

Aus dem Medizinischen Zentrum für
Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
Geschäftsführender Direktor Prof. Dr. Roland Frankenberger

Des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg
Poliklinik für Zahnerhaltung

**Nachweis der Penetrationstiefe
von BioRoot - Sealer in Dentintubuli
unter Anwendung verschiedener Obturationsmethoden**

Inaugurale Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin
dem Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg

Vorgelegt von

Sven Wrobel

aus Düsseldorf

Marburg 2023

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg

am: 08.03.2023

Gedruckt mit der Genehmigung des Fachbereichs Medizin

Dekanin: Prof. Dr. Denise Hilfiker-Kleiner

Referent: Priv.-Doz. Dr. Matthias J. Roggendorf

1. Korreferent: Prof. Dr. Ulrich Lotzmann

Meinen Eltern gewidmet

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Endodontologie	1
1.2 Wurzelkanalbehandlung	1
1.2.1 Pathogenese.....	1
1.2.2 Wurzelkanalaufbereitung	2
1.2.3 Wurzelkanalspülung	3
1.2.3.1 Natriumhypochlorit	3
1.2.3.2 EDTA	4
1.2.4 Wurzelkanalfüllmaterialien	5
1.2.4.1 Guttapercha	5
1.2.4.2 Sealereigenschaften	6
1.2.4.3 Sealer.....	8
1.3 Wurzelkanalfülltechniken.....	12
1.3.1 Laterale Kondensation.....	12
1.3.2 Einstift-Technik (Single-Cone-Technik, SCT)	13
1.3.3 Erweiterte Apexifikation	13
1.4 Zielsetzung und Nullhypothese	15
2 Material und Methoden.....	16
2.1 Studie.....	16
2.2 Anforderungen an die Probezähne	16
2.3 Studiendurchführung.....	17
2.3.1 Auswahl des Studienmaterials.....	18
2.3.2 Aufbereitung der Wurzelkanäle	18
2.3.3 Einteilung der Zähne in Untersuchungsgruppen.....	20
2.3.4 Vorbereitung des Wurzelfüllmaterial	20
2.3.5 Randomisierte Auswahl der Zähne.....	22
2.3.6 Spülung der Wurzelkanäle.....	23

2.3.7	Obturation der Wurzelkanäle	23
2.3.7.1	Gruppe 1 (<i>AH Plus</i> , laterale Kondensation)	23
2.3.7.2	Gruppe 2 (<i>BioRoot</i> + <i>Biodentine</i> , in Inkrementtechnik)	24
2.3.7.3	Gruppe 3 (<i>BioRoot</i> , laterale Kondensation).....	24
2.3.7.4	Gruppe 4 (<i>BioRoot</i> , Single-Cone-Technik).....	25
2.3.8	Lagerung	25
2.3.9	Herstellung der Proben.....	25
2.3.10	Fluoreszenzaufnahmen	28
2.3.11	Auswertungsverfahren.....	29
3	Ergebnisse	30
3.1	Nicht parametrische Analysen.....	30
3.1.1	Kruskal-Wallis-Test.....	30
3.1.2	Mann-Whitney-U-Test.....	31
3.1.3	Friedman-Test	32
3.1.4	Wilcoxon-Test.....	33
4	Diskussion.....	35
4.1	Diskussion von Material und Methoden.....	35
4.1.1	Auswahl der Zähne und des Studientyps	35
4.1.2	Konfokales Laserscanning-Mikroskop (CLSM)	37
4.1.3	Wurzelkanalaufbereitung	38
4.1.4	Spülprotokoll	38
4.1.5	Wurzelkanalfülltechniken	39
4.2	Diskussion der Ergebnisse	41
5	Zusammenfassung	46
5.1	Ziel der Studie	46
5.2	Material und Methoden.....	46
5.3	Ergebnisse	47
5.4	Schlussfolgerung.....	47
6	Summary	48
6.1	Aim	48
6.2	Materials and Methods	48
6.3	Results	49
6.4	Conclusion	49

7	Quellenverzeichnis	50
8	Anhang	67
8.1	Lebenslauf.....	67
8.2	Verzeichnis der akademischen Lehrenden	68
8.3	Danksagung	69

Abkürzungsverzeichnis

AAE	American Association of Endodontists
BC	Bioceramic
bspw.	beispielsweise
Ca ²⁺	Kalziumion
CLSM	Konfokales Laserscanning Mikroskop
CO	Kohlenstoffmonoxid
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn- Mund- und Kieferheilkunde
di-	zwei
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure/ Ethylendiamintetraacetat
ESE	European Society of Endodontology
Fa	Firma
Iso/ #	International Organization for Standardization
LC	Laterale Kondensation
MTA	Mineraltrioxidaggregat
NaCl	Natriumchlorid
NaN ₃	Natriumazid
NaOCl	Natriumhypochlorit
Ncm	Newtonzentimeter
Ni-Ti	Nickel-Titan
Nm	Newtonmeter
OH ⁻	Hydroxidion
pH	Potential des Wasserstoffs
REM	Rasterelektronenmikroskop

RhBITC	Rhodamin B-Isothiocyanat
SCT	Single-Cone-Technik
SEM	Scanning Electron Microscope
UpM	Umdrehungen pro Minute
z.B.	zum Beispiel
ZOE	Zinkoxid-Eugenol
α -Phase	alpha-Phase

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Flowchart der Studiendurchführung	17
Abb. 2: F360-Feilen in den Größen 25, 35 und 45 (alle 4% Taper)	19
Abb. 3: Einwiegen des Fluoreszenzfarbstoffes mittels einer Semimikrowaage	21
Abb. 4: BioRoot RC-Sealer mit Pulver, Flüssigkeit in der Phiole sowie Messlöffel	24
Abb. 5: Exaktes Vermessen der Schnittstärke.....	26
Abb. 6: Sägeprozess der Proben.....	26
Abb. 7: Schnittproben der Untersuchungsgruppen.....	27
Abb. 8: Laterale Kondensation Querschnitt	27
Abb. 9: Single-Cone-Technik Querschnitt.....	27
Abb. 10: CLSM - Schnittprobe der Untersuchungsgruppe Biodentine	28
Abb. 11: Boxplotdiagramm der Penetrationstiefen aller Gruppen.....	34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Randomisierte Einteilung der Zähne in Materialgruppen	22
Tabelle 2: Deskriptive Datenanalyse	30
Tabelle 3: Signifikanzwerte Mann-Whitney-U-Test apikal	31
Tabelle 4: Signifikanzwerte Mann-Whitney-U-Test mittig	31
Tabelle 5: Signifikanzwerte Mann-Whitney-U-Test koronal	32
Tabelle 6: Ergebnisse paarweiser Vergleiche zwischen den Ebenen aller Untersuchungsgruppen	33

1 Einleitung

1.1 Endodontologie

Die Endodontologie befasst sich mit der Lehre, Behandlung und Vermeidung von Erkrankungen des Endodonts (Pulpa-Dentin-Komplex) sowie des periapikalen Gewebes. Es soll ein langfristiger Erhalt des stomatognathen Systems erreicht werden [31, 41, 52]. Bereits 1990 und 2017 konnten Sjögren et al. sowie Chercoles-Ruiz et al. zeigen, dass die Wurzelkanalbehandlung nach 10 Jahren Erfolgsquoten bis zu 90% und höher ausweist [30, 150]. Dieser Erfolg hängt von vielen Faktoren, wie z.B. dem Debridement, einem adäquaten und effizienten Spülprotokoll sowie einer dichten Kanalfüllung ab [11, 13, 47, 56, 82]. Genauer betrachtet kann eine Behandlung und der langfristige Erhalt des stomatognathen Systems nur dann erfolgen, wenn eine Reinfektion des behandelten Wurzelkanals verhindert werden kann [31]. Dies wird nur durch eine sorgfältige Wurzelkanalaufbereitung, Spülung und anschließende Füllung mit bspw. biokompatiblen Wurzelkanalfüllungsmaterialien erreicht [73].

1.2 Wurzelkanalbehandlung

1.2.1 Pathogenese

Das Wurzelkanalsystem ist in seinem gesunden und intakten Zustand frei von pathogenen Mikroorganismen. Im Gegensatz zur Mundhöhle hat das Wurzelkanalsystem keine physiologische Mikrobiota und jeder hier nachgewiesene Mikroorganismus kann als potenzielles Pathogen betrachtet werden [46]. Sobald Mikroorganismen ihren Weg in das Wurzelkanalsystem gefunden haben, können die Folgen von einer einfachen reversiblen Pulpitis bis hin zur Nekrose des Pulpagewebes und schließlich zur Bildung einer periapikalen Läsion reichen, der apikalen Parodontitis [105]. Eine Pulpanekrose ohne Beteiligung von Mikroorganismen, führt nicht zwingend zu einer apikalen

Parodontitis [59]. Eine nekrotische Pulpa, entstanden durch z. B. mechanische oder thermische Traumata, kann ihren "sterilen" Status kaum aufrechterhalten, da ihr die Durchblutung und die Abwehrmechanismen fehlen, um eindringende Mikroorganismen zu eliminieren. Ein infiziertes Wurzelkanalsystem ist eine Voraussetzung für die Entstehung einer apikalen Parodontitis [105]. Dies ist eine entzündliche Reaktion des periapikalen Parodontalgewebes auf das infizierte Wurzelkanalsystem. Es bildet sich eine periapikale Osteolyse, verursacht durch die toxische Reizung, die vom infizierten Wurzelkanal ausgeht, sowie durch die Immunantwort des Wirts.

Des Weiteren ist eine Vielzahl anderer Faktoren für eine Wurzelkanalbehandlung verantwortlich. Chemische, mechanische und thermische Noxen können ebenso zur Schädigung der Pulpa führen, ebenso eine Mikroleakage an Wurzelkanalfüllungen [82]. Nicht zu vernachlässigen ist die iatrogen verursachte Erkrankung des Pulpa-Dentin-Komplexes [15].

1.2.2 Wurzelkanalaufbereitung

Die Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (DGZMK), die European Society of Endodontology (ESE) als auch die American Association of Endodontists (AAE) definieren die Wurzelkanalaufbereitung als eine dem ursprünglichen Kanal anatomisch ähnliche Präparation mit gleichzeitiger Reinigung des Kanalsystems [2, 41, 52]. Dieser Vorgehensweise lässt sich in mehrere Arbeitsschritte aufteilen. Hier sind zu nennen:

1. Zugangskavität schaffen
2. Kanaleingangsdarstellung
3. Arbeitslängenbestimmung
4. Spülung des Kanalsystems
5. Wurzelkanalaufbereitung (Formgebung)

Da die ersten drei Punkte nicht zum Ergebnis dieser hier durchgeführten Forschungsarbeit beitragen, werden sie nicht weiter erläutert.

1.2.3 Wurzelkanalspülung

Bei infizierten Wurzelkanälen sind die chemomechanische Reinigung und Formung des Wurzelkanalsystems zur Beseitigung oder Reduzierung der Bakterienpopulationen eines der Hauptziele für eine erfolgreiche endodontische Behandlung [73, 107]. Vollständig sterile Bedingungen sind allein durch die Formung des Kanals nicht möglich. Selbst bei sorgfältiger Durchführung kann die mechanische Aufbereitung große Bereiche (>35 %) der Kanalwände, insbesondere im apikalen Drittel der Wurzel, nicht erreichen [21, 120, 121]. Daher stellt die Spülung bei der Wurzelkanalaufbereitung einen großen Teilbereich dar. Die Eigenschaften einer Wurzelkanalspüllösung müssen ein breites Aufgabenspektrum abdecken. Dazu zählen Mikroorganismen aus dem Wurzelkanalsystem zu eliminieren, auch in Dentintubuli, in welche später der Sealer penetriert. Weitere Aufgaben sind die Smearlayer-Entfernung, Gewebeauflösung und Spülung von kontaminierten Ablagerungen, die sich während der Wurzelkanalaufbereitung ansammeln. Außerdem sollten die Wurzelkanalspülmittel biokompatibel mit der Mundschleimhaut sein. Es werden eine Vielzahl von Wurzelkanalspüllösungen verwendet, darunter Säuren (Zitronensäure und Phosphorsäure), Chelatbildner (EDTA), proteolytische Enzyme, alkalische Lösungen (Natriumhypochlorit, Natriumhydroxid, Harnstoff und Kaliumhydroxid), Oxidationsmittel (Wasserstoffperoxide), lokale anästhetische Lösungen und normale Kochsalzlösung [34].

1.2.3.1 Natriumhypochlorit

Natriumhypochlorit (NaOCl) ist die am häufigsten verwendete Wurzelkanalspüllösung. Sie wirkt antiseptisch und löst organische Bestandteile im Gewebe auf. Die Konzentrationen von 0,5 % bis 5,25 % variieren [12, 26]. Das

freie Chlor in NaOCl löst vitales und nekrotisches Gewebe auf, indem es Proteine in Aminosäuren aufspaltet. Die Reduktion der Konzentration der Lösung verringert ihre Toxizität, die antibakterielle Wirkung und die Fähigkeit, Gewebe aufzulösen. Eine Erhöhung des Volumens, der Konzentration oder eine Erwärmung der Lösung erhöht ihre Wirksamkeit bei der Wurzelkanalspülung [26, 155]. Zu den Vorteilen von NaOCl gehört seine Fähigkeit, im Wurzelkanalsystem vorhandene organische Anteile des Gewebes aufzulösen. Des Weiteren ist es verhältnismäßig kostengünstig [73]. Die größten Nachteile von NaOCl sind seine Zytotoxizität bei der Injektion in periradikuläres Gewebe und die Eigenschaft Korrosion an metallischem Zahnersatz zu verursachen [115]. Weitere negative Aspekte sind, die mittels NaOCl-Spülung nicht erfolgende Entfernung anorganischer Anteile des Smearlayers sowie auch, je nach Konzentration die nicht vollständige Entfernung von Bakterien [98, 145, 149].

1.2.3.2 EDTA

Chelatbildner wie Ethylendiamintetraacetat (EDTA), bilden lösliche Komplexmoleküle mit Metallionen, um die letztgenannten zu inaktivieren, so dass sie nicht mit anderen Elementen oder Ionen reagieren können [142]. Folglich sollen keine Ausfällungen oder Ablagerungen gebildet werden. In der Zahnmedizin binden Chelatbildner Kalzium, um es durch Spülung aus dem Kanal transportieren zu können. Der in der Endodontie am häufigsten verwendete Chelatbildner ist EDTA. Der Smearlayer, welcher die Dentinkanälchen bedeckt, entsteht während der Instrumentierung und setzt sich aus Dentin, Flüssigkeit der Spülmittel und Gewebetrümmern zusammen [133]. Die Entfernung des Smearlayers von der Wurzelkanalwand ist folglich ein wichtiger Schritt in der Endodontie. Ein Grund dafür ist, dass der endodontische Sealer in die Dentintubuli penetrieren kann, und so eine gute Retention der Wurzelkanalfüllung erzeugt [61, 83]. Des Weiteren soll eine suffiziente Abdichtung des Kanals erreicht werden. Zusätzlich können durch die Entfernung der Schmierschicht und die damit verbundene Erhöhung der Dentinpermeabilität Bakterien freigelegt werden, um abschließend diese mit NaOCl-Spülung zu entfernen [33].

1.2.4 Wurzelkanalfüllmaterialien

1.2.4.1 Guttapercha

Das am häufigsten verwendete feste oder stopfbare Obturationsmaterial ist Guttapercha (Trans-Polyisopren). Es wird seit weit über 100 Jahren in der Endodontie als Kernfüllungswerkstoff verwendet. Das in der Zahnmedizin verwendete Guttaperchamaterial setzt sich aus ca. 19-22% Trans-Poly-Isopren und 59-75% Zinkoxid-Füllstoff mit weiteren Zusätzen zusammen. Zu den Zusatzstoffen gehören Wachse oder Harze, die die Plastizität des Materials steigern, und Metallsalze, welche zur Erhöhung der Radioopazität des Materials eingesetzt werden. Die genaue Zusammensetzung der handelsüblichen Produkte variiert von Hersteller zu Hersteller [166].

Die stereochemische Formel von Guttapercha ist das Transiomer des Naturkautschuks und existiert in drei verschiedenen Formen; zwei kristalline (α und β) und eine amorphe Form. Alle drei Aspekte spielen bei der Wurzelkanalobturation eine Rolle. Das aus der Natur gewonnene Guttapercha besteht hauptsächlich aus der α -Phase, während die in handelsüblichen Guttapercha-Kegeln enthaltene Guttapercha hauptsächlich als β -Phase vorliegt. Diese wird durch Erhitzen auf 42-49°C in die α -Phase umgewandelt. Eine weitere Erwärmung auf 53°C bis 59°C führt zum Verlust der kristallinen Form und zur Bildung einer amorphen Phase [141]. Die Relevanz dieser strukturellen Veränderungen liegt darin, dass sie mit volumetrischen Veränderungen verbunden sind, die wiederum die klinischen Abläufe bei der Obturation beeinflussen.

Zusammengefasst weist Guttapercha sehr gute Eigenschaften für ein Wurzelkanalfüllmaterial auf. Es ist nicht toxisch, sehr preiswert und kann durch seine Thermoplastizität in unterschiedlichen Füllmethoden genutzt werden. Trotz der positiven Merkmale von Guttapercha, kann allein keine suffiziente Abdichtung des Wurzelkanals erzeugt werden [151, 171]. Es werden ergänzend Sealer zur Obturation empfohlen [42].

1.2.4.2 Sealereigenschaften

Eine Wurzelkanalfüllung besteht hauptsächlich aus zwei Materialien: einem Kernmaterial "Guttapercha" und einer Versiegelungspaste, dem "Sealer". Laut Grossman et al. 1978 [60] sollte der ideale Sealer folgende Eigenschaften aufweisen:

- einfache Applizierbarkeit
- gute Abdichtung
- gute Röntgenopazität
- geringe Schrumpfung
- ausreichende Verarbeitungszeit
- bakterizide Eigenschaften
- nicht zahnverfärbend
- biokompatibel
- zahnschonend
- Sterilität
- gute Revidierbarkeit

Alle aktuellen Obturationstechniken verwenden Sealer, um das Füllungsmaterial versiegelnd zu ergänzen [117]. Allerdings hat bis heute noch kein Sealer sämtliche Kriterien nach Grossman erfüllen können. Er füllt sowohl den Raum zwischen dem Wurzelfüllmaterial als auch den des Wurzel Dentins aus [172]. Des Weiteren penetriert er in die akzessorischen Kanäle. Dies hängt auch von der benetzten Fläche des Dentins durch den Sealer ab. Wenn eine Grenzfläche zwischen einer Flüssigkeit (Sealer) und einem Festkörper (Dentin) besteht, wird der Winkel zwischen der Oberfläche der Flüssigkeit und dem Umriss der Kontaktfläche als Kontaktwinkel bezeichnet. Der Kontaktwinkel (Benetzungswinkel) ist ein Maß für die Benetzbarkeit eines Festkörpers durch eine Flüssigkeit. Im Falle einer vollständigen Benetzung (Ausbreitung) beträgt der Kontaktwinkel 0° . Zwischen 0° und 90° ist der Festkörper benetzbar, über 90° ist er nicht benetzbar [162]. Bei ultrahydrophoben Materialien, mit dem sogenannten Lotuseffekt, nähert sich der Kontaktwinkel der theoretischen Grenze von 180° an. Ein geringer Winkel ist bei Sealern für den Haftverbund und die Abdichtung erwünscht [174, 179].

