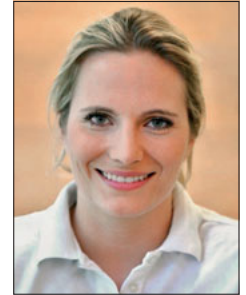


Sophie Curtius Seutter von Loetzen, Michael Hülsmann

Konzepte und Materialien zur Perforationsdeckung

Eine Übersicht



INDIZES *Perforationsdeckung, Verschlussmaterialien, MTA, Biokeramiken, Matrix-Techniken*

Perforationen des Wurzelkanals stellen einen schwerwiegenden Zwischenfall während einer Wurzelkanalbehandlung dar, der bis zum Verlust des Zahnes führen kann. Im Laufe der Zeit wurden zahlreiche unterschiedliche Konzepte und Materialien zum Perforationsverschluss beschrieben und untersucht. Der Beitrag gibt eine Übersicht und fasst die diesbezüglichen Studienergebnisse zusammen.

Sophie Curtius Seutter von Loetzen

Dr. med. dent.
Fachpraxis am Frauenplatz
Frauenplatz 11
80331 München
E-Mail: Sophie.vonSeutter@
Fachpraxis.de

Michael Hülsmann

Prof. Dr. med. dent.
Poliklinik für Präventive
Zahnmedizin, Parodontologie
und Kariologie
Universitätsmedizin
Göttingen
Georg-August-Universität
Robert-Koch-Str. 40
37075 Göttingen

■ Einleitung

Eine Perforation wurde früher zu den unangenehmsten endodontischen Zwischenfällen gezählt^{1,2} und als eine der Hauptursachen für endodontische Misserfolge angesehen³. Unter Perforationen sind Verbindungen zwischen dem Wurzelkanalsystem und den betroffenen Teilen des umgebenden Desmodonts und/oder der Mundhöhle zu verstehen⁴. Die Schaffung einer solchen künstlichen Öffnung kann durch Bohren, Durchstechen, Schneiden oder Resorptionen erfolgen⁵.

Perforationen bei Wurzelkanalbehandlungen werden in der Literatur mit einer Inzidenz von 2 bis 12 % angegeben^{1,2,6,7,8}. Ingle⁹ konstatierte bereits 1961, dass Perforationen circa 10 % der endodontischen Misserfolge ausmachten. In einer Studie von Kvinnsland et al.¹⁰ hatten sich 53 % der iatrogenen Perforationen während der Insertion von Stiften ergeben, die verbleibenden 47 % bei endodontischen Routinebehandlungen. In über 74,5 % der untersuchten Fälle war es im Oberkiefer zu Komplikationen gekommen und am häufigsten wurden die bukkalen und mesialen Wurzeloberflächen sowie der mittlere Wurzelabschnitt perforiert. Tsesis et al.⁷

dagegen identifizierten erheblich mehr Perforationen in Unterkiefermolaren (54,3 %).

Die schlechteste Prognose haben Perforationen in der „kritischen Zone“ auf Höhe des Alveolar-kamms und des epithelialen Attachments aufgrund der potenziellen mikrobiellen Kontamination und der damit einhergehenden parodontalen Destruktion¹¹. Krestal lokalisierte Perforationen führen häufig zu epithelialer Migration, welche die Chance auf eine Regeneration erheblich reduziert¹¹.

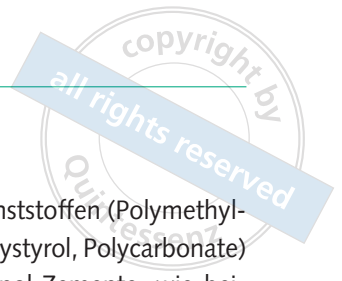
Perforationen koronal dieses Gebietes können dagegen mit adhäsiven Techniken oder definitivem Zahnersatz ohne parodontale Beteiligung sicher gedeckt werden. Perforationen apikal der kritischen Zone weisen ebenfalls eine gute Prognose auf, vorausgesetzt, die endodontische Behandlung kann adäquat ausgeführt werden und die Deckung zeigt eine ausreichende Dichte¹¹.

■ Materialien zur Perforationsdeckung

In der Vergangenheit war die Prognose für Perforationsreparaturen auf der Basis einer orthograden

Manuskript

Eingang: 15.02.2017
Annahme: 18.04.2017



Deckung wenig vorhersehbar¹⁰, da die verwendeten Reparaturmaterialien häufig zur Ausbildung eines Parodontaldefekts führten¹², das heißt, es kam vielfach zur Bildung einer fibrösen Bindegewebskapsel an der Grenze zum unmittelbaren Knochen. Bekannte Perforationsdeckungs-materialien waren damals u. a. Amalgam, Cavit, Zinkoxid-Eugenol und Guttapercha¹³.

Während Benenati et al.¹⁴ von der erfolgreichen Verwendung des Amalgams im Vergleich zu warmer, vertikal kondensierter Guttapercha berichteten, waren Lantz und Persson¹⁵ gegenteiliger Meinung. Harris¹⁶ empfahl Cavit und beschrieb eine 89,3 %ige Erfolgsrate, die wiederum Jew et al.⁵ nicht bestätigen konnten. Weine¹⁷ favorisierte Zinkoxid-Eugenol-Zement und Martin et al.¹⁸ empfahlen zur Hartgewebsneubildung eine Kalziumhydroxid-Therapie.

Durch technische Weiterentwicklungen wie das Operationsmikroskop (OPMI) reduzierte sich die Notwendigkeit chirurgischer Interventionen zur Perforationsdeckung und durch die Verwendung neuerer Materialien wie Mineral Trioxide Aggregate (MTA) verbesserten sich die Langzeitprognosen zunehmend. Bis zur Einführung der Biokeramiken galt MTA bei den meisten Indikationen als das Mittel der Wahl¹¹.

Die Wahl des Füllungsmaterials basiert auf dem technischen Zugang zur Perforationsstelle, der Möglichkeit, den Flüssigkeitseintritt zu kontrollieren und auf ästhetischen Gesichtspunkten¹⁹.

In der Literatur wurden folgende Materialien zur Perforationsdeckung beschrieben:

- Amalgam²⁰,
- Cavit²¹,
- Komposit,
- Dentinchips,
- Folien (Teflon, Indium etc.),
- Geristore: hierbei handelt es sich um einen Kunststoff-Glasionomer-Zement (Compomer), der aufgrund seiner guten Haftkraft an Dentin speziell für starke zervikale Defekte entwickelt wurde,
- Glasionomerzement (GIZ)³,
- Guttapercha: Strömberg et al.²² untersuchten in den 1970er-Jahren die Wirkung einer Mischung aus Harz, Guttapercha und Chloroform bei 24 Perforationsdeckungen humaner Zähne. Alle Versuche waren erfolgreich, bis auf die furkalen Perforationen, bei denen es teilweise zu einem epithelialen Einwachsen kam,

- Hydroxylapatit,
- durch den Zusatz von Kunststoffen (Polymethylmethacrylatpolymere, Polystyrol, Polycarbonate) verstärkte Zinkoxid-Eugenol-Zemente, wie beispielsweise IRM,
- Kalziumhydroxid²³,
- gefriergetrockneter Knochen,
- Mineral Trioxide Aggregate (MTA) mit Kollagen^{24,25},
- Plaster of Paris (Kalziumsulfat/gebrannter Gips),
- Trikalzium-Phosphat,
- Zinkoxid-Eugenol-Zement (ZOE),
- Durch Ersetzen eines Teils des Eugenols durch 2-Ethoxybenzoesäure (EBA) und eines Teils des Zinkoxids durch anorganische Füller (vor allem Aluminiumoxid (Al₂O₃)) wurde versucht, die klassischen ZOE-Zemente zu verbessern (wie in Super EBA).

■ Anforderungen an Reparaturmaterialien

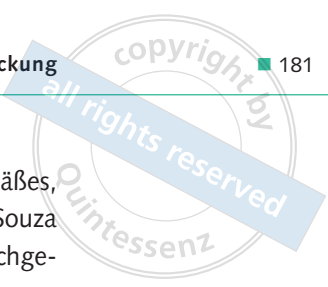
Bezüglich der Materialeigenschaften muss zwischen den intrakanalär zum Verschluss der Perforation und den extraradikulär zuvor als Matrix eingebrachten Materialien unterschieden werden.

Das intrakanalär zur Perforationsdeckung verwendete Material sollte die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Induktion von Knochen- und Zementbildung,
- biokompatibel,
- flüssigkeitsdicht,
- bakteriostatisch,
- radiopak,
- nicht resorbierbar,
- nicht kanzerogen,
- leichte Verfügbbarkeit,
- gute Verarbeitungsfähigkeit zu einem akzeptablen Preis^{23,25,27,28}.

