

FLORIAN J. WEGEHAUPT
GÉRALDINE KUMMER
THOMAS ATTIN

Klinik für Präventivzahn-
 medizin, Parodontologie und
 Kariologie, Zentrum für Zahn-
 medizin, Universität Zürich,
 Zürich, Schweiz

KORRESPONDENZ

PD Dr. Florian J. Wegehaupt
 Klinik für Präventivzahn-
 medizin, Parodontologie und
 Kariologie, Zentrum für Zahn-
 medizin, Universität Zürich
 Plattenstrasse 11
 CH-8032 Zürich
 Tel. +41 44 634 33 54
 Fax +41 44 634 43 08
 E-Mail: florian.wegehaupt@
 zzm.uzh.ch

SWISS DENTAL JOURNAL SSO 127:
 748–755 (2017)
 Zur Veröffentlichung angenom-
 men: 27. Februar 2017

Schutz vor Erosionen durch Versiegler und Adhäsivsysteme unter abrasiven Bedingungen

SCHLÜSSELWÖRTER

Abrasion
 Erosion
 Adhäsive
 Versiegler

ZUSAMMENFASSUNG

Ziel der folgenden Studie war es, die Beständigkeit eines experimentellen Versieglers (K-0184) und diejenige von marktüblichen Self-Etch-Adhäsivsystemen zur Prävention erosiver Dentinverluste unter abrasiven Bedingungen zu testen. 96 Dentinproben wurden randomisiert auf acht Versuchsgruppen (1–8; n = 12) aufgeteilt: (1) Kontrolle (keine Beschichtung), (2) K-0184, (3) Shield Force Plus, (4) Xeno Select, (5) Scotchbond Universal, (6) Adhese Universal, (7) OptiBond All-In-One und (8) Clearfil SE Bond. Vor und nach Versiegelung der Dentinproben wurde eine proflometrische Messung durchgeführt, um die Schichtdicke der aufgetragenen Produkte zu bestimmen. Während der folgenden zwölf Tage wurden die Proben täglich für 5 min in Salzsäure (pH 3) demineralisiert und mit 600 Bürstenstrichen gebürstet (F = 2,5 N).

In der verwendeten Salzsäure wurde die Menge an gelöstem Calcium mit Atomabsorptionsspektroskopie gemessen.

Die Calciumkonzentration der Kontrollgruppe (ohne Beschichtung) war zu allen Messzeitpunkten (Tag 1–12 und kumuliert) statistisch signifikant am höchsten. Die geringste kumulierte Calciumfreisetzung konnte für K-0184 beobachtet werden; sie unterschied sich signifikant von den Gruppen 4, 6 und 7. Die signifikant grösste Schichtdicke wurde ebenfalls für K-0184 beobachtet. Der Versiegler K-0184 und die Adhäsivsysteme Xeno Select, Scotchbond Universal, Adhese Universal und Clearfil SE Bond sind in der Lage, einen erosiven Dentinverlust unter den gewählten abrasiven Bedingungen von insgesamt 7200 Bürstenstrichen signifikant zu reduzieren.

Einleitung

Erosive Veränderungen der Zahnhartsubstanz gerieten in den letzten Jahrzehnten in den Fokus der Forschung und hielten vermehrt Einzug in den Praxisalltag (JAEGGI & LUSSI 2014). Eine entsprechende Literaturrecherche von Lussi und Carvalho zeigt die Wichtigkeit der Thematik auf: Während 1980 lediglich zehn Studien unter dem Suchbegriff «tooth erosion» in PubMed gefunden werden konnten, waren es im Jahr 2012 bereits 100 Studien (LUSSI & CARVALHO 2014). Auch bei Publikationen über allgemein nicht kariöse Zahnhartsubstanzdefekte («tooth wear», «tooth attrition», «tooth abrasion») ist ein ähnlicher Anstieg zu beobachten.

Dentale Erosionen sind definiert als nicht kariöse Zahnhartsubstanzdefekte, die unter Ausschluss von Bakterien entstehen (LUSSI & CARVALHO 2014). Die Ätiologie ist multifaktoriell, wobei stets eine exogene (Lebensmittel, Medikamente) oder endogene (Magensäure, welche aufgrund von Essstörungen oder Reflux-Erkrankungen in die Mundhöhle gelangt) Säure zum Herauslösen der Mineralien aus der Zahnhartsubstanz führt (ZIPKIN & MCCLURE 1949).

Ohne präventive und therapeutische Massnahmen führen erosive Veränderungen zu erheblichen Langzeitfolgen wie Hypersensibilitäten der Zähne, Verlust der vertikalen Bisshöhe und nicht zuletzt zu ästhetischen Einbussen (LAZARCHIK & FILLER 1997). Zu den konventionellen präventiven Massnahmen zählen die chemische Wiedererhärtung der Zahnhartsubstanz mittels lokal applizierter Fluoride (AMAECHI & HIGHAM 2005), neuerer Produkte wie Zinnchlorid (GANSS ET AL. 2010) oder Ceriumchlorid (WEGEHAUPT ET AL. 2010). Besonders bei schwerwiegenden erosiven Zahnhartsubstanzdefekten, deren Ursachen ungeklärt sind oder noch nicht ausreichend therapiert werden konnten, ist neben der chemischen auch eine mechanische Intervention zum Schutz vor weiteren Dentinverlusten notwendig (AZZOPARDI ET AL. 2004). Neben aufwendigen und meist sehr teuren Restaurationen hat sich in den letzten Jahren eine minimalinvasive Therapie etabliert, die durch die «Versiegelung» der Dentinoberfläche mit Versiegler und Adhäsiven erfolgt (BRUNTON ET AL. 2000). Die verwendeten Adhäsive werden abhängig von der Applikationsart in «Etch&Rinse-» und «Self-Etch-Adhäsive» eingeteilt. Bei den Etch&Rinse-Adhäsiven wird die Zahnhartsubstanz zunächst mit einer Säure vorbehandelt. Die Self-Etch-Adhäsive enthalten bereits saure Monomere, die die Demineralisation der Zahnhartsubstanz und die Infiltration der Kunststoffschicht zeitgleich ermöglichen (VAN MEERBEEK ET AL. 2011). Durch die im Vergleich zu den Etch&Rinse-Adhäsiven mildere Azidität kollabiert das Kollagenfasernetzwerk des Dentins weniger stark, sodass ein optimaler Verbund zwischen Dentin und Adhäsiv erzielt werden kann (VAN MEERBEEK ET AL. 2011). Darüber hinaus verursachen Self-Etch-Adhäsive im Rahmen der Füllungstherapie weniger postoperative Schmerzen (VAN MEERBEEK ET AL. 2011). Folglich scheinen Self-Etch-Adhäsive besonders gut zum Schutz vor Erosionen und Abrasionen geeignet zu sein (AZZOPARDI ET AL. 2004; ITOH ET AL. 2010). Auch die in verschiedenen Studien (AZZOPARDI ET AL. 2004; WEGEHAUPT ET AL. 2012A; WEGEHAUPT ET AL. 2012B; WEGEHAUPT ET AL. 2013A; WEGEHAUPT ET AL. 2013C) zum Schutz vor Erosionen verwendeten Versiegler Seal&Protect und K-0184 wirken und reagieren mit den dentalen Substraten (Schmelz und Dentin) ohne spezielle Vorbehandlung (Ätzung oder andersgeartete Konditionierung), sodass man sie, in Bezug auf ihre Interaktion mit den Zahnhartsubstanzen, mit Self-Etch-Adhäsiven vergleichen kann. Der verwendete experimentelle Versiegler K-0184 wurde auch in

