

Till Dammaschke

Kalziumsilikat-basierte Sealer: Das Ende der thermoplastischen Obturation?*

Warum Sie diesen Beitrag lesen sollten?

Vor- aber auch Nachteile der biokompatiblen und bioaktiven Kalziumsilikat-basierten Sealer werden dargestellt, vor allem in Hinblick auf verschiedene kalte und warme Wurzelkanalfülltechniken.

Zusammenfassung: Bei allen Obturationstechniken ist eine gewisse Menge an Wurzelkanalfüllpaste (Sealer) erforderlich, um kleine Unebenheiten entlang der Kanalwand auszugleichen. Als Goldstandard gelten dabei bisher Sealer auf Epoxidharzbasis. Eine neuere Entwicklung stellen Sealer auf Kalziumsilikatbasis (KSS) dar, die sich von Kalziumsilikat-basierten Zementen (MTA) ableiten. KSS sind nachgewiesenermaßen biokompatibel und bioaktiv. In Kontakt mit Gewebeflüssigkeit bildet sich an der Oberfläche von KSS ein Hydroxylapatit-ähnlicher Niederschlag, sodass diese Sealer offensichtlich nicht als körperfremd erkannt werden, auch im Falle einer Sealerextrusion. Nach dem Abbinden setzen die KSS über einen längeren Zeitraum OH^- und Ca^{2+} -Ionen frei, wodurch die Sealer möglicherweise gewisse antibakterielle Effekte aufweisen und die Heilung einer periapikalen Entzündung unterstützen. Daher gibt es Überlegungen, Wurzelkanäle hauptsächlich mit KSS zu füllen und den Gutta-perchaanteil zu minimieren. Allerdings liegen noch keine klinischen Langzeitstudien vor, die einen Vorteil dieses neuen Konzepts bestätigen.

Obwohl Guttapercha schon seit sehr langer Zeit erfolgreich für die Obturation von Wurzelkanälen verwendet wird, gibt es unterschiedliche Auffassung darüber, welche Wurzelkanalfülltechnik besser ist: kalte oder warme (thermoplastische) Obturation. Nach Exposition von suffizient gefüllten Wurzelkanälen mit Speichel kommt es immer zu einer Penetration von Mikroorganismen in das Wurzelkanalsystem – unabhängig von der Obturationsmethode. Keine bisher bekannte Obturationsmethode führt zu einem bakteriendichten Verschluss des Wurzelkanals. Hinsichtlich der klinischen Erfolgsraten konnte daher keine Überlegenheit der häufig propagierten thermoplastischen Wurzelkanalfülltechniken im Vergleich zur kalten lateralen Kompaktion nachgewiesen werden.

Für die thermoplastische Obturation sind KSS allerdings in der Regel nicht freigegeben, da diese Sealer wasserbasiert sind und zu befürchten ist, dass durch die hohen Temperaturen von bis zu 200 °C dem Sealer zu viel Wasser entzogen wird, was sich nachteilig auf die werkstoffkundlichen Eigenschaften auswirken könnte. Es ist aber fraglich, ob so hohe Temperaturen klinisch bei der thermoplastischen Obturation erreicht werden.

Nachteilig an den KSS ist ihre im Vergleich zu Epoxidharzsealern höhere Löslichkeit. Langfristig könnte es so zu Auflösungserscheinungen an der Wurzelkanalfüllung kommen. In den bisher vorliegenden Studien lässt sich aber ein

Poliklinik für Parodontologie und Zahnerhaltung, Universitätsklinikum Münster, Albert-Schweitzer-Campus 1, Gebäude W 30, Münster: Prof. Dr. Till Dammaschke

*Deutsche Version der englischen Erstveröffentlichung Dammaschke T: Calcium silicate-based sealers: The end of thermoplastic obturation? Dtsch Zahnärztl Z Int 2021; 3: 71–79

Zitierweise: Dammaschke T: Kalziumsilikat-basierte Sealer: Das Ende der thermoplastischen Obturation? Dtsch Zahnärztl Z 2021; 76: 104–113

Peer-reviewed article: eingereicht: 16.07.2020, revidierte Fassung akzeptiert: 12.08.2020

DOI.org/10.3238/dzz.2021.0010

Unterschied bei den klinischen Erfolgsraten zwischen Epoxidharzsealern und KSS nicht feststellen. Insgesamt stellen KSS daher eine interessante Alternative zu den herkömmlichen Wurzelkanalfüllpasten dar. Grundsätzlich ist allerdings der Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung nicht nur von der Obturationstechnik, sondern vor allem auch von der vollständigen Entfernung des infizierten Gewebes und der dauerhaften Desinfektion des Wurzelkanalsystems sowie einer bakterienichten postendodontischen Versorgung abhängig.

Schlüsselwörter: Kalziumsilikat; thermoplastische Obturation; Wurzelkanalfülltechniken; Wurzelkanalsealer

1. Einleitung

Sealer auf Epoxidharzbasis, wie z.B. AH Plus (Dentsply Sirona, Konstanz), haben sich zu einem Standardmaterial für die Wurzelkanalobturation sowohl bei kalten als auch bei warmen Obturationsmethoden entwickelt und gelten heutzutage als „Goldstandard“ unter den Wurzelkanalfüllpasten [26]. Allerdings haben diese Sealer einen großen Nachteil: Sie sind nicht bioaktiv [21]. Außerdem zeigen Sealer auf Epoxidharzbasis während der Abbindezeit eine gewisse Toxizität, erweisen sich aber nach der Aushärtung als so gut wie unlöslich und nicht zellschädigend [29, 30]. Daher führt ein Überpressen von Epoxidharz-Sealern normalerweise nicht zu schädlichen Reaktionen des periapikalen Gewebes, außer in Fällen, in denen der Sealer in den Nervenkanal des Unterkiefers disloziert wird, wo diese Wurzelkanalfüllpaste – so wie alle anderen Sealer auch – neurotoxisch wirkt [24].

Die neueste Entwicklung im Bereich der Sealer sind Wurzelkanalfüllpasten auf Kalziumsilikatbasis. Ziel dabei war es, die bekannten positiven Eigenschaften der Kalziumsilikat-basierten Zemente wie Mineral Trioxide Aggregat (MTA; z.B. ProRoot MTA, Dentsply Sirona, Ballaigues, Schweiz; MTA-Angelus, Angelus, Londrina, Brasilien) oder Biodentine (Septodont, Saint-Maur-des-Fossés, Frankreich), v.a. die Biokompatibilität und Bioaktivität, auch bei konventionellen, orthograden Wurzelkanalfüllungen nutzbar zu machen. Hauptbestandteile sind Di- und/oder Trikalziumsilikat, weshalb diese Wurzelkanalfüllpasten auch als „Kalziumsilikat-basierte Sealer“ (KSS) bezeichnet werden [14] (Abb. 1 und 2). Fälsch-

licherweise wird im Zusammenhang mit diesen Kalziumsilikat-basierten Sealern sehr oft der Begriff „Biokeramik“ verwendet [50]. Vielmehr handelt es sich aber um „hydraulische“ Sealer, da sie sowohl in Kontakt mit Luft als auch mit Wasser abbinden und erhärten [5]. KSS benötigen sogar Wasser, um vollständig abzubinden. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Sealern, muss bei KSS das Wurzelkanallumen nicht mehr zwingend möglichst trocken sein, um eine optimale Verarbeitung des Sealers zu gewährleisten. Die Abbindeigenschaften der KSS werden durch das Vorhandensein von Restfeuchtigkeit im Wurzelkanal nicht beeinträchtigt [16].