Durch diese Fülleigenschaften wird eine dreidimensionale suffiziente Versiegelung erreicht. Grundsätzlich haben Sealer die Fähigkeit, eine Verbindung zwischen den Materialien und der Dentinstruktur herzustellen [40]. Sie verhindern somit eine Mikroleakage, welche eine Reinfektion des Kanals zu Folge hat [41, 82]. Weitere Merkmale wie Biokompatibilität werden derzeit noch intensiv diskutiert und untersucht. Einige Studien zeigten eine kontinuierliche zytotoxische Wirkung des Sealers (*AH Plus*), andere hingegen belegten nur eine vierstündige Toxizität während der flüssigen Phase und wiederum andere Untersuchungen wiesen keine zytotoxische Wirkung nach [10, 23, 79, 153]. Nicht außer Acht zu lassen ist seine bakterizide Wirkung, welche zur Rückbildung von periapikalen Läsionen beiträgt [69].

Über die Jahre wurde eine Reihe von Materialien entwickelt, die nach ihrer chemischen Zusammensetzung und Struktur in folgende Klassen eingeteilt werden können: Zinkoxid-Eugenol-Basis, Epoxidharzbasis, Glasionomer-Basis, Silikon-Basis, Kalziumhydroxid-Basis und bioaktive endodontische Sealer. Wie bereits erwähnt, ist die Biokompatibilität eine der wichtigsten Eigenschaften von

Wurzelkanalsealern, da diese Materialien in direkten Kontakt mit periradikulären Geweben kommen. Diese Biokompatibilität entspricht der Fähigkeit, in der Anwendung eine angemessene Gewebereaktion zu erzielen, d. h. bei Kontakt keine zytotoxischen Reaktionen hervorzurufen [170].

1.2.4.3 Sealer

1.2.4.3.1 Zinkoxid-Eugenol-Sealer (ZOE)

ZOE-Sealer sind seit ihrer Entwicklung aufgrund ihres Langzeiterfolgs ein Standard in der Endodontie gewesen. Sie enthalten Zinkoxidpulver und flüssiges Eugenol, ein ätherisches Öl, das aus Nelken gewonnen wird. Wenn sie gemischt und in feuchtes Wurzelentin eingebracht werden, formen Zinkoxid und Eugenol einen Komplex, wodurch ein amorphes Gel gebildet wird. Restliches Zinkoxidpulver verbleibt im Gel und bildet eine starre Matrix. Einige dieser Pulver-Flüssigkeits-Gemische enthalten Silber in der Pulverkomponente (Kerr-Formel), was zu einer dunklen Verfärbung der Zähne führen kann. Um dieses Problem zu lösen, wurden silberfreie Produkte entwickelt, die eine Verfärbung vermeiden. Studien zeigten, dass ZOE-Sealer kaum oder keinen Haftverbund mit dem Wurzelentin eingehen [156].

1.2.4.3.2 Epoxidharzbasis-Sealer

Sealer auf Epoxidharzbasis, wie *AH 26* und *AH Plus* (Dentsply Sirona), bestehen aus Epoxidharzen sowie Aminen und härten durch eine Additionsreaktion zwischen Epoxidgruppen, die an Epoxidharze und Amine gebunden sind, zu einem Polymer aus. Epoxidharz wurde 1938 von P. Castan, einem Schweizer Chemiker der Firma *DeTrey* (Zürich, Schweiz) erfunden. *AH 26* wurde in den 1940er Jahren von derselben Firma entwickelt. Feldmann und Nyborg fanden 1967 in einer Studie an Kaninchen heraus, dass *AH 26*, implantiert nach einem Tag Aushärtung, eine viel stärkere Gewebereizung verursachte als reines Silber [53]. *AH 26* wurde

nachgewiesen Formaldehyd freizusetzen, da es den Zusatzstoff Hexamethylentetraamin enthält [154]. Daraufhin wurde 1995 *AH Plus* von der gleichen Firma entwickelt, welches nicht mehr über Hexamethylentetraamin verfügt. Es gilt als Goldstandard der Endodontie.

AH Plus ist zur manuellen Anmischung in Tubenform erhältlich aber auch als moderne Doppelkammerspritze *AH Plus Jet*. Bereits vier Stunden nach dem Vermischen weist es keine Zytotoxizität mehr auf. Trotzdem konnte ein geringer Anteil Formaldehyd nachgewiesen werden, welcher aber signifikant geringer als bei *AH 26* ausfiel [90, 91]. Aufgrund seiner Polymerisationsreaktion von Diepoxiden und Mono-/ Diaminen zu einem Epoxidaminpolymer weist *AH Plus* unverzichtbare mechanische Eigenschaften auf. Resultate zeigen sich in hoher Dichtigkeit, Volumenbeständigkeit sowie guter Verarbeitung. Zudem sind seine Fließeigenschaften nicht zu vernachlässigen [148]. Dies wurde in zahlreichen Studien nachgewiesen [43, 94, 136]. Folglich werden Epoxidharzsealer auch von der DGZMK empfohlen [42].

1.2.4.3.3 Glasionomersealer

Glasionomer-Dentalprodukte werden durch Mischen eines feinen Silikatglaspulvers mit Polyacrylaten und verwandten Säuren hergestellt. Das Gemisch besteht aus Untereinheiten mit organischem Monomer und anorganischen Ionen, welches sich Ionomer nennt. Diese Materialien werden für Zemente und Restaurationswerkstoffe in der Zahnmedizin verwendet. Ein positiver Nebeneffekt der Produkte ist die Fluoridfreisetzung. Glasionomersealer wie *Ketac-Endo* weisen einen geringen Haftverbund zwischen Guttapercha oder dem Wurzelentin auf [88, 106].

1.2.4.3.4 Silikonbasierte Sealer

Sealer auf Silikonbasis entstehen aus additionsvernetzenden Reaktionen zwischen Vinylgruppen und Hydrosilyl-Gruppen von Polydimethylsiloxan-Ketten. *GuttaFlow*, *GuttaFlow 2*, und *RoekoSeal* (Fa Coltène/Whaledent, Altstätten, Schweiz) sind Beispiele für silikonbasierte Sealer. Laut Studien zeigt sich nur eine äußerst geringe Zytotoxizität und eine sehr gute Biokompatibilität [1, 91, 180]. Darüber hinaus wurde ein besseres Abdichtverhalten bei silikonbasierten Sealern als bei Epoxidharzsealern, nachgewiesen. Die Schrumpfung, Löslichkeit sowie das Fließverhalten sind hier von großer Bedeutung [86, 89]. Ebenso wie die Epoxidharzsealer sind die silikonbasierten Sealer (*RoekoSeal* und *GuttaFlow*) in einer modernen, handlichen Doppelmischkanüle erhältlich, um ein korrektes Anmischverhältnis zu garantieren.

1.2.4.3.5 Biokeramische Sealer

Sealer auf Biokeramikbasis werden seit dreißig Jahren in der Endodontie verwendet [126]. Ihr Erfolg korrespondiert mit dem verstärkten Einsatz der Biokeramik-Technologie in der Medizin und Zahnmedizin. Ihnen ging das MTA (Mineral Trioxid Aggregat) voraus, welches in den 1990er von Mahmoud Torabinejad in den dentalen Markt eingeführt wurde [161]. MTA ist eins der am häufigsten untersuchten dentalen Materialien im Bereich der Endodontie [51, 65, 113, 114, 160]. In diesen Studien wurde berichtet, dass es eine ausgezeichnete Biokompatibilität sowie eine gute Abdichtung aufweist. Diese resultiert aus der hohen Hydrophilie, welche sich durch den kleinen Kontaktwinkel messen lässt [179]. Dieser geringe Winkel zeigt eine hohe Fließfähigkeit des Sealers, welcher gut in enge Kanalstrukturen penetrieren kann und damit Toträume verringert. *In-vitro*-Studien haben belegt, dass unter feuchten Bedingungen BC-Sealer eine hohe Haftkraft am Dentin aufweisen. Bei geringer Feuchtigkeit zeigen dies alle getesteten Sealer [104]. Weitere Einsatzgebiete sind u.a. die Reparatur von Perforationen, Exstirpation vitaler Pulpa, retrograder/ anterograder Wurzelkanalfüllungen. Allerdings haben sich lange Abbindezeit, Zahnverfärbungen aufgrund von enthaltenem Bismut-III-Oxid bei Kontakt mit

Natriumhypochlorit und hohe Kosten als potenzielle Nachteile herausgestellt [6, 97, 114, 167]. Aufgrund dessen sollten die Vorteile von MTA mit der Basis eines biokompatiblen Füllmaterials weiterentwickelt werden. Es entstanden di- und trikalziumbasierte Sealer, auch als biokeramische Sealer bekannt. Biokeramiken sind keramische Werkstoffe, die speziell für den medizinischen und zahnmedizinischen Einsatz entwickelt wurden. Dazu gehören Aluminiumoxid, Zirkonoxid, bioaktives Glas, Glaskeramik, Hydroxylapatit und Calciumphosphate [67]. Die Einteilung der biokeramischen Werkstoffe in bioaktive oder bioinerte Materialien erfolgt in Abhängigkeit von ihrer Wechselwirkung mit dem umgebenden lebenden Gewebe. Bioinerte Substanzen, wie Zirkoniumdioxid und Aluminiumoxid, erzeugen eine vernachlässigbare Reaktion des umgebenden Gewebes und haben effektiv keine biologische oder physiologische Wirkung [17]. Bioaktive Materialien, wie z. B. Glas und Kalziumphosphat, interagieren mit dem umgebenden Gewebe, um das Wachstum von permanentem Gewebe zu fördern [93]. Di- und trikalziumbasierte Sealer setzen Calciumhydroxid durch die Hydratation und den Kontakt mit Phosphat aus Gewebsflüssigkeiten frei. Dies führt zu einer Ausfällung von Kalziumphosphat oder Kalziumcarbonat an der Materialoberfläche und einem alkalischen pH-Wert [124, 139]. Des Weiteren wurde auch die Bildung von Hydroxylapatit festgestellt. Die daraus resultierende alkalische Reaktion der Hydratationsprodukte löst kollagenes Gewebe des Dentins auf. Diese Lysereaktion erzeugt eine poröse Dentinoberfläche, welche die Permeabilität von Ca^{2+} , OH^- und CO_3^{2-} -Ionen erleichtert [8]. Die Folge ist eine Remineralisierung in diesem Bereich [168]. Diese Reaktionen zeigen die Bioaktivität des Materials. Ein weiterer Effekt des alkalischen pH-Wertes ist die antibakterielle Eigenschaft. Bei pH-Werten bis 12,5 wurden initial antibakterielle Aktivitäten gegen *E. faecalis* nachgewiesen [39, 179]. Andere Studien konnten im Vergleich zwischen *AH Plus* und *Endosequence BC* signifikant höhere pH-Werte und somit antibakterielle Wirkung in der *BC-Sealer* Gruppe zeigen [25]. Neben der Biokompatibilität und der Bioaktivität von di- und trikalziumbasierten Sealern wurde in mehreren Studien auch die Zytotoxizität dieser untersucht. Explizit betrachtete man desmodontale Stammzellen [32] und gingivale Fibroblasten [123]. Darüber hinaus wurden Osteoblasten von Menschen *in vitro* mit *BC-Sealern* (*iRoot*, *Endosequence*) untersucht [35, 92, 137]. Die untersuchten Sealer zeigten

in allen Analysen sehr geringe Zytotoxizität und tragen somit positiv zu den Vorteilen der Gruppe von biokeramischen Sealern bei. Alle in den Studien geprüften di- und trikalziumbasierten Sealer sind meist als Pulver-/Flüssigkeitsgemisch zu applizieren. Dem di-/trikalziumbasierten Pulver (*BioRoot RCS*, Firma Septodont, Saint-Maur-des-Fossés, Frankreich; *NeoMTA Plus*, Firma Avalon Biomed, Houston, Texas, USA) wird eine wasserbasierte Flüssigkeit, maschinell oder händisch, beigemischt. *iRoot SP* (Firma Innovative Bio-Ceramix Inc., Burnaby, British Columbia, Kanada) oder anderer Handelsname *EndoSequence BC Sealer* (Firma Brasseler, Savannah, Georgia, USA) kommen anwendungsfertig gemischt aus der Spritze zum Einsatz.

1.3 Wurzelkanalfülltechniken

1.3.1 Laterale Kondensation

Die kalte laterale Kondensation beginnt durch Benetzung der Kanalwände mit Sealer. Dies kann mit einer feinen Injektionsnadel, einer ultraschallaktivierten Feile, dem Masterpoint, einer Papierspitze oder einer kleinen Feile passieren [66]. Der Masterpoint wird auf Arbeitslänge in den Wurzelkanal eingebracht und mit einem Spreader unter vertikaler Kompaktion für 10-60 s kompaktiert, um das Material apikal und lateral an die Kanalwände zu adaptieren. Der optimale Zeitpunkt für den Einsatz des Spreaders ist wissenschaftlich nicht validiert. Nach der Kompaktierung des Masterpoints wird der Spreader unter Drehbewegungen wieder aus dem Wurzelkanal gezogen. Dies ist erforderlich, um sicherzustellen, dass der Masterpoint nicht herausgezogen wird. Es folgen Hilfspoints, welche ebenfalls unter Zuhilfenahme des Spreaders im Kanal verdichtet werden. Die Hilfspoints werden während ihrer Kompaktierung so nah wie möglich an den Masterpoint gedrückt, um den Kanal möglichst vollständig mit Guttapercha zu füllen [147]. Die vertikale Kompaktion setzt sich normalerweise fort, bis der Spreader nicht weiter als 2-3 mm in den Kanal reicht. Obwohl diese Technik als kalte laterale Kondensation bezeichnet wird, wird immer Wärme eingesetzt, um die Wurzelfüllung auf Höhe der Kanalöffnung oder darunter abzuschmelzen und sie Richtung apikal mit einem kalten Plugger zu verdichten.

1.3.2 Einstift-Technik (Single-Cone-Technik, SCT)

Bei der Single-Cone-Technik oder auch Zentralstifttechnik, wird der Wurzelkanal nur mit einem Guttaperchastift gefüllt. Für diese Technik wird eine besondere Art der Kanalpräparation empfohlen, da die Größe und Konizität der Präparation genau aufeinander abgestimmt sein müssen. Im apikalen Wurzel Drittel muss der verwendete Guttaperchastift auf Arbeitslänge eine Klemmpassung haben, den sogenannten „Tugback“. Wurzelkanäle, die nicht genau der Form des Guttaperchastiftes entsprechen, benötigen mehr Sealer, welcher nach dem Abbindeprozess größere Schrumpfung sowie Porosität aufweist [66, 169]. Zudem besteht bei schlechter Passung auch die Gefahr der apikalen Extrusion des Wurzelkanalfüllstiftes [140]. Die Differenz zwischen Wurzelkanalanatomie und Guttaperchastift kann durch maschinelle Aufbereitung mit Nickel-Titan-Instrumenten verringert werden, welches gleichzeitig eine Formkongruenz schafft. Trotz genauerer Aufbereitung der Wurzelkanäle durch Nickel-Titan-Instrumente können diese häufig in den medialen sowie koronalen Anteilen nicht genügend gefüllt werden [101].

1.3.3 Erweiterte Apexifikation

Anterograde Wurzelkanalfüllungen werden durch Verdichtung des Materials mit einem Plugger im gesamten Kanalbereich meist bei Zähnen durchgeführt, welche keinen ausreichenden apikalen Stopp aufweisen. Meist zeigt sich dieser Fall bei Zähnen deren Wurzelwachstum noch nicht abgeschlossen ist, nach Traumata, bei Wurzelspitzenresektionen (hier retrograde Füllung) oder einem vergrößertem Foramen apicale [5, 111]. Guttapercha würde hier zu einem ungenügenden apikalen Abschluss führen, woraus apikales Leakage resultiert. [146] Des Weiteren besteht bei der Kompaktion von Guttapercha die Gefahr einer Wurzelfraktur durch sehr dünne, apikale Dentinränder [74]. In Bezug auf spätere prothetische Versorgungen zeigen Studien, dass eine Apexifikation mit einem

bioaktiven kompaktierten Material Wurzelfrakturen vorbeugt [50, 159]. Das Material wird mit einem Plugger in den Kanal auf Arbeitslänge eingebracht und dort nur durch leichte Stoßbewegungen verdichtet [143]. Dieser Vorgang wird so lange fortgesetzt, bis die gewünschte Füllhöhe erreicht ist.

1.4 Zielsetzung und Nullhypothese

Die In-vitro-Studie sollte nachweisen, dass der biokeramische Sealer *BioRoot* ähnlich gute Penetrationstiefen bei unterschiedlichen Obturationsmethoden, in Dentinkanälchen aufweist, wie der epoxidharzbasierte Sealer *AH Plus*.

Für diesen Versuch wurden maschinell aufbereitete Wurzelkanäle von vorher einheitlich ausgesuchten Zähnen mit einem standardisierten Spülprotokoll vorbereitet. Anschließend erfolgte eine randomisierte Zuteilung in vier Untersuchungsgruppen, in denen die Zähne dann mit dem dort vorgesehenen Wurzelkanalfüllmaterial sowie Fluoreszenzfarbstoff befüllt wurden.

Um die zirkuläre Sealerpenetrationen in den einzelnen Wurzelkanalabschnitten auszuwerten, wurden alle Untersuchungsgruppen unter einem Konfokale Laserscanning Mikroskop fotografiert und später mit einer Software vermessen.

Nullhypothese 1

BioRoot weist im Vergleich zu *AH Plus* keine signifikant unterschiedlichen Penetrationstiefen in Dentintubuli auf.

Nullhypothese 2

Unterschiedliche Obturationsmethoden zeigen keine signifikanten Unterschiede der Sealerpenetration.

2 Material und Methoden

2.1 Studie

Es wurde eine randomisierte *In-vitro*-Studie an 60 vorausgewählten, extrahierten humanen Zähnen durchgeführt.

2.2 Anforderungen an die Probezähne

Für diese Forschungsstudie wurde extrahierte, einwurzelige Prämolaren und Frontzähne ausgewählt.