weiteren Studien (WEGEHAUPT ET AL. 2013B; WEGEHAUPT ET AL. 2014) auf seine Abrasionsbeständigkeit und Biokompatibilität hin getestet und untersucht.

In einer kürzlich publizierten Studie (WEGEHAUPT ET AL. 2013C) wurden ein Oberflächenversiegler und zwei Etch&Rinse-Adhäsive auf ihre Beständigkeit unter erosiven und abrasiven Bedingungen untersucht. Jedoch liegen zurzeit kaum Studien vor, die Self-Etch-Adhäsive hinsichtlich ihrer erosiven und abrasiven Stabilität vergleichen.

Das Ziel der vorliegenden In-vitro-Studie war es, die Beständigkeit eines experimentellen Versieglers (K-0184) und von marktüblichen Adhäsivsystemen unter dem Einfluss von intrinsischer Säure und unter abrasiven Bedingungen zu testen. Dabei wurde die Nullhypothese, dass erosive und abrasive Bedingungen nicht zum Verlust des Schutzes der verwendeten Versiegler- und Adhäsivsysteme führen, geprüft.

Material und Methoden

Herstellung und erosive Vorbehandlung der Dentinproben

Für die Studie wurden 96 Dentinproben aus bovinen Unterkieferfrontzähnen verwendet. Mittels Skalpell und Scaler wurden die Rinderzähne nach der Extraktion zunächst von Gewebe- und Faserresten gereinigt. Nach Abtrennen der Krone an der Schmelz-Zement-Grenze (IsoMet® Low Speed Saw, Buehler, Illinois, USA) wurden mithilfe eines wassergekühlten, diamantierten Trepanbohrers jeweils sechs Proben mit einem Durchmesser von 3 mm aus den gewonnenen Wurzeln herausgefräst. Anschliessend wurden die zylindrischen Dentinproben in Kunststoff (Paladur®, Heraeus Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland) eingebettet. Um die Proben von Kunststoffresten zu befreien und die Oberfläche zu glätten, wurden sie in einer Schleifmaschine (Planopol-2, Struers GmbH, Birmensdorf, Schweiz) mit 150 Umdrehungen/min mit Siliciumcarbidpapier (Struers GmbH, Birmensdorf, Schweiz) mit absteigender Körnung (1200, 2500 und 4000 Grit) plangeschliffen. Abschliessend wurden die Proben auf acht Gruppen (1-8; n=12) aufgeteilt. Dabei wurde darauf geachtet, dass jeder Gruppe nicht mehr als eine Probe eines Zahnes zugeteilt wurde. Während 24 h wurden die Proben nun einem De- und Remineralisationsvorgang unterzogen. Hierzu wurden die Proben während 6 × 5 min in Salzsäure (pH = 3,0) gelagert. Nach jedem erosiven Angriff wurden die Proben mit Leitungswasser gespült, um den Erosionsprozess zu beenden. Zwischen den Säureangriffen (30 min) und über Nacht wurden die Proben in künstlichem Speichel gelagert. Herstellung und Zusammensetzung des künstlichen Speichels sind in der Publikation von Klimek und Coautoren (KLIMEK ET AL. 1982) beschrieben.

Versiegelung der Dentinproben

Die Oberflächen der Dentinproben wurden mit dem experimentellen Versiegler (K-0184) oder mit marktüblichen Adhäsivsystemen versiegelt. Die Gruppe 1 diente als Kontrollgruppe, bei der die Dentinoberfläche unversiegelt blieb. Die Lichtpolymerisation der verwendeten Versiegler- oder Adhäsivsysteme erfolgte mit der Polymerisationslampe «Bluephase» (Modus: low, 1200 mW/cm²; Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) mit einem Abstand von 0,5 cm zwischen Lichtaustrittsfenster und Probenoberfläche.

Die Proben der Gruppe 2 wurden mit dem experimentellen Versiegler K-0184 (Dentsply DeTrey GmbH, Konstanz, Deutschland) behandelt. Der Versiegler wurde in einem ersten Schritt

auf die Dentinoberfläche aufgetragen. Dabei war es wichtig, den Versiegler während 20 s ungestört einwirken zu lassen. Anschliessend wurde der Versiegler während 5 s leicht verblasen und 10 s lang lichtpolymerisiert. Eine zweite Schicht wurde im gleichen Prozedere aufgetragen. Die Anwendung des Versieglers erfolgte nach den entsprechenden Herstellerangaben.

Die Proben der Gruppe 3 wurden mit Shield Force Plus (Tokuyama Dental Corporation, Tokyo, Japan) versiegelt. Shield Force Plus wurde während 10 s auf die Dentinprobe einmassiert, danach jeweils 5 s leicht und dann stark verblasen. Die Lichtpolymerisation erfolgte für 10 s.

In Gruppe 4 wurden die Dentinproben mit Xeno[®] Select (Dentsply DeTrey GmbH) versiegelt. Das Adhäsiv kann selbstätzend, mit selektiver Schmelzätzung oder mit der «Total-Etch»-Methode verwendet werden. In der vorliegenden Laborstudie wurde mit der selbstätzenden Methode gearbeitet: Das Adhäsiv wurde während 20 s auf die Dentinoberfläche einmassiert, danach für mindestens 5 s verblasen, bis sich das Adhäsiv nicht mehr bewegte, und schliesslich für 10 s lichtgehärtet.

Die Dentinproben der Gruppe 5 wurden mit Scotchbond[™] Universal (3M ESPE, Neuss, Deutschland) versiegelt. Scotchbond[™] Universal gehört zu den selbstätzenden Adhäsiven (Universal-Etch-Adhäsiv). In einem ersten Schritt wurde das Adhäsiv für 20 s auf der Oberfläche einmassiert. Mit sanftem Luftstrom wurde es anschliessend während mindestens 5 s verblasen, sodass das Lösungsmittel vollständig verdunstete. Die darauffolgende Lichtpolymerisation dauerte 10 s.