Darüber hinaus sollte es:

- eine bakteriendichte Versiegelung ermöglichen,
- keiner Einschränkung durch eine Blutung unterliegen,
- eine Kontrolle der Extrusion ins umliegende Gewebe ermöglichen^{11,13}.



Vor der Einführung von MTA spielten auch die Fließ-eigenschaften eine wichtige Rolle. Je fließfähiger ein Material war, desto besser war seine Anhaftung an die Perforationswände²⁹.

Die Forderungen nach Biokompatibilität und Unlöslichkeit erfüllten bereits im Jahr 1992 Amalgam, Cavit, Glasionomerzement, Guttapercha inklusive Sealer und Zinkoxid-Zement. Die übrigen Anforderungen wurden dagegen von den damaligen Materialien noch nicht erfüllt^{11,13}.

Das Matrixmaterial muss ebenfalls:

- biokompatibel sein,
- zusätzlich steril oder sterilisierbar sein,
- resorbierbar sein.
- und darf keine Entzündungsreaktionen des Körpers hervorrufen.

Materialien mit den oben aufgeführten Eigenschaften standen bereits Anfang der 1990er-Jahre zur Verfügung, wie gefriergetrockneter Knochen, demineralisierter Knochen oder Kalziumphosphat-Materialien und Hydroxylapatit (HA)¹³.

Aus der Parodontologie sind resorbierbare Membranen bekannt. Salman et al.³⁰ untersuchten im Tierversuch, ob diese auch bei Perforationsdeckungen als Matrix von Vorteil sein könnten und kamen zu dem Ergebnis, dass Furkationsperforationen ohne Membran ausschließlich mit Resin-Modified Glass Ionomer Zement (RMGIC) gleichwertig versorgt werden können.

■ Amalgam

Amalgam stellte in der Vergangenheit das gebräuchlichste Perforationsdeckungsmaterial dar¹². Bereits 1957 empfahl Grossman die Verwendung dieser Legierung³¹. Der Vorteil lag in seiner kurzen Aushärtezeit von nur vier Minuten³². Balla et al.²³ kritisierten jedoch bereits 1991 die geringe Versiegelungsfähigkeit von Amalgam, die zu Entzündungsprozessen und zu einer unzureichenden Regeneration der parodontalen Gewebe führte. 1992 stellte Lemon sein „Internal Matrix Concept“ vor, bei dem er die Kondensation von Amalgam mit leichtem Druck gegen eine extraradikuläre Barriere aus Hydroxylapatit empfahl¹³.

In Übereinstimmung mit einer Vielzahl weiterer Studien kamen Mehrvarzfar et al.³³ zu dem Ergebnis, dass Amalgam als Perforationsdeckungsmaterial

aufgrund seines Mikroleakage kein zeitgemäßes, akzeptables Deckungsmaterial mehr darstellt. Souza et al.³⁴ zufolge weist Amalgam trotz der nachgewiesenen Freisetzung toxischer Elemente eine geringere Zytotoxizität auf als Glasionomerzement. Für die Zytotoxizität des Amalgams sind Kupfer und Zink verantwortlich, signifikant weniger dagegen das reine Silber und das Quecksilber³⁵.

■ Geristore

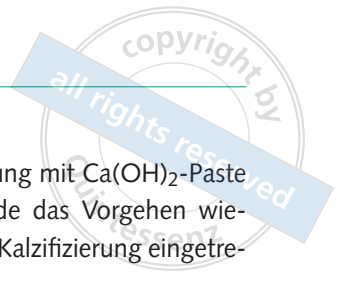
Geristore (DenMat, Santa Maria, CA, USA) ist ein Kunststoff-Glasionomer-Zement (Compomer), der aufgrund seiner guten Haftkraft an Dentin speziell für zervikale Defekte entwickelt wurde. Für die Deckung subgingivaler Defekte mit Geristore muss zunächst die Dentinoberfläche mit Phosphorsäure konditioniert werden, zudem ist ein Adhäsivverfahren erforderlich und anschließend muss das Material lichtgehärtet werden.

■ Glasionomerzement (GIZ)

Daoudi und Saunders³⁶ wiesen in ihrer In-vitro-Studie zur Abdichtungsfähigkeit von MTA ein signifikant geringeres Leakage als bei modifiziertem Harz-Glasionomerzement (RMGIC) nach. Der Einsatz eines OPMI hatte keinen signifikant positiven Einfluss auf die Qualität der Perforationsdeckung mit GIZ oder MTA.

Alhadainy und Himel³⁷ berichteten über eine bessere Abdichtungsfähigkeit für lichthärtenden GIZ verglichen mit Cavit bzw. Amalgam, wobei Letzteres am schlechtesten abschnitt. Darüber hinaus attestierten sie lichthärtendem RMGIC (beispielsweise Vitrebond) oder lichthärtendem Ca(OH)₂ eine bessere Versiegelungsqualität als herkömmlichem Glasionomerzement (beispielsweise Ketac Fil) oder Ca(OH)₂^{37,38}.

Himel und Alhadainy³⁹ bestätigten dem lichthärtenden RMGIC einen signifikant besseren Penetrationswiderstand gegen Methylenblau als lichthärtendem Komposit, unabhängig von einer Dentinpräparation und Dentinätzung. Allerdings zeigten die mit RMGICs versorgten präparierten und geätzten Dentinflächen eine signifikant bessere Dichtigkeit als die nicht präparierten und nicht geätzten Dentinoberflächen.



Fuss et al.⁴⁰ wiesen für Silber-GIZ (Chelon Silver, ESPE, Seefeld) ein signifikant besseres Versiegelungsvermögen nach als für Amalgam. In ihrer Studie zur Kontamination der Pulpakammer extrahierter Zähne durch Bakterien (*Streptococcus sobrinus*) kamen auch Jantar et al.⁴¹ zu dem Schluss, dass Ketac Silver signifikant bessere Versiegelungseigenschaften aufweist als Amalgam. Nach 22 Tagen zeigten allerdings sämtliche Proben eine vollständige Durchdringung mit Bakterien. Mittal et al.⁴² verglichen an 90 extrahierten Zähnen das Durchlässigkeitsverhalten von Amalgam, GIZ, Komposit, IRM und AH 26. Diese Reihenfolge der Materialien spiegelt auch die Abfolge der undichtesten Materialien wider, das heißt, Amalgam erwies sich als am ungeeignetsten, um eine Perforation zu verschließen. Chau et al.⁴³ verglichen die Dichte von lichthärtendem GIZ, Kalziumphosphat-Zement und der Kombination von beiden. Als Ergebnis stellten sie fest, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Versiegelungsmaterialien vorlag. Souza et al.⁴⁴ testeten die Zytotoxizität mehrerer Materialien, wobei GIZ eindeutig die höchste Zytotoxizität aufwies, da es dosisabhängig die Zellentwicklung behinderte. Es zeigte sich, dass sich nach der Polymerisation in einer wässrigen Umgebung zahlreiche Komponenten aus dem GIZ lösten⁴⁵.

■ Hydroxylapatit

1994 verzeichneten Balla et al.²³ keine Geweberegeneration bei furkalen Perforationsreparaturen mit Hydroxylapatit, Amalgam oder Trikalziumphosphaten, stattdessen traten histologisch bei allen Proben Entzündungen unterschiedlichen Schweregrades auf. Bei den HA-Proben ergab sich mit der Zeit eine günstigere Gewebereaktion, wobei allerdings eine Probe eine schwerwiegende Nekrose aufwies. Eine Knochenneuf ormation konnte bei keiner Probe verzeichnet werden.

■ Kalziumhydroxid

Ca(OH)₂ wurde vor der Einführung des MTA angewandt, um wie bei indirekten und direkten Überkappungen oder bei Apexifikationen eine Rekalzifizierung des Gewebes außerhalb der Wurzel zu erreichen³. Der Wurzelkanal wurde nach ausgiebi-

ger Ausformung und Reinigung mit Ca(OH)₂-Paste gefüllt (gegebenenfalls wurde das Vorgehen wiederholt), bis die gewünschte Kalzifizierung eingetreten war²⁶.

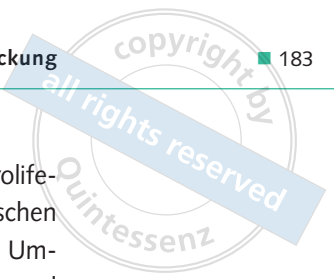
Lichthärtendes Ca(OH)₂ führte bei lateralen Wurzelperforationen zu weit besseren Ergebnissen als chemisch härtender GIZ oder Amalgam⁴⁶. Kalziumhydroxid verursachte mittlere bis schwere Entzündungen des Furkationsknochens^{47,48}.