Einschlusskriterien

- gerader Kanalverlauf
- abgeschlossenes Wurzelwachstum
- Mindestwurzellänge 12mm
- Gängigkeit
- Kariesfreiheit
- einheitlicher Konus präoperativ

Ausschlusskriterien

- sehr großer Konus
- zweiter Wurzelkanal
- sehr ausgedehntes Endodont ohne mögliche Kongruenz mit der finalen Aufbereitungsgröße
- wurzelkanalbehandelte Zähne
- frakturierte Zähne

2.3 Studiendurchführung

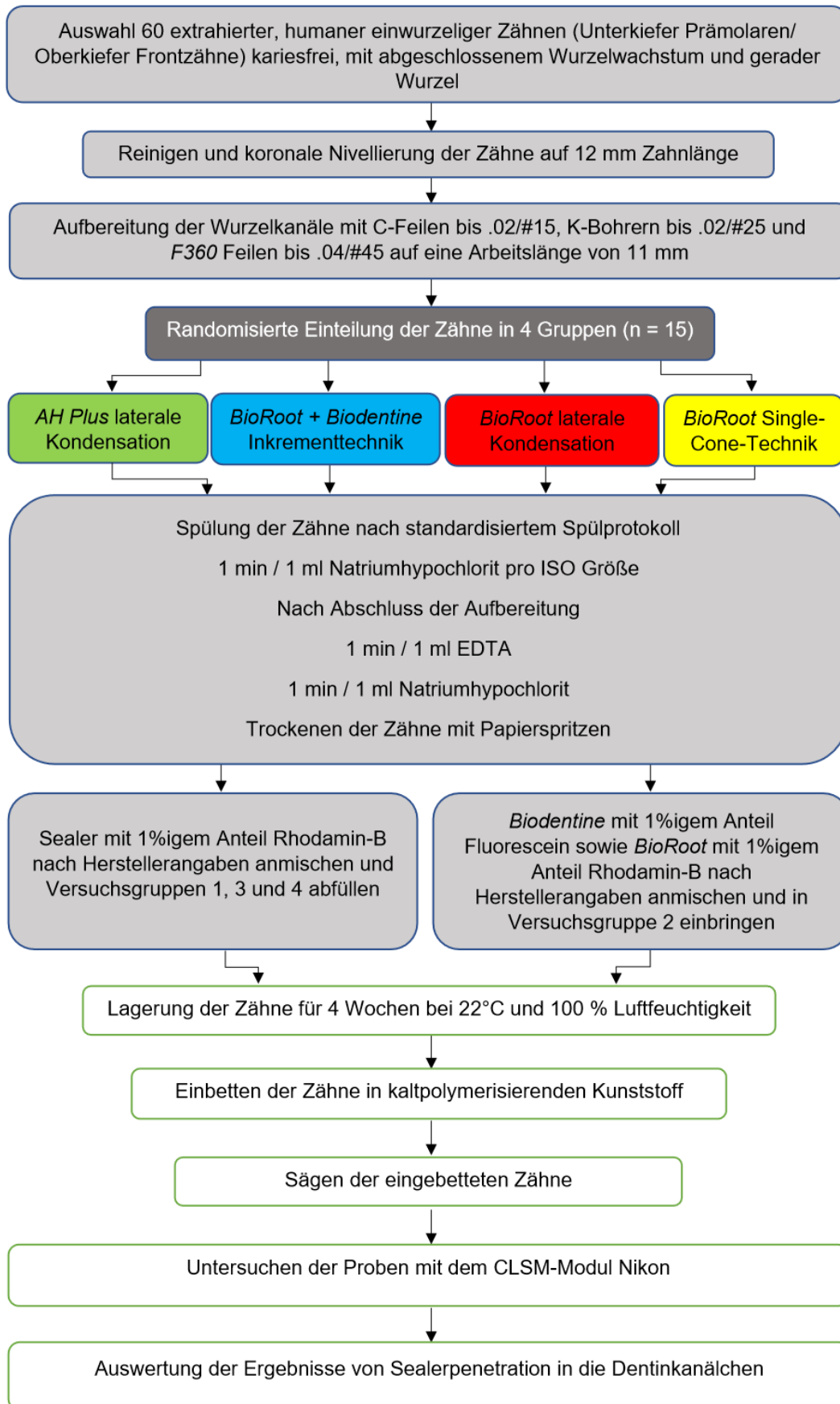


Abb. 1: Flowchart der Studiendurchführung

2.3.1 Auswahl des Studienmaterials

Alle Zähne (113), welche für eine genauere Vorauswahl in Frage kamen, wurden nach der Extraktion in Natriumazid (0,001% NaN_3 der Fa. Carl Roth, Karlsruhe und 0,9% NaCl der Fa. B. Braun, Melsungen) gelagert. Nach visueller Sichtung wurden unter den oben genannten Ein-/ Ausschlusskriterien 60 Zähne manuell mit Handscaler (Hu-Friedy) gereinigt und in nummerierten Eppendorf-Gefäßen mit Natriumazid aufbewahrt. Die Oberflächen der Zähne zeigten nach der Reinigung, optisch keine Rückstände von Knochen, Granulationsgewebe oder anderen Bestandteilen des Parodonts.

Es erfolgte eine optische Längenbestimmung sowie Markierung der Zähne mit einer Millimetersonde (Fa. Carl Marlin, Solingen) auf eine Zahnwurzellänge von 12 mm. Im nächsten Schritt wurden die ausgewählten Zähne mit einer diamantierten Schleifscheibe unter Wasserkühlung (Fa. Wassermann, Hamburg) in einem 90° Winkel auf diese Referenzlänge gekürzt.

2.3.2 Aufbereitung der Wurzelkanäle

Zunächst wurden die Wurzelkanäle mit einer C-Feile .02/#08 (Fa. VDW, München) manuell aufbereitet, um einen Gleitpfad zu erstellen. In aufsteigender Größe wurde jeder Kanal manuell bis .02/#25 bearbeitet. Jede eingebrachte Feile wurde mit 1 ml NaOCl 5,25% (Wissenschaftliches Labor der Zahnklinik Marburg) aus einer *Omnifix*-Spritze (Firma B. Braun) mit einer *VMK*-Endospülkanüle (Einwegkanüle nach Dr. J. Buquet, Fa. Vedefar, Mechelen) unterstützend gespült.



Abb. 2: F360-Feilen in den Größen 25, 35 und 45 (alle 4% Taper)

Im nächsten Schritt erfolgte die maschinelle Aufbereitung der Kanäle mit Nickel-Titan-Feilen des F360-Systems (Fa. Komet, Lemgo) von .04/#25 bis .04/#45 mit einer Arbeitslänge von 11mm. Die Aufbereitung erfolgte drehmomentkontrolliert (1,8 Ncm / 300 UpM) mit dem *Endopilot-Motor* (Fa. Komet) unter Berücksichtigung der Single-Length-Technik. Es wurde ebenfalls jede maschinelle Feile mit 1 ml NaOCl 5,25% unterstützend gespült, um Debridement zu entfernen. Die exakte Arbeitslänge von 11 mm wurde bei jedem Schritt unter Zuhilfenahme einer *Minifix*-Messlehre (Fa. VDW) sowie exakter Positionierung des dazugehörigen Silikonstoppers verifiziert. Nach abschließender Aufbereitung mit der letzten Feile auf Arbeitslänge, wurde mit NaOCl 5,25% 1 min / 1 ml gespült.

2.3.3 Einteilung der Zähne in Untersuchungsgruppen

Nach der Wurzelkanalaufbereitung wurden alle 60 Zähne randomisiert einer der vier Untersuchungsgruppen zugeteilt (siehe Flowchart). Jede Testgruppe enthält 15 Zähne. Die vorübergehende Lagerung erfolgte in einem frischen Eppendorf-Gefäß, mit einem Schaumstoffpellet in Natriumazid getränkt, am Boden, bei 22°C.

2.3.4 Vorbereitung des Wurzelfüllmaterial

Den Materialien der Untersuchungsgruppen wurden vor dem Befüllen der Kanäle fluoreszierenden Farbstoffen beigemischt. In die Kontrollgruppe *AH Plus* (Fa. Dentsply, Charlotte USA) wurde 1 % Rohdamin-B Isothiocyanat (Fa. Sigma-Aldrich, St. Louis USA) beigemischt. Zunächst wurde auf einer Semimikrowaage (LE225D, Fa. Sartorius, Göttingen) das Gewicht des Sealers (Paste A) bestimmt und anteilig 1 % Rohdamin-B Isothiocyanat hinzugefügt. Für den späteren Anmischprozesse musste bedacht werden, dass der gleiche Anteil des Sealers (Paste B) noch beigemengt wird. Unter gleichmäßigem Rühren konnte eine homogene Masse der Paste A und des Rhodamins erzeugt werden. Diese wurde in ein geschwärztes Eppendorfgefäß gefüllt, um Lichteinfluss vor dem Anmischprozess zu vermeiden.

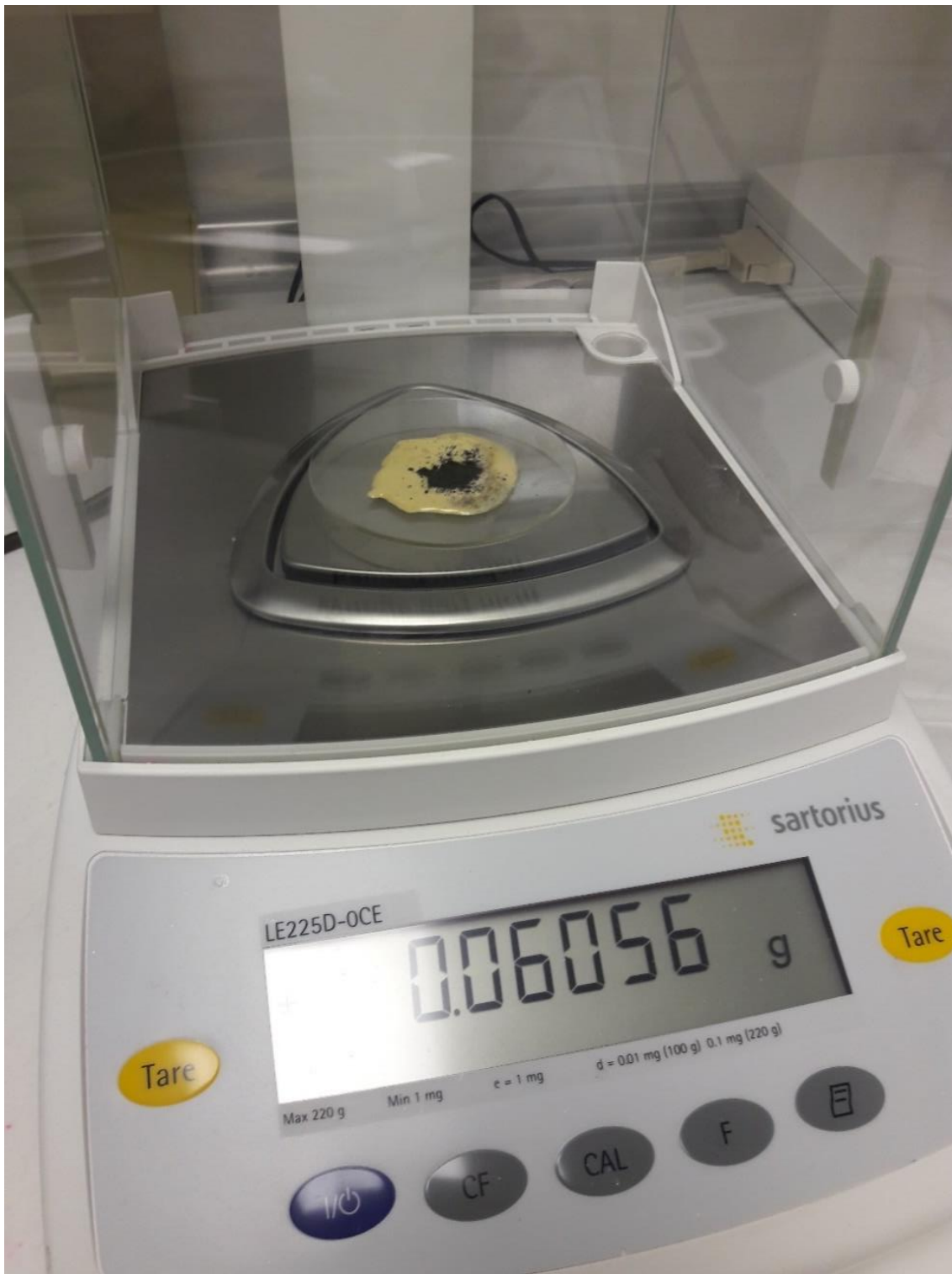


Abb. 3: Einwiegen des Fluoreszenzfarbstoffes mittels einer Semimikrowaage

In den Untersuchungsgruppen B-D wurde *BioRoot RCS* (Fa. Septodont, Saint-Maur-des-Fossés, Frankreich) ebenfalls mit Rohdamin-B-Isothiocyanat-Anteilen versehen. *BioRoot* besteht aus einem Pulver mit Tricalciumsilikat, Zirkoniumoxid und Povidon sowie einer wässrigen Lösung aus Calciumchlorid und

Polycarboxylat. Das Pulver wurde auf einer Semimikrowaage eingewogen und mit einem 1%igem Anteil Rhodamin-B Isothiocyanat gemischt. Zum Schutz vor Lichteinfluss wurde das Gemisch in das saubere, lichtgeschützte Behältnis, in dem das Pulver aufbewahrt wurde, zurückgefüllt.

Untersuchungsgruppe D enthält zusätzlich zu *BioRoot RCS* als Wurzelfüllmaterial noch *Biodentine* (Fa. Septodont). Dieses besteht aus Pulver (Tricalciumsilikat, Zirconiumoxid, Calciumoxid, Calciumcarbonat, Farbstoffen) und einer wässrigen Lösung (Calciumchlorid und Polycarboxylat). Um einen Fluoreszenzkontrast zwischen *BioRoot* und *Biodentine* herstellen zu können, wurde in *Biodentine* 1% Fluorescein-5-Natrium-Isothiocyanat beigemischt. Dies erfolgte wie bei den anderen zu untersuchenden Materialien mit einer Semimikrowaage. Da *Biodentine* einen Kapselanmischprozess bedingt, wurde hier jede Kapsel einzeln eingewogen und mit Fluoreszenzfarbstoff befüllt. Um einen exakten Anteil des Fluoreszenzfarbstoffes zu erreichen, wurden zusätzlich die nach Herstellerangaben benötigte Flüssigkeitsmenge abgewogen und zum Gesamtgewicht addiert. Das vorbereitete *Biodentine* lagerte ebenfalls in lichtgeschützten Kapseln.

2.3.5 Randomisierte Auswahl der Zähne

Alle Zähne wurden vor der Spülung und Füllung der Wurzelkanäle per Zufallsverfahren in ihre Untersuchungsgruppen eingeteilt.

Tabelle 1: Randomisierte Einteilung der Zähne in Materialgruppen

Gruppe	Material	Zähne														
		2	22	16	13	21	55	32	4	26	31	48	18	35	40	10
1	<i>AH Plus LC</i>	2	22	16	13	21	55	32	4	26	31	48	18	35	40	10
2	<i>Biodentine</i>	9	14	28	33	41	3	57	38	17	60	6	46	30	25	50
3	<i>BioRoot LC</i>	15	37	7	51	12	27	44	20	59	5	39	58	49	24	34
4	<i>BioRoot SC</i>	56	8	43	36	42	52	1	47	53	23	45	29	11	54	19

2.3.6 Spülung der Wurzelkanäle

Vor der Wurzelkanalfüllung wurde jeder Zahn nach dem gleichen Spülprotokoll

1. Natriumhypochlorit 5,25 % (1 min / 1 ml) (Wissenschaftliches Labor der Zahnklinik Marburg)
2. EDTA 15% (1 min / 1 ml) (Wissenschaftliches Labor der Zahnklinik Marburg)
3. Natriumhypochlorit 5,25 % (1 min / 1 ml)

behandelt und anschließend mit Papierspritzen .04/#45 (Antaeos, Fa. VDW) getrocknet. Dieser Spülvorgang erfolgte jeweils unmittelbar vor der Wurzelkanalfüllung.

2.3.7 Obturation der Wurzelkanäle

2.3.7.1 Gruppe 1 (*AH Plus*, laterale Kondensation)

Zunächst erfolgte die Kontrolle auf Klemmpassung sowie die Markierung des einzubringenden Masterpoints .02/#45 (Antaeos, Fa. VDW) auf Arbeitslänge (11 mm).

Nach erfolgreicher Spülung sowie Trocknung der Wurzelkanäle (siehe 3.8) wurde der vorbereitete Sealer *AH Plus* (LOT 1911000228) nach Herstellerangaben im Verhältnis 1:1 angemischt und mit einer Papierspitze der Größe .04/#45 (Antaeos, Fa. VDW) in den Kanal eingebracht. Nach Benetzung der Kanalinnenwände wurde der Masterpoint ebenfalls mit Sealer beschickt und unter Kontrolle der Arbeitslänge sowie lateraler Kondensation in den Kanal eingebracht. Um weitere Guttaperchapoints .02/#25 (Antaeos, Fa. VDW LOT B60920318) in den Kanal einzubringen wurde ein Fingerspreader .02/#35 (Fa. VDW) benutzt. Nach erfolgreicher Füllung des Kanals sind alle überstehenden Guttaperchapoints mit einem zuvor aussortierten, erhitzten Handexcavator abgeschmolzen worden. Im oberen Kanaldrittel wurden die Guttaperchapoints

mit einem Plugger (Fa. Pluradent, Offenbach, Buchanan Hand Plugger 2, blau) verdichtet und somit ein suffizienter Endoabschluss erzeugt.



Abb. 4: BioRoot RC-Sealer mit Pulver, Flüssigkeit in der Phiole sowie Messlöffel

2.3.7.2 Gruppe 2 (*BioRoot* + *Biodentine*, in Inkrementtechnik)

In Untersuchungsgruppe 2 wurde zunächst das Kanallumen mit *BioRoot RCS* benetzt, analog zu den vorherigen zwei Untersuchungsgruppen. Im nächsten Schritt wurde das vorbereitete *Biodentine* (LOT B23490) unter Herstellerangaben angemischt und mit Handpluggern (Fa. Pluradent, Buchanan Hand Plugger 1 u. 2, rot, blau) im Kanal verdichtet. Das Einbringen des Materials erfolgte in jedem Schritt mit Kontrolle der Arbeitslänge sowie taktiler und vertikaler Kompaktion.