In Gruppe 6 wurde Adhese[®] Universal (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) zur Versiegelung der Dentinproben verwendet. Adhese[®] Universal ist ein lichthärtendes Ein-Komponenten-Dentinadhäsiv (Universal-Etch-Adhäsiv) und wurde im gleichen Prozedere wie die meisten vorangegangenen Adhäsivsysteme verarbeitet: 20 s einwirken lassen, mit Luftstrom verblasen und 10 s lichthärten.

Die Proben der Gruppe 7 wurden mit OptiBond[™] All-In-One (Kerr Dental, Scafati, Italien), einem Ein-Komponenten-Dentinadhäsiv, versiegelt, welches zunächst 20 s auf das Dentin einwirken musste und anschliessend durch einen leichten Luftstrom verblasen wurde. In einem zweiten Schritt wurde das Prozedere wiederholt: Das Adhäsiv wurde für 20 s auf das Dentin einmassiert und für 5 s verblasen. Danach erfolgte die Aushärtung mithilfe der Polymerisationslampe während 10 s.

Die Proben der Gruppe 8 wurden mit Clearfil[™] SE Bond (Kuraray, Okayama, Japan) versiegelt. Bei Clearfil[™] SE Bond handelt es sich um ein 2-Flaschen-System, das aus einem selbstätzenden Primer und einem Bonding besteht. Der Primer wirkte während 20 s auf der Dentinoberfläche ein, nach leichtem Verblasen wurde anschliessend das Bonding aufgetragen und auch leicht verblasen. Das Adhäsiv wurde für 10 s ausgehärtet.

Die chemische Zusammensetzung der sieben Versiegler/Adhäsive ist in der Tabelle I ersichtlich.

Messung der Versiegler-/Adhäsivschichtdicke

Um die resultierende Schichtdicke der verwendeten Produkte (Versiegler/Adhäsive) bestimmen zu können, wurde vor Beschichtung der Dentinproben eine Basismessung der Oberfläche mit einem Stylus-Profilometer (MAHR Oberflächenmessgerät, Mahr GmbH, Göttingen, Deutschland) durchgeführt. Hierbei wurden pro Probe fünf Profile im Abstand von jeweils 250 µm aufgezeichnet. Vor der profilometrischen Messung mussten die Proben während 10 min an der Luft getrocknet werden, um allfällige Dentinschrumpfungen während des Messverfahrens vermeiden zu können. Zudem wurden bei allen Proben die Kunststoffränder mit einem Klebeband (Scotch[®] Magic[™], 3M AG, Rüschlikon, Schweiz) beidseitig abgeklebt, damit bei der erneuten Aufzeichnung der Profile nach Versiegelung der Proben eine Referenzfläche zur Überlagerung der

Tab. I Zusammensetzung der Versiegler/Adhäsive (nach Herstellerangaben)

Versiegler/Adhäsiv	Inhaltsstoffe
K-0184	UDMA, Trimethacrylat, PENTA, hochdisperses Siliciumdioxid, Kampferchinon, Ethyl-4(dimethylamino)benzoat, BHT, Cetylaminhydrofluorid, Aceton
Shield Force Plus	2,6-di-tert. Butyl-4-methylphenol, 2-HEMA, Bis-GMA, Diphenyl-(2,4,6-trimethylbenzoyl)-phosphinoxid, Mequinol, Methacryloxyalkylsäurephosphat, Propan-2-ol, TEGDMA, Kampferchinon, Wasser
Xeno[®] Select	Bifunktionale Acrylate, saure Acrylate, Phosphorsäureester, Wasser, tertiäres Butanol (T-Butanol), Initiator, Stabilisator
Scotchbond[™] Universal	10-MDP, Dimethacrylatharze, HEMA, Vitrebond [™] Copolymer, Füller, Ethanol, Wasser, Silan, Initiatoren
Adhese[®] Universal	2-HEMA, Bis-GMA, Methacrylatphosphorsäureester, 2-Dimethyl-aminoethylmethacrylat, Kampferchinon, Ethanol, Wasser
OptiBond[™] All-In-One	HEMA, Ethanol, Dinatrium-Hexafluorsilikat, Aceton, Wasser
Clearfil[™] SE Bond	Primer: 10-MDP, 2-HEMA, hydrophiles aliphatisches Dimethylacrylat, Kampferchinon, N,N-Diethanol-p-Toluidin, Wasser Bonding: 10-MDP, 2-HEMA, Bis-GMA, hydrophobes aliphatisches Dimethylacrylat, Kampferchinon, N,N-Diethanol-p-Toluidin, kolloidale Kieselerde

Abkürzungen: UDMA = Urethan-Dimethacrylat, PENTA = Phosphorsäure-modifiziertes Acrylatharz, BHT = Butylhydroxytoluol, HEMA = 2-Hydroxyethylmethacrylat, Bis-GMA = Bisphenol-A-Diglycidyl-methacrylat, TEGDMA = Triethylen-Glykol-Dimethacrylat, 10-MDP = 10-Methacryloyloxydecyl-Di-hydrogenphosphat, Vitrebond[™] Copolymer = Methacrylat-modifiziertes Polyalkanoatsäure-Copolymer

beiden Profile vorhanden sein würde. Die Bestimmung der Schichtdicke der Versiegler/Adhäsive erfolgte durch Vergleich der Profile vor und nach Beschichtung (ATTIN ET AL. 2009). Die Basismessung erfolgte nach initialer Demineralisation der Proben, um die reine Schichtdicke der Versiegler/Adhäsive zu bestimmen.

Erosiv/abrasive Behandlung der Proben

Die Proben wurden während zwölf Tagen täglich dem folgenden erosiv/abrasiven Prozedere unterzogen:

Erosion während 5 min in HCl (pH 3,0; 2,5 ml Säure/Probe) unter stetiger Bewegung (IKA-Vibrax-VXR; IKA®-Werke GmbH & Co. KG, Staufen, Deutschland). Anschliessend wurden die Proben jeweils einzeln mit Aqua dest. abgespült und für 5 min in einer automatischen Bürstmaschine mit 120 Bürststrichen/min und einem konstanten Anpressdruck von 2,5 N gebürstet (verwendete Zahnbürste: ParoM43 mit 0,2-mm-Filament, Esro AG, Thalwil, Schweiz). Das verwendete Bürstslurry mit RDA 100 wurde in einem Verhältnis (Gewicht) von 1:5 aus Sident 9 (Dr. Storeck, Hanau, Deutschland) und einem Natrosol-Glycerin-Gemisch (Speichelersatzgemisch) gemäss Imfeld (IMFELD 2010) hergestellt. Über Nacht wurden die Proben in künstlichem Speichel (KLIMEK ET AL. 1982) gelagert. Das beschriebene Prozedere wurde am darauffolgenden Tag wiederholt (total 12 Behandlungen).

