,693	355,755
	30	1	394,740	36,725	321,709	467,771
		3	304,670	36,725	231,639	377,701
		5	330,497	36,725	257,467	403,528

10 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. C. Koçkapan für das Überlassen des Dissertationsthemas, für die zu jeder Zeit hilfreiche, teils kritische und immer konstruktive Hilfe sowie für die von ihm investierte Zeit.

Des Weiteren möchte ich Frau Birgit Meier und Herrn Ulrich Heun für die Hilfe bei der Versuchsdurchführung danken. Sie waren stets für mich da und standen mir unterstützend zur Seite. Für die statistische Beratung danke ich Herrn Wolfgang Pabst von der Arbeitsgruppe Medizinische Statistik der Justus-Liebig Universität.

Auch meinen Kolleginnen und Kollegen möchte ich von Herzen danken.

Nicht zuletzt gilt mein persönlicher Dank meiner Familie, vor allem meinen Eltern, die mir meinen bisherigen Lebens- und Berufsweg ermöglicht und mich auf großen Teilen dieses Weges begleitet haben. Nicht vergessen werden sollen meine Freunde, die teils als Lektoren, teils als unermüdliche Unterstützung zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Abschließend möchte ich auch Dir, liebe Maike, für Deine Geduld und die aufbauenden und ermunternden Worte von Herzen danken.