Während der Abbindung von KSS kommt es zur Bildung von Kalziumhydroxid, das bekanntermaßen biologische Heilungsprozesse auslöst [10, 49]. KSS sind daher bioaktiv. In Kontakt mit simulierter Körperflüssigkeit wurde außerdem für die KSS die Bildung einer Hydroxylapatit-ähnlichen Oberfläche berichtet [36, 45]. Da diese Schicht keine Fremdkörperreaktion verursacht, können KSS als biokompatibel angesehen werden, auch wenn sie über den Apex hinaus gepresst werden oder wenn der Sealer mit periapikalen Geweben in Kontakt steht.

KSS sind demnach im Gegensatz zu anderen Wurzelkanalsealern biokompatibel und bioaktiv [29, 30] (Abb. 3 und 4). Unter dem Aspekt Biokompatibilität und Bioaktivität sind KSS anderen Sealern offensichtlich überlegen, was möglicherweise vorteilhaft für das Behandlungsergebnis ist [16]. Daher gibt es Überlegungen, von dem bisherigen Behandlungskonzept „möglichst viel Gutta-

percha und möglichst wenig Sealer“ abzuweichen und stattdessen Wurzelkanäle hauptsächlich (aber nicht ausschließlich) mit KSS zu füllen. Guttapercha soll dann nur in der Zentralstifttechnik in den Wurzelkanal eingebracht werden – ganz unabhängig von der Passung, um die biologischen Wirkungen der KSS optimal zu nutzen. Allerdings liegen noch keine klinischen Langzeitstudien vor, die einen Vorteil dieses neuen Konzepts bestätigen.

Ziel dieses Übersichtsartikels soll es daher sein, die neuen KSS im Spannungsfeld der verschiedenen Wurzelkanalfülltechniken in Kombination mit Guttapercha wie Zentralstifttechnik, lateraler Kompaktion und thermoplastischer Obturation zu beleuchten und den aktuellen Forschungsstand darzustellen.

2. Guttapercha

Guttapercha wird seit weit mehr als 120 Jahren erfolgreich für die Obturation von Wurzelkanälen verwendet. Das Material ist so gut wie nicht löslich, inert, gewebeverträglich, hat durch den Zinkoxidanteil eine schwache antibakterielle Wirkung, ist kalt und warm verarbeitbar – sowie kompaktierbar und dabei dimensionsstabil. Obwohl die Obturation mit Guttapercha nicht perfekt ist, gilt es immer noch als Material der Wahl bei den meisten Wurzelkanalfüllungen [11]. Allerdings wird weiterhin kontrovers diskutiert, welche Wurzelkanalfülltechnik zu bevorzugen ist, v.a. hinsichtlich kalter versus warmer (thermoplastischer) Obturation mit Guttapercha [27]. Einigkeit herrscht aber darüber, dass bei allen Obturationstechniken eine gewisse Menge an Wurzelkanalfüllpaste (Sealer) er-

Calcium silicate-based sealers: The end of thermoplastic obturation?

Abstract: All obturation techniques require a certain amount of root canal sealers in order to fill small irregularities along the canal wall. Epoxy resin-based sealers have been the gold standard to date. A more recent development is represented by calcium silicate-based sealers (CSS), which derive from calcium silicate-based cements (MTA). CSS are proven to be biocompatible and bioactive. A hydroxyapatite-like precipitate forms on the surface of CSS when they come in contact with tissue fluid so that these sealers are not recognized as foreign bodies, even in cases of sealer extrusion. After their setting, CSS release OH^- and Ca^{2+} ions over a longer period of time through which they potentially exhibit certain antibacterial effects and support the healing of periapical inflammation. For this reason, consideration has been given to the idea of filling root canals mainly with CSS and minimizing the proportion of gutta-percha. To date, however, no long-term clinical studies have been performed to confirm the advantages of this new concept.

Although gutta-percha has been successfully used for root canal obturation for a very long time, there are different perspectives with regard to which root canal filling technique is better: cold or warm (thermoplastic) obturation. After the exposure of sufficiently filled root canals with saliva, microorganisms always infiltrate into the root canal system regardless of the obturation method. Until now, no known obturation method leads to a bacteria-proof sealing of the root canal. Thus, in terms of clinical success rates, no superiority of the frequently recommended thermoplastic root canal filling technique compared with cold lateral compaction could be demonstrated.

As a rule, CSS are not approved for thermoplastic obturation, as these sealers are water-based; there is the concern that high temperatures of up to 200 °C will remove too much water from the sealer, which can have a negative impact on its properties. It is questionable whether such high temperatures are clinically achieved during thermoplastic obturation.

A disadvantage of CSS is their higher solubility compared to epoxy resin sealers. In the long term, this can lead to the dissolution of the root canal filling. In the studies that have been performed to date, however, no difference in the clinical success rates between epoxy resin sealers and CSS has been determined. Overall, CSS represent an interesting alternative to conventional root canal sealers. In principle, the success of a root canal treatment depends not only on the obturation technique, but above all, on the complete removal of the infected tissue, the permanent disinfection of the root canal system and the bacteria-proof post-endodontic restoration.

Keywords: calcium silicate; thermoplastic obturation; root canal filling techniques; root canal sealer

forderlich ist, um kleine Unebenheiten entlang der Kanalwand auszugleichen, laterale bzw. akzessorische Kanäle sowie offenliegende Dentintubuli zu verschließen und so eine bessere Anpassung der Guttapercha an die

Kanalwände zu gewährleisten. Außerdem wird versucht, so eine dichte Verbindung zwischen Guttapercha und Kanalwand herzustellen [27]. Der Sealeranteil sollte dabei aber möglichst gering sein. Viele handels-

übliche endodontische Sealer können verwendet werden, solange sie (so gut wie) nicht löslich, biokompatibel (oder zumindest gut gewebeverträglich) sowie nicht resorbierbar sind und beim Abbinden nicht schrumpfen [11].

3. Kalte Obturationstechniken

3.1 Zentralstifttechnik

Bei den kalten Wurzelkanalfülltechniken wird zwischen der Zentral- bzw. Einstifttechnik und der lateralen Kompaktion unterschieden. Ziel bei der Zentralstifttechnik ist es, einen genau passenden Guttaperchastift in Kombination mit einem Sealer so in den Wurzelkanal einzubringen, dass der gesamte Kanal dicht gefüllt ist. Die Bereiche des Wurzelkanals, bei denen der Stift nicht randständig ist, sollen von Sealern aufgefüllt werden [11, 39]. Der größte Nachteil der Zentralstifttechnik besteht darin, dass bei allen Wurzelkanälen, die nach Aufbereitung nicht genau der Form der Guttaperchastifte entsprechen, der Sealeranteil an der Wurzelkanalfüllung vergleichsweise groß ist. Aufgrund der möglichen Schrumpfung einiger Wurzelkanalsealer während der Abbindereaktion wird ein möglichst hoher Anteil an Guttapercha als wichtiger Faktor für eine erfolgreiche Wurzelkanalobturation angesehen [32, 48]. Höhere Anteile an Sealern könnten so zu Undichtigkeiten und bakterieller Penetration führen [6] und dadurch den Erfolg der endodontischen Behandlung beeinträchtigen [4, 15]. Dies stellt daher insbesondere in Wurzelkanälen mit ovalem Wurzelkanalquerschnitt ein Problem dar, bei denen eine kreisrunde Präparation nicht erzielt werden kann [11, 39]. Auch eignen sich mittels manueller Aufbereitungstechniken instrumentierte Wurzelkanäle nicht für die Zentralstifttechnik, da die Form des so präparierten Wurzelkanals und des Guttaperchastifts zu stark differieren. Voraussetzung für die Anwendung der Zentralstifttechnik ist daher ein mit maschinell eingesetzten Nickel-Titan-Instrumenten gleichmäßig konisch aufbereiteter Wurzelkanal, der möglichst gut der Form des zuletzt verwendeten Auf-