Bestimmung der Dichtigkeit der Versiegler/Adhäsive

Die Menge an Calcium, die sich während des erosiven Angriffs durch die Salzsäure aus dem Dentin gelöst hatte, wurde mithilfe einer Flammenabsorptionsspektroskopie (contrAA®300; Analytik Jena AG, Jena, Deutschland) bestimmt. Hierbei bedeutet ein geringer Calciumgehalt in der Säure eine hohe Dichtigkeit der Versiegler/Adhäsive und somit einen guten Schutz vor Erosionen. Es wurden jeweils 2 ml der HCl-Lösung mit 2 ml Stron-

tiumchlorid (SrCl_2) und 2 ml entionisiertem Wasser gemischt. Die Zugabe von Strontiumchlorid erfolgte, um das in der Säure gelöste Phosphat zu maskieren, was anderenfalls zu einer Verfälschung der anschliessenden Messung führen könnte. Die Wellenlänge für die Calciummessung wurde auf 422 nm gesetzt, was dem typischen Wert für Calcium entspricht (WEGEHAUPT ET AL. 2012A).

Statistische Auswertung

Die Daten wurden in Excel kodiert und mit SPSS Version 22 analysiert. Der Kolmogorov-Smirnov-Test wurde angewendet, um die Daten auf Normalverteilung zu überprüfen. Die deskriptiven Statistiken: Median und Interquartilbereich (IQR) wurden zu allen Zeitpunkten (alle zwölf Tage des erosiv/abrasiven Prozedere) für alle Gruppen berechnet. Die Unterschiede zwischen den Gruppen für jede der stetigen Variablen (Calciummenge 1. Tag bis Calciummenge 12. Tag, Calciummenge kumuliert, Schichtdicke der Versiegler/Adhäsive) wurden mittels des nicht parametrischen Kruskal-Wallis-Tests und des nach Bonferroni korrigierten nicht parametrischen Mann-Whitney-Tests (p-Wert < 0,0018) analysiert. Der Mann-Whitney-Test wurde als Post-hoc-Test verwendet.

Innerhalb der einzelnen Gruppen wurde die Calciumfreisetzung der Tage 2 bis 12 mit der Calciumfreisetzung am 1. Tag mittels des nicht parametrischen Wilcoxon-Tests für verbundene Stichproben verglichen (p-Wert < 0,05). Eine signifikante Zunahme der Calciumfreisetzung wurde als signifikanter Verlust des Schutzes vor Erosionen gedeutet.

Ergebnisse

Versiegler-/Adhäsivschichtdicke

Die Schichtdicke (Median, Interquartilbereich) der sieben Systeme ist in Abbildung 1 dargestellt. Die grösste Schichtdicke wurde für K-0184 (Median: 48,61 μm , IQR: 25,86 μm) beobach-

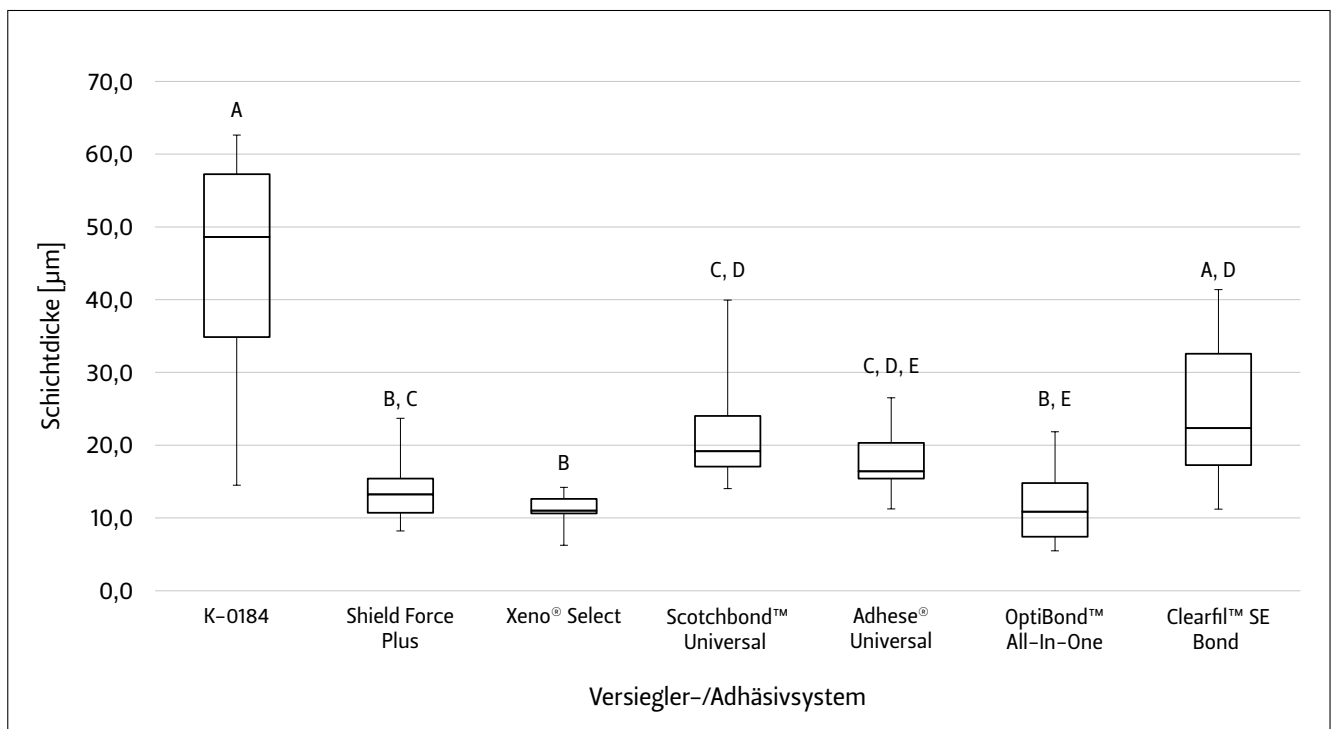


Abb. 1 Schichtdicken (Median) und Interquartilbereich (IQR) der sieben Versiegler-/Adhäsivsysteme. Messwerte, die sich nicht statistisch signifikant voneinander unterscheiden, sind mit dem gleichen Buchstaben markiert.