■ Plaster of Paris (Kalziumsulfat/gebrannter Gips)

Der Name „Plaster of Paris“ stammt historisch von einem großen Gipslager am Montmartre in Paris. Plaster of Paris (PoP) besteht aus Kalziumsulfat, das heißt, aus gebranntem Gips. Das Material ist biokompatibel und hat einen blutstillenden Effekt. Es ist innerhalb eines Zeitraums von etwa vier Wochen resorbierbar und eignet sich somit als Matrixmaterial^{19,49}.

Alhadainy und Himel²⁹ untersuchten Plaster of Paris als Matrixmaterial unter Amalgam und lichthärtendem GIZ. Das Ergebnis sprach jedoch hinsichtlich des Haftverbundes von Füllungsmaterial an den Dentinwänden (Leakage) gegen den Einsatz von PoP. Sowohl Amalgam als auch der selbsthärtende GIZ wiesen mit PoP als Barriere schlechte Versiegelungseigenschaften auf (Amalgam: 100 % Leakage). Eine Überstopfung ließ sich dagegen mithilfe des PoP verhindern. Bahn⁵⁰ befasste sich mit Plaster of Paris in der zahnärztlichen Chirurgie, beispielsweise als Medikamentenvehikel bei knöchernen Infektionen oder als Füllstoff in größeren Knochendefekten nach Extraktionen oder Zystenoperationen und attestierte dem Material Stabilität, Sterilisierbarkeit, Biokompatibilität sowie eine rasche Resorptionsrate mit einhergehender Knochenregeneration. Radentz und Collings⁵¹ schrieben Plaster of Paris eine Beschleunigung der Knochenmineralisation zu, da das Material eine Quelle von Kalziumionen für den frühzeitigen Mineralisationsprozess darstellt.

Somit fungiert Plaster of Paris als Knochenbarriere, welche die Knochenregeneration vorantreibt, epitheliales Wachstum an dieser Stelle sowie die Bildung von parodontalen Taschen verhindert und das parodontale Reattachement fördert⁵².



■ Zink-Oxid-Eugenol (Super EBA)

Vor der Einführung von MTA galt Super EBA (Key-stone Industries, Gibbstown, NJ, USA) als gute Alternative zu Silberamalgam als Perforationsdeckungs-material⁵³. Weldon et al.⁵⁴ bestätigten die gute, mit der von MTA vergleichbaren Abdichtungsqualität von Super EBA bei Furkationsperforationen. Es zeigte sich ein signifikant besseres Abdichtungsvermögen von Super EBA im Vergleich zu MTA, jedoch nur zum Untersuchungszeitpunkt nach 24 Stunden. Eine Kombination aus MTA und darüber liegendem Super EBA führte zu signifikant mehr Leakage als die Verwendung von MTA oder Super EBA allein. Die Zytotoxizität von Super EBA ist im Vergleich zu GIZ als moderat einzustufen. Vorangegangene Studien führten die zytotoxischen Eigenschaften von Super EBA auf den Austritt von Zink-Ionen in wässrige Lösungen zurück⁵⁵.

■ Mineral Trioxide Aggregate (MTA)

MTA ist ein weithin akzeptiertes und verwendetes Reparaturmaterial für Perforationen auf Knochen-niveau. MTA verbessert die Prognose perforierter Zähne, die ohne MTA als kompromittiert einzustufen wären^{12,25}.

Physikalische und chemische Eigenschaften von MTA

MTA besteht aus zwei Komponenten: einem hydrophilen Pulver und sterilem Wasser. Das Pulver setzt sich aus Trikalziumsilikaten, Trikalziumaluminaten, Trikalziumoxiden und Silikat-, Mineral- und Bismut-oxiden zusammen und war ursprünglich grau, was gelegentlich zu dunklen Verfärbungen der Zahnhartsubstanz führt. Das in der Folge entwickelte weiße MTA unterscheidet sich vom grauen MTA durch das Fehlen von Eisen und durch einen herabgesetzten Bismutoxidgehalt. Die Hydratation des Pulvers führt zur Bildung einer Gelphase, die innerhalb von etwa vier Stunden erhärtet. Seine Druckbelastbarkeit beträgt bis zu 67 MPa³².

MTA besitzt antibakterielle und antimykotische Eigenschaften. Es handelt sich um ein bioaktives Material, welches die Zytokinproduktion reguliert und die Zelldifferenzierung und Einwanderung hartgewebsproduzierender Zellen auslöst. MTA setzt

Kalziumionen zur Zellanbindung und Zellproliferation frei und schafft aufgrund seines basischen pH-Wertes von etwa 12,5 ein antibakterielles Umfeld³², bildet auf seiner Oberfläche $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und unter idealen Bedingungen wächst Wurzelzement über MTA⁵⁶.

Hartgewebsneubildung durch MTA

Bezüglich der Reaktion des Parodontalligaments auf unterschiedliche Materialien (Amalgam, Super EBA, MTA) verursacht MTA die besten Gewebereaktionen in Form einer Zementneubildung⁵⁷. Allerdings stellten Moretton et al.⁵⁸ nicht nur die Osteoinduktivität des MTA infrage, sondern stuften es als lediglich osteokonduktiv ein. MTA ist bei Kontakt mit Pulpagewebe oder periradikulärem Gewebe in der Lage, die Bildung von Hartgewebe anzuregen^{25,59}. Die Regeneration von Zement erleichtert wiederum die Regeneration und Wiederanlagerung des Parodontiums^{25,32}. Darüber hinaus induziert MTA auch die Proliferation undifferenzierter Pulpazellen sowie osteoblastenähnlicher Zellen und Fibroblasten des Parodontalligaments. Diese Proliferation ist die Voraussetzung für die Wundheilung von Knochen, Dentin und Zement.

Tziafas et al.⁶⁰ zeigten in einer Tierstudie, dass MTA funktionelle und zytologische Veränderungen in Pulpazellen hervorrufen kann. Es kam zur Bildung einer gleichmäßigen Schicht kristalliner Strukturen entlang der Pulpa-MTA-Kontaktfläche. Dieser Schicht angelagert fanden sich in jedem Zahn Ablagerungen knochentypischen Hartgewebes. Hierdurch wurde nachgewiesen, dass MTA in der Lage ist, die Bildung von Reparaturdentin zu induzieren. Torabinejad et al.^{32,61} zufolge fördert MTA die Regeneration von Zement und führt somit zu einem effektiveren Perforationsverschluss als andere untersuchte Materialien.

Biokompatibilität von MTA

Das Fehlen pathologischer Effekte nach Extrusion von MTA in das umliegende Gewebe kann als Beweis seiner Biokompatibilität angesehen werden. Einer der Vorteile des MTA besteht in seiner nicht vorhandenen Mutagenität. Es ist nicht neurotoxisch und gehört zu den am wenigsten zytotoxischen zahnärztlichen Materialien⁶². Souza et al.⁴⁴ verglichen die Biokompatibilität bzw. Zytotoxizität



Abb. 1 Zahn 15: distal im koronalen Wurzel Drittel perforierender parapulpärer Stift; Parodontalspalt disto-koronal erweitert.

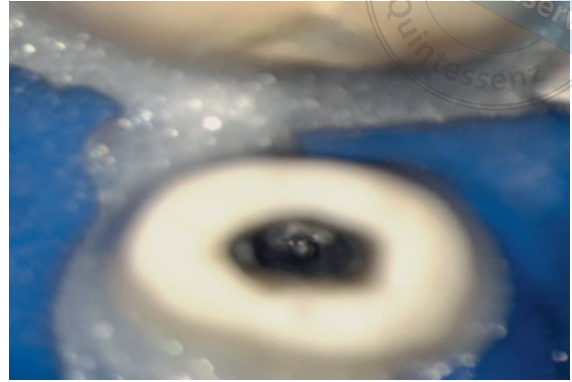


Abb. 2 Aufbau mit distaler Perforation nach Stiftentfernung.



Abb. 3 Perforationsdeckung mit MTA.

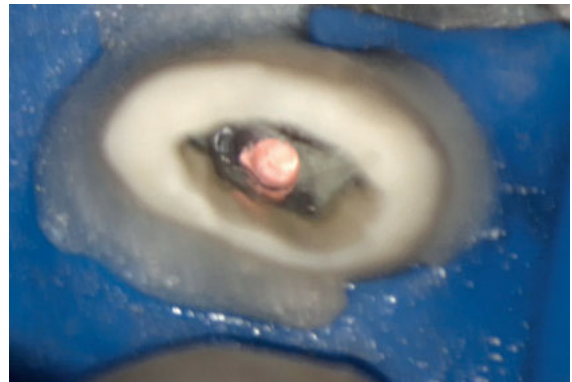


Abb. 4 Obturierter Wurzelkanal.