2.3.7.3 Gruppe 3 (*BioRoot*, laterale Kondensation)

Untersuchungsgruppe 3, enthält abweichend zu Untersuchungsgruppe 1, *BioRoot RCS* (LOT B17274). Im Wurzelkanalfüllprozess wurde hier nach dem exakt gleichen Verfahren, wie bei Gruppe 1 gearbeitet. Zum Anmischen von

BioRoot RCS müssen ein Messlöffel des Pulvers sowie 5 Tropfen der Flüssigkeit auf einer Glasplatte 60 Sekunden zu einer homogenen Paste vermenget werden. Die Kanalbenetzung mit Sealer erfolgte ebenfalls mit einer Papierspitze. Das Einbringen des benetzten Masterpoints wurde unter Kontrolle der Arbeitslänge durchgeführt.

2.3.7.4 Gruppe 4 (*BioRoot*, Single-Cone-Technik)

In Untersuchungsgruppe 4, wurde zur Kanalfüllung *BioRoot RCS* nach Herstellerangaben angemischt (vgl. Gruppe 3) und mit einer Papierspitze im Kanallumen verteilt. Aufgrund der abweichenden Fülltechnik (Single-Cone-Technik) in Gruppe 4 wurden Guttaperchapoints der Größe .04/#45 (Antaeos, Fa. VDW LOT B60915279) auf Arbeitslänge mit Klemmpassung eingebracht. Es folgte das Abschmelzen des Guttaperchapoints mit einem Handexcavator (siehe Gruppe 1 und 3) sowie die koronale Kompaktierung mit einem Plugger.

2.3.8 Lagerung

Nach Abschluss des Füllprozesses wurden alle Zähne in die gereinigten Eppendorfgefäße, mit einem Schaumstoffpellet, welches in destilliertes Wasser getränkt wurde, zurückgelegt. Die Lagerung erfolgte unter Lichtschutzatmosphäre bei 22°C für 4 Wochen und 100% Luftfeuchtigkeit.

2.3.9 Herstellung der Proben

Alle Zähne einer Untersuchungsgruppe wurde aus den Lagerungsbehältnissen entnommen und mit Ethanol 70% (Fa. Otto Fischar GmbH & Co. KG, Saarbrücken) gereinigt. Dies ist notwendig, um ein fehlerfreien Haftverbund zwischen dem Einbettmaterial und der Zahnoberfläche herzustellen. Die Fixierung der Untersuchungsobjekte erfolgte auf einem Objektträger (Fa. Param GmbH), welcher zuvor mit Aluminiumoxid 250 µm (Fa. Bego GmbH & Co.,

Bremen) zum besseren Haftverbund angestrahlt wurde. Alle Zähne wurden an ihrer Wurzelspitze mit hochviskösem Komposit (Fa. Voco, Cuxhaven, *Flow Amaris High Translucent*) auf dem Objektträger unter Lichthärtung befestigt. Anschließend wurde eine zuvor angefertigte Silikonform, welche diesen exakt umschließt, zur Einbettung in Kunststoff, befestigt.

Die fertiggestellte Hohlform wurde mit kaltpolymerisierendem Kunststoff (*Technovit 4006 SE*, Fa. Kulzer), welcher sich speziell für Schliffeinbettung eignet, ausgegossen. Nach dem Aushärteprozess wurde jeder Untersuchungsblock an den zuvor festgelegten Messstellen (3, 6, 9 mm) mit einem wasserfesten permanenten Marker (rot, Fa. Faber Castell, Stein) gekennzeichnet.

Zum Sägen der Blöcke wurden diese mit Saugspannung in die Maschine eingespannt und die Schnittbreite mit einer elektronischen Messlehre (Fa. Mitutoyo, Kawasaki Japan) nochmals überprüft. Der Sägeprozess erfolgte für jede Schnittbreite vollautomatisch, unter Wasserkühlung und mit Rotation der Proben, um einen gleichmäßig präzisen Schnitt zu ermöglichen.



Abb. 6: Exaktes Vermessen der Schnittstärke

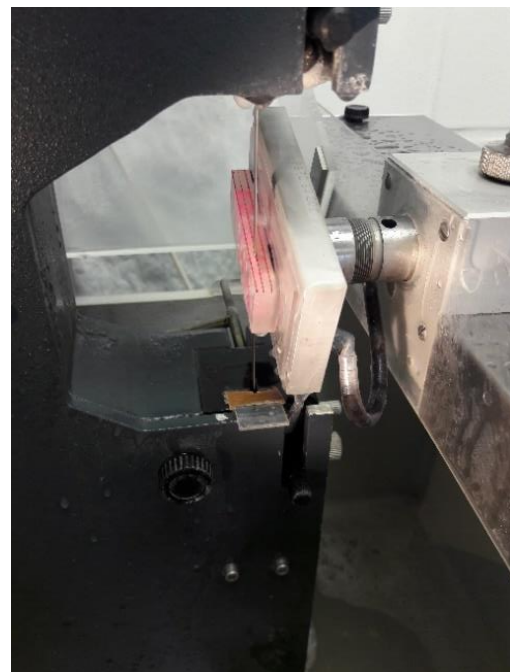


Abb. 5: Sägeprozess der Proben

Alle Proben wurden nach dem Schleifprozess getrocknet. Um Verwischungen des Farbstoffes, die die Messung beeinflussen könnten, zu vermeiden ist jede

Probe nochmals händisch, mit Schleifpapier (Körnung 4000, Fa. Obi) nivelliert worden.

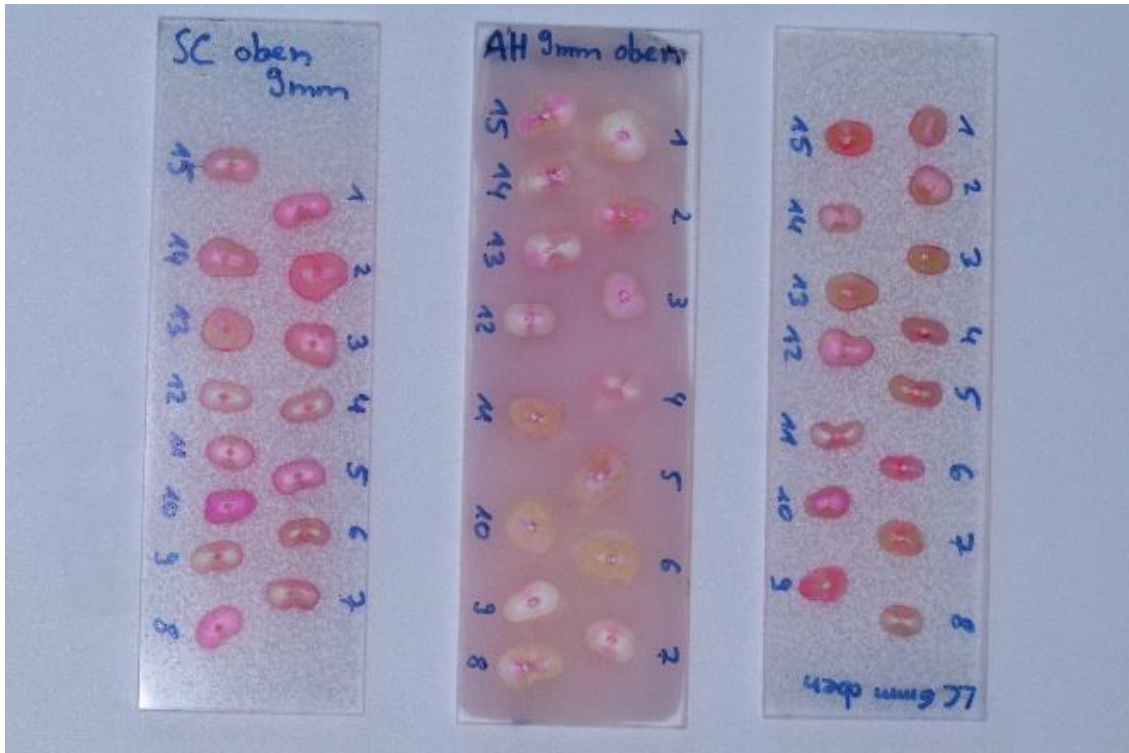


Abb. 7: Schnittproben der Untersuchungsgruppen



Abb. 8: Laterale Kondensation Querschnitt



Abb. 9: Single-Cone-Technik Querschnitt

2.3.10 Fluoreszenzaufnahmen

Das Konfokale Laserscanning Mikroskop (CLSM), welches für die Aufnahmen benutzt wurde, besitzt ein *D-Eclipse C1* Modul (Fa. Nikon, Tokio Japan) im dualen Fluoreszenzmodus. Die exakte Einstellung der Aufnahmen erfolgte mit einem 4er Objektiv und 2x Zoom. Das Bild wurde in einer Auflösung von 1024x1024 Pixel gespeichert.

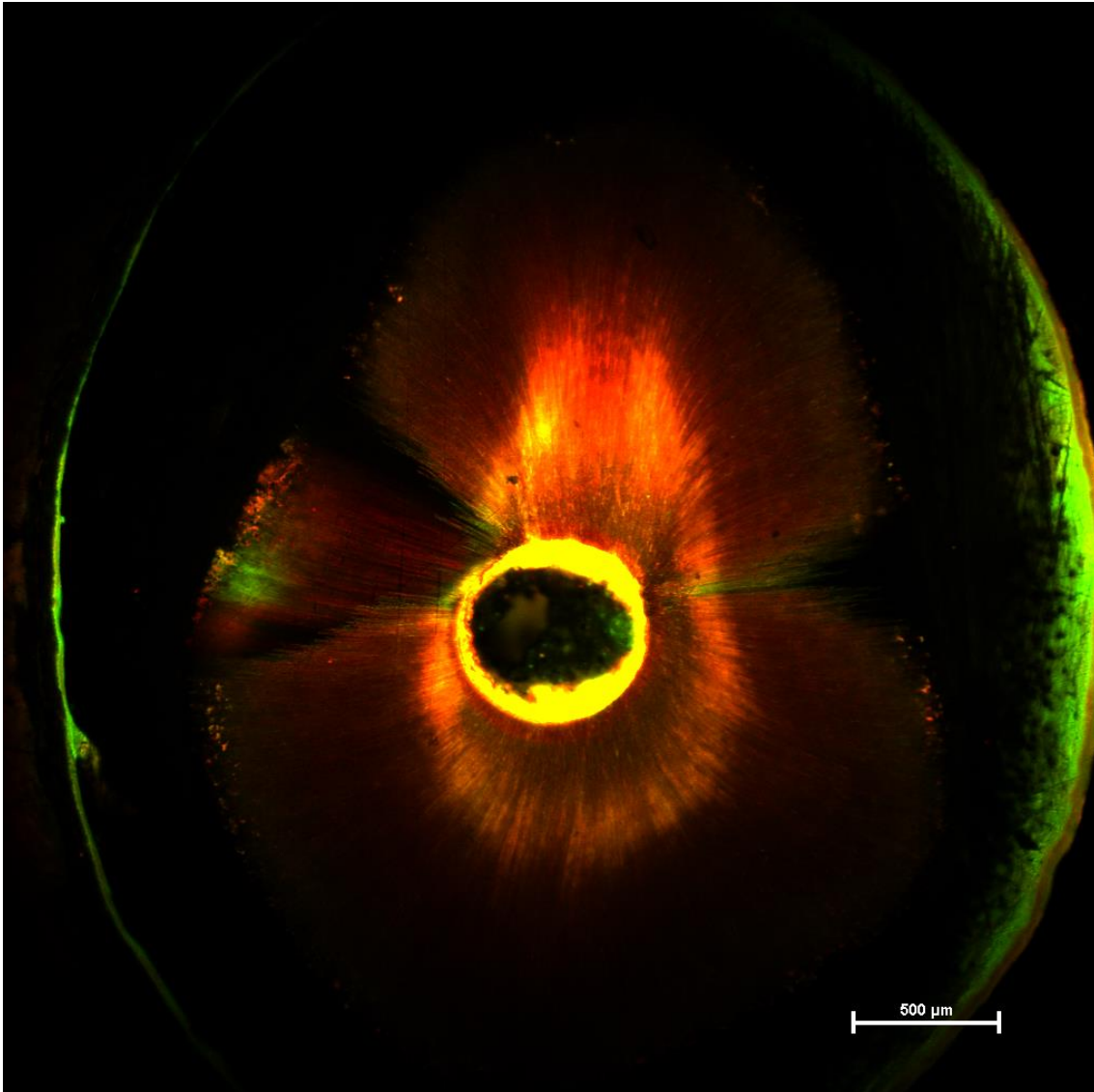


Abb. 10: CLSM - Schnittprobe der Untersuchungsgruppe *Biodentine*

Die verwendeten Materialien zur Anfärbung der Proben waren *Rhodamin B-Isothiocyanat (RhBITC)* und *Fluorescein Natrium*. *Rhodamin-B-Isothiocyanat (RhBITC)* ist ein Derivat des Fluoreszenzfarbstoffes Rhodamin-B und wurde für

die Anfärbung der Untersuchungsgruppen 1 – 4 verwendet. Es ist ein organischer Farbstoff, welcher laut Herstellerangaben ein Absorptionsmaximum bei 543 nm und ein Emissionsmaximum von 571 nm hat. Bei 543,5 nm wird es mit einem Helium-Neon-Laser (CVI Melles Griot) angeregt.

Fluorescein Natrium ist ein wasserlösliches Natriumsalz und wurde zum Anfärben der Untersuchungsgruppe 2 benutzt. Es zeigt sein Absorptionsmaximum bei 490 nm und sein Emissionsmaximum von 515 nm. Im Vergleich zu *RhBITC* wird *Fluorescein Natrium* mittels Argonlaser (CVI Melles Griot) bei einer Wellenlänge von 488 nm angeregt. Es wurden ein Emissionfilter mit den Wellenlängen 408 / 488 / 543 nm und ein Bandpassfilter mit den Wellenlängenbereichen 485 - 535 nm und 530 - 680 nm in den Strahlengang eingeblendet.

2.3.11 Auswertungsverfahren

Die im Versuch erfassten Daten wurden mit der Software *SPSS Statistics 26* (IBM) statistisch ausgewertet. Auf Basis der Eingabe aller ermittelten Daten (Penetrationstiefe des Materials apikal, medial, koronal) konnten für alle Gruppen (= Sealer / Obturationstechnik) sowie alle 3 Mess-Ebenen die deskriptiven Daten ermittelt werden.

3 Ergebnisse

Die Berechnung der Normalverteilung ergab für alle Gruppen und Ebenen einen Signifikanzwert von $p < 0,001^*$. Da keine Normalverteilung vorlag (siehe Tab. 2), wurden für die weitere statistische Analyse nicht-parametrische Testverfahren eingesetzt. Als nicht-parametrische Testverfahren wurden der Kruskal-Wallis-Test, der Mann-Whitney-Test, der Friedman-Test sowie der Wilcoxon-Test verwendet.

Tabelle 2: Deskriptive Datenanalyse

Ebene	Technik	Mittelwert	SD	Median	Min	Max	IQ	p-Wert ^a
apikal								
	AH Plus/LCT	111,80	118,03	79,80	3,41	721,39	80,43	$p < 0,001^*$
	BR/BD	108,94	104,38	65,45	7,69	493,22	132,01	$p < 0,001^*$
	BR/LCT	154,05	92,48	157,07	2,40	326,82	152,94	$p < 0,001^*$
	BR/SCT	233,17	206,64	163,38	11,42	779,66	265,90	$p < 0,001^*$
mittig								
	AH Plus/LCT	238,29	166,10	230,96	3,93	712,02	287,93	$p < 0,001^*$
	BR/BD	255,33	187,59	239,95	25,50	941,13	282,36	$p < 0,001^*$
	BR/LCT	357,05	236,72	329,32	12,94	984,67	329,41	$p < 0,001^*$
	BR/SCT	210,93	156,52	171,84	3,31	633,64	250,05	$p < 0,001^*$
koronal								
	AH Plus/LCT	277,06	150,82	295,45	6,96	587,09	255,05	$p < 0,001^*$
	BR/BD	316,82	196,04	288,72	31,40	1235,10	239,83	$p < 0,001^*$
	BR/LCT	218,51	79,51	237,54	18,76	429,92	84,90	$p < 0,001^*$
	BR/SCT	316,52	143,89	293,69	49,60	729,83	186,36	$p < 0,001^*$

Legende: MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung, IQ = Interquartilbereich, ^a = Shapiro-Wilk-Test zur Normalverteilungsanalyse

3.1 Nicht parametrische Analysen

3.1.1 Kruskal-Wallis-Test

Primär musste ermittelt werden, ob in den drei zu untersuchenden Ebenen signifikante Unterschiede zwischen den 4 Gruppen vorlagen. Dazu wurde der nicht-parametrische Kruskal-Wallis-Test eingesetzt, welcher für einen Vergleich von mehr als zwei Gruppen erforderlich ist.

apikal: $p < 0,001^*$

mittig: $p < 0,001^*$

koronal: $p < 0,001^*$

Die Analyse zeigte, dass in allen Ebenen signifikante Unterschiede ermittelt wurden. Folglich ist es erforderlich, herauszufinden, welche der Gruppen im Paar-Vergleich für diese signifikanten Unterschiede der Penetrationstiefe verantwortlich waren.

3.1.2 Mann-Whitney-U-Test

Als aussagekräftiger Test wurde hier der Mann-Whitney-U-Test verwendet. Dieser ebenfalls nicht-parametrische Test vergleicht alle möglichen Gruppen-Paare miteinander und erlaubt es somit herauszufinden, welche Gruppen-Paare sich hinsichtlich signifikant verschiedener Penetrationstiefen unterscheiden.

Ergebnisse der Paarvergleiche mittels Mann-Whitney-U-Test

Tabelle 3: Signifikanzwerte Mann-Whitney-U-Test apikal

apikal	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4
Gruppe 1		p = 0,670	p < 0,001*	p < 0,001*
Gruppe 2	p = 0,670		p < 0,001*	p < 0,001*
Gruppe 3	p < 0,001*	p < 0,001*		p = 0,027*
Gruppe 4	p < 0,001*	p < 0,001*	p = 0,027*	

Tabelle 4: Signifikanzwerte Mann-Whitney-U-Test mittig

mittig	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4
Gruppe 1		p = 0,605	p < 0,001*	p = 0,143
Gruppe 2	p = 0,605		p < 0,001*	p = 0,032*
Gruppe 3	p < 0,001*	p < 0,001*		p < 0,001*
Gruppe 4	p = 0,143	p = 0,032*	p < 0,001*	

Tabelle 5: Signifikanzwerte Mann-Whitney-U-Test koronal

koronal	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4
Gruppe 1		p = 0,203	p < 0,001*	p = 0,076
Gruppe 2	p = 0,203		p < 0,001*	p = 0,547
Gruppe 3	p < 0,001*	p < 0,001*		p < 0,001*
Gruppe 4	p = 0,076	p = 0,547	p < 0,001*	

3.1.3 Friedman-Test

Abschließend ist es relevant, ob die Penetrationstiefen in den einzelnen Gruppen sich zwischen den drei Schnittebenen signifikant voneinander unterscheiden. Hierbei wurden nur die Werte der Regionen innerhalb der Gruppen miteinander verglichen. Folglich wurde jede Untersuchungsgruppe einzeln betrachtet. Hierzu wurde zunächst das ebenfalls nicht-parametrische Testverfahren nach Friedman eingesetzt, welches die drei Schnittebenen innerhalb einer Untersuchungsgruppe miteinander vergleicht. Die statistische Analyse ergab dabei folgende Werte:

Gruppe 1: p < 0,001*

Gruppe 2: p < 0,001*

Gruppe 3: p < 0,001*

Gruppe 4: p < 0,001*

Die Ergebnisse der Sealerpenetrationstiefe innerhalb der vier Gruppen zwischen den drei Regionen sind signifikant verschieden.