bereitungsinstruments entsprechen sollte. Dadurch wird die benötigte Sealermenge reduziert. Ein weiterer Nachteil der Zentralstifttechnik ist darin zu sehen, dass keine Kompaktion des Füllungsmaterials stattfindet und Unebenheiten in der Kanalwand und Seitenkanälen evtl. nur ungenügend gefüllt werden [39]. So werden möglicherweise unregelmäßige Wurzelkanalabschnitte oder durch die mechanische Instrumentierung nicht erreichbare Wurzelkanalbereiche nicht abgefüllt. Zudem können Blasen im Sealer auftreten.

3.2 Laterale Kompaktion

Um z.B. ovale oder manuell aufbereitete Wurzelkanäle vollständig mit möglichst viel Guttapercha und möglichst wenig Sealer dicht zu füllen, ist es das Ziel der lateralen Kompaktion, zu dem Masterpoint weitere, kleinere Guttaperchastifte in den Wurzelkanal zu applizieren. Dazu wird mit einem Fingerspreader die bereits im Wurzelkanal befindliche Guttapercha kalt verformt und dabei in den Wurzelkanalquerschnitt hinein kompaktiert, um so Platz für weitere Guttaperchastifte zu schaffen. Ein Problem der lateralen Kompaktion können allerdings vertikale Wurzelfrakturen sein, die durch die mit dem Fingerspreader applizierte Kraft verursacht werden. Ob die laterale Kompaktion bei sachgemäßer Kraftanwendung tatsächlich mit einem erhöhten Risiko von Längsfrakturen assoziiert ist, ist bisher nicht abschließend geklärt. Eine zu starke Krafteinwirkung sollte allerdings vermieden werden [27]. Bei zu geringer Kraftanwendung ist es aber fraglich, ob ausreichend Sealer in alle Bereiche des Wurzelkanals gepresst wird.

4. Warme Obturationstechniken

Aufgrund dieser Nachteile der kalten Wurzelkanalfülltechniken wurden warme, thermoplastische Obturationstechniken empfohlen, um den Anteil von Guttapercha in einer Wurzelkanalfüllung zu erhöhen. Mit dieser Technik kann im Idealfall das ganze Wurzelkanalsystem einschließlich Seitenkanäle und apikaler Ramifikationen mit Guttapercha statt nur mit Sealer gefüllt werden. Da die Wurzel-



Abbildung 1 Bei den Sealern auf Kalziumsilikatbasis (KSS) lassen sich 2 Darreichungsformen unterscheiden: vorgemischte, Ein-Komponenten-KSS gebrauchsfertig in Spritzen und Zwei-Komponenten-KSS aus Pulver und Wasser oder 2 Pasten, die vor Gebrauch angemischt werden müssen. Beispiel für einen Ein-Komponenten Kalziumsilikat-haltigen Sealer auf MTA-Basis (EndoSeal MTA; Maruchi, Wonju, Korea) zur direkten Applikation in den Wurzelkanal.

kanalfüllung unter Druck erfolgt, wird erwärmtes und somit verflüssigtes Guttapercha mehr oder weniger kontrolliert in die Seitenkanäle hineingepresst [22, 40]. Weitlumige oder unregelmäßig geformte Wurzelkanalsysteme sind mit thermoplastischen Wurzelkanalfülltechniken einfacher, schneller und sicherer zu füllen. Auch für komplexe Wurzelkanalanatomien (z.B. tiefe Aufzweigung von Wurzelkanälen) oder Wurzelkanälen mit sehr irregulärem Querschnitt (z.B. c-förmige Kanäle; internes Granulom) erscheint die thermoplastische Obturation eindeutig von Vorteil zu sein [27].

Bei der „Continuous-Wave-Technik“ nach Buchanan wird zur Erwärmung der Guttapercha zumeist eine Temperatur von 200 °C vorgeschlagen. Der verwendete Sealer sollte daher mit der thermoplastischen Obturation kompatibel sein und im angewendeten Temperaturintervall stabil bleiben, da es sonst zu einer chemischen Desintegration oder zu gravierenden Veränderungen der werkstoffkundlichen Eigenschaften kommen könnte. Denkbar sind Verklumpungen des Sealers oder vorzeitiges bzw. ausbleibendes Abbinden [27]. Welche Sealergruppen allerdings überhaupt mit thermoplastischen Obturationstechniken kompatibel sind, ist in der Literatur umstritten. Beispielsweise wurde empfohlen, epoxidharzhaltige Sealer lediglich einer Temperatur von maximal 100 °C auszuset-

zen. Andernfalls könnte es zu chemischen Veränderungen kommen. Dagegen seien KSS bis 125 °C chemisch noch stabil, auch wenn diese von den Herstellern nicht für Warmfülltechniken freigegeben sind. Zinkoxid-Eugenol-haltige Sealer sind dagegen gar nicht thermostabil [3]. In einer weiteren Studie wurde ebenfalls festgestellt, dass epoxidharzhaltige Sealer nicht mit thermoplastischen Obturationstechniken kompatibel sind – im Gegensatz zu Sealern auf Kalziumhydroxidbasis [9]. Andere Autoren konnten dagegen keine wesentlichen physikalischen oder chemischen Veränderungen bei Sealern auf Epoxidharz- oder Zinkoxid-Eugenolbasis durch thermische Behandlung feststellen [18].

5. Kalte versus warme Obturationstechniken

Ob die thermoplastischen Fülltechniken im Vergleich zur Zentralstifttechnik oder lateralen Kompaktion zu verbesserten Erfolgsraten führen, wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Eine Studie berichtete zwar in Fällen mit apikaler Parodontitis über eine 10 % höhere Erfolgsrate bei der thermoplastischen Obturation im Vergleich zur (kalten) lateralen Kompaktion [20], aber nicht viele Studien unterstützen diesen Befund, sondern zeigen eher keinen Unterschied [11]. Einer Metaanalyse zufolge sind hinsichtlich der Erfolgsraten die kalte laterale Kompaktion und die thermo-



Abbildung 2 Beispiel für einen Zwei-Komponenten Kalziomsilikat-haltigen Sealer bestehend aus Pulver und Wasser (BioRoot RCS; Septodont, Saint-Maur-des-Fossés, Frankreich). Bei Pulver- und Wasser-basierten Sealern kann die Konsistenz entsprechend der klinischen Situation passend eingestellt werden.

plastischen Wurzelkanalfülltechniken als gleichwertig zu betrachten [35]. Zehn klinische Studien, von denen 9 randomisiert waren, wurden in diese Metaanalyse einbezogen, und 1748 zuvor unbehandelte Zähne wurden entweder mit kalter lateraler Kompaktion oder warmer Guttapercha thermoplastisch obturiert. Eine Auswertung erfolgte in einem Zeitraum von 1–5 Jahren. Während beide Methoden – kalte laterale Kompaktion und thermoplastische Obturation – ein statistisch ähnliches Niveau hinsichtlich postoperativen Beschwerden, Langzeitergebnis und Füllungsqualität aufwiesen, führt die thermoplastische Obturation signifikant häufiger zu einer Überpressung von Wurzelkanalfüllmaterial [35].