Tab. II Calciumkonzentrationen ($\mu\text{g Ca/ml}$, Median [Interquartilbereich]) an den Tagen 1–12 und kumuliert (kum) der acht Versuchsgruppen

Tag	Gruppe 1: Kontrolle	Gruppe 2: K-0184	Gruppe 3: Shield Force Plus	Gruppe 4: Xeno Select	Gruppe 5: Scotchbond Universal	Gruppe 6: Adhese Universal	Gruppe 7: OptiBond All-In-One	Gruppe 8: Clearfil SE Bond
1	1,70 (0,56) A	0,26 (0,21) B, C	0,14 (0,11) C	0,19 (0,09) B, C	0,20 (0,19) B, C	0,23 (0,15) B	0,31 (0,17) B	0,36 (0,24) B
2	0,89 (0,67) A*	0,10 (0,05) B*	0,14 (0,04) B	0,14 (0,03) B, C*	0,13 (0,06) B*	0,14 (0,05) B*	0,23 (0,16) C	0,18 (0,11) B, C*
3	1,37 (0,86) A*	0,06 (0,03) B*	0,18 (0,04) C	0,11 (0,05) C*	0,07 (0,07) B*	0,10 (0,08) B*	0,27 (0,21) C	0,10 (0,08) B*
4	1,63 (0,62) A	0,08 (0,04) B*	0,21 (0,07) C*	0,13 (0,07) B, C, D*	0,08 (0,07) B, D*	0,12 (0,05) D*	0,31 (0,33) C	0,10 (0,08) B, D*
5	1,25 (0,48) A*	0,05 (0,05) B*	0,20 (0,15) C*	0,12 (0,04) B, D*	0,08 (0,07) B, D	0,16 (0,10) B, C	0,29 (0,28) C, D	0,13 (0,19) B, C
6	1,13 (0,30) A*	0,02 (0,04) B*	0,27 (0,14) C*	0,06 (0,03) B*	0,04 (0,08) B*	0,08 (0,05) B, D*	0,38 (0,36) C, D	0,05 (0,19) B, C*
7	1,12 (0,28) A*	0,01 (0,04) B*	0,23 (0,22) C*	0,09 (0,08) B*	0,05 (0,13) B*	0,12 (0,09) B*	0,55 (0,51) C	0,06 (0,07) B*
8	1,15 (0,45) A*	0,00 (0,04) B*	0,24 (0,36) C*	0,04 (0,05) B, D*	0,00 (0,04) B, D*	0,07 (0,05) D, E*	0,44 (0,55) C, E	0,01 (0,09) B, D*
9	1,09 (0,26) A*	0,05 (0,04) B*	0,29 (0,23) C*	0,09 (0,04) B, D*	0,07 (0,10) B, D*	0,13 (0,07) D*	0,58 (0,56) C	0,08 (0,10) B, D*
10	1,18 (0,41) A*	0,06 (0,04) B*	0,42 (0,29) C*	0,11 (0,07) B*	0,07 (0,08) B*	0,16 (0,09) B, D	0,61 (0,55) C, D*	0,11 (0,18) B*
11	1,40 (0,57) A	0,09 (0,19) B	0,53 (0,38) C*	0,11 (0,03) B*	0,12 (0,22) B	0,21 (0,11) B	0,70 (0,66) C*	0,10 (0,25) B*
12	1,32 (0,47) A	0,07 (0,07) B, D*	0,49 (0,51) C*	0,10 (0,04) B*	0,13 (0,16) B, D	0,18 (0,10) D	0,83 (0,70) C*	0,11 (0,23) B, D*
kum	15,68 (2,95) A	0,90 (0,55) B	3,19 (2,27) C, E	1,30 (0,65) B, D	1,10 (0,80) B, D	1,71 (0,86) D	5,60 (4,80) C	1,76 (1,01) B, D, E

Innerhalb eines Tages und kumulativ sind jene Calciumwerte, die sich nicht statistisch signifikant unterscheiden, mit dem gleichen Buchstaben versehen (horizontale Leserichtung). Innerhalb einer Versuchsgruppe sind jene Calciumwerte von Tag 2 bis 12, die sich nicht statistisch signifikant vom Ursprungswert des 1. Tages unterscheiden, mit einem Asterisk (*) markiert (vertikale Leserichtung).

tet. Die signifikant geringsten Schichtdicken wurden für Shield Force Plus (Median: 13,23 μm , IQR: 6,00 μm), Xeno® Select (Median: 11,01 μm , IQR: 2,55 μm) und OptiBond™ All-In-One (Median: 10,86 μm , IQR: 9,28 μm) beobachtet.

Dichtigkeit der Versiegler/Adhäsive

Die freigesetzte Calciumkonzentration während der erosiven Behandlung an den Tagen 1 bis 12 sowie der kumulierte Calciumwert (Summe der Calciumwerte jeder Gruppe der Tage 1 bis 12) der acht Versuchsgruppen sind in der Tabelle II dargestellt.

An allen Tagen konnte die signifikant höchste Calciumfreisetzung in der Kontrollgruppe (Gruppe 1) beobachtet werden ($p < 0,0018$).

An allen Tagen unterschied sich die Calciumfreisetzung in Gruppe 2 (K-0184) signifikant von OptiBond™ All-In-One und ab Tag 3 auch von Shield Force Plus.

Shield Force Plus (Gruppe 3) wies Calciumwerte auf, die sich, mit Ausnahme der Tage 1 und 2, an allen Messtagen signifikant

von K-0184 und Scotchbond™ Universal, ferner von Adhese® Universal (Ausnahme Tage 2 und 5) und Clearfil™ SE Bond (ausgenommen Tage 2, 5 und 6) unterschieden.

Ein signifikanter Unterschied bestand zwischen Scotchbond™ Universal und Shield Force Plus von Tag 3 an. Im Vergleich zu OptiBond™ All-In-One konnte mit Ausnahme der Tage 1 und 5 eine signifikant geringere Calciumfreisetzung für Scotchbond™ Universal beobachtet werden.

Die gemessenen Calciumwerte von Clearfil™ SE Bond unterschieden sich signifikant von jenen von Shield Force Plus (Ausnahme Tage 2, 5 und 6) und OptiBond™ All-In-One (Ausnahme Tage 1, 2, 5 und 6).

Die kumulativen Calciumfreisetzungen der Gruppen 2, 4, 5 und 8 (K-0184, Xeno® Select, Scotchbond™ Universal und Clearfil™ SE Bond) unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Die kumulativen Calciumfreisetzungen der Gruppen 3 (Shield Force Plus) und 7 (OptiBond™ All-In-One) waren signifikant höher als in den Gruppen 2, 4, 5 sowie 8 und unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Kumulativ konnte

die signifikant höchste Calciumfreisetzung in der Kontrollgruppe (Gruppe 1) beobachtet werden.