3.1.4 Wilcoxon-Test

Um feststellen zu können, zwischen welchen Ebenen die Unterschiede signifikant waren, wurde der Wilcoxon-Test eingesetzt, der einen Paarvergleich zwischen den jeweiligen Regionen erlaubte. Damit ließen sich alle drei möglichen Paare einer Gruppe miteinander vergleichen. Außer in Gruppe 4 apikal versus mittig, zeigten alle anderen Paarvergleiche der Gruppe 4 sowie in sämtlichen anderen Gruppen signifikant voneinander verschiedene Penetrationstiefen.

Ergebnisse der Paarvergleiche im Wilcoxon-Test

Tabelle 6: Ergebnisse paarweiser Vergleiche zwischen den Ebenen aller Untersuchungsgruppen

Vergleichspaare	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4
apikal vs. mittig	p = 0,001*	p = 0,001*	p = 0,001*	p = 0,765
apikal vs. koronal	p = 0,001*	p = 0,001*	p = 0,001*	p = 0,001*
mittig vs. koronal	p = 0,010*	p = 0,001*	p = 0,001*	p = 0,001*

Im folgenden Boxplotdiagramm werden die Untersuchungsergebnisse nochmal anschaulich zusammengefasst, um eine Penetration in den einzelnen Gruppen sowie Vergleichswerte zwischen den Gruppen darzustellen.

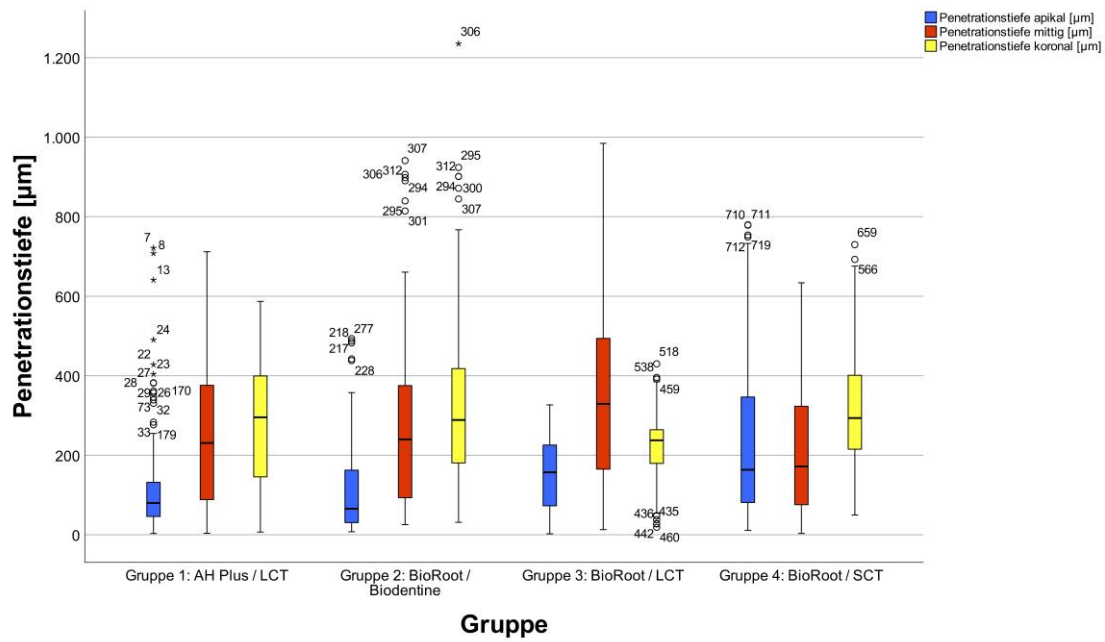


Abb. 11: Boxplotdiagramm der Penetrationstiefen aller Gruppen

Es ist zu erkennen, dass die Sealerpenetration im apikalen Bereich bei Gruppe 1-3 sehr gering ausfiel. Deutlich davon zu unterscheiden ist hier die Gruppe 4, welche apikal höhere Penetrationstiefen aufwies.

Gruppe 1 zeigte insgesamt 14 extreme Ausreißer, welche aber im Vergleich zur Gesamtanzahl der 180 Messstellen als nicht sehr relevant erachtet werden.

4 Diskussion

4.1 Diskussion von Material und Methoden

4.1.1 Auswahl der Zähne und des Studientyps

Für den In-vitro-Versuch dieser Dissertation wurden 60 humane Zähne der zweiten Dentition mit rundem Wurzelquerschnitt, sowie gerader Wurzel ausgewählt. Hierbei sind nur Inzisiven und Eckzähne des Oberkiefers sowie Prämolaren des Unterkiefers verwendet worden. Die Auswahl sollte möglichst gleiche Versuchsvoraussetzungen ohne signifikante Unterschiede ermöglichen. Alle Zähne wurden in Zahnarztpraxen extrahiert und danach in Natriumazidlösung gelagert. Die Zähne wurden vollständig anonymisiert ohne jegliche Rückverfolgbarkeit ihrer Herkunft gesammelt. Es lagen somit keine Informationen über Pathologie oder das Alter der Zähne vor. Häufig zeigen sich bei extrahierten Zähnen altersabhängige Veränderungen im Dentinaufbau [63, 70] sowie Unterschiede im Hinblick auf die Porosität und/ oder Sklerosierungen durch externe inflammatorische Prozesse [116]. Die Auswahl einer bestimmten Altersgruppe oder nach Ursache der Extraktion ist durch den Sammelprozess in der Praxis schwer zu realisieren, weswegen hier, wie oben genannt keine Informationen zum Alter der Zähne oder Ursache der Extraktion vorliegen. Während der Zuteilung der Zähne in die vier Versuchsgruppen wurde durch die randomisierte Auswahl der Einflussfaktor des Alters relativiert, aber nicht annulliert.

Die Lagerung der Zähne erfolgte in Natriumazid, um einerseits relative Keimfreiheit zu gewährleisten, aber auch um gegen die Dehydrierung von Dentin und Schmelz zu wirken [84]. Der Verbund von Komposit und Dentin wurde nicht negativ beeinflusst [138]. Folglich wurden die Dentinkanälchen sowie die Dentinmatrix nicht signifikant geschädigt und können im Versuch als Vergleich zur in vivo Wurzelkanalbehandlung betrachtet werden. Die Struktur des Dentins schrumpft signifikant durch 6 % Wasserverlust um 0,5 % bei einer Stunde Lagerung an der Luft. Dies zeigten Zhang et. al. in ihrer Studie [178]. Auch können Mikrorisse durch zu lange Trocknung nach 24 Stunden entstehen [134].

In Folge der Schrumpfung verringert sich der Durchmesser der Dentinkanälchen, was wiederum zur Folge hat, dass Wurzelkanalspüllösungen und Wurzelfüllmaterialien schlechter penetrieren können [14].

In diesem Versuch wurden menschliche Zähne verwendet, um die klinische Relevanz so ideal wie möglich zu gewährleisten. Teilweise wurden Rinderzähne menschlichen Zähnen für Studienzwecke vorgezogen. Dies hatte mehrere Gründe. Menschliche Zähne sind morphologisch und histologisch anderen Säugetierzähnen ähnlich, aber aufgrund ihrer Größe und guten Verfügbarkeit wurden Rinderschneidezähne für die Forschung genutzt [108, 128]. Des Weiteren weisen Rinderzähne nach Camargo et al. [22] im Vergleich zu menschlichen Zähnen eine signifikant höhere Anzahl von Dentinkanälchen auf, was in Bezug auf den hier dargestellten Versuch ein Grund war menschliche Zähne zu verwenden. Camargo et. al. haben ebenfalls gezeigt, dass bei der Rasterelektronenmikroskopaufnahme von Rinderzähnen im Vergleich zu humanen Zähnen die Anzahl und der Durchmesser der Dentinkanälchen bei Rindern homogener war. Dieses Resultat lässt darauf schließen, dass in der vorliegenden Studie andere Ergebnisse hinsichtlich der Sealer-Penetration gegenüber der Studie von Camargo vorliegen könnten. Auch wenn in der Literatur bovine Zähne als ein geeignetes Substrat für die Analyse eingesetzt werden [49], so scheinen die hier vorliegenden Ergebnisse diese Behauptung nicht zu rechtfertigen.

Die Einflussfaktoren auf den Versuch wurden weiterhin durch detaillierte Vorgaben zu morphologischen Aspekten der Zähne minimiert. Für diese Studie wurden insgesamt 113 extrahierte, einwurzelige Prämolaren und Frontzähne mit geradem Wurzelverlauf ausgewählt. Eine weitere Voraussetzung zur Auswahl der Zähne, war eine Mindestlänge der Wurzel von 12 mm, keine endodontische Vorbehandlung und Kariesfreiheit im gesamten zu untersuchenden Bereich.

Es wurde ein gerader Wurzelverlauf gewählt, um möglichst gleiche Arbeitsbedingungen für die Kanalaufbereitung zu ermöglichen. Es gibt keine Studien, die Sealerpenetration in geraden und gekrümmten Kanälen vergleichen, jedoch untersuchten Studien Unterschiede der Microleakage. Es zeigte sich, dass gekrümmte

Kanäle eher eine Undichtigkeit in der Bakterienpenetrationsanalyse zeigen als gerade Kanäle [75, 78].

Aufgrund des reduzierten Haftverbunds zwischen kariöser Dentinstrukturen und Befestigungsmaterialien bspw. Sealern, wurden alle Zähne mit Wurzelkaries aussortiert [110, 118]. Des Weiteren sind endodontisch vorbehandelte Zähne aufgrund von Spülprotokollen mit NaOCl und EDTA nicht in der Auswahl für die Studie gewesen, da hier auch schlechtere Haftverbände sowie Reste von verbleibenden Wurzelkanalfüllmaterialien nachgewiesen wurden [112, 119, 122].

4.1.2 Konfokales Laserscanning-Mikroskop (CLSM)

Das CLSM wurde für den Versuch mit *AH Plus* und *BioRoot* verwendet, da es eine detaillierte Aufnahme über die Penetrationstiefe und die Verteilung von Sealern innerhalb der Dentintubuli ermöglicht. In einer Studie von El Hachem et. al. [48] wurde das CLSM anstelle eines REMs verwendet, da es den Nachweis der Sealerpenetration entlang des Kanalumfangs jeder Probe mittels Fluoreszenz ermöglicht. Das CLSM zeigte die Bildung von Hochkontrastpunkten der Sealerpenetration innerhalb der Dentintubuli. Ein weiterer Vorteil der CLSM ist, dass die Proben in verschiedenen Tiefen sichtbar gemacht werden können und zudem echte Grenzflächenfehler (siehe REM) von künstlichen Lücken unterschieden werden können. Diese Unterscheidungsfehler können im Gegensatz zum CLSM nach einer Hochvakuumtrocknung unter dem Rasterelektronenmikroskop entstehen [3, 109]. Ferner bietet es mehrere Vorteile gegenüber der konventionellen optischen Weitfeldmikroskopie [4, 158]. Beim SEM (Scanning Electron Microscope) ist es schwer den Sealer vom umgebenen Dentin abzugrenzen [29]. Darüber hinaus erfordert das CLSM keine spezielle Probenbearbeitung und die Beobachtungen können unter nahezu normalen Bedingungen (atmosphärischer Luftdruck, keine vollständige Austrocknung, kein Druckunterschied) durchgeführt werden [38].

4.1.3 Wurzelkanalaufbereitung

Die Aufbereitung der Wurzelkanäle erfolgte standardisiert mittels des *F360*-Feilensystems [85]. Die Wurzelkanäle wurden initial mit einer .02/#10 C-Feile sondiert und wie in Punkt 2.3.2 beschrieben, auf .04/#35 aufbereitet. Die Unterteilung zwischen manueller und maschineller Aufbereitung wurde folglich mit beginnender *F360* Größe 25 auf maschinell umgestellt [85]. Die maschinelle Aufbereitung wurde gewählt, um ein präziseres und gleichmäßigeres Ergebnis hinsichtlich des Debridement sowie der Kanalgeometrie zu erzielen [55, 87, 132, 157]. Da hier gerade Kanäle aufbereitet wurden, ist der Faktor einer durch iatrogen verursachten, ungleichmäßigen Aufbereitung zu vernachlässigen. Sonntag und Guntermann et. al [152] zeigten dass Zähne, welche durch Studenten aufbereitet wurden, gerade bei ungeübten Behandlern eine gleichmäßigere Kanalaufbereitung durch Ni-Ti-Feilen resultierte. Manuelle Feilen zeigten hingegen ein niedrigeres Frakturrisiko. Diese Beobachtung deckt sich auch mit einer Studie von Hülsmann et. al [72]. Hierbei wurde eine erhöhte Fallzahl von Instrumentenfrakturen ermittelt. Hingegen ein Statusreport des American Journal of Dentistry zeigte, dass es bei der maschinellen Aufbereitung weniger zu Frakturen kam, da diese häufig durch unterschiedliche Torsionen auftraten [16]. Das *F360*-System ist ein vollrotierendes Wurzelkanalaufbereitungssystem, wodurch Feilenbrüche in Zusammenhang mit Torsion auf ein Minimum reduziert werden, weil der Drehwinkel die Elastizitätsgrenze der Feile nicht überschreitet [176].

4.1.4 Spülprotokoll

Die Wurzelkanalspülung ist einer der wichtigsten Schritte für den Versuch. Alle Zähne wurden nach dem gleichen vorher festgelegten Spülprotokoll behandelt. Laut Literatur stellte sich das Spülen mit Natriumhypochlorit 5,25 %, EDTA 15 % und abschließend Natriumhypochlorit 5,25 % von einigen Studien als effektivstes manuelles Spülprotokoll heraus [11, 47, 56]. Es wurde zusätzlich empfohlen bei unterschiedlichen morphologischen Gegebenheiten bspw. bei kalzifizierten Kanälen unterschiedliche Spülprotokolle zu verwenden [45]. Dies wurde aber

weitestgehend minimiert, da nur Zähne mit gängigen Kanälen in die engere Auswahl genommen wurden, siehe Punkt 2.2. Des Weiteren wurden von Mader et. al [96] anhand von Rasterelektronenmikroskopaufnahmen gezeigt, dass der Smearlayer bis zu 40 µm in die Dentinkanälchen eindrang. Spülprotokolle mit 5,25%igen NaOCl-Lösungen und 15%iger EDTA Lösung penetrieren hingegen bis zu 131 µm tief in die Dentinkanälchen, womit ein Einfluss durch den Smearlayer weitestgehend ausgeschlossen werden kann [57, 71]. Ein Vorteil bei diesem häufig verwendeten Spülprotokoll liegt in der Penetrationstiefe des beim Füllvorgang verwendeten Sealers. Insbesondere die Zwischenspülung mit EDTA zeigt hier bessere Sealerpenetrationstiefen im Unterschied zur alleinigen NaOCl-Spülung [9]. Vergleicht man den Spülvorgang zwischen NaOCl mit EDTA bei bioaktiven Sealern und epoxidbasierenden Sealern, zeigte keiner der beiden Sealer einen Nachteil in der Penetration [9, 76]. Folglich ist ein negativer Effekt in der Beeinflussung von Penetrationstiefen der Sealer aufgrund von Interaktionen zwischen Spülflüssigkeiten und Sealermaterial in diesem Versuch zu vernachlässigen. Es kann sogar angenommen werden, dass der Versuch eine effiziente Sealerpenetration nach Verwendung des Spülprotokolls zeigt [56, 165, 177].

4.1.5 Wurzelkanalfülltechniken

Die in diesem Versuch verwendeten Wurzelkanalfüllmethoden zählen zu den meistverwendeten Obturationstechniken im Bereich der Kaltfülltechnik. Am häufigsten untersucht und angewendet wird die laterale Kondensationstechnik [37, 58, 62, 77, 100]. Durch diese Technik wird eine homogene und dichte Wurzelkanalfüllung erzeugt, welche auch unregelmäßige Kanalstrukturen nach dem Aufbereiten ausgleicht [36, 175]. Bei nicht sachgemäßer Anwendung von Fingerspreadern in Kombination mit Guttapercha kann es bei der lateralen Kondensation zur Wurzellängsfraktur kommen [28]. Die Füllmethode der Single-Cone-Technik wird zwar aufgrund ihrer Dichtigkeit in vielen Studien diskutiert, hat aber in der heutigen Endodontie einen festen Platz und zeigt auch ein niedrigeres Frakturrisiko der Wurzel [13, 20, 80, 102, 173]. Die besten Ergebnisse erzielt

diese Technik in runden Kanalquerschnitten, weswegen sie hier auch verwendet und mitbeurteilt wurde [135]. Zahlreiche Hersteller bieten als Ergänzung ihres Wurzelkanalaufbereitungssystems auch die passenden Guttaperchastifte an. In diesem Versuch erfolgte deswegen die Verwendung von *F360*-Guttaperchaspitzen .04/#45 der Firma Komet Dental. Eine weitere Technik ist die anterograde Wurzelkanalfülltechnik mit Kalziumsilikatzement, welche hauptsächlich bei Apexifikationen oder zum Verschluss einer *via falsa* verwendet wird [125]. Sie wurde oft in Bezug auf ihre Dichtigkeit untersucht. Jedoch findet sich in der Literatur keine adäquate Quelle zur Penetration von *Biodentine* im Zusammenhang mit Sealer in Dentinkanälchen [81, 144]. In diesem Versuch lag keine Indikation für eine Apexifikation vor, jedoch war es auch ein Ziel dieser Studie, die Penetration von *BioRoot RCS* in Kombination mit *Biodentine* unter Verwendung der Inkrement-Technik zu untersuchen.

4.2 Diskussion der Ergebnisse

Ziel dieser Studie war es, die Sealerpenetration von *BioRoot RCS* mit unterschiedlichen Füllmethoden zu untersuchen. Des Weiteren sollten zur Referenzgruppe mit *AH Plus* die unterschiedlichen Penetrationstiefen analysiert werden. Alle Penetrationswerte wurden apikal, medial sowie koronal betrachtet.