6. Bakteriendichtigkeit von Wurzelkanalfüllungen

Grundsätzlich beeinträchtigt ein Mikroleakage das Ergebnis und den Erfolg jeder Wurzelkanalbehandlung [6]. Daher ist eine möglichst bakteriendichte Wurzelkanalfüllung wünschenswert. Allerdings konnte bisher mit keiner Wurzelkanalfülltechnik, weder warm noch kalt, eine zuverlässige bakteriendichte Obturation des Wurzelkanalsystems erreicht werden [31, 41]. Nach Exposition von suffizient gefüllten Wurzelkanälen mit Speichel kommt es zu einer Penetration von Mikroorganismen in das Wurzelkanalsystem. Innerhalb von 3–60 Tagen weist eine freiliegende, dem Mundmilieu ausgesetzte Wurzelkanalfüllung aus Guttapercha und

Sealer ein mikrobielles Leakage entlang der Wurzelkanalfüllung auf – unabhängig von der Obturationsmethode [31, 41].

Nicht nur Bakterien, sondern auch Endotoxine sind in der Lage, in Wurzelkanalfüllungen einzudringen und das periapikale Gewebe zu entzünden. Endotoxine sind Bestandteil der äußeren Zellmembran gramnegativer Bakterien und werden beim Zerfall dieser Bakterien freigesetzt. Endotoxine dringen möglicherweise schneller als Bakterien in das Wurzelkanalfüllmaterial ein und können eine apikale Entzündungsreaktion auslösen [1].

Auf Grundlage der bisher verfügbaren evidenzbasierten Studien kann man daher schlussfolgern, dass die Dichtigkeit der postendodontischen, koronalen Restauration mindestens genauso wichtig für den Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung ist, wie die der eigentlichen Wurzelkanalfüllung selber. Es gibt hinsichtlich der Heilungschancen nach Wurzelkanalbehandlung keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Faktoren [23]. Koronale Undichtigkeiten werden als eine der Hauptursachen für das Versagen bei der Wurzelkanalbehandlung angesehen [1]. Eine Undichtigkeit der koronalen Restauration ist daher die wahrscheinlichste Erklärung für das Wiederauftreten einer apikalen Parodontitis [37] – nicht die Art der Wurzelkanalfüllungstechnik und wie hoch der Sealeranteil dabei ist.

7. Löslichkeit von Sealern auf Kalziomsilikatbasis

Unter Abwägung der Vor- und Nachteile der zuvor dargestellten verschiedenen Wurzelkanalfülltechniken und der Idee, bei den KSS von dem Postulat „möglichst viel Guttapercha und möglichst wenig Sealer“ abzuweichen, ergibt sich ein Aspekt, der einer näheren Betrachtung bedarf: Während Epoxidharz-haltige Sealer als nahezu unlöslich gelten, ist die Löslichkeit von KSS im Vergleich zu beispielsweise AH Plus signifikant höher [36, 45]. Dies kann sich bei einem neuen Behandlungskonzept „möglichst viel Sealer und möglichst wenig Guttapercha“ negativ auswirken.

Laut der Norm ISO 6876:2012 sollte der Gewichtsverlust von Sea-

lern 24 h nach Lagerung in doppelt destilliertem Wasser weniger als 3 % betragen [28]. In einigen Studien zu den KSS BioRoot RCS und iRoot SP wurde eine höhere Löslichkeit berichtet. Andere Publikationen zu iRoot SP-, BioRoot RCS-, Endoseal MTA- und Endo C.P.M.-Sealer dagegen bestätigen eine Löslichkeit von weniger als 3 %. Insgesamt sind bisher die Daten in der Literatur dazu aber uneinheitlich [16].

Die Löslichkeit ist dabei entscheidend abhängig vom Lagermedium. In doppeltdestilliertem Wasser (so wie in ISO 6876:2012 vorgegeben [28]) ist die Löslichkeit von KSS signifikant höher als in simulierter Körperflüssigkeit (phosphatgepufferte Kochsalzlösung, kurz PBS von englisch phosphate-buffered saline) [36, 45]. Eine Langzeituntersuchung ergab, dass die Löslichkeit eines KSS (BioRoot RCS) auch über einen Zeitraum von 6 Monaten bei Lagerung in PBS den Anforderungen der ISO 6876:2012 entsprach [45] (Abb. 5).

Aufgrund der Löslichkeit kommt es also innerhalb von 7 Tagen nach Lagerung in destilliertem Wasser und PBS zu einer Volumenabnahme bei den KSS. Allerdings konnte ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Bildung von Hohlräumen zwischen KSS und AH Plus während der Lagerzeit nicht festgestellt werden [44]. Alle Sealer weisen Hohlräume nach Wurzelkanalfüllung auf, unabhängig von der Art des Sealers [34]. Obwohl TotalFill BC-Sealer (FKG Dentaire, La Chaux-de-Fonds, Schweiz) eine höhere Löslichkeit als AH Plus hat, wies dieser KSS bei einer Bewertung mittels Mikrocomputertomographie (Micro-CT) eine volumetrische Stabilität auf [43].

Grundsätzlich scheint jedoch die Löslichkeit – bedingt durch die Freisetzung von Ionen aus den KSS – mit einem positiven biologischen Ergebnis verbunden zu sein [50]. Die Löslichkeit der Sealer ist also ein zweischneidiges Schwert. Auf der einen Seite sollten Sealer nach Möglichkeit unlöslich sein, um auch über Jahre den Wurzelkanal dicht zu verschließen. Andererseits weiß man, dass, um bioaktive und biokompatible Effekte zu erreichen, Ionen aus den Sealern in das umgebende Gewebe in Lösung

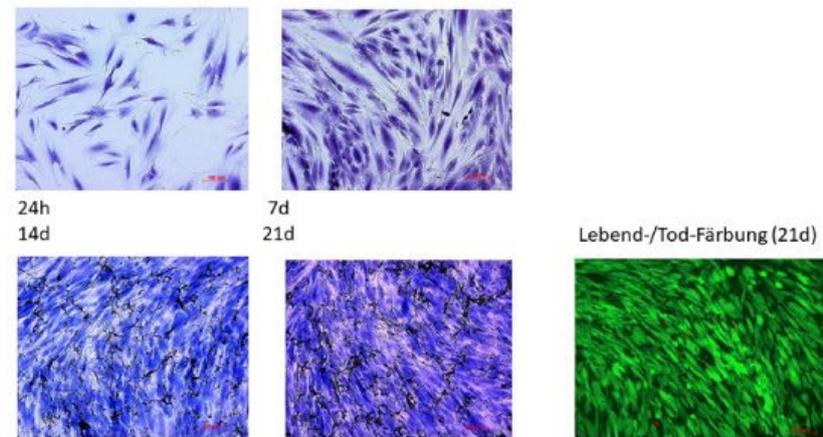


Abbildung 3 Menschliche Osteoblasten nach direktem Kontakt mit einem Eluat von BioRoot RCS nach bis zu 21 d in vitro. In der BioRoot RCS-Gruppe überlebten alle Osteoblasten den Kontakt mit einem 1:2 verdünnten Extrakt und eine deutliche Zellproliferation konnte beobachtet werden. Dies spricht für die Biokompatibilität und Bioaktivität der KSS (Richardson-Färbung und Lebend- (grün)/Tod- (rot) Färbung; Vergrößerung x 100) [30].