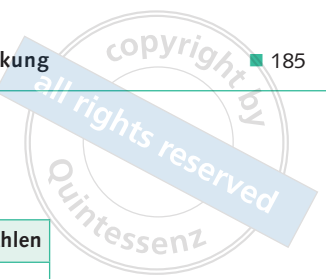
Abb. 5 Röntgenkontrolle nach Perforationsdeckung.

der Versiegelungsmaterialien Amalgam, GIZ, Super EBA, N-Rickert, MTA und Guttapercha und kamen ebenfalls zu dem Schluss, dass MTA das am wenigsten zytotoxische der untersuchten Materialien sei. Vor allem GIZ sowie N-Rickert und Amalgam lösten signifikante Änderungen in der Zellanzahl und Zellentwicklungsfähigkeit aus und waren als am stärksten zytotoxisch einzustufen. Guttapercha, Super

EBA und MTA erwiesen sich dagegen als weniger zytotoxisch.

Bei einem von Pitt Ford et al.²⁵ an Hundezähnen durchgeführten Vergleich von Amalgam und MTA zur Perforationsdeckung wiesen alle Amalgamproben histologisch Zeichen von Entzündungen auf, dagegen nur einer der sechs mit MTA gefüllten Hundezähne. Die Biokompatibilität von MTA wurde auch in einem Tierversuch nachgewiesen, bei dem MTA in die Unterkiefer- und Schienbeinknochen von Schweinen implantiert wurde⁶³. Eine weitere Studie zeigte, dass MTA keinen signifikanten Effekt auf bakterielles Wachstum fakultativer oder anaerober Bakterien hat⁶⁴. Bisher konnte in keiner Studie ein Unterschied in der Biokompatibilität zwischen weißem und grauem MTA festgestellt werden^{65,66}.

Die Abbildungen 1 bis 5 zeigen die MTA-Applikation bei einer Perforation des koronalen Wurzelmittels.



Nachteile des MTA

Diese bestehen vor allem in den möglichen gräulichen Zahnverfärbungen, seiner langen Abbindezeit, den hohen Materialkosten sowie seiner schwierigen Verarbeitung und Entfernbarkeit.

Wirkungsweise des MTA

Die Wirkung von MTA beruht auf folgenden Mechanismen:

- Bildung von $\text{Ca}(\text{OH})_2$, das Ca-Ionen abgibt,
- alkalischer pH-Wert von circa 12,5³²,
- Beeinflussung der Zytokinproduktion,
- Förderung der Differenzierung und Migration von Zellen zur Hartgewebeformung,
- Bildung von Hydroxylapatit auf der Oberfläche.

Pitt Ford et al.²⁵ wiesen nach, dass die oben beschriebenen Ergebnisse nur dann erzielt werden können, wenn eine Perforation umgehend gedeckt wird. Bei verspäteter MTA-Deckung kam es trotz der guten Eigenschaften des MTA zu Entzündungen. De-Deus et al.⁶⁷ verglichen die Versiegelungsqualität von MTA mit der von Portland-Zement. Die beiden Materialien unterschieden sich nicht signifikant. Al-Hezaimi et al.⁶⁸ verglichen den antibakteriellen Effekt von grauem und weißem MTA gegenüber *Enterococcus faecalis* und *Streptococcus sanguis* und stellten fest, dass auf grauem MTA kein Wachstum zu verzeichnen war, während das weiße MTA einen geringeren antibakteriellen Effekt gegenüber *E. faecalis* aufwies.

Soluti et al.⁶⁹ verglichen *in vitro* die Versiegelungsqualitäten von MTA, IRM und Amalgam. MTA zeigte signifikant bessere Ergebnisse und zusätzlich die geringste Überstopfung, während IRM die wenigsten Unterfüllungen aufwies. In zwei Studien zur Versiegelungsfähigkeit zeigte MTA im Gegensatz zu Amalgam, Super EBA oder IRM keinen negativen Effekt bei Blutkontamination^{64,70}.

In einer Langzeitstudie führten Mente et al.⁷¹ über einen Zeitraum von vier bis neun Jahren Nachuntersuchungen an 64 Zähnen mit orthograden Perforationsdeckungen mit MTA durch, wobei die Erfolgsrate bei 86 % lag. Die meisten Misserfolge traten innerhalb der ersten vier Jahre nach Versorgung mit MTA auf⁷².

Die Tabelle 1 zeigt weitere Studienergebnisse zur Perforationsdeckung mit MTA.

Tab. 1 Studien zur Perforationsdeckung mit MTA.

| Autor | Jahr | Recalldauer | Erfolgszahlen |
|------------------------------|------|-------------------|---------------|
| Main et al. ¹² | 2004 | 12 bis 45 Monate | 100 % |
| Pace et al. ⁷³ | 2008 | 60 Monate | 90 % |
| Mente et al. ⁷¹ | 2010 | 12 bis 65 Monate | 80 % |
| Pontius et al. ⁷⁴ | 2013 | 6 bis 116 Monate | 92 % |
| Krupp et al. ⁷⁵ | 2013 | 12 bis 120 Monate | 73,3 % |

■ Biokeramiken

Bei Biokeramiken, die bereits aus dem Medizinbereich (beispielsweise als Gelenkersatz) bekannt sind, handelt es sich um anorganische, nicht metallische Materialien, die seit etwa 2008 auch in der Endodontie Verwendung finden. Sie können als Sealer, ortho- und retrogrades Wurzelfüllmaterial, zur Perforationsreparatur, zur Pulpaüberkappung und bei der Apexifikation angewandt werden^{76,77}. Der Vorteil der neuen Biokeramiken liegt in einer verbesserten Biokompatibilität im Vergleich zu herkömmlichen Sealmaterialien⁷⁸. *In vitro* wurden eine Zelladhäsion, Proliferation und ein Überleben von mesenchymalen Knochenmarkstammzellen, Zellen des Parodontalligaments (PDL) und von Stammzellen der Pulpa auf den neuartigen Biokeramiken nachgewiesen⁷⁹. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass sie im Gegensatz zu MTA nicht zu einer koronalen Verfärbung der Zahnkrone führen⁸⁰.

Das Root Repair Material Total BC Fill (FKG, LaChaux-de-Fonds, Schweiz) setzt sich laut Herstellerangaben aus Kalziumsilikat, Zirkoniumoxid, Tantaloxid und Kalziumphosphat zusammen. Biokeramiken benötigen zum Abbinden Flüssigkeit und weisen somit eine hohe Hydrophilie auf. Die Abbindezeit des Root Repair Materials Putty beträgt laut Herstellerangaben etwa zwei Stunden. Auch die reduzierte Aushärtezeit des RRM Putty Fast-Set (20 min) bietet Vorteile im Vergleich zum MTA, da eine einzeitige Reparatur einer Perforation und umgehende Wurzelfüllung des übrigen Wurzelkanalanteils aus dem gleichen Material (Guttapercha und Sealer aus Biokeramik) möglich sind. Nachteilig für den Gebrauch der Biokeramik könnte seine hohe Härte nach der Abbindezeit sein, was unter Umständen eine Entfernung erschwert⁸¹.



Abb. 6 Diagnostikröntgenbild vor Revision: Lentulofragment in mb-Wurzel.



Abb. 7 Bei dem Versuch der Fragmententfernung mit Ultraschall wurde die mb-Wurzel nach mesial perforiert; Perforationsdeckung mit biokeramischem Putty (BC Total Fill).

■ Matrixtechniken

Die größten Probleme während einer Perforationsdeckung sind einerseits die Blutstillung und andererseits das kontrollierte Einbringen des Reparaturmaterials¹¹. In den 1960er- und 1970er-Jahren wurde eine retentive Präparation der Perforationsaußenwände vorgenommen, um ein Überstopfen zu verhindern. Eine solche Extrusion konnte in der Folgezeit durch die Nutzung von Matrixkonzepten verhindert werden³. Auslander und Weinberg⁸² stellten bereits 1969 die Verwendung einer Indium-Folie als Matrix vor, die vor dem orthograden Einbringen von Amalgam in eine Furkationsperforation appliziert wurde. 1986 zeigten Aguirre et al.⁸³ allerdings anhand radiologischer und histologischer Befunde, dass Amalgam und Gutta-percha zu wesentlich besseren Ergebnissen bei der furkalen Perforationsdeckung führten als eine Indium-Folie. Für die Nutzung von Matrixkonzepten steht eine Reihe resorbierbarer Materialien zur Verfügung, wie Kollagen, gefriergetrockneter demineralisierter allogener Knochen, Hydroxylapatit, Gelfoam und Kalziumsulfat, wobei Kollagen und Kalziumsulfat aufgrund ihrer leichten Handhabung die Gebräuchlichsten sind^{19,49}. Kollagen wird zu kleinsten Stücken zurechtgeschnitten und mithilfe von Hand-Pluggern oder MTA-Gun-Systemen nach und nach bis zum PDL in die Knochenwunde eingebracht, wo es nach vier bis sechs Wochen resorbiert wird.

■ Diskussion

Die Prognose eines Zahnes mit einer Perforation ist abhängig vom Zeitfenster zwischen Entstehung und Verschluss der Perforation, dem Schweregrad der initialen Schädigung des parodontalen Ligaments, von der Lokalisation der Perforation im Verhältnis zum gingivalen Sulkus, der Größe der Läsion, dem Versiegelungspotenzial des verwendeten Materials, der Qualität der Deckung und dem Infektionsgrad der Perforation^{3,11,84}. Tabelle 2 fasst Studien zusammen, die einen Vergleich des Erfolgs bei der Perforationsdeckung von MTA mit früher verwendeten Materialien ermöglichen. Die Abbildungen 6 bis 11 zeigen klinische Situationen.

Die unzureichende Eignung älterer Materialien zeigte sich in ihrer Unfähigkeit, den Defekt suffizient zu versiegeln, um eine Kommunikation der Mundhöhle mit dem Inneren eines Zahnes zu verhindern, und in ihrer mangelnden Biokompatibilität. Bis zur Einführung von MTA war kein Deckungsmaterial in der Lage, den Entzündungsprozess und den nachfolgenden Attachmentverlust zu stoppen und das gesunde Gewebe an der Perforationsstelle zu erhalten. Im Vergleich dazu gelingt es mit MTA, einen regenerativen Prozess in Form eines Gewebeattachments, beziehungsweise einer Zementbildung zu stimulieren^{12,25,90}.

Pontius et al.⁷⁴ erzielten eine Erfolgsrate von 90 % bei einem mittleren Recall von 37 Monaten. Es konnten keine signifikanten Unterschiede be-

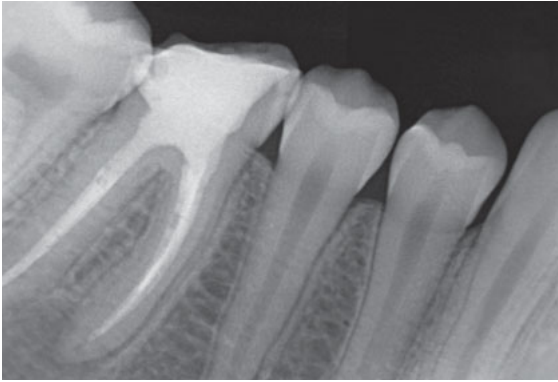


Abb. 8 Diagnostikröntgenbild alio loco vor Revision. Zahnfarbene, bis weit nach subkrestal reichende Kompositpins erschweren Reentry.

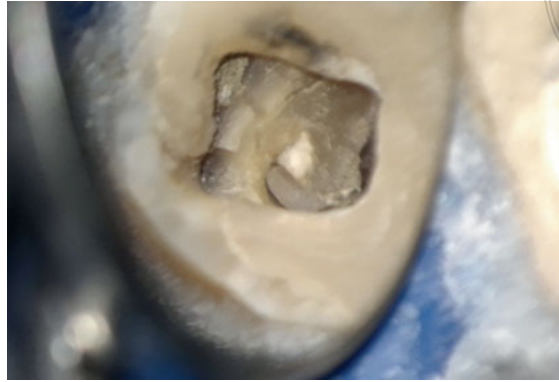


Abb. 9 Auf der Suche nach dem Eingang des mb-Wurzelkanals mit Ultraschall wurde der Zahn perforiert. Versuch der Deckung mit MTA.

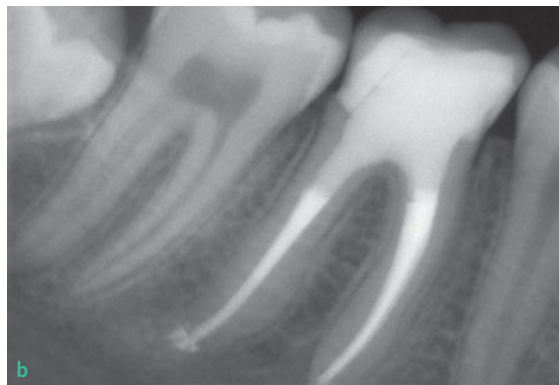
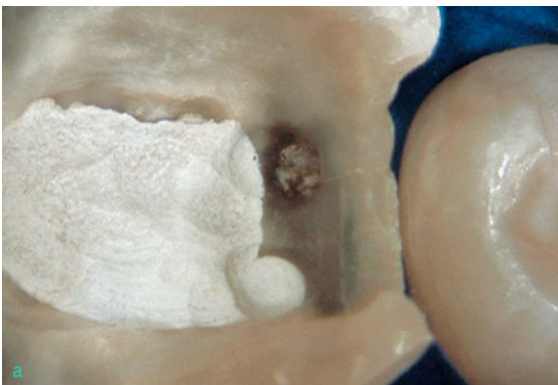


Abb. 10a und b Zustand vor Wurzelkanalfüllung (WF) und WF-Kontrollröntgenbild: eine Aushärtung des MTA aufgrund seiner epikrestalen Lage erfolgte nicht, sondern komplette Auswaschung des Zements; daher adhäsive Deckung nach mesial.

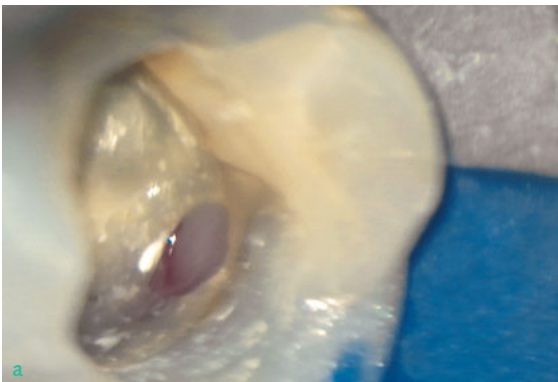
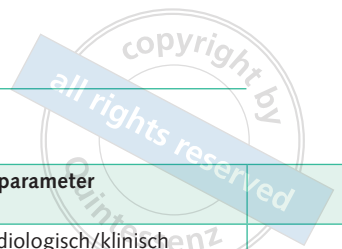


Abb. 11a und b Situation nach Überweisung. WK alio loco ist bereits erfolgt. Der Patient berichtete von persistierenden Beschwerden. Distale suprakrestale Perforation, die umgehend adhäsiv versorgt wurde.

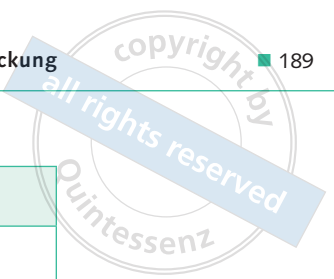
züglich der Erfolgsergebnisse von 50 untersuchten Perforationen als Folge initialer Wurzelkanalbehandlung/Revisionsbehandlung, bezüglich des Vorhandenseins/Fehlens einer präoperativen apikalen Parodontitis und hinsichtlich des Parodontalstatus auf Perforationsseite festgestellt werden. Prognosefaktoren, wie beispielsweise die Größe oder Lage der Perforation, das Zeitfenster bis zur Deckung

oder der Zahntyp, haben an Bedeutung verloren. In der Langzeitstudie mit einem Nachuntersuchungszeitraum von einem bis acht Jahre ergab sich lediglich für Perforationen mit einem Durchmesser von mehr als 3 mm eine geringere Erfolgsrate⁷². Zwei weitere Faktoren spielten allerdings eine Rolle für das Ergebnis: die Erfahrung des Zahnarztes sowie das Einbringen eines Stiftes.

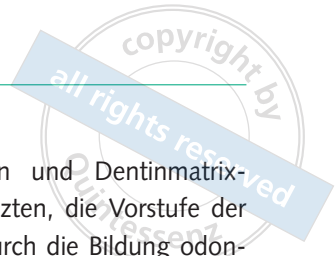


Tab. 2 Vergleich von Studien zur Verwendung von MTA versus alte Perforationsmaterialien (eigene Darstellung).

| Autoren | Jahr | in vivo | in vitro | Anzahl / Ort / Spezies | Untersuchungsparameter |
|---------------------------------------|------|---------|----------|---|---|
| Aguirre et al. ⁸³ | 1986 | X | | 48 Oberkiefermolaren Furkation Hund | Histologisch/radiologisch/klinisch Entzündungsgrad, Knochen, Dentin Zementresorption, Heilungstyp, Epithelproliferation |
| Alhadainy und Himeh ⁸⁵ | 1994 | | X | 60 Furkation Human | Färbelösungspenetration stereomikroskopisch |
| Sluyk et al. ⁸⁶ | 1998 | | X | 32 Oberkiefer- und Unterkiefermolaren Furkation Human | Messung der notwendigen Kraft zur MTA-Entfernung von Zahnhartsubstanz |
| Salman et al. ³⁰ | 1999 | X | | 30 Unterkieferprämolaren Furkation Hund | Histologische Reaktion auf Matrix |
| Daoudi und Saunders ³⁶ | 2002 | | X | 46 Molaren Furkation Human | Färbemittelpenetration |
| Weldon et al. ⁵⁴ | 2002 | | X | 51 Oberkiefermolaren Furkation Human | Flüssigkeitspenetration |
| Main et al. ¹² | 2004 | X | | 16 Human | Radiologische Erfolgsquote |
| Yildirim et al. ²⁸ | 2005 | X | | 90 Unterkieferprämolaren und Molaren Furkation Hund | Histologisch Entzündungs- und Heilungstyp |
| Al Hezaimi et al. ⁶⁸ | 2006 | | X | | Antibakterieller Effekt gegenüber E. faecalis und S. sanguis |
| Al-Daafas und Al-Nazhan ⁸⁷ | 2007 | X | | 72 Seitenzahnbereich Furkation Hund | Histologisch Entzündungsgrad, Heilungstyp, Epithelproliferation, Resorption von Knochen, Dentin, Zement |
| Holland et al. ⁸⁸ | 2007 | X | | 30 Laterale Perforationen Hund | Histomikrobiologisch & histomorphologisch |
| Pace et al. ⁷³ | 2008 | X | | 10 Furkation Human | Erfolgsquote: Klinisch und radiologisch |
| Samie et al. ⁸⁹ | 2009 | X | | 34 Prämolaren Furkation Hund | Histologisch Entzündungsgrad, Epithelproliferation |
| Krupp et al. ⁷⁵ | 2013 | X | | 90 Human | Erfolgsquote: Radiologisch |
| Pontius et al. ⁷⁴ | 2013 | X | | 50; alle Zahntypen Furkation und lateral Human | Erfolgsquote: Klinisch und radiologisch Langzeitstudie |
| Mente et al. ⁷² | 2014 | X | | 64 Human | Langzeitstudie Versiegelungsqualität |



| | Recalldauer | Verwendete Materialien | Ergebnis Material | Anmerkungen |
|--|---|---|--|--|
| | Nach 2 und 6 Monaten | 1. Amalgam 2. Guttapercha 3. Indiumfolie + Amalgam | Amalgam und Guttapercha kein signifikanter Unterschied | |
| | 2 Wochen | 1. PoP + Amalgam 2. Amalgam allein 3. PoP + lichthärtendes GIZ 4. Lichthärtendes GIZ allein | 1. Lichthärtendes GIZ 2. PoP + GIZ 3. Amalgam 4. PoP + Am | |
| | 24 h 72 h | MTA mit trockenem oder feuchtem Wattepellet darauf | MTA | Kein Unterschied zw. feuchtem oder trockenem Wattepellet, aber mit Feuchtigkeit in Perforation: signifikant besseres Ergebnis Nach 72 h signifikant größerer Widerstand gg. Abzugskraft als nach 24 h |
| | 3 Monate | 1. RMGIC alleine 2. Atrisorb + RMGIC | Kein Unterschied | |
| | 72 h | 1. MTA 2. RMGI (Vitrebond) jeweils mit und ohne OMPI x26 | MTA | Signifikant besser, aber kein Unterschied, ob mit oder ohne OPMI |
| | 30 min 4 h 24 h 1 Woche 1 Monat | 1. MTA 2. Super EBA 3. MTA + Super EBA | Kein signifikanter Unterschied | MTA: erst nach 4 h befriedigender Verschluss, Super EBA: erst nach 24 h überlegen |
| | Mind. 1 Jahr | MTA | MTA | 100 %iger Erfolg |
| | 1 Monat 3 Monate 6 Monate | 1. MTA 2. Super EBA | MTA | Bei MTA: In allen Zementbildung nach 6 Monaten Bei Super EBA: Bindegewebsbildung |
| | 1h 24 h 72 h | 1. Weißes MTA 2. Graues MTA | Graues MTA | Antibakterieller Effekt abhängig von Konzentration des MTA |
| | 4 Monate | 1. Graues MTA 2. graues MTA + Kalziumsulfat 3. Amalgam 4. Amalgam + Kalziumsulfat | Graues MTA alleine | CaSO ₄ als Matrix löst Entzündungsreaktionen aus Deckung auch bei MTA sofort indiziert |
| | 90 Tage | kontaminierte Perforation mit MTA (mit und ohne Ca(OH) ₂ -Einlage) nicht kontaminierte Perforation mit MTA | MTA bei nicht kontaminierter Perforation | MTA in nichtkontaminierter Perf. signifikant besser / Ca(OH) ₂ im Vorfeld bringt keinen signifikanten Unterschied |
| | 6 Monate bis 5 Jahre | MTA | MTA | 100 % Erfolg |
| | 3 Monate | 1. MTA 2. „Calcium enriched mixture“ (CEM) | Kein Unterschied zwischen den Materialien bezüglich Outcome | 90 %iger Erfolg |
| | 1 bis 10 Jahre | MTA | MTA | Erfolg 73,3 % / prognostischer Faktor: präoperative AP an der Perforationsstelle & Kontakt der Perforation zur Mundhöhle |
| | 6 Monate bis 9,5 Jahre | 1. MTA 2. MTA + Kollagen 3. MTA + Kalziumsulfat 4. Geristore® 5. Flow 6. Guttapercha 7. Flow + Kalziumsulfat 8. MTA + Biomed | Kein Unterschied zwischen den Materialien bezüglich Outcome | 90 %iger Erfolg |
| | 1 bis 8 Jahre | MTA | MTA | Gute Versiegelungsqualität unabhängig vom Ort / 86 % Heilungsrate |



Bei allen vorgestellten positiven Aspekten darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die Verwendung von MTA auch Nachteile mit sich bringt:

- lange Aushärtezeit von 2h 45 min (\pm 5 min)³²,
- relativ hoher Preis und techniksensitive Handhabung,
- enthaltene Schwermetalle⁷⁶,
- Bei suprakrestalen und transgingivalen Läsionen besteht das Risiko, dass das MTA aufgrund seiner noch nicht abgeschlossenen Aushärtung durch Flüssigkeiten aus der Mundhöhle ausgewaschen wird⁴⁹. Hier kann die Verwendung adhäsiver Materialien im subgingivalen Bereich eine gute Alternative darstellen^{3,11}.
- Risiko der Zahnverfärbung⁹¹.

Alsanea et al.⁹² gelang es in einem Tierversuch, bei dem sie Mäusen Dentinplättchen mit humanen

dentalen Pulpa-Stammzellen und Dentinmatrixproteinen subkutan einpflanzen, die Vorstufe der Regeneration von Dentin durch die Bildung odontoblastenähnlicher Zellen auszulösen. Es erscheint vielversprechend, diesen Ansatz für die Zukunft der Perforationsdeckung mit körpereigener Regeneration weiter zu verfolgen.

■ Fazit

Bezeichneten Seltzer et al.^{1,2} noch im Jahre 1967 eine Perforation als einen der bedeutsamsten endodontischen Zwischenfälle, lässt sich dieser heutzutage mithilfe der modernen Deckungsmaterialien besser handhaben. Langzeitstudien haben äußerst positive, den Zahnerhalt betreffende Ergebnisse nachgewiesen.

■ Literatur

1. Seltzer S, Bender IB, Smith J, Freedman I, Nazimov H. Endodontic failures – An analysis based on clinical, roentgenographic, and histologic findings. I. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1967;23:500–516.
2. Seltzer S, Bender IB, Smith J, Freedman I, Nazimov H. Endodontic failures – An analysis based on clinical, roentgenographic, and histologic findings. II. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1967;23:517–530.
3. Alhadainy HA. Root perforations: a review of literature. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1994;68:368–374.
4. Eleazer P, Glickman G, McClanahan S, et al. / American Association of Endodontists. Clinical Resources. AAE Glossary of Endodontic Terms. <http://www.aae.org/clinical-resources/aae-glossary-of-endodontic-terms.aspx> (15. Januar 2017).
5. Jew RC, Weine SW, Keene JJ, Smulson MH. A histologic evaluation of periodontal tissues adjacent to root perforations filled with Cavit. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1982;54:124–135.
6. Nicholls E. Treatment of traumatic perforations of the pulp cavity. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1962;15:603–612.
7. Tsesis I, Rosenberg E, Faivishevsky V, Kfir A, Katz M, Rosen E. Prevalence and associated periodontal status of teeth with root perforation: a retrospective study of 2,002 patients' medical records. *J Endod* 2010;36:797–800.
8. Fuss Z, Trope M. Root perforations: classification and treatment choices based on prognostic factors. *Endod Dent Traumatol* 1996;12:255–264.
9. Ingle JI. A standardized endodontic technique utilizing newly designed instruments and filling materials. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1961;14:83–91.
10. Kvinnsland I, Oswald RJ, Halse A, Grønningsæter AG. A clinical and roentgenological study of 55 cases of root perforation. *Int Endod J* 1989;22:75–84.
11. Clauder T, Shin SJ. Repair of perforations with MTA: clinical applications and mechanisms of action. *Endod Topics* 2009;15:32–55.
12. Main C, Mirzayan N, Shabahang S, Torabinejad M. Repair of root perforations using mineral trioxide aggregate: a long-term study. *J Endod* 2004;30:80–83.
13. Lemon RR. Nonsurgical repair of perforation defects. *Dent Clin North Am* 1992;36:439–457.
14. Benenati FW, Roane JB, Biggs JT, Simon JH. Recall evaluation of iatrogenic root perforations repaired with amalgam and gutta-percha. *J Endod* 1986;12:161–166.
15. Lantz B, Persson A. Periodontal tissue reactions after surgical treatment of root perforations in dogs' teeth. A histologic study. *Odontol Revy* 1970;21:51–62.
16. Harris WE. A simplified method of treatment for endodontic perforations. *J Endod* 1976;2:126–134.
17. Weine F. *Endodontic Therapy*, 3th Edn. St. Louis: Mosby 1982; zitiert nach Lemon RR. Nonsurgical repair of perforation defects. *Dent Clin North Am* 1992;36:439–457.
18. Martin LR, Gilbert B, Dickerson AW. Management of endodontic perforations. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1982;54:668–677.
19. Ruddle CJ. *Nonsurgical Endodontic Retreatment*, 8th Edn. St. Louis: Mosby 2002; zitiert nach Clauder T, Shin SJ. Repair of perforations with MTA: clinical applications and mechanisms of action. *Endod Topics* 2009;15:32–55.
20. Roane JB, Benenati FW. Successful management of a perforated mandibular molar using amalgam and hydroxylapatite. *J Endod* 1987;13:400–404.
21. Kerekes K, Tronstad L. Long-term results of endodontic treatment performed with a standardized technique. *J Endod* 1979;5:83–90.
22. Strömberg T, Hasselgren G, Bergstedt H. Endodontic treatment of traumatic root perforations in man. A clinical and roentgenological follow-up study. *Sven Tandlak Tidkr* 1972;65:457–466.
23. Balla R, Lo Monaco CJ, Skribner J, Lin LM. Histological study of furcation perforations treated with tricalcium phosphate, hydroxylapatite, amalgam, and life. *J Endod* 1991;17:234–238.
24. Holland R, Otoboni Filho JA, de Souza V, Nery MJ, Estrada Bernabé PF, Dzean E Jr. Mineral trioxide aggregate repair of lateral root perforations. *J Endod* 2001;27:281–284.
25. Pitt Ford TR, Torabinejad M, McKendry DJ, Hong CU, Kariyawasam SP. Use of mineral trioxide aggregate for repair of furcal perforations. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1995;79:756–763.
26. Sinai IH. Endodontic perforations: their prognosis and treatment. *J Am Dent Assoc* 1977;95:90–95.

27. El-Deeb ME, El-Deeb M, Tabibi A, Jensen JR. An evaluation of the use of amalgam, cavite, and calcium hydroxide in the repair of furcation perforations. *J Endod* 1982;8:459–466.
28. Yildirim T, Gençoğlu N, Firat I, Perk C, Guzel O. Histologic study of furcation perforations treated with MTA or Super EBA in dogs' teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2005;100:120–124.
29. Alhadainy HA, Himel VT. Evaluation of plaster bone barrier for repair of furcation perforations. *AAE Abstracts of Papers. J Endod* 1993;19:198–199.
30. Salman MA, Quinn F, Dermody J, Hussey D, Claffey N. Histological evaluation of repair using a bioresorbable membrane beneath a resin-modified glass ionomer after mechanical furcation perforation in dogs' teeth. *J Endod* 1999;25:181–186.
31. Grossman LI. The management of accidents encountered in endodontic practice. *Dent Clin North Am* 1957;11:903–912.
32. Torabinejad M, Hong CU, McDonald F, Pitt Ford TR. Physical and chemical properties of a new root-end filling material. *J Endod* 1995;21:349–353.
33. Mehrvarzfar P, Dahi-Taleghani A, Saghiri MA, Karamifar K, Shababi B, Behnia A. The comparison of MTA, Geristore® and Amalgam with or without Bioglass as a matrix in sealing the furcal perforations (in vitro study). *Saudi Dent J* 2010;22:119–124.
34. Souza NJA, Justo GZ, Oliveira CR, Haun M, Bincoletto C. Cytotoxicity of materials used in perforation repair tested using the V79 fibroblast cell line and the granulocyte-macrophage progenitor cells. *Int Endod J* 2006;39:40–47.
35. Kaga M, Seale NS, Hanawa T, Ferracane JL, Waite DE, Okabe T. Cytotoxicity of amalgams, alloys, and their elements and phases. *Dent Mater* 1991;7:68–72.
36. Daoudi MF, Saunders WP. In vitro evaluation of furcal perforation repair using mineral trioxide aggregate or resin modified glass ionomer cement with and without the use of the operating microscope. *J Endod* 2002;28:512–515.
37. Alhadainy HA, Himel VT. Evaluation of the sealing ability of amalgam, cavite, and glass ionomer cement in the repair of furcation perforations. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1993;75:362–366.
38. Alhadainy HA, Himel VT. Comparative study of the sealing ability of light-cured versus chemically cured materials placed into furcation perforations. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1993;76:338–342.
39. Himel VT, Alhadainy HA. Effect of dentin preparation and acid etching on the sealing ability of glass ionomer and composite resin when used to repair furcation perforations over plaster of paris barriers. *J Endod* 1995;21:142–145.
40. Fuss Z, Abramovitz I, Metzger Z. Sealing furcation perforations with silver glass ionomer cement: an in vitro evaluation. *J Endod* 2000;26:466–468.
41. Jantarat J, Dashper SG, Messer HH. Effect of matrix placement on furcation perforation repair. *J Endod* 1999;25:192–196.
42. Mittal M, Chandra S, Chandra S. An evaluation of plaster of paris barriers used under various materials to repair furcation perforations (in vitro study). *J Endod* 1999;25:385–388.
43. Chau JYM, Hutter JW, Mork TO, Nicoll BK. An in vitro study of furcation perforation repair using calcium phosphate cement. *J Endod* 1997;23:588–592.
44. Souza NJA, Justo GZ, Oliveira CR, Haun M, Bincoletto C. Cytotoxicity of materials used in perforation repair tested using the V79 fibroblast cell line and the granulocyte-macrophage progenitor cells. *Int Endod J* 2006;39:40–47.
45. Geurtsen W. Biocompatibility of resin-modified filling materials. *Crit Rev Oral Biol Med* 2000;11:333–355.
46. Dazey S, Senia S. An in vitro comparison of the sealing ability of materials placed in lateral root perforations. *J Endod* 1990;16:19–23.
47. Himel VT, Brady J, Weir J. Evaluation of repair of mechanical perforations of the pulp chamber floor using biodegradable tricalcium phosphate or calcium hydroxide. *J Endod* 1985;11:161–165.
48. El-Deeb ME, El-Deeb M, Tabibi A, Jensen JR. An evaluation of the use of amalgam, cavite, and calcium hydroxide in the repair of furcation perforations. *J Endod* 1982;8:459–466.
49. Roda SR, Gittleman BH. Nonsurgical retreatment. In: Hargreaves KM, Cohen S, Berman LH. *Cohen's pathways of the pulp*, 10th Edn. St. Louis: Mosby 2011; 890–952.
50. Bahn SL. Plaster: a bone substitute. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1966;21:672–681.
51. Radentz WH, Collings CK. The implantation of plaster of paris in the alveolar process of the dog. *J Periodontol* 1965;36:357–364.
52. Sottosanti J. Calcium sulfate: a biodegradable and biocompatible barrier for guided tissue regeneration. *Compendium* 1992;13:226–228, 230, 232–234.
53. Oynick J, Oynick T. Treatment of endodontic perforations. *J Endod* 1985;11:191–192.
54. Weldon JK, Pashley DH, Loushine RJ, Weller RN, Kimbrough WF. Sealing ability of mineral trioxide aggregate and super-eba when used as furcation repair materials: a longitudinal study. *J Endod* 2002;28:467–470.
55. Briseño BM, Willershausen B. Root canal sealer cytotoxicity on human gingival fibroblasts. I. Zinc oxide-eugenol-based sealers. *J Endod* 1990;16:383–386.
56. Parirokh M, Torabinejad M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review – part III: clinical applications, drawbacks, and mechanism of action. *J Endod* 2010;36:400–413.
57. Baek SH, Plenck H Jr, Kim S. Periapical tissue responses and cementum regeneration with amalgam, super-eba, and mta as root-end filling materials. *J Endod* 2005;31:444–449.
58. Moretton TR, Brown CE Jr, Legan JJ, Kafrawy AH. Tissue reactions after subcutaneous and intrasosseous implantation of mineral trioxide aggregate and ethoxybenzoic acid cement. *J Biomed Mater Res* 2000;52:528–533.
59. Sarkar NK, Caicedo R, Ritwik P, Moiseyeva R, Kawashima I. Physicochemical Basis of the biological properties of mineral trioxide aggregate. *J Endod* 2005;31:97–100.
60. Tziafas D, Pantelidou O, Alvanou A, Bellibasakis G, Papadimitriou S. The dentinogenic effect of mineral trioxide aggregate (MTA) in short-term capping experiments. *Int Endod* 2002;35:245–254.
61. Torabinejad M, Pitt Ford TR, McKendry DJ, Abedi HR, Miller DA, Kariyawasam SP. Histologic Assessment of mineral trioxide aggregate as a root-end filling in monkeys. *J Endod* 1997;23:225–228.
62. Ghoddusi J, Tavakkol Afshari J, Donyavi Z, Brook A, Disfani R, Esmaeizadeh M. Cytotoxic effect of a new endodontic cement and mineral trioxide aggregate on L929 line culture. *Iran Endod J* 2008;3:17–23.
63. Torabinejad M, Hong CU, Pitt Ford TR, Kariyawasam SP. Tissue regeneration to implanted super-eba and mineral trioxide aggregate in the mandible of guinea pigs: a preliminary report. *J Endod* 1995;21:569–571.
64. Torabinejad M, Hong CU, Pitt Ford TR, Kettering JD. Antibacterial effects of some root end filling materials. *J Endod* 1995;21:403–406.
65. Camilleri J, Montesin FE, Papaioannou S, McDonald F, Pitt Ford TR. Biocompatibility of two commercial forms of mineral trioxide aggregate. *Int Endod J* 2004;37:699–704.
66. Ribeiro DA, Duarte MAH, Matsumoto MA, Alencar Marques ME, Salvadori DM. *J Endod* 2005;31:605–607.
67. De-Deus G, Petrucelli V, Gurgel-Filho E, Coutinho-Filho T. MTA versus portland cement as repair material for furcal perforations: a laboratory study using a polymicrobial leakage model. *Int Endod J* 2006;293–298.
68. Al-Hezaimi K, Al-Shalan TA, Naghshbandi J, Oglesby S, Simon JHS, Rotstein I. Antibacterial effect of two mineral trioxide aggregate (MTA) preparations against enterococcus faecalis and streptococcus sanguis in vitro. *J Endod* 2006;32:1053–1056.
69. Soluti A, Lee SJ, Torabinejad M. Abstract #59 – Sealing ability of a mineral trioxide aggregate in lateral root perforations. *AAE Abstract of Papers. J Endod* 1993;19:199.
70. Torabinejad M, Higa RK, McKendry DJ, Pitt Ford TR. Dye Leakage of four root end filling materials: effects of blood contamination. *J Endod* 1994;20:159–163.

71. Mente J, Hage N, Pfefferle T, et al. Treatment outcome of mineral trioxide aggregate: repair of root perforations. *J Endod* 2010;36:208–213.
72. Mente J, Meltem L, Panagidis D, Saure D, Pfefferle T. Treatment outcome of mineral trioxide aggregate: repair of root perforations-long-term results. *J Endod* 2014;40:790–796.
73. Pace R, Giuliani V, Pagavino G. Mineral trioxide aggregate as repair material for furcal perforation: case series. *J Endod* 2008;34:1130–1133.
74. Pontius V, Pontius O, Braun A, Frankenberger R, Roggendorf MJ. Retrospective evaluation of perforation repairs in 6 private practices. *J Endod* 2013;39:1346–1358.
75. Krupp C, Bargholz C, Brüsehaber M, Hülsmann M. Treatment outcome after repair of root perforations with mineral trioxide aggregate: a retrospective evaluation of 90 teeth. *J Endod* 2013;39:1364–1369.
76. Ree M, Schwartz R. Management of perforations: four cases from two private practices with medium- to long-term recalls. *J Endod* 2012;38:1422–1427.
77. Ütrecht T, Dammaschke T. Wurzelfüllpasten auf Kalziumsilikatbasis – Aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisstand. *Endodontie* 2015;66:1–8.
78. Wang Z. Bioceramic material in endodontics. *Endod Topics* 2015;32:3–30.
79. Chen I, Salhab I, Setzer FC, Kim S, Nah HD. A new calcium-silicate-based bioceramic material promotes human osteo- and odontogenic stem cell proliferation and survival via the extracellular signal-regulated kinase signaling pathway. *J Endod* 2016;42:480–486.
80. Kohli MR, Yamaguchi M, Setzer FC, Karabucak B. Spectro-photometric analysis of coronal tooth discoloration induced by various bioceramic cements and other endodontic materials. *J Endod* 2015;41:1862–1866.
81. Boutsioukis C, Noula G, Lambrianidis T. Ex vivo study of the efficiency of two techniques for the removal of mineral trioxide aggregate used as a root canal filling material. *J Endod* 2008;34:1239–1242.
82. Auslander WP, Weinberg G. Anatomic repair of internal perforations with indium foil and silver amalgam: outline of a method. *N Y J Dent* 1969;39:454–457.
83. Aguirre R, El Deeb ME, El Deeb ME. Evaluation of the repair of mechanical furcation perforations using amalgam, gutta-percha, or indium foil. *J Endod* 1986;12:249–256.
84. Lantz B, Persson A. Periodontal tissue reactions after root perforations in dogs' teeth. A histologic study. *Odontol Tidskr* 1967;75:209–237.
85. Alhadainy HA, Himel VT. An in vitro evaluation of plaster of Paris barriers used under amalgam and glass ionomer to repair furcation perforations. *J Endod* 1994;20:449–452.
86. Sluyk SR, Moon PC, Hartwell GR. Evaluation of setting properties and retention characteristics of mineral trioxide aggregate when used as a furcation perforation repair material. *J Endod* 1998;24:768–771.
87. Al-Daafas A, Al-Nazhan S. Histological evaluation of contaminated furcal perforation in dogs' teeth repaired by MTA with or without internal matrix. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2007;103: e92–99.
88. Holland R, Bisco Ferreira L, de Souza V, Otoboni Filho JA, Murata SS, Dezan E Jr. Reaction of the lateral periodontium of dog's teeth to contaminated and noncontaminated perforations filled with mineral trioxide aggregate. *J Endod* 2007;33:1192–1197.
89. Samiee M, Eghbal MJ, Parirokh M, Abbas FM, Asgary S. Repair of furcal perforation using a new endodontic cement. *Clin Oral Invest* 2010;14:653–658.
90. Arens DE, Torabinejad M. Repair of furcal perforations with mineral trioxide aggregate: Two case reports. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1996;82:84–88.
91. Bortoluzzi EA, Araújo GS, Tanomaru JMG, Tanomaru-Filho M. Marginal gingiva discoloration by gray mta: a case report. *J Endod* 2007;33:325–327.
92. Alsanea R, Ravindran S, Fayad MI, Johnson BR, Wenckus CS, Hao J, George A. Biomimetic approach to perforation repair using dental pulp stem cells and dentin matrix protein 1. *J Endod* 2011;37:1092–1097.

Concepts and materials for root perforation repair: A summary

KEYWORDS *Perforation repair, repair materials, MTA, bioceramics, matrix techniques*

Perforations of the root canal represent a severe complication during root canal treatment, which can result in eventual loss of the tooth. Over the years a number of different concepts and materials have been proposed for perforation repair. This following article presents a survey and summarizes the results of studies on these concepts and materials.