Zu Beginn wurden folgende Nullhypothesen aufgestellt:

Nullhypothese 1

BioRoot RCS weist im Vergleich zu *AH Plus* keine signifikanten Unterschiede der Penetrationstiefen in Dentintubuli auf.

Nullhypothese 2

Unterschiedliche Obturationsmethoden zeigen keine signifikanten Unterschiede der Sealerpenetration.

Abschließend können beide Nullhypothesen verworfen werden. Zunächst zeigten sich signifikante Unterschiede in den Penetrationstiefen von *BioRoot RCS* im Vergleich zu *AH Plus* in den Ergebnissen, besonders in den mittleren und apikalen Anteilen der Wurzelkanäle. Des Weiteren wiesen die Untersuchungsergebnisse Abweichungen der Sealerpenetration bei unterschiedlichen Obturationsmethoden auf. Tendenziell wäre hier aufgrund der Ergebnisse die laterale Kondensation mit *BioRoot RCS* zu empfehlen. Sie penetriert in apikalen und mittleren Wurzelkanalanteilen tiefer als die Referenzgruppe *AH Plus*.

Verschiedene Faktoren können hier Einfluss auf die Sealerpenetrationswerte nehmen. Sowohl beeinflussbare Faktoren wie die Obturationstechniken und Zahnmorphologie als auch invariable Faktoren, wie z.B. die Teilchengröße der Sealerkomponenten, könnten sich auf die Sealerpenetration auswirken.

In Studien zur Penetrationstiefe von Sealern wurden ebenfalls ein konfokales Laserscanningmikroskop sowie Rhodamin-B verwendet [95, 130, 164]. Des Weiteren konnte anschaulich von Donnermeyer und Schmidt et al. [44] gezeigt werden, dass der Zusatz von Fluoreszenzfarbstoffen in Wurzelkanalsealern und die Penetrationstiefe nicht miteinander korrelieren. Somit lassen sich Fluoreszenzfarbstoffe als beeinflussender Faktor der Fließfähigkeit/ Penetrationstiefe von Sealern vernachlässigen. Ebenfalls lässt sich die Partikelgröße der Sealerpartikel vernachlässigen. Bei *AH Plus* sowie *BioRoot* liegt die Partikelgröße der größten Teilchen zwischen 5 µm und 10 µm und die der Kleinsten bei <0,3 µm [129].

Es zeigte sich in den Untersuchungsgruppen 1-4, dass die Sealerpenetration von apikal bis koronal stetig zunahm. Durch die Aufbereitung des Wurzelkanals wurde der Durchmesser vergrößert. Folglich konnte eine größere Dentinfläche mit mehr frei exponierten Dentintubuli geschaffen werden, in welche der Sealer penetrieren konnte [3, 99]. Des Weiteren haben Studien gezeigt, dass in den apikalen Bereichen des Wurzelkanals mehr sklerotisches Dentin vorzufinden war, welches ebenfalls die Penetration in dieser Studie beeinflusst haben könnte [131]. Ein weiterer Faktor könnte die Schwierigkeit der Smearlayer-Entfernung während der Aufbereitung im apikalen Bereich gewesen sein [18]. Interessant ist aber, dass in Gruppe 4, trotz der zuvor beschriebenen Einflüsse, apikal eine höhere Penetration erreicht wurde.

Vergleicht man die apikalen Medianwerte der Sealerpenetrationstiefe, so lagen jene von *BioRoot* (LC / SC) über dem der Vergleichsgruppe von *AH Plus*. Eine mögliche Ursache können die Unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der BC-Sealer im Vergleich zu den epoxidbasierten Sealer sein. Wie in Kapitel 1.2.4.2 bereits beschrieben, ist die Benetzbarkeit des Dentins durch den Kontaktwinkel beeinflussbar. Die Auswirkungen sind jedoch in Studien kontrovers diskutiert worden. Assmann et al. [7] konnten zunächst keine mechanisch signifikanten Unterschiede zwischen epoxidbasierten Sealer und BC-Sealern bei Wurzelkanalfüllungen feststellen. In der Studie von Ha et al. [64], welche technisch präziser die Benetzungsareale von den zu vergleichenden Sealern auf Polyesterfolien, sowie deren mechanisches Fließverhalten darstellte, konnten hingegen signifikante Unterschiede zwischen BC-Sealern und

epoxidbasierten Sealern festgestellt werden. Somit ist als ein möglicher Grund für die bessere Penetration zwischen BC-Sealern und epoxidbasierten Sealern der Kontaktwinkel und die Fluidität in Betracht zu ziehen. Es sollten hier noch weitere Studien zu dieser Thematik erfolgen.

Die laterale Kondensationstechnik zeigte in einigen Studien eine schlechte Anpassung mit mehr verbleibenden Hohlräumen [103]. In früheren Studien wurde über schlechtere Ergebnisse bei der lateralen Kondensationstechnik im Vergleich zu anderen Gruppen wie bspw. Single-Cone-Technik berichtet, was auf die Bildung von Hohlräumen, Spreizkanälen und die fehlende Oberflächenverteilung des Sealers an den Kanalwänden zurückgeführt wurde [172]. In einer Studie von Türker et al. [163], welche ebenso wie in der hier vorliegenden Untersuchung die laterale Kondensationstechnik als Referenzgruppe einsetzte, konnte gezeigt werden, dass mögliche Faktoren der mangelnden Oberflächenanpassung der Guttapercha, heterogene Verschmelzungen der Guttaperchapoints sowie Lücken zwischen der Guttapercha zu kürzeren Penetrationstiefen des Sealers führten. Gerade bei unterschiedlichen Konizitäten von Wurzelkanal und Guttaperchastift können immer wieder Hohlräume auftreten [127]. Hingegen bei der Single-Cone-Technik soll die Sealschichtdicke minimiert werden, wobei Wurzelkanaltaper und Guttaperchataper exakt aufeinander abgestimmt sind [68]. Apikal zeigten Türker et al. eine signifikant niedrigere Hohlraumrate, die vermutlich auch zu einer dünneren Sealerschichtstärke führte und folglich vor allem apikal zu einer tieferen Sealerpenetration. Damit lassen sich die besseren apikalen Werte der Sealerpenetration zwischen Single-Cone-Technik und lateraler Kondensation erklären. Trotzdem zeigten immer wieder Studien, dass Spaltraumbildung auch bei der Single-Cone-Technik häufiger auftrat [27].

Anhand der Auswertung zeigte sich ebenfalls, dass im mittleren Bereich des Wurzelkanal die Sealerpenetration bei lateraler Kondensation erhöht war. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass häufig im mittleren Teil der größte Druck durch Spreader und Kondensation wirken konnte, während apikal und koronal jeweils eine gewisse Sealerextrusion möglich war. Folglich kann eine dünne Sealerschicht tiefer in mehr frei exponierte Dentintubuli penetrieren.

Betrachtet man die Löslichkeit der Sealer, waren Unterschiede festzustellen. Die geringe Löslichkeit von *AH Plus* erklärt sich hauptsächlich durch seine chemische Zusammensetzung [54] und der daraus resultierenden Polymerisationsreaktion. Diese Polymerverbindung weist nach Erhärtung eine hohe Festigkeit und Stärke auf.

Die Zusammensetzung von *BioRoot* spiegelt eine andere Reaktion wider. Durch einen höheren Anteil an Nanopartikeln, können sich die Oberflächen während der Abbindereaktion vergrößern und somit mit mehr Wassermolekülen in Kontakt kommen [19]. Von einer Schrumpfung ist hier aber nicht auszugehen, da die Sealeranteile Kalzium-, Hydroxyl- sowie Siliziumionen mit phosphathaltigen Gewebeflüssigkeiten interagieren. Es bildet sich Kalziumhydroxylapatit [24], welches vermutlich eher zu einer besseren Abdichtung führt. Rein spekulativ ist hier die Annahme, dass durch die Oberflächenvergrößerung der Nanopartikel und den Kontakt mit Wasser größere Penetrationstiefen erreicht werden können. Ähnlich eines Kapillareffektes. Ausgeschlossen der Ex-vivo-Versuch [24], welcher unter den hier vorliegenden Versuchsbedingungen nicht mit in die Bewertung einfließen konnte, wäre dies eine weitere mögliche Erklärung für die höheren Penetrationstiefen von *BioRoot* im Vergleich zu *AH Plus*.

Viele durch den Versuch dargestellten Ergebnisse ließen sich nur bedingt mit Quellen bestätigen oder widerlegen, da häufig das Studiendesign nicht direkt miteinander vergleichbar war oder die Zähne unter anderen Voraussetzungen analysiert wurden. In den meisten Vergleichen zwischen *AH Plus* und *BioRoot* erreichten die hier erzielten Werte der Penetration mindestens genauso gute Werte, wenn nicht sogar bessere. Trotzdem ist zu beachten, dass auch die morphologische Beschaffenheit der Zahnhartsubstanz, pathologische Ursache des Zahnes sowie die Versuchsparameter (exemplarisch: Exposition von Spülflüssigkeiten, Druck der Feile, Rest siehe 4.1) eine Rolle spielen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Sealerpenetration der hier, untersuchten Materialien stark von den oben diskutierten Einflussfaktoren abhängt und diese immer bei der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Es sind somit noch weitere Studien zur Untersuchung von Sealern erforderlich. Dies könnte gegebenenfalls im Rahmen einer Dezimierung der

zu untersuchenden Gruppen aber einer Vergrößerung der zu untersuchenden Zähne erfolgen.

Obgleich viele Einflussparameter die Sealerpenetration beeinflussen ist die laterale Kondensation die effektivste Wurzelkanalfüllmethode, welche die höchste Sealerpenetration im Bereich der Kaltfülltechniken betrifft.

5 Zusammenfassung

Die Endodontologie befasst sich mit der Lehre, Behandlung und Vermeidung von Erkrankungen des Endodonts (Pulpa-Dentin-Komplex) sowie des periapikalen Gewebes. Es soll ein langfristiger Erhalt des stomatognathen Systems erreicht werden. Dazu tragen suffiziente Wurzelkanalfüllungen bei. Genauer gesagt, hängt die suffiziente Wurzelkanalfüllung von mehreren Faktoren ab. Einer ist die suffiziente Sealerpenetration in die exponierten Dentintubuli nach erfolgter Kanalaufbereitung. 2016 wurde ein neuer trikalziumbasierter Sealer, *BioRoot RCS*, der Firma Septodont in den Dentalhandel gebracht. Dieser soll einerseits durch die biokompatible Versiegelung, andererseits durch den alkalischen pH-Wert von >11 , erzeugt durch Freisetzung von Kalziumionen, einen suffizienten Abschluss der Wurzelkanalfüllung ermöglichen.

5.1 Ziel der Studie

In dieser Studie sollte die Penetrationstiefe von *BioRoot RCS* mit unterschiedlichen Obturationsmethoden im Vergleich zu einer Referenzgruppe, *AH Plus*, in Kombination mit der lateralen Kondensation gezeigt werden.

5.2 Material und Methoden

Es wurden insgesamt 60 humane einwurzelige Zähne in vier Untersuchungsgruppen eingeteilt. Alle Zähne wurden gesäubert und mit dem *F360*-Feilensystem aufbereitet. Die Wurzelkanalspülung erfolgte mit einem standardisiertem Spülprotokoll, bestehend aus NaOCl 5,25 % und EDTA 15%. Die vier Untersuchungsgruppen beinhalteten die Referenzgruppe (*AH Plus*) LC gefüllt, die *BioRoot RCS* LC gefüllte Gruppe, eine SC gefüllte Gruppe mit *BioRoot RCS* sowie eine Gruppe mit *Biodentine* und *BioRoot RCS* gefüllt. Die zu verwendenden Sealer wurden mit den Fluoreszenzfarbstoffen Rhodamin-B-Isotiocyanat und Fluorescein-Natrium versetzt. Nach vierwöchiger Aushärtung

der Sealer in den Wurzelkanälen erfolgte das Sägen der Proben und die Untersuchung unter dem konfokalen Laserscanningmikroskop.

5.3 Ergebnisse

Die Referenzgruppe mit *AH Plus* zeigte apikal, im Median deutlich schlechtere Penetrationstiefen von 79 µm im Vergleich zu *BioRoot RCS* mit signifikant erhöhten 159 - 164 µm Penetrationstiefe. Im medialen Wurzelbereich differenzierten sich die unterschiedlichen Untersuchungsgruppen, wobei im direkten Vergleich der Fülltechnik *BioRoot RCS LC* mit 329 µm zu *AH Plus LC* 230 µm deutlich tiefer penetrierte. Die koronale Penetration der LC mit *BioRoot RCS* 237 µm war geringer als die LC mit *AH Plus* 295 µm. Trotzdem erzielte die SC Technik ähnliche Ergebnisse wie die LC mit *AH Plus* bei 293 µm – 295 µm. Die vierte zu untersuchende Gruppe bestehend aus *Biodentine* war mit ihren Medianwerten vergleichbar mit der LC-Technik mit *AH Plus*. (siehe Tabelle 2)

5.4 Schlussfolgerung

Innerhalb der Grenzen dieser In-vitro-Studie kann der Schluss gezogen werden, dass *BioRoot RCS* tiefer in Dentinkanälchen penetriert als die Vergleichsgruppen mit *AH Plus*. *BioRoot RCS* penetrierte in beiden Füllungsgruppen apikal tiefer als die Referenzgruppe. Im medialen Bereich hatte die laterale Kondensation höhere Penetrationstiefen als *AH Plus*. Koronal hingegen zeigten alle Untersuchungsgruppen annähernd ähnliche Werte.

6 Summary

Endodontology deals with teaching, treatment and prevention of diseases of the endodont (pulp-dentin complex) and periapical tissues. The aim is to achieve long-term preservation of the stomatognathic system, contributed to by sufficient root canal fillings. More precisely, sufficient root canal filling depends on several factors. One is sufficient sealer penetration into the freely exposed dentinal tubules after uniform canal preparation. In 2016, a new tricalcium-based sealer, *BioRoot RCS*, from Septodont was introduced to the dental trade. On the one hand, the biocompatible sealant and, on the other hand, the alkaline pH value of >11 generated by the release of calcium ions should enable sufficient completion of the root canal filling.

6.1 Aim

The purpose of this study was to demonstrate the penetration depth of *BioRoot RCS* in different obturation methods and always in comparison to a reference group consisting of *AH Plus*.

6.2 Materials and Methods

A total of 60 human single-rooted teeth were divided into four study groups. All teeth were cleaned and prepared with the *F360* filing system. Root canal irrigation was performed using a standardized irrigation protocol consisting of NaOCl 5.25 % and EDTA 15 %. The four study groups included the reference group (*AH Plus*) LC (lateral condensation) filled, the *BioRoot RCS* LC filled group, an SC filled group with *BioRoot RCS*, and a group filled with *Biodentine* and *BioRoot*. The fluorescent dyes rhodamine B isotiocyanate and fluorescein sodium were added to the sealers prior to use. After four weeks of curing of the sealers in the root canals, the samples were sawed and examined under the confocal laser scanning microscope.

6.3 Results

The reference group with *AH Plus* showed significantly less penetration depths of 79 μm compared to *BioRoot RCS* with significantly increased 159 – 164 μm penetration depth in the apical and middle sections of the root canals. In the middle root region, the study groups differentiated, with *BioRoot RCS* LC penetrating significantly deeper at 329 μm to *AH Plus* LC 230 μm in a direct comparison of the filling technique. The coronal penetration of LC with *BioRoot RCS* 237 μm was inferior to LC with *AH Plus* by 295 μm . Nevertheless, the SC technique achieved similar results to LC with *AH Plus* at 293 μm – 295 μm . The median values of group 4 to be investigated with *Biodentine* was always on par with the LC technique with *AH Plus*. (see chart 2)

6.4 Conclusion

Within the limits of this in vitro study, it can be concluded that *BioRoot RCS* penetrates deeper into dentinal tubules than the comparison groups with *AH Plus*. *BioRoot RCS* penetrates apically deeper than the reference group in both filling groups. In the medial region, lateral condensation has higher penetration depths than *AH Plus*. Coronally, however, all study groups show approximately similar values.

7 Quellenverzeichnis

- [1] Accardo C, van Himel T, Lallier TE. A novel GuttaFlow sealer supports cell survival and attachment. *Journal of endodontics* 2014; 40(2): 231–4.
- [2] American Association of Endodontists. *Treatment Standards Whitepaper*; 2018.
- [3] Amoroso-Silva PA, Guimarães BM, Marciano MA, *et al.* Microscopic analysis of the quality of obturation and physical properties of MTA Fillapex. *Microscopy research and technique* 2014; 77(12): 1031–6.
- [4] Amos WB, White JG. How the Confocal Laser Scanning Microscope entered Biological Research. *Biol Cell* 2003; 95(6): 335–42.
- [5] Andreasen JO, Farik B, Munksgaard EC. Long-term calcium hydroxide as a root canal dressing may increase risk of root fracture. *Dental Traumatology* 2002; 18(3): 134–7.
- [6] Arx T von. Apical surgery: A review of current techniques and outcome. *Saudi Dent J* 2011; 23(1): 9–15.
- [7] Assmann E, Scarparo RK, Böttcher DE, Grecca FS. Dentin bond strength of two mineral trioxide aggregate-based and one epoxy resin-based sealers. *Journal of endodontics* 2012; 38(2): 219–21.
- [8] Atmeh AR, Chong EZ, Richard G, Festy F, Watson TF. Dentin-cement interfacial interaction: calcium silicates and polyalkenoates. *J Dent Res* 2012; 91(5): 454–9.
- [9] Aydın ZU, Özyürek T, Keskin B, Baran T. Effect of chitosan nanoparticle, QMix, and EDTA on TotalFill BC sealers' dentinal tubule penetration: a confocal laser scanning microscopy study. *Odontology* 2019; 107(1): 64–71.
- [10] Azar NG, Heidari M, Bahrami ZS, Shokri F. In vitro cytotoxicity of a new epoxy resin root canal sealer. *Journal of endodontics* 2000; 26(8): 462–5.
- [11] Basrani B, HAAPASALO M. Update on endodontic irrigating solutions. *Endodontic Topics* 2012; 27(1): 74–102.