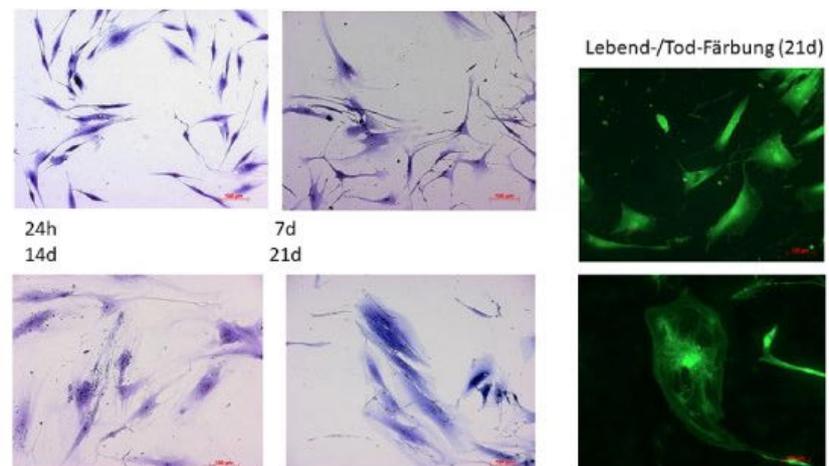


Abbildung 4 In der AH Plus-Gruppe (Dentsply Sirona, Konstanz) starben nahezu alle menschlichen Osteoblasten in den ersten Tagen nach Zugabe des Sealer-Extrakts in einer Verdünnung von 1:10 ab. In der Richardson-Färbung und der Lebend-/Tod-Färbung waren nach 14 bzw. 21 d nur wenige Zellen sichtbar. Im Kontakt mit AH Plus wurde die Morphologie der Osteoblasten verändert; sie werden mit längerer Inkubationszeit größer (Tage 14 und 21; Vergrößerung x 100) [30].

gehen müssen. So ist bekannt, dass in vitro KSS auch in simulierter Körperflüssigkeit einen hohen Level an Ca^{2+} -Ionen- und an OH-Ionen-Freisetzung aufweisen. Aber auch Silizium-Ionen werden freigesetzt [7, 10, 49]. All diese Ionen tragen bekanntermaßen zur Ausheilung apikaler Läsionen bei.

Die Freisetzung von OH-Ionen führt in vitro zudem zu einem basischen pH-Wert für einen Zeitraum von bis zu 4 Monaten [45] (Abb. 6).

Dadurch lassen sich u.U. die nachgewiesenen antimikrobiellen Effekte der KSS erklären [33, 47, 51]. So sind beispielsweise Endosequence BC-Sealer und BioRoot RCS gegenüber *E. faecalis* wirksam – sowohl direkt nach Applikation als auch im abgebundenen Zustand [8, 33]. KSS sind auch gegen viele andere Keime im Wurzelkanal aktiv [16]. Dentinkontakt verstärkt den antibakteriellen Effekt [8, 47].

Hinsichtlich des apikalen Abdichtungsvermögens der KSS sind die An-

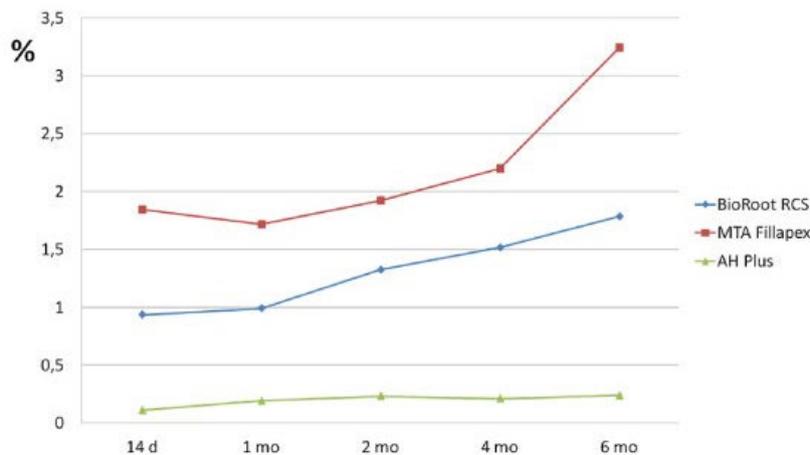


Abbildung 5 Löslichkeit von BioRoot RCS, MTA Fillapex (Angelus, Londrina, Brasilien) und AH Plus in phosphatgepufferter Kochsalzlösung (PBS) zur Simulation von Körperflüssigkeit. Die Löslichkeit der KSS BioRoot RCS und MTA Fillapex war im Vergleich zu AH Plus signifikant erhöht. Allerdings entsprach die Löslichkeit von BioRoot RCS auch über einen Zeitraum von 6 Monaten den Anforderungen der ISO 6876:2012 von weniger als 3 % [45].

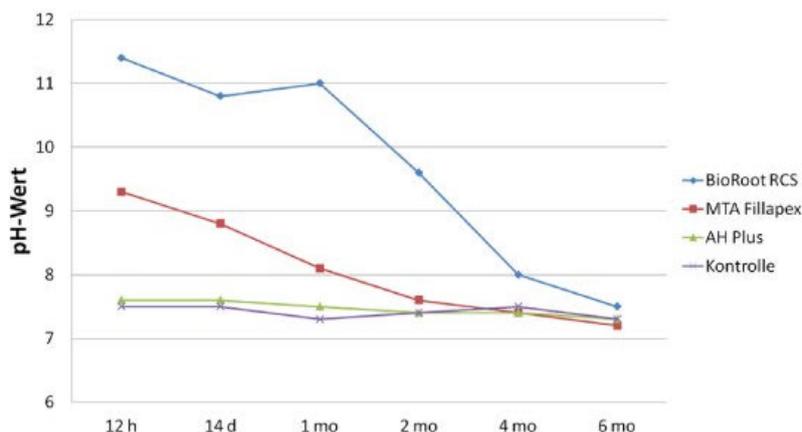


Abbildung 6 pH-Werte von BioRoot RCS, MTA Fillapex und AH Plus in phosphatgepufferter Kochsalzlösung (PBS) zur Simulation von Körperflüssigkeit. BioRoot RCS führt für einen Zeitraum von bis zu 4 Monaten in vitro zu einem basischen pH-Wert in der Phosphat-gepufferten Kochsalzlösung. Dies kann durch die Freisetzung von OH⁻-Ionen aus dem Sealer erklärt werden (Kontrolle = PBS ohne Sealer) [45].

gaben in der Literatur bisher widersprüchlich. Im Vergleich zu herkömmlichen Sealern wurde den neuen KSS ein vergleichbares oder sogar besseres apikales Abdichtungsvermögen attestiert. Andere Studien fanden dagegen ein signifikant erhöhtes apikales Mikroleakage [16]. Beim Abbindevorgang interagieren die KSS mit der Oberfläche des Wurzelkanalwanddentins; ein Prozess, der über Monate ablaufen kann. Es kann darüber spekuliert werden, inwieweit dadurch im Laufe der Zeit die Löslichkeit abnimmt und es zu einer Verbesserung der Versiegelung des Wurzel-

kanals durch ein KSS kommen kann [42]. Trotzdem steht zu befürchten, dass es, bedingt durch mögliche Auflösungsprozesse der KSS v.a. im apikalen Drittel, evtl. zu einer Re-Kolonisierung von Mikroorganismen kommen kann, was dann unter Umständen zu einer Reinfektion des Wurzelkanalsystems beiträgt. Im Falle einer Auflösung des Sealers, entstehen in der apikalen Region Hohlräume, die von Mikroorganismen (re-)kolonisiert werden könnten. Dies kann prinzipiell auf 3 Wegen geschehen: 1. Passage von Mikroorganismen aus koronalen Regionen, 2. Persistenz von Mi-

kroorganismen in der apikalen Region (Biofilm im Wurzelkanal), 3. Reinfektion aus z.B. extrakanalärem Biofilm oder infiziertes Weichgewebe.

8. Kalziumsilikat-basierte Sealer und thermoplastische Obturation

Um nun das Problem der Löslichkeit der KSS zu umgehen und den Sealeranteil doch möglichst gering zu halten, könnte man geneigt sein, auf thermoplastische Obturationsmethoden zurückzugreifen. Allerdings sind Sealer auf Kalziumsilikatbasis zum größten Teil von den Herstellern bislang nicht für warme Wurzelkanalfülltechniken freigegeben, da sie zum Abbinden Feuchtigkeit benötigen und thermoplastische Obturationstechniken dem Sealer möglicherweise zu viel Feuchtigkeit entziehen können. Dies könnte die Eigenschaften der Materialien beeinträchtigen [9, 27].

Nach der Erwärmung von BioRoot RCS auf über 100 °C wurde Wasserverlust und eine irreversible Veränderung in der chemischen Struktur des Materials berichtet. Außerdem wurden reversible Veränderungen in der chemischen Struktur von iRoot SP nach Erwärmung über 125 °C beschrieben [3]. In einer anderen Studie wurde iRoot SP dagegen durch die thermische Behandlung in seinen chemischen oder physikalischen Eigenschaften nicht beeinflusst [12]. Jedoch unterscheiden sich Art und Dauer der Wärmeanwendung zwischen den Studien. Aber gerade die Art und Dauer der Wärmeanwendung könnten das Ergebnis solcher In-vitro-Studien beeinflussen [3, 18, 46]. Die Simulation der Wärmebehandlung sollte die klinische Situation so gut wie möglich widerspiegeln, um Ergebnisse mit klinischer Relevanz zu erhalten. Daher sollten intrakanaläre Temperaturen und klinisch relevante Aufheizzeiten für die Untersuchung des Effekts der thermischen Behandlung von Sealern während der thermoplastischen Obturation berücksichtigt werden [17].

Es ist daher grundsätzlich fraglich, ob diese hohen Temperaturen von 100–200 °C bei der thermoplastischen Obturation im Wurzelkanal überhaupt erreicht werden. In einer kürzlich publizierten In-vitro-Studie

lag die höchste gemessene Temperatur mit der „Continuous Wave Technik“ bei 56 °C, welche vermutlich kaum Einfluss auf die Sealer hat [17]. Zusammenfassend lässt sich aber feststellen, dass es nur wenige Informationen über den Einfluss klinisch relevanter Temperaturen auf KSS gibt.

Nur ein Produkt, der Sealer Endo-sequence BC Sealer HiFlow (Brasseler USA, Savannah, USA), der auch als Total Fill BC Sealer HiFlow (FKG Dentaire) vertrieben wird, wird für die thermoplastische Obturation des Wurzelkanals empfohlen. Dieser Sealer sollte laut Hersteller ausschließlich zusammen mit entsprechend niedrig schmelzender Guttapercha verwendet werden. In der bisher einzigen Studie, in der der BC Sealer HiFlow entsprechend erwärmt wurde, wurde seine chemische Zusammensetzung durch die thermische Behandlung nicht verändert. Auch die Fließrate, Filmdicke und Abbindezeit wurden aus klinischer Sicht nicht relevant beeinflusst [12].

9. Klinische Studien zu Kalziumsilikat-basierten Sealern

KSS sind seit ihrer Markteinführung 2007 vielfach *in vitro* untersucht worden und zeigen dabei positive Ergebnisse, die eine klinische Anwendung vielversprechend erscheinen lassen. Allerdings gibt es bisher nur relativ wenige klinische Studien zu den KSS [19]. In einer randomisierten kontrollierten Studie mit 114 Zähnen wurde kein signifikanter Unterschied in Bezug auf postoperative Schmerzen zwischen dem konventionellen Sealer AH Plus und dem KSS Total Fill BC Sealer gefunden. Wurzelkanalfüllungen ohne Sealerextrusion führen nur selten zu postoperativen Beschwerden. Die Wahl des Sealers hat keinen Einfluss auf das Auftreten von Beschwerden [25]. Zu vergleichbaren Ergebnissen kam eine weitere Studie. Die Ergebnisse zeigten auch hier, dass ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen AH Plus und iRoot SP hinsichtlich der Inzidenz postoperativer Schmerzen nicht vorlag. Allerdings nahmen – im Vergleich zu Patienten, bei denen iRoot SP Sealer zum Einsatz kam – Patienten, bei denen AH Plus Sealer ver-

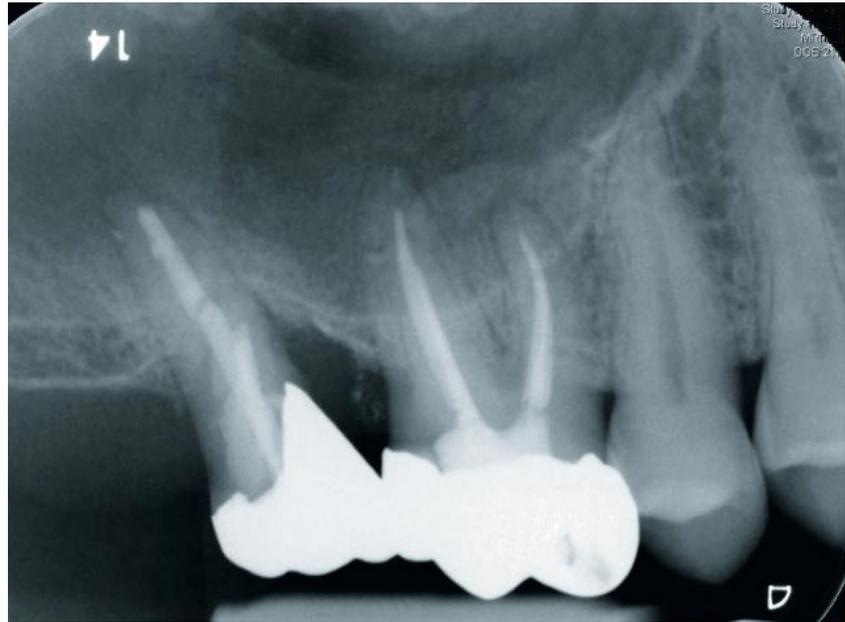


Abbildung 7 Röntgenkontrollaufnahme nach Wurzelkanalfüllung mit Guttapercha und BioRoot RCS an Zahn 16 (kalte, laterale Kompaktion).



Abbildung 8 Röntgenologische apikale Ausheilung mesiale Wurzelspitze 6 Monate nach Wurzelkanalbehandlung an Zahn 16.

wendet wurde, kurz nach der Wurzelkanalfüllung signifikant häufiger Schmerzmittel ein [2].

Wurzelkanalfüllungen mit der Zentralstifttechnik in Kombination mit Endo-sequence BC Sealer können hohe Erfolgsraten erreichen. Nach einer durchschnittlichen Nachbeobachtungszeit von 30 Monaten wurden 90,9 % der Wurzelkanalbehandlungen als Erfolg gewertet, wobei 83,1 % der Fälle als Heilung und 7,8 % als heilend eingestuft wurden.

In 47,4 % der Fälle kam es zu einer Sealer-Extrusion, was aber keinen signifikanten Einfluss auf den Behandlungserfolg hatte [13]. Im direkten Vergleich zwischen der Zentralstifttechnik unter Verwendung eines KSS (BioRoot RCS) und warmer vertikaler Kompaktion mit einem Epoxidharzhaltigen Sealer (AH Plus) ließ sich klinisch nach einem Jahr ein signifikanter Unterschied hinsichtlich Erfolgsraten nicht feststellen. Anhand von DVT-Aufnahmen wurde für AH Plus

(Abb. 1–8: T. Dammaschke)

(warmer vertikaler Kompaktion) eine Erfolgsrate von 80 % und für Bio-Root RCS (Zentralstifttechnik) von 84 % bestimmt. Röntgenologisch lagen die Erfolgsraten bei 89 % (AH Plus) bzw. 90 % (BioRoot RCS). Der Unterschied war statistisch nicht signifikant. Die Autoren sehen in den Ergebnissen eine klinisch validierte Rechtfertigung zur Verwendung der Zentralstifttechnik mit einem KSS, auch wenn es sich um eine nicht-randomisierte Studie handelt [50].

10. Fazit

Obwohl Studien über den langfristigen klinischen Erfolg noch fehlen, haben sich KSS zu einer relevanten Alternative zu Sealern auf Epoxidharzbasis entwickelt. Die Aussagekraft der bisher vorliegenden klinischen Studien ist aufgrund der kurzen Nachbeobachtungszeiträume sicherlich mit Vorsicht zu betrachten. Allerdings ist eindeutig eine Tendenz zu erkennen, dass Wurzelkanalfüllungen mit KSS am Patienten erfolgreich sein können [19] – auch mit Zentralstifttechnik und ohne thermoplastische Obturation (Abb. 7 und 8).

In einer Mikro-CT-Analyse wurde die Obturationsqualität von zwei Abfüllmethoden verglichen: die Zentralstifttechnik mit dem KSS EndoSequence BC und die thermoplastische Obturation mit AH Plus als Sealer. Dabei gab es keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich Füllvolumen und Hohlräumen. Mit beiden Abfüllmethoden konnte eine vergleichbare Qualität Wurzelkanalfüllung erzielt werden. Keiner der beiden Methoden in Kombination mit dem jeweiligen Sealer war in der Lage, das Wurzelkanalsystem vollständig zu füllen [38].

Aufgrund der Biokompatibilität und Bioaktivität stellen Kalziumsilikat-basierte Sealer in Kombination mit kalten Obturationsmethoden eine Alternative zu thermoplastischen Obturationsmethoden dar. Dennoch ist die Frage, ob die Kalt- oder Warmobturation die bessere Technik für Sealer auf Kalziumsilikatbasis ist, bisher unbeantwortet.

Kalziumsilikat-basierte Sealer führen vermutlich nicht zum Ende der thermoplastischen Obturationsmethoden. Allerdings muss man

nach derzeitiger Datenlage auch feststellen, dass thermoplastischen Obturationsmethoden für eine erfolgreiche endodontische Behandlung nicht zwingend notwendig sind.

Grundsätzlich muss man bedenken, dass der Erfolg einer Wurzelkanalbehandlung und die Ausheilung von Entzündungsprozessen nicht nur mit der Obturationstechnik, sondern auch direkt mit der suffizienten Entfernung von infiziertem Gewebe, den Mikroorganismen und deren Toxinen sowie der korrekten Desinfektion des Wurzelkanalsystems und einer bakterien-dichten Restauration des wurzelkanalbehandelten Zahns zusammenhängen.

Interessenkonflikte

Till Dammaschke gibt an, dass er Honorare der Firma Septodont für Vorträge erhalten hat.

Literatur

- Alves J, Walton R, Drake D: Coronal leakage: endotoxin penetration from mixed bacterial communities through obturated, post-prepared root canals. *J Endod* 1998; 24: 587–591
- Atav Ates A, Dumani A, Yoldas O, Unal I: Post-obturation pain following the use of carrier-based system with AH Plus or iRoot SP sealers: a randomized controlled clinical trial. *Clin Oral Investig* 2019; 23: 3053–3061
- Atmeh AR, Hadis M, Camilleri J: Real-time chemical analysis of root filling materials with heating: guidelines for safe temperature levels. *Int Endod J* 2020; 53: 698–708
- Bachicha WS, DiFiore PM, Miller DA, Lautenschlager EP, Pashley DH: Microleakage of endodontically treated teeth restored with posts. *J Endod* 1998; 24: 703–708
- Berzins DW: Chemical properties of MTA. In: Torabinejad M (ed): *Mineral trioxide aggregate. Properties and clinical applications*. Wiley Blackwell Publishing, Hoboken, New Jersey 2014, 17–36
- Bogen G, Kuttler S: Mineral trioxide aggregate obturation: a review and case series. *J Endod* 2009; 35: 777–790
- 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: 419–428
- Bukhari S, Karabucak B: The antimicrobial effect of bioceramic sealer on an 8-week matured *Enterococcus faecalis* biofilm attached to root canal dentinal surface. *J Endod* 2019; 45: 1047–1052
- Camilleri J: Sealers and warm gutta-percha obturation techniques. *J Endod* 2015; 41: 72–78
- Camps J, Jeanneau C, El Ayachi I, Laurent P, About I: Bioactivity of a calcium silicate-based endodontic cement (BioRoot RCS): interaction with human periodontal ligament cells in vitro. *J Endod* 2015; 41: 1469–1473
- Castellucci A: Obturation of the radicular spaces. In: Rotstein I, Ingle JI (ed): *Ingle's endodontics*. 7th Edition. PMPH USA, Raleigh 2019, 669–727
- Chen B, Haapasalo M, Mobuchon C, Li X, Ma J, Shen Y: Cytotoxicity and the effect of temperature on physical properties and chemical composition of a new calcium silicate-based root canal sealer. *J Endod* 2020; 46: 531–538
- Chybowski EA, Glickman GN, Patel Y, Fleury A, Solomon E, He J: Clinical outcome of non-surgical root canal treatment using a single-cone technique with endosequence bioceramic sealer: A retrospective analysis. *J Endod* 2018; 44: 941–945
- Dammaschke T: Sealer auf Kalziumsilikatbasis. *Der Freie Zahnarzt* 2020; 64: 64–71
- Davalou S, Gutmann JL, Nunn MH: Assessment of apical and coronal root canal seals using contemporary endodontic obturation and restorative materials and techniques. *Int Endod J* 1999; 32: 388–396
- Donnermeyer D, Bürklein S, Dammaschke T, Schäfer E: Endodontic sealers based on calcium silicates: a systematic review. *Odontology* 2019; 107: 421–436
- Donnermeyer D, Schäfer E, Bürklein S: Real-time intracanal temperature measurement during different obturation techniques. *J Endod* 2018; 44: 1832–1836
- Donnermeyer D, Urban K, Bürklein S, Schäfer E: Physico-chemical investigation of endodontic sealers exposed to simulated intracanal heat application: epoxy resins and zinc oxide-eugenols. *Int Endod J* 2020; 53: 690–697
- Donnermeyer D: Literatur-Rundschau: Kalziumsilikat-basierte Wurzelkanalsealer – die klinische Datenlage. *Endodontie* 2020; 29: 209–216
- Farzaneh M, Abitbol S, Lawrence HP, Friedman S: Treatment outcomes in endodontics – the Toronto study. Part II: initial treatment. *J Endod* 2004; 30: 302–309

21. Giacomino CM, Wealleans JA, Kuhn N, Diogenes A: Comparative biocompatibility and osteogenic potential of two bioceramic sealers. *J Endod* 2019; 45: 51–56
22. Gilhooly RMP, Hayes SJ, Bryant ST, Dummer PMH: Comparison of cold lateral condensation and a warm multiphase gutta-percha technique for obturating curved root canals. *Int Endod J* 2000; 33: 415–420
23. Gillen BM, Looney SW, Gu LS et al.: Impact of the quality of the coronal restoration versus the quality of the root canal fillings on success of root canal treatment: a systematic review and meta-analysis. *J Endod* 2011; 37: 895–902
24. González-Martín M, Torres-Lagares D, Gutiérrez-Pérez JL, Segura-Egea JJ: Inferior alveolar nerve paresthesia after overfilling of endodontic sealer into the mandibular canal. *J Endod* 2010; 36: 1419–1421
25. Graunaite I, Skucaite N, Lodiene G, Agentiene I, Machiulskiene V: Effect of resin-based and bioceramic root canal sealers on postoperative pain: a split-mouth randomized controlled trial. *J Endod* 2018; 44: 689–693
26. Hergt A, Wiegand A, Hülsmann M, Rödiger T: AH Plus root canal sealer – an updated literature review. *Endo (Lond Engl)* 2015; 9: 245–265
27. Herrmann H-W, Hülsmann M, Schäfer E: Probleme bei der Wurzelkanalfüllung. In: Hülsmann M, Schäfer E (Hrsg): Probleme in der Endodontie. Prävention, Identifikation und Management. 2. Aufl., Quintessenz Verlag, Berlin 2019, 291–322
28. International Organization for Standardization: International Standard ISO 6876:2012: Dental root canal sealing materials. International Organization for Standardization, Geneva 2012
29. Jung S, Libricht V, Sielker S, Hanisch MR, Schäfer E, Dammaschke T: Evaluation of the biocompatibility of root canal sealers on human periodontal ligament cells ex vivo. *Odontology* 2019; 107: 54–63
30. 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: e0194467. doi: 10.1371/journal.pone.0194467
31. Khayat A, Lee SJ, Torabinejad M: Human saliva penetration of coronally unsealed obturated root canals. *J Endod* 1993; 19: 458–461
32. Kontakiotis EG, Wu M-K, Wesselink PR: Effect of sealer thickness on long-term sealing ability: a 2-year follow-up study. *Int Endod J* 2003; 30: 307–312
33. Long J, Kreft JU, Camilleri J: Antimicrobial and ultrastructural properties of root canal filling materials exposed to bacterial challenge. *J Dent* 2020; 93: 103283. doi: 10.1016/j.jdent.2020.103283
34. Milanovic I, Milovanovic P, Antonijevic D, Dzeletovic B, Djuric M, Miletic V: Immediate and long-term porosity of calcium silicate-based sealers. *J Endod* 2020; 46: 515–523
35. Peng L, Ye L, Tan H, Zhou X: Outcome of root canal obturation by warm gutta-percha versus cold lateral condensation: a meta-analysis. *J Endod* 2007; 33: 106–109
36. Prüllage RK, 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. *J Endod* 2016; 42: 1784–1788
37. Ricucci D, Siqueira JF Jr.: Recurrent apical periodontitis and late endodontic treatment failure related to coronal leakage: a case report. *J Endod* 2011; 37: 1171–1175
38. 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. *Aust Endod J* 2020; 46: 82–87
39. Schäfer E, Nelius B, Bürklein S: A comparative evaluation of gutta-percha filled areas in curved root canals obturated with different techniques. *Clin Oral Investig* 2012; 16: 225–230
40. Schilder H: Filling root canals in three dimensions. *Dent Clin North Am* 1967; 11: 723–744
41. Siqueira JF Jr, Rôças IN, Favieri A, Abad EC, Castro AJ, Gahyva SM: Bacterial leakage in coronally unsealed root canals obturated with 3 different techniques. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2000; 90: 647–650
42. Steffen R, Coray R, Stratigaki E: Mineraltrioxidaggregat und bioaktive Zement in der Kinderzahnmedizin. *Quintessenz Zahnmed* 2019; 70: 302–314
43. Tanomaru-Filho M, Torres FFE, Chavez-Andrade GM et al.: Physicochemical properties and volumetric change of silicone/bioactive glass and calcium silicate-based endodontic sealers. *J Endod* 2017; 43: 2097–2102
44. Torres FFE, Zordan-Bronzel CL, Guerreiro-Tanomaru JM, Chávez-Andrade GM, Pinto JC, Tanomaru-Filho M: Effect of immersion in distilled water or phosphate-buffered saline on the solubility, volumetric change and presence of voids within new calcium silicate-based root canal sealers. *Int Endod J* 2020; 53: 385–391
45. Urban K, Neuhaus J, Donnermeyer D, Schäfer E, Dammaschke T: Solubility and pH value of 3 different root canal sealers: a long-term investigation. *J Endod* 2018; 44: 1736–1740
46. Viapiana R, Moïnzadeh AT, Camilleri L, Wesselink PR, Tanomaru Filho M, Camilleri J: Porosity and sealing ability of root fillings with gutta-percha and Bio-Root RCS or AH Plus sealers. Evaluation by three ex vivo methods. *Int Endod J* 2016; 49: 774–782
47. Wang Z, Shen Y, Haapasalo M: Dentin extends the antibacterial effect of endodontic sealers against *Enterococcus faecalis* biofilms. *J Endod* 2014; 40: 505–508
48. Wu M-K, Wesselink PR: A primary observation on the preparation and obturation of oval canals. *Int Endod J* 2001; 34: 137–141
49. Xuereb M, Vella P, Damidot D, Sammut CV, Camilleri J: In situ assessment of the setting of tricalcium silicate-based sealers using a dentin pressure model. *J Endod* 2015; 41: 111–124
50. Zavattini A, Knight A, Foschi F, Mannonci F: Outcome of root canal treatment using a new calcium silicate root canal sealer: a non-randomized clinical trial. *J Clin Med* 2020; 9: 782 doi: 10.3390/jcm9030782
51. Zhang H, Shen Y, Ruse ND, Haapasalo M: Antibacterial activity of endodontic sealers by modified direct contact test against *Enterococcus faecalis*. *J Endod* 2009; 35: 1051–1055



(Foto: T. Dammaschke)

PROF. DR. TILL DAMMASCHKE
 Poliklinik für Parodontologie und
 Zahnerhaltung
 Universitätsklinikum Münster
 Albert-Schweitzer-Campus 1,
 Gebäude W 30, Waldeyerstr. 30,
 48149 Münster
 tillda@uni-muenster.de