In der Gruppe 3 (Shield Force Plus) konnte ab Tag 4 eine signifikant höhere Calciumfreisetzung als am Tag 1 beobachtet werden. Für OptiBond™ All-In-One (Gruppe 7) konnte ab Tag 10 eine signifikant höhere Calciumfreisetzung als am Tag 1 nachgewiesen werden. Für alle anderen Gruppen konnte an den Tagen 2 bis 12 keine signifikant höhere oder sogar eine geringere Calciumfreisetzung beobachtet werden als am Tag 1.

Diskussion

Die Nullhypothese der vorliegenden Studie, dass die Behandlungsdauer von zwölf Tagen *in vitro* unter erosiven und abrasiven Bedingungen nicht zum Verlust des Schutzes der verwendeten Versiegler- und Adhäsivsysteme führt, muss aufgrund der vorliegenden Ergebnisse verworfen werden.

In der vorliegenden Studie wurden die Dentinproben aus bovinen Zähnen hergestellt. Mehrere Studien liegen vor, die Zahnhartsubstanzverluste unter erosiven und abrasiven Einflüssen an bovinem Dentin getestet haben (IMFELD 2001; DE MEZES ET AL. 2004; MAGALHAES ET AL. 2009; STEINER-OLIVEIRA ET AL. 2010; WEGEHAUPT ET AL. 2013C). Nebst der einfachen Beschaffung können aus einem Rinderzahn mehrere Proben gewonnen werden (WEGEHAUPT ET AL. 2008; SHELLIS ET AL. 2011). Darüber hinaus werden Rinderzähne meist von Tieren bezogen, die aus ähnlicher Herkunft und Haltung stammen (WEGEHAUPT ET AL. 2012A). Die genannten Punkte führen zu homogenen Proben und folglich zur verbesserten Vergleichbarkeit innerhalb der zu untersuchenden Gruppen (WIEGAND & ATTIN 2011). Des Weiteren weist bovines Dentin ein mit humanem Dentin vergleichbares Verhalten unter abrasiven und erosiv/abrasiven Bedingungen auf (WEGEHAUPT ET AL. 2008).

Die erosive Attacke der Proben erfolgte mithilfe von Salzsäure (HCl). HCl ist Hauptbestandteil der Magensäure und wird vielfach zur Simulation intrinsischer Erosionen bei Refluxerkrankungen oder Essstörungen eingesetzt (SCHLUETER ET AL. 2007; AUSTIN ET AL. 2011; WEGEHAUPT ET AL. 2013C). Neben der Salzsäure enthält Magensaft verschiedene proteolytische Enzyme, wie beispielsweise Pepsin oder Trypsin (HUNT 1951). Es wird kontrovers diskutiert, ob proteolytische Enzyme zur Degradation der organischen Dentinmatrix führen und somit massgeblich an der Progression erosiver Läsionen beteiligt sind (SCHLUETER ET AL. 2007; SCHLUETER ET AL. 2010; BUZALAF ET AL. 2014; GANSS ET AL. 2014). Wegen der Kontroversen und mehrerer Studien (WIEGAND ET AL. 2007; GANSS ET AL. 2009A; WEGEHAUPT & ATTIN 2010; AUSTIN ET AL. 2011; DE-MELO ET AL. 2011; WEGEHAUPT ET AL. 2012B; WEGEHAUPT ET AL. 2013C), welche intrinsische Erosionen ohne proteolytische Enzyme simuliert haben, wurde in der vorliegenden Studie reine Salzsäure verwendet.

Die vorliegende *In-vitro*-Studie wurde während zwölf Tagen durchgeführt. Ein Tag *in vitro* soll hierbei, in Bezug auf die Abrasionsdauer, etwa einem Monat (30 Tage) *in vivo* entsprechen. Diese Berechnung basiert auf der Annahme von Wiegand und Attin (WIEGAND & ATTIN 2011), dass unter klinischen Bedingungen bei einmaligem Zähneputzen jeder Zahn mit 10–15 Bürstenstrichen (BS) gebürstet wird. Zudem putzt die Mehrheit der Bevölkerung die Zähne durchschnittlich zweimal pro Tag (GANSS ET AL. 2009B). Folglich wird ein Zahn während eines Monats *in vivo* mit 600–900 BS gebürstet, was in etwa der täglichen Abrasion (5 min) mit der Bürstmaschine (120 BS/min) in der vorliegenden Studie entspricht.

Einschränkend muss man anmerken, dass die Dauer des erosiven Angriffes pro Tag nicht einen Monat *in vivo* simulierte. Hier wäre eine deutlich höhere Erosionsdauer nötig gewesen. Allerdings zielte die vorliegende Studie primär drauf ab, zu untersuchen, wie gut der Schutz vor Erosionen unter abrasiven Bedingungen ist. Der erosive Angriff diente primär dazu, die Dichtigkeit (Schutz vor Erosionen) der Versiegler/Adhäsive zu untersuchen.

Die Dentinproben wurden mithilfe einer fluoridfreien «Slurry»-Paste mit RDA-Wert 100 gebürstet, um die Versiegler/Adhäsive unter extremer Belastung zu testen und mögliche präventive Effekte des Fluorids auszuschliessen. Fluoride in Zahnpasten führen *in vitro* sowie auch *in situ* zu weniger Zahnhartsubstanzverlusten (WIEGAND & ATTIN 2011). Es ist daher anzunehmen, dass für die klinische Relevanz der Studie die Verwendung von fluoridhaltiger Zahnpasta von Vorteil gewesen wäre und dass dieses Fehlen folglich eine Limitation der vorliegenden Studie darstellt.

Die in der Studie verwendete Messmethode zur Bestimmung der Dichtigkeit der Versiegler/Adhäsive (Calciumanalyse mithilfe der Atomabsorptionsspektroskopie) gilt als geeignete Methode zum Nachweis initialer erosiver Zahnhartsubstanzverluste (ATTIN & WEGEHAUPT 2014). Eine Messung des Zahnhartsubstanzverlustes mittels Profilometrie kann nur dann erfolgen, wenn die organische Dentinmatrix im Vorfeld durch Kollagenasen entfernt wurde (GANSS ET AL. 2007), da der Taster des Profilometers sonst unkontrolliert in das freigelegte Kollagen einsinkt, was zu Ungenauigkeiten in der Messung führen kann. Zur Schichtdickenmessung von Versiegler- und Adhäsivsystemen scheint die Profilometrie jedoch geeignet (WEGEHAUPT ET AL. 2013B). In der vorliegenden Studie wurden die Dentinproben vor der profilometrischen Messung jeweils für 10 min getrocknet. Allfällige Schwankungen der Schichtdicke aufgrund von Schrumpfungen des Dentins konnten mittels dieser Technik verhindert werden (ATTIN & WEGEHAUPT 2014). Dies basiert auf den Erkenntnissen der Studie von Ganss und Mitarbeitern (GANSS ET AL. 2007), die zeigen konnten, dass Veränderungen im Dentin nur in den ersten 10 min geschehen und nach erneutem Benetzen der Dentinoberfläche (für 30 s) reversibel sind. Folglich ist davon auszugehen, dass die Profilometrie zur Messung der relativen Schichtdicke der Testgruppen ausreichend genau ist (ATTIN ET AL. 2009).

Die Calciumfreisetzung der mit Versiegler- oder Adhäsivsystemen versiegelten Proben war während der gesamten zwölf Tage und auch kumulativ signifikant geringer als die der Kontrollproben (ohne Beschichtung). Verschiedene Studien (BRUNTON ET AL. 2000; WEGEHAUPT ET AL. 2012B; WEGEHAUPT ET AL. 2013C; BUZALAF ET AL. 2014) haben gezeigt, dass die Beschichtung der Dentinoberfläche mit einem Versiegler oder Adhäsiv den erosiven Verlust an Zahnhartsubstanz reduziert. Nichtsdestotrotz unterscheiden sich die getesteten Versiegler- und Adhäsivsysteme in der vorliegenden Studie bezüglich der Beständigkeit unter erosiven und abrasiven Bedingungen. Die Calciumwerte der mit Shield Force Plus (Gruppe 3) und mit Opti-Bond™ All-In-One (Gruppe 7) behandelten Proben stiegen über die gesamte Dauer der Studie an und lagen an den Tagen 7, 9, 11 und 12 signifikant über den Werten der restlichen Versiegler/Adhäsive. In Bezug auf die kumulative Calciumfreisetzung zeigte das Adhäsiv OptiBond™ All-In-One den schlechtesten Schutz vor Erosionen, gefolgt von Shield Force Plus.

Eine Studie von Walter und Mitarbeitern (WALTER ET AL. 2012) untersuchte die Haftkraft von OptiBond™ All-In-One über

eine Zeitdauer von zwei Jahren. Die Abnahme der Haftkraft über die genannte Zeitdauer ist auf die hydrolytische Degradation der Hybridschicht, d.h. den Verbund zwischen Dentin und Adhäsiv, zurückzuführen. Diese ist laut der Studie vor allem von der chemischen Zusammensetzung der Adhäsive und nicht von der Applikationsart abhängig (WALTER ET AL. 2012). Self-Etch-Adhäsive weisen hydrophile Eigenschaften auf (ITO ET AL. 2010; FELIZARDO ET AL. 2011). Je hydrophiler ein Self-Etch-Adhäsiv ist, desto mehr Wasser wird in die Kunststoffschicht des Adhäsivs aufgenommen (ITO ET AL. 2010). Auch nach der Polymerisation agieren somit die sauren Monomere als eine Art semipermeable Membran, die den Verbund zwischen Dentin und Adhäsiv durch Wasserinfiltration schwächt und folglich zu «nanoleakage» und Phasenseparation führen kann (ITO ET AL. 2010; SILVA E SOUZA ET AL. 2010). Dabei ist vor allem das Monomer 2-Hydroxyethylmethacrylat (HEMA) massgeblich für die Hydrophilie der Self-Etch-Adhäsive verantwortlich und verringert die Langzeit-Haftkraft deutlich (FELIZARDO ET AL. 2011). Diese Annahme stimmt mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie überein: Zum einen enthalten Shield Force Plus und OptiBond™ All-In-One, welche die schlechtesten Resultate (höchste Calciumfreisetzung) zeigten, HEMA, und zum anderen zeigten die HEMA-freien Versiegler-/Adhäsivsysteme K-0184, Xeno® Select und Scotchbond™ Universal die niedrigste Calciumfreisetzung. Für eine weiter gehende Erklärung der schlechteren Resultate von Shield Force Plus und OptiBond™ All-In-One wären weitere Studien mit dem Fokus auf die chemische Zusammensetzung wünschenswert.

Literatur zum Self-Etch-Adhäsiv Clearfil™ SE Bond ist reichlich vorhanden. Verschiedene Studien verwenden Clearfil™ SE Bond aufgrund seiner Beständigkeit auch als Kontrollgruppe (WALTER ET AL. 2012). In der vorliegenden Studie liegen für das Self-Etch-Adhäsiv ebenfalls gute Ergebnisse vor. Eine mögliche Erklärung für die Beständigkeit könnte in der chemischen Zusammensetzung aus gewissen funktionellen Monomeren liegen. Aufgrund des milden pH-Wertes der Self-Etch-Adhäsive bleiben beim Demineralisationsvorgang Hydroxyapatitkristalle um die Kollagenfasern der organischen Dentinmatrix erhalten (SILVA E SOUZA ET AL. 2010). Einige Studien konnten zeigen, dass besonders die funktionellen Monomere 10-Methacryloxydecyl-Dihydrogen-phosphat (10-MDP), 4-Methacryloxyethyl-Tri-mellitsäure (4-MET) und 2-Methacryloxyethyl-Phenylhydrogenphosphat (Phenyl-P) starke chemische Interaktionen mit dem Hydroxyapatitkristall im Dentin eingehen und so zu weniger Degradation der Hybridschicht führen (INOUE ET AL. 2005; SILVA E SOUZA ET AL. 2010; WALTER ET AL. 2012). Die in dieser Studie getesteten Self-Etch-Adhäsive Clearfil™ SE Bond und Scotchbond™ Universal enthalten 10-MDP und zeigten über die gesamte Studiendauer keinen signifikanten Calciumverlust. Es ist anzunehmen, dass die chemische Interaktion zwischen Adhäsiv und Dentin eine entscheidende Rolle für die Haftkraft der Self-Etch-Adhäsive spielt und stark von der chemischen Zusammensetzung abhängig ist.

Die Gruppen K-0184, Xeno® Select, Scotchbond™ Universal, Adhese® Universal und Clearfil™ SE Bond zeigten an Tag 1 eine signifikant grössere Calciumfreisetzung als an den nachfolgenden Tagen 2 bis 12. Es wäre falsch, anzunehmen, dass sich der Schutz der Versiegler-/Adhäsivsysteme während der zwölf Tage unter erosiven und abrasiven Bedingungen verbessert hätte. Eine erhöhte initiale Mineralfreisetzung konnte auch in der Studie von Wegehaupt und Mitarbeitern (WEGE-

HAUPT ET AL. 2013C) nachgewiesen werden. Die initial erhöhte Calciumfreisetzung ist auf die Materialeigenschaften der verwendeten Versiegler und Adhäsive zurückzuführen. Beim Auftragen der Adhäsive und Versiegler, welche auch wie Self-Etch-Adhäsive wirken, kommt es zum Herauslösen der Mineralien aus der Dentinoberfläche und zur Inkorporation der Mineralien in die Versiegler-/Adhäsivschicht. Im Weiteren entsteht während des Aushärtens eine Sauerstoffinhibitionsschicht in der obersten Kunststoffschicht, welche ebenfalls Calcium enthält und sich durch das Zähneputzen von der Oberfläche ablöst. Die grösste Differenz der Calciumfreisetzung zeigte sich bei K-0184 zwischen Tag 1 und 2. Dieses Ergebnis stimmt mit den Resultaten der Studie von Wegehaupt und Mitarbeitern (WEGEHAUPT ET AL. 2013C) überein. Folglich ist davon auszugehen, dass das vermehrt freigesetzte Calcium an Tag 1 aus der Sauerstoffinhibitionsschicht und der darunter befindlichen Kunststoffschicht und nicht aus dem darunter liegenden Dentin stammt.

Die durchschnittliche Schichtdicke der getesteten Versiegler/Adhäsive beträgt etwa 20 µm. Diese Werte sind mit den Ergebnissen der Studie von Brunton und Mitarbeitern (BRUNTON ET AL. 2000) vergleichbar, in der durchschnittlich 28 µm gemessen wurden. Dennoch variieren in der vorliegenden Studie die gemessenen Schichtdicken der Versiegler und Adhäsive zwischen den Gruppen wie auch innerhalb einer Gruppe beträchtlich. Der Versiegler K-0184 wird nach Herstellerangaben zweimal auf die Dentinoberfläche aufgetragen und weist folglich in der profilometrischen Messung eine Schichtdicke auf, die mehr als doppelt so dick wie die der restlichen Adhäsivsysteme ist. Auch OptiBond™ All-In-One und Clearfil™ SE Bond werden in zwei Schritten auf die Dentinoberfläche aufgetragen. Die Schichtdicke ist im Vergleich zu K-0184 jedoch geringer. Eine mögliche Ursache für die unterschiedlichen Schichtdicken könnte in der chemischen Zusammensetzung der Versiegler- und Adhäsivsysteme liegen. In einer aktuellen Studie (SILVA E SOUZA ET AL. 2010) konnte nachgewiesen werden, dass das Lösungsmittel der Adhäsive für die Schichtdicke einen entscheidenden Faktor darstellt. Ein Adhäsiv, welches tertiäres Butanol (T-Butanol) als Lösungsmittel enthielt, wies im Rasterelektronenmikroskop eine geringere Schichtdicke auf als die anderen getesteten Adhäsive, deren Lösungsmittel aus einem Wasser-Ethanol-Gemisch bestanden (SILVA E SOUZA ET AL. 2010). Auch in der vorliegenden Arbeit wurde die dünnste Schichtdicke für das Self-Etch-Adhäsiv Xeno® Select gemessen, welches ebenfalls T-Butanol enthält.

Im Weiteren ist anzumerken, dass in dieser Studie das Verhältnis zwischen Schichtdicke und Calciumfreisetzung nicht korreliert. Trotz der geringen Schichtdicke der Self-Etch-Adhäsive Xeno® Select, Scotchbond™ Universal und Adhese® Universal von weniger als 20 µm blieb die Calciumfreisetzung niedrig und somit der Schutz vor erosiver Demineralisation über die gesamte Studiendauer von zwölf Zyklen hoch. Daraus lässt sich ableiten, dass die Schichtdicke für die in der vorliegenden Studie untersuchte Zeitdauer keinen Einfluss auf den Schutz vor Erosion durch die Versiegler/Adhäsive hat und eine rein quantitative Messung der Schichtdicke für den Schutzeffekt der Versiegler/Adhäsive irrelevant ist. Allerdings scheint die Korrelation zwischen Schichtdicke und Schutz vor Calciumfreisetzung mit zunehmender Anzahl an Behandlungszyklen stärker zu werden. In einer kürzlich erschienen Studie von Zhao und Mitarbeitern (ZHAO ET AL. 2016) wurde die Be-

ständigkeit eines Versieglers und eines fließfähigen Komposits während 24 Erosions- und Abrasionszyklen (60 min Erosion und 600 BS pro Zyklus) getestet. Während der gesamten Studiendauer zeigte das fließfähige Komposit, welches eine initiale Schichtdicke von 151 µm aufwies, einen Schutz vor erosiv/abrasivem Dentinverlust, wohingegen der Versiegler mit einer initialen Schichtdicke von 43 µm nach 18 Zyklen an Schutzwirkung verlor. Auch in einer klinischen Studie zum Schutz vor erosiv/abrasivem Zahnhartsubstanzverlust mittels Versiegeln (SUNDARAM ET AL. 2007) konnte gezeigt werden, dass in vivo Seal&Protect seine protektiven Eigenschaften nach sechs bis neun Monaten verliert und eine Wiederversiegelung durchgeführt werden muss.

In Anbetracht der Resultate und der oben genannten Limitationen der vorliegenden Studie kann geschlossen werden, dass fünf der sieben getesteten Versiegler-/Adhäsivsysteme (K-0184, Xeno[®] Select, Scotchbond[™] Universal, Adhese[®] Universal und Clearfil[™] SE Bond) in der Lage sind, den erosi-

ven Zahnhartsubstanzverlust aus Dentin über die simulierte Zeitdauer von zwölf Monaten in vivo signifikant zu reduzieren. Die Versiegelung der Dentinoberfläche mittels Versiegeln und Adhäsivsystemen als minimal invasive Therapie gegen intrinsische Säureangriffe scheint eine geeignete Methode zu sein, um den resultierende erosiven Dentinverlust auch unter abrasiven Bedingungen signifikant zu reduzieren.

Verdankung und Hinweis

Die Autoren danken der Firma Dentsply Sirona (Konstanz, Deutschland) für die kostenfreie Zurverfügungstellung der getesteten Versiegler/Adhäsive. Die vorliegende Studie ist Teil (und in Teilen identisch mit) der Masterarbeit «In-vitro-Untersuchung zum Schutz vor intrinsischen Erosionen mittels Oberflächenversiegeln und Adhäsivsystemen unter abrasiven Bedingungen» von G. Kummer, durchgeführt an der Universität Zürich, Schweiz.