- [12] Baumgartner JC, Cuenin PR. Efficacy of several concentrations of sodium hypochlorite for root canal irrigation. *Journal of endodontics* 1992; 18(12): 605–12.
- [13] BEATTY RG, VERTUCCI FJ, ZAKARIASEN KL. Apical sealing efficacy of endodontic obturation techniques. *Int Endod J* 1986; 19(5): 237–41.
- [14] Beitz W, editor. *Taschenbuch für den Maschinenbau: Mit Tabellen*. 20., neubearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer; 2001.
- [15] Bergenholtz G, Nyman S. Endodontic complications following periodontal and prosthetic treatment of patients with advanced periodontal disease. *J Periodontol* 1984; 55(2): 63–8.
- [16] Bergmans L, van Cleynenbreugel J, Wevers M, Lambrechts P. Mechanical root canal preparation with NiTi rotary instruments: rationale, performance and safety. Status report for the American Journal of Dentistry. *Am J Dent* 2001; 14(5): 324–33.
- [17] Best SM, Porter AE, Thian ES, Huang J. Bioceramics: Past, present and for the future. *Journal of the European Ceramic Society* 2008; 28(7): 1319–27.
- [18] Blank-Gonçalves LM, Nabeshima CK, Martins GHR, Machado MEdL. Qualitative analysis of the removal of the smear layer in the apical third of curved roots: conventional irrigation versus activation systems. *Journal of endodontics* 2011; 37(9): 1268–71.
- [19] Borges RP, Sousa-Neto MD, Versiani MA, *et al.* Changes in the surface of four calcium silicate-containing endodontic materials and an epoxy resin-based sealer after a solubility test. *Int Endod J* 2012; 45(5): 419–28.
- [20] Brackett MG, Martin R, Sword J, *et al.* Comparison of seal after obturation techniques using a polydimethylsiloxane-based root canal sealer. *Journal of endodontics* 2006; 32(12): 1188–90.
- [21] Byström A, Sundqvist G. Bacteriologic evaluation of the efficacy of mechanical root canal instrumentation in endodontic therapy. *Scand J Dent Res* 1981; 89(4): 321–8.
- [22] Camargo CHR, Siviero M, Camargo SEA, Oliveira SHG de, Carvalho CAT, Valera MC. Topographical, diametral, and quantitative analysis of

- dentin tubules in the root canals of human and bovine teeth. *Journal of endodontics* 2007; 33(4): 422–6.
- [23] Camps J, About I. Cytotoxicity testing of endodontic sealers: a new method. *Journal of endodontics* 2003; 29(9): 583–6.
- [24] Camps J, Jeanneau C, El Ayachi I, Laurent P, About I. Bioactivity of a Calcium Silicate-based Endodontic Cement (BioRoot RCS): Interactions with Human Periodontal Ligament Cells In Vitro. *Journal of endodontics* 2015; 41(9): 1469–73.
- [25] Candeiro GTdM, Correia FC, Duarte MAH, Ribeiro-Siqueira DC, Gavini G. Evaluation of radiopacity, pH, release of calcium ions, and flow of a bioceramic root canal sealer. *Journal of endodontics* 2012; 38(6): 842–5.
- [26] Cardoso LR, Baldasso FER, Delai D, Montagner F, Kopper PMP. Effect of EDTA, sodium, and calcium hypochlorite on the inorganic component of root canal dentin: A SEM analysis. *Microscopy research and technique* 2019; 82(2): 128–33.
- [27] Celikten B, F Uzuntas C, I Orhan A, *et al.* Micro-CT assessment of the sealing ability of three root canal filling techniques. *J Oral Sci* 2015; 57(4): 361–6.
- [28] Chai H, Tamse A. Vertical Root Fracture in Buccal Roots of Bifurcated Maxillary Premolars from Condensation of Gutta-percha. *Journal of endodontics* 2018; 44(7): 1159–63.
- [29] Chandra SS, Shankar P, Indira R. Depth of penetration of four resin sealers into radicular dentinal tubules: a confocal microscopic study. *Journal of endodontics* 2012; 38(10): 1412–6.
- [30] Chércoles-Ruiz A, Sánchez-Torres A, Gay-Escoda C. Endodontics, Endodontic Retreatment, and Apical Surgery Versus Tooth Extraction and Implant Placement: A Systematic Review. *Journal of endodontics* 2017; 43(5): 679–86.
- [31] Chugal N, Mallya SM, Kahler B, Lin LM. Endodontic Treatment Outcomes. *Dent Clin North Am* 2017; 61(1): 59–80.
- [32] Collado-González M, García-Bernal D, Oñate-Sánchez RE, *et al.* Biocompatibility of three new calcium silicate-based endodontic sealers on human periodontal ligament stem cells. *Int Endod J* 2017; 50(9): 875–84.

- [33] Dai L, Khechen K, Khan S, *et al.* The effect of QMix, an experimental antibacterial root canal irrigant, on removal of canal wall smear layer and debris. *Journal of endodontics* 2011; 37(1): 80–4.
- [34] Darcey J, Jawad S, Taylor C, Roudsari RV, Hunter M. Modern Endodontic Principles Part 4: Irrigation. *Dent Update* 2016; 43(1): 20-2, 25-6, 28-30 *passim*.
- [35] De-Deus G, Canabarro A, Alves GG, Marins JR, Linhares ABR, Granjeiro JM. Cytocompatibility of the ready-to-use bioceramic putty repair cement iRoot BP Plus with primary human osteoblasts. *Int Endod J* 2012; 45(6): 508–13.
- [36] De-Deus G, Murad C, Paciornik S, Reis CM, Coutinho-Filho T. The effect of the canal-filled area on the bacterial leakage of oval-shaped canals. *Int Endod J* 2008; 41(3): 183–90.
- [37] De-Deus G, Reis C, Beznos D, Abranches AMG de, Coutinho-Filho T, Paciornik S. Limited ability of three commonly used thermoplasticized gutta-percha techniques in filling oval-shaped canals. *Journal of endodontics* 2008; 34(11): 1401–5.
- [38] De-Deus G, Reis C, Di Giorgi K, Brandão MC, Audi C, Fidel RAS. Interfacial adaptation of the Epiphany self-adhesive sealer to root dentin. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2011; 111(3): 381–6.
- [39] Desai S, Chandler N. Calcium hydroxide-based root canal sealers: a review. *Journal of endodontics* 2009; 35(4): 475–80.
- [40] Deus GA de, Gurgel-Filho ED, Maniglia-Ferreira C, Coutinho-Filho T. The influence of filling technique on depth of tubule penetration by root canal sealer: a study using light microscopy and digital image processing. *Aust Endod J* 2004; 30(1): 23–8.
- [41] DGZMK. Stellungnahme Wurzelkanalaufbereitungen DGZMK; 2000.
- [42] DGZMK. Wissenschaftliche Stellungnahme der DGZMK: Wurzelkanalfüllpasten und –stifte.; 1999.
- [43] Dibaji F, Mohammadi E, Farid F, Mohammadian F, Sarraf P, Kharrazifard MJ. The Effect of BC Sealer, AH-Plus and Dorifill on Push-out Bond Strength of Fiber Post. *Iran Endod J* 2017; 12(4): 443–8.

- [44] Donnermeyer D, Schmidt S, Rohrbach A, Berlandi J, Bürklein S, Schäfer E. Debunking the Concept of Dentinal Tubule Penetration of Endodontic Sealers: Sealer Staining with Rhodamine B Fluorescent Dye Is an Inadequate Method. *Materials (Basel)* 2021; 14(12): 3211.
- [45] Dotto L, Sarkis Onofre R, Bacchi A, Rocha Pereira GK. Effect of Root Canal Irrigants on the Mechanical Properties of Endodontically Treated Teeth: A Scoping Review. *Journal of endodontics* 2020; 46(5): 596-604.e3.
- [46] Dudeja PG, Dudeja KK, Srivastava D, Grover S. Microorganisms in periradicular tissues: Do they exist? A perennial controversy. *J Oral Maxillofac Pathol* 2015; 19(3): 356–63.
- [47] Edgar Schäfer. Irrigation of the root canal 2007.
- [48] El Hachem R, Khalil I, Le Brun G, *et al.* Dentinal tubule penetration of AH Plus, BC Sealer and a novel tricalcium silicate sealer: a confocal laser scanning microscopy study. *Clin Oral Investig* 2019; 23(4): 1871–6.
- [49] Elements of chordate anatomy. By Charles K. Weichert. vii + 503 pages, illustrated \$6.75. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York. 2nd edition 1959. *Anat. Rec.* 1960; 138(4): 495.
- [50] Elnaghy A, Elsaka S. Fracture resistance of simulated immature roots using Biodentine and fiber post compared with different canal-filling materials under aging conditions. *Clin Oral Investig* 2020; 24(3): 1333–8.
- [51] Enkel B, Dupas C, Armengol V, *et al.* Bioactive materials in endodontics. *Expert Rev Med Devices* 2008; 5(4): 475–94.
- [52] European Society of Endodontology. Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J* 2006; 39(12): 921–30.
- [53] Feldmann G, Nyborg H, Conrado CA. Tissue reactions to root filling materials. 3. A comparison between implants of the root filling material N2 and silver in the jaws of rabbits. *Odontol Revy* 1967; 18(4): 387–93.
- [54] Flores DSH, Rached FJA, Versiani MA, Guedes DFC, Sousa-Neto MD, Pécora JD. Evaluation of physicochemical properties of four root canal sealers. *Int Endod J* 2011; 44(2): 126–35.

- [55] Franco V, Fabiani C, Taschieri S, Malentacca A, Bortolin M, Del Fabbro M. Investigation on the shaping ability of nickel-titanium files when used with a reciprocating motion. *Journal of endodontics* 2011; 37(10): 1398–401.
- [56] Ghorbanzadeh A, Aminsobhani M, Sohrabi K, *et al.* Penetration Depth of Sodium Hypochlorite in Dentinal Tubules after Conventional Irrigation, Passive Ultrasonic Agitation and Nd:YAG Laser Activated Irrigation. *J Lasers Med Sci* 2016; 7(2): 105–11.
- [57] Giardino L, Cavani F, Generali L. Sodium hypochlorite solution penetration into human dentine: a histochemical evaluation. *Int Endod J* 2017; 50(5): 492–8.
- [58] Gilhooly RM, Hayes SJ, Bryant ST, Dummer PM. Comparison of cold lateral condensation and a warm multiphase gutta-percha technique for obturating curved root canals. *Int Endod J* 2000; 33(5): 415–20.
- [59] Glickman GN. AAE Consensus Conference on Diagnostic Terminology: background and perspectives. *Journal of endodontics* 2009; 35(12): 1619–20.
- [60] Grossman LI. *Endodontic practice*. 9. ed. Philadelphia: Lea Febiger 1978.
- [61] Gu X-H, Mao C-Y, Kern M. Effect of different irrigation on smear layer removal after post space preparation. *Journal of endodontics* 2009; 35(4): 583–6.
- [62] Gulabivala K, Holt R, Long B. An in vitro comparison of thermoplasticised gutta-percha obturation techniques with cold lateral condensation. *Endod Dent Traumatol* 1998; 14(6): 262–9.
- [63] Güzel C, Uzunoglu E, Dogan Buzoglu H. Effect of Low-surface Tension EDTA Solutions on the Bond Strength of Resin-based Sealer to Young and Old Root Canal Dentin. *Journal of endodontics* 2018; 44(3): 485–8.
- [64] Ha J-H, Kim H-C, Kim YK, Kwon T-Y. An Evaluation of Wetting and Adhesion of Three Bioceramic Root Canal Sealers to Intraradicular Human Dentin. *Materials (Basel)* 2018; 11(8).
- [65] HAAPASALO M, Parhar M, Huang X, Wei X, Lin J, Shen Y. Clinical use of bioceramic materials. *Endodontic Topics* 2015; 32(1): 97–117.
- [66] Hellwig E, Klimek J, Attin T. Einführung in die Zahnerhaltung: Prüfungswissen Kariologie, Endodontologie und Parodontologie ; mit 60

Tabellen. 5., überarb. und erw. Aufl., [Nachdr.] Köln: Dt. Zahnärzte-Verl. 2010.

- [67] Hench LL. Bioceramics: From Concept to Clinic. *J American Ceramic Society* 1991; 74(7): 1487–510.
- [68] Heran J, Khalid S, Albaaj F, Tomson PL, Camilleri J. The single cone obturation technique with a modified warm filler. *J Dent* 2019; 89: 103181.
- [69] Holland R, Gomes JE, Cintra LTA, Queiroz ÍOdA, Estrela C. Factors affecting the periapical healing process of endodontically treated teeth. *J Appl Oral Sci* 2017; 25(5): 465–76.
- [70] Hu RC, Xie W, Hu YQ, Piao ZG. Root canal anatomy of maxillary second premolars at various ages observed by cone-beam CT. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi* 2019; 54(11): 733–8.
- [71] Hülsmann M, Heckendorff M, Lennon A. Chelating agents in root canal treatment: mode of action and indications for their use. *Int Endod J* 2003; 36(12): 810–30.
- [72] Hülsmann M, Herbst U, Schäfers F. Comparative study of root-canal preparation using Lightspeed and Quantec SC rotary NiTi instruments. *Int Endod J* 2003; 36(11): 748–56.
- [73] Hülsmann, Schäfer, Petschelt, Raab, Weiger. *Good_clinical_practice__Die_Wurzelkanalbehandlung* 2014.
- [74] Ingrid Peroz, Felix Blankenstein, Klaus-Peter Lange, Michael Naumann. Restoring endodontically treated teeth. *Quintessenz International* 2015; 60(3): e87-e90.
- [75] Jafarzadeh M, Yazdizadeh M, Sheikh AF, Hosseini Goosheh SM, Khodadadnejad F, Rohani A. The effect of tapered master gutta-percha cone on apical seal of straight and curved root canals prepared with nickel-titanium rotary files. *Dent Res J (Isfahan)* 2020; 17(4): 287–92.
- [76] Jardine AP, Da Rosa RA, Santini MF, *et al.* The effect of final irrigation on the penetrability of an epoxy resin-based sealer into dentinal tubules: a confocal microscopy study. *Clin Oral Investig* 2016; 20(1): 117–23.
- [77] Jarrett IS, Marx D, Covey D, Karmazin M, Lavin M, Gound T. Percentage of canals filled in apical cross sections - an in vitro study of seven obturation techniques. *Int Endod J* 2004; 37(6): 392–8.

- [78] Juhász A, Verdes E, Tokés L, Kóbor A, Dobó-Nagy C. The influence of root canal shape on the sealing ability of two root canal sealers. *Int Endod J* 2006; 39(4): 282–6.
- [79] Jung S, Sielker S, Hanisch MR, Libricht V, Schäfer E, Dammaschke T. Cytotoxic effects of four different root canal sealers on human osteoblasts. *PLOS ONE* 2018; 13(3): e0194467.
- [80] Kardon BP, Kuttler S, Hardigan P, Dorn SO. An in vitro evaluation of the sealing ability of a new root-canal-obturation system. *Journal of endodontics* 2003; 29(10): 658–61.
- [81] Karobari MI, Basheer SN, Sayed FR, *et al.* An In Vitro Stereomicroscopic Evaluation of Bioactivity between Neo MTA Plus, Pro Root MTA, BIODENTINE & Glass Ionomer Cement Using Dye Penetration Method. *Materials (Basel)* 2021; 14(12).
- [82] Kennedy WA, Walker WA, Gough RW. Smear layer removal effects on apical leakage. *Journal of endodontics* 1986; 12(1): 21–7.
- [83] Kokkas AB, Boutsoukis AC, Vassiliadis LP, Stavrianos CK. The influence of the smear layer on dentinal tubule penetration depth by three different root canal sealers: an in vitro study. *Journal of endodontics* 2004; 30(2): 100–2.
- [84] Komabayashi T, Ahn C, Zhang S, Zhu Q, Spångberg LSW. Chronologic comparison of root dentin moisture in extracted human teeth stored in formalin, sodium azide, and distilled water. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2009; 108(1): e50-4.
- [85] Komet-Dental. Step-by-Step Anleitung F360 System.
- [86] Kontakiotis EG, Tzanetakis GN, Loizides AL. A 12-month longitudinal in vitro leakage study on a new silicon-based root canal filling material (Gutta-Flow). *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2007; 103(6): 854–9.
- [87] Krajczár K, Varga E, Marada G, Jeges S, Tóth V. Comparison of working length control consistency between hand K-files and Mtwo NiTi rotary system. *J Clin Exp Dent* 2016; 8(2): e136-40.

- [88] Lee K-W, Williams MC, Camps JJ, Pashley DH. Adhesion of endodontic sealers to dentin and gutta-percha. *Journal of endodontics* 2002; 28(10): 684–8.
- [89] Lee S-H, Oh S, Al-Ghamdi AS, Mandorah AO, Kum K-Y, Chang SW. Sealing Ability of AH Plus and GuttaFlow Bioseal. *Bioinorg Chem Appl* 2020; 2020: 8892561.
- [90] Leonardo MR, da Silva LAB, Filho MT, da Silva RS. Release of formaldehyde by 4 endodontic sealers. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 1999; 88(2): 221–5.
- [91] Lodiene G, Morisbak E, Bruzell E, Ørstavik D. Toxicity evaluation of root canal sealers in vitro. *Int Endod J* 2008; 41(1): 72–7.
- [92] Loushine BA, Bryan TE, Looney SW, *et al.* Setting properties and cytotoxicity evaluation of a premixed bioceramic root canal sealer. *Journal of endodontics* 2011; 37(5): 673–7.
- [93] Luo Z, Li D, Kohli MR, Yu Q, Kim S, He W-X. Effect of Biodentine™ on the proliferation, migration and adhesion of human dental pulp stem cells. *J Dent* 2014; 42(4): 490–7.
- [94] Lussi A, Imwinkelried S, Stich H. Obturation of root canals with different sealers using non-instrumentation technology. *Int Endod J* 1999; 32(1): 17–23.
- [95] Machado MEL, Veintimilla Lozada VN, Carrillo Rengifo KJ, Guillén REG, Caballero-Flores H, Nabeshima CK. Confocal laser scanning microscopic analysis of the penetration of an epoxy resin-based sealer into dentinal tubules after calcium hydroxide dressing. *Australian Endodontic Journal* 2021; 47(3): 480–6.
- [96] Mader CL, Baumgartner JC, Peters DD. Scanning electron microscopic investigation of the smeared layer on root canal walls. *Journal of endodontics* 1984; 10(10): 477–83.
- [97] Marciano MA, Duarte MAH, Camilleri J. Dental discoloration caused by bismuth oxide in MTA in the presence of sodium hypochlorite. *Clin Oral Investig* 2015; 19(9): 2201–9.

- [98] McComb D, Smith DC. A preliminary scanning electron microscopic study of root canals after endodontic procedures. *Journal of endodontics* 1975; 1(7): 238–42.
- [99] McMichael GE, Primus CM, Opperman LA. Dentinal Tubule Penetration of Tricalcium Silicate Sealers. *Journal of endodontics* 2016; 42(4): 632–6.
- [100] McMurtrey LG, Krell KV, Wilcox LR. A comparison between thermafil and lateral condensation in highly curved canals. *Journal of endodontics* 1992; 18(2): 68–71.
- [101] Monticelli F, Sadek FT, Schuster GS, *et al.* Efficacy of two contemporary single-cone filling techniques in preventing bacterial leakage. *Journal of endodontics* 2007; 33(3).
- [102] Monticelli F, Sword J, Martin RL, *et al.* Sealing properties of two contemporary single-cone obturation systems. *Int Endod J* 2007; 40(5): 374–85.
- [103] Moussa-Badran S, Roy B, Du Bessart Parc AS, Bruyant M, Lefevre B, Maurin JC. Technical quality of root fillings performed by dental students at the dental teaching centre in Reims, France. *Int Endod J* 2008; 41(8): 679–84.
- [104] Nagas E, Uyanik MO, Eymirli A, *et al.* Dentin moisture conditions affect the adhesion of root canal sealers. *Journal of endodontics* 2012; 38(2): 240–4.
- [105] Nair PNR. Pathogenesis of apical periodontitis and the causes of endodontic failures. *Crit Rev Oral Biol Med* 2004; 15(6): 348–81.
- [106] Najar AL, Saquy PC, Vansan LP, Sousa-Neto MD. Adhesion of a glass-ionomer root canal sealer to human dentine. *Aust Endod J* 2003; 29(1): 20–2.
- [107] Ng Y-L, Mann V, Gulabivala K. A prospective study of the factors affecting outcomes of nonsurgical root canal treatment: part 1: periapical health. *Int Endod J* 2011; 44(7): 583–609.
- [108] Oesterle LJ, Shellhart WC, Belanger GK. The use of bovine enamel in bonding studies. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1998; 114(5): 514–9.
- [109] Ordinola-Zapata R, Bramante CM, Graeff MSZ, *et al.* Depth and percentage of penetration of endodontic sealers into dentinal tubules after root canal obturation using a lateral compaction technique: a confocal

- laser scanning microscopy study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2009; 108(3): 450–7.
- [110] Otake S. The influence of the difference of caries detective methods on the bond strength for caries affected root canal dentin. *Kokubyo Gakkai Zasshi* 2010; 77(1): 20–6.
- [111] P V R, Vemisetty H, K D, *et al.* Comparative Evaluation of Marginal Adaptation of Biodentine(TM) and Other Commonly Used Root End Filling Materials-An Invitro Study. *JCDR* 2014; 8(3): 243–5.
- [112] Palhais M, Sousa-Neto MD, Rached-Junior FJA, *et al.* Influence of solvents on the bond strength of resin sealer to intraradicular dentin after retreatment. *Braz Oral Res* 2017; 31: e11.
- [113] Parirokh M, Torabinejad M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review--Part I: chemical, physical, and antibacterial properties. *Journal of endodontics* 2010; 36(1): 16–27.
- [114] Parirokh M, Torabinejad M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review--Part III: Clinical applications, drawbacks, and mechanism of action. *Journal of endodontics* 2010; 36(3): 400–13.
- [115] Pashley EL, Birdsong NL, Bowman K, Pashley DH. Cytotoxic effects of NaOCl on vital tissue. *Journal of endodontics* 1985; 11(12): 525–8.
- [116] Patel S, RICUCCI D, Durak C, Tay F. Internal root resorption: a review. *Journal of endodontics* 2010; 36(7): 1107–21.
- [117] Patni PM, Chandak M, Jain P, *et al.* Stereomicroscopic Evaluation of Sealing Ability of Four Different Root Canal Sealers- An invitro Study. *J Clin Diagn Res* 2016; 10(8): ZC37-9.
- [118] Perdigão J. Dentin bonding-variables related to the clinical situation and the substrate treatment. *Dent Mater* 2010; 26(2): e24-37.
- [119] Pereira KdF, Vencão AC, Magro MG, *et al.* Effect of endodontic retreatment on the bond strength of resin cements to root canal dentin. *Am J Dent* 2019; 32(3): 147–51.
- [120] Peters OA, Peters CI, Schönenberger K, Barbakow F. ProTaper rotary root canal preparation: effects of canal anatomy on final shape analysed by micro CT. *Int Endod J* 2003; 36(2): 86–92.

- [121] Peters OA, Schönenberger K, Laib A. Effects of four Ni-Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by micro computed tomography. *Int Endod J* 2001; 34(3): 221–30.
- [122] Pirani C, Pelliccioni GA, Marchionni S, Montebugnoli L, Piana G, Prati C. Effectiveness of three different retreatment techniques in canals filled with compacted gutta-percha or Thermafil: a scanning electron microscope study. *Journal of endodontics* 2009; 35(10): 1433–40.
- [123] Poggio C, Riva P, Chiesa M, Colombo M, Pietrocola G. Comparative cytotoxicity evaluation of eight root canal sealers. *J Clin Exp Dent* 2017; 9(4): e574-e578.
- [124] Prüllage R-K, Urban K, Schäfer E, Dammaschke T. Material Properties of a Tricalcium Silicate-containing, a Mineral Trioxide Aggregate-containing, and an Epoxy Resin-based Root Canal Sealer. *Journal of endodontics* 2016; 42(12): 1784–8.
- [125] Rafter M. Apexification: a review. *Dental Traumatology* 2005; 21(1): 1–8.
- [126] Raghavendra SS, Jadhav GR, Gathani KM, Kotadia P. Bioceramics in endodontics - a review. *J Istanb Univ Fac Dent* 2017; 51(3 Suppl 1): S128-S137.
- [127] Rangappa KG, Hegde J, Chikkamallaiah C, Bashetty K, Rashmi K, Kumar KK. Comparative evaluation of the sealing ability of different obturation systems used over apically separated rotary nickel-titanium files: An in vitro study. *J Conserv Dent* 2013; 16(5): 408–12.
- [128] Reeves GW, Fitchie JG, Hembree JH, Puckett AD. Microleakage of new dentin bonding systems using human and bovine teeth. *Oper Dent* 1995; 20(6): 230–5.
- [129] Reszka P, Nowicka A, Lipski M, Dura W, Drożdżik A, Woźniak K. A Comparative Chemical Study of Calcium Silicate-Containing and Epoxy Resin-Based Root Canal Sealers. *Biomed Res Int* 2016; 2016: 9808432.
- [130] Reynolds JZ, Augsburger RA, Svoboda KKH, Jalali P. Comparing dentinal tubule penetration of conventional and 'HiFlow' bioceramic sealers with resin-based sealer: An in vitro study. *Australian Endodontic Journal* 2020; 46(3): 387–93.

- [131] Ribeiro RG, Marchesan MA, Silva RG, Sousa-Neto MD, Pécora JD. Dentin permeability of the apical third in different groups of teeth. *Braz Dent J* 2010; 21(3): 216–9.
- [132] Robberecht L, Dehurtevent M, Lemaitre G, Béhal H, Hornez J-C, Claisse-Crinquette A. Influence of Root Canal Curvature on Wall Cleanliness in the Apical Third during Canal Preparation. *Eur Endod J* 2017; 2(1): 1–6.
- [133] Rödiger T, Döllmann S, Konietschke F, Drebenstedt S, Hülsmann M. Effectiveness of different irrigant agitation techniques on debris and smear layer removal in curved root canals: a scanning electron microscopy study. *Journal of endodontics* 2010; 36(12): 1983–7.
- [134] Rödiger T, Müller C, Hoch M, *et al.* Moisture content of root canal dentine affects detection of microcracks using micro-computed tomography. *Int Endod J* 2018; 51(3): 357–63.
- [135] Roggendorf MJ, Ebert J, Petschelt A, Frankenberger R. Influence of moisture on the apical seal of root canal fillings with five different types of sealer. *Journal of endodontics* 2007; 33(1): 31–3.
- [136] Roizenblit RN, Soares FO, Lopes RT, Dos Santos BC, Gusman H. Root canal filling quality of mandibular molars with EndoSequence BC and AH Plus sealers: A micro-CT study. *Australian Endodontic Journal* 2020; 46(1): 82–7.
- [137] Salles LP, Gomes-Cornélio AL, Guimarães FC, *et al.* Mineral trioxide aggregate-based endodontic sealer stimulates hydroxyapatite nucleation in human osteoblast-like cell culture. *Journal of endodontics* 2012; 38(7): 971–6.
- [138] Santana FR, Pereira JC, Pereira CA, Fernandes Neto AJ, Soares CJ. Influence of method and period of storage on the microtensile bond strength of indirect composite resin restorations to dentine. *Braz Oral Res* 2008; 22(4): 352–7.
- [139] Sarkar NK, Caicedo R, Ritwik P, Moiseyeva R, Kawashima I. Physicochemical basis of the biologic properties of mineral trioxide aggregate. *Journal of endodontics* 2005; 31(2): 97–100.
- [140] Schilder H. Cleaning and shaping the root canal. *Dent Clin North Am* 1974; 18(2): 269–96.

- [141] Schilder H, Goodman A, Aldrich W. The thermomechanical properties of gutta-percha. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology* 1974; 37(6): 946–53.
- [142] Seidberg BH, Schilder H. An evaluation of EDTA in endodontics. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology* 1974; 37(4): 609–20.
- [143] Septodont. *Biodentine Handbuch*.
- [144] Shipper G, Grossman ES, Botha AJ, Cleaton-Jones PE. Marginal adaptation of mineral trioxide aggregate (MTA) compared with amalgam as a root-end filling material: a low-vacuum (LV) versus high-vacuum (HV) SEM study. *Int Endod J* 2004; 37(5): 325–36.
- [145] Shuping GB, Orstavik D, Sigurdsson A, Trope M. Reduction of intracanal bacteria using nickel-titanium rotary instrumentation and various medications. *Journal of endodontics* 2000; 26(12): 751–5.
- [146] Silvestrin T, Torabinejad M, Handysides R, Shabahang S. Effect of apex size on the leakage of gutta-percha and sealer-filled root canals. *Quintessence Int* 2016; 47(5): 373–8.
- [147] Simons J, Ibanez B, Friedman S, Trope M. Leakage after lateral condensation with finger spreaders and D-11-T spreaders. *Journal of endodontics* 1991; 17(3): 101–4.
- [148] Siqueira JF, Favieri A, Gahyva SM, Moraes SR, Lima KC, Lopes HP. Antimicrobial activity and flow rate of newer and established root canal sealers. *Journal of endodontics* 2000; 26(5): 274–7.
- [149] Sjögren U, Figdor D, Persson S, Sundqvist G. Influence of infection at the time of root filling on the outcome of endodontic treatment of teeth with apical periodontitis. *Int Endod J* 1997; 30(5): 297–306.
- [150] Sjögren U, Hägglund B, Sundqvist G, Wing K. Factors affecting the long-term results of endodontic treatment. *Journal of endodontics* 1990; 16(10): 498–504.
- [151] Skinner RL, van Himel T. The sealing ability of injection-molded thermoplasticized gutta-percha with and without the use of sealers. *Journal of endodontics* 1987; 13(7): 315–7.

- [152] Sonntag D, Guntermann A, Kim SK, Stachniss V. Root canal shaping with manual stainless steel files and rotary Ni-Ti files performed by students. *Int Endod J* 2003; 36(4): 246–55.
- [153] Sousa CJA, Montes CRM, Pascon EA, Loyola AM, Versiani MA. Comparison of the intraosseous biocompatibility of AH Plus, EndoREZ, and Epiphany root canal sealers. *Journal of endodontics* 2006; 32(7): 656–62.
- [154] Spångberg LS, Barbosa SV, Lavigne GD. AH26 releases formaldehyde. *Journal of endodontics* 1993; 19(12): 596–8.
- [155] Stojicic S, Zivkovic S, Qian W, Zhang H, HAAPASALO M. Tissue dissolution by sodium hypochlorite: effect of concentration, temperature, agitation, and surfactant. *Journal of endodontics* 2010; 36(9): 1558–62.
- [156] Tagger M, Tagger E, Tjan AHL, Bakland LK. Measurement of adhesion of endodontic sealers to dentin. *Journal of endodontics* 2002; 28(5): 351–4.
- [157] Taşdemir T, Aydemir H, Inan U, Unal O. Canal preparation with Hero 642 rotary Ni-Ti instruments compared with stainless steel hand K-file assessed using computed tomography. *Int Endod J* 2005; 38(6): 402–8.
- [158] Tedesco M, Chain MC, Bortoluzzi EA, da Fonseca Roberti Garcia L, Alves AMH, Teixeira CS. Comparison of two observational methods, scanning electron and confocal laser scanning microscopies, in the adhesive interface analysis of endodontic sealers to root dentine. *Clin Oral Investig* 2018; 22(6): 2353–61.
- [159] Topçuoğlu HS, Kesim B, Düzgün S, Tuncay Ö, Demirbuga S, Topçuoğlu G. The effect of various backfilling techniques on the fracture resistance of simulated immature teeth performed apical plug with Biodentine. *Int J Paediatr Dent* 2015; 25(4): 248–54.
- [160] Torabinejad M, Parirokh M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review--part II: leakage and biocompatibility investigations. *Journal of endodontics* 2010; 36(2): 190–202.
- [161] Torabinejad M, Watson TF, Pitt Ford TR. Sealing ability of a mineral trioxide aggregate when used as a root end filling material. *Journal of endodontics* 1993; 19(12): 591–5.

- [162] Tummala M, Chandrasekhar V, Rashmi AS, Kundabala M, Ballal V. Assessment of the wetting behavior of three different root canal sealers on root canal dentin. *J Conserv Dent* 2012; 15(2): 109–12.
- [163] Türker SA, Uzunoğlu-Özyürek E, Kaşıkçı S, Öndeş M, Geneci F, Çelik HH. Filling quality of several obturation techniques in the presence of apically separated instruments: A Micro-CT study. *Microscopy research and technique* 2021; 84(6): 1265–71.
- [164] Uğur Aydın Z, Koşumcu S, Meşeci B. Effect of Different Irrigation Activation Techniques on Sealer Penetration: A Confocal Laser Microscopy Study. *Chin J Dent Res* 2021; 24(2): 113–8.
- [165] Violich DR, Chandler NP. The smear layer in endodontics - a review. *Int Endod J* 2010; 43(1): 2–15.
- [166] Vishwanath V, Rao HM. Gutta-percha in endodontics - A comprehensive review of material science. *J Conserv Dent* 2019; 22(3): 216–22.
- [167] Walker MP, Diliberto A, Lee C. Effect of setting conditions on mineral trioxide aggregate flexural strength. *Journal of endodontics* 2006; 32(4): 334–6.
- [168] Watson TF, Atmeh AR, Sajini S, Cook RJ, Festy F. Present and future of glass-ionomers and calcium-silicate cements as bioactive materials in dentistry: biophotonics-based interfacial analyses in health and disease. *Dent Mater* 2014; 30(1): 50–61.
- [169] WHITWORTH J. Methods of filling root canals: principles and practices. *Endodontic Topics* 2005; 12(1): 2–24.
- [170] Willershausen I, Wolf T, Kasaj A, Weyer V, Willershausen B, Marroquin BB. Influence of a bioceramic root end material and mineral trioxide aggregates on fibroblasts and osteoblasts. *Arch Oral Biol* 2013; 58(9): 1232–7.
- [171] Wu MK, Fan B, Wesselink PR. Diminished leakage along root canals filled with gutta-percha without sealer over time: a laboratory study. *Int Endod J* 2000; 33(2): 121–5.
- [172] Wu MK, Ozok AR, Wesselink PR. Sealer distribution in root canals obturated by three techniques. *Int Endod J* 2000; 33(4): 340–5.

- [173] Wu M-K, Bud MG, Wesselink PR. The quality of single cone and laterally compacted gutta-percha fillings in small and curved root canals as evidenced by bidirectional radiographs and fluid transport measurements. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2009; 108(6): 946–51.
- [174] Xu J, He J, Shen Y, *et al.* Influence of Endodontic Procedure on the Adherence of *Enterococcus faecalis*. *Journal of endodontics* 2019; 45(7): 943–9.
- [175] Yilmaz Z, Tuncel B, Ozdemir HO, Serper A. Microleakage evaluation of roots filled with different obturation techniques and sealers. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2009; 108(1): 124–8.
- [176] You S-Y, Bae K-S, Baek S-H, Kum K-Y, Shon W-J, Lee W. Lifespan of one nickel-titanium rotary file with reciprocating motion in curved root canals. *Journal of endodontics* 2010; 36(12): 1991–4.
- [177] Zehnder M. Root canal irrigants. *Journal of endodontics* 2006; 32(5): 389–98.
- [178] Zhang D, Mao S, Lu C, Romberg E, Arola D. Dehydration and the dynamic dimensional changes within dentin and enamel. *Dent Mater* 2009; 25(7): 937–45.
- [179] Zhang H, Shen Y, Ruse ND, HAAPASALO M. Antibacterial activity of endodontic sealers by modified direct contact test against *Enterococcus faecalis*. *Journal of endodontics* 2009; 35(7): 1051–5.
- [180] Zoufan K, Jiang J, Komabayashi T, Wang Y-H, Safavi KE, Zhu Q. Cytotoxicity evaluation of Gutta Flow and Endo Sequence BC sealers. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2011; 112(5): 657–61.

8 Anhang

8.1 Lebenslauf

Auf den Lebenslauf wurde aus Datenschutzgründen verzichtet

8.2 Verzeichnis der akademischen Lehrenden

Meine akademischen Lehrenden waren in Marburg:

Arweiler, Asimonia-Eschbach, Auschill, Braun, Czubayko, Feuser,
Frankenberger, Gente, Hoch, Jablonski-Momeni, Kinscherf, Korbmacher-
Steiner, Kortus-Götze, Lill, Lotzmann, Mandic, Mengel, Neff, Neumüller,
Nonnenmacher, Plant, Roggendorf, Schütz, Stuck, Suske, Weihe.

8.3 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Beteiligten bedanken, die mich bei der Entstehung dieser Doktorarbeit tatkräftig unterstützt und motiviert haben.

Ein besonderer Dank geht an erster Stelle an meinen Doktorvater Herrn Privatdozent Dr. med. dent. Matthias J. Roggendorf für die Bereitstellung des Themas. Er hat durch sein exzellentes Engagement sowohl bei der praktischen Durchführung der Versuche – kein Weg war ihm zu weit, um erforderliche Verbrauchsmaterialien zu besorgen oder notwendige Tests durchzuführen - als auch beim Abfassen der Doktorarbeit zu einem erfolgreichen Abschluss beigetragen. Herrn Professor Dr. med. dent. Frankenberger danke ich für Möglichkeit der Durchführung dieser Arbeit in der Poliklinik für Zahnerhaltungskunde. Ebenfalls bedanke ich mich bei Prof. Dr. Dr. Krämer, Frau Dr. Lücker und Herrn Stork für die Möglichkeit der Versuchsdurchführung in den Räumen der Zahnklinik Gießen.

Ein besonderer Dank geht an meinen langjährigen Freund Dr. med. vet. Nico King-Urner und seine Frau für die aufmerksamen Korrekturlesungen dieser Arbeit. Bei meiner Freundin Franziska möchte ich mich herzlich für die Ermutigungen und die Unterstützung während der Durchführung dieser Arbeit bedanken. Außerdem geht ein großer Dank an meine Eltern für ihre Unterstützung und ihre Aufmunterungen, die letztendlich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben.