

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie der
Ludwig-Maximilians-Universität München
Direktor: Prof. Dr. R. Hickel

Randspaltanalyse von Füllungen mit Bulk Fill-Kompositen

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnheilkunde
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Rainer Awiszus
aus Fröndenberg

2017

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter:	Prof. Dr. K.-H. Kunzelmann
Mitberichterstatter:	Priv. Doz. Dr. Michael Stimmelmayer
Dekan:	Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel
Tag der mündlichen Prüfung:	19.01.2017

Inhaltsangabe

1.	Einleitung	1
2.	Literaturübersicht	2
2.1.	Komposite	2
2.1.1.	Aufbau, Zusammensetzung und Einteilung	3
2.1.2.	Organische und anorganische Matrix	3
2.1.3.	Hybrid-Präpolymerisate	4
2.1.4.	Füllstoffe	4
2.1.5.	Glasfüllkörper	5
2.2.	Hybridkomposite	7
2.3.	Kompositfüllungskonzepte	8
2.4.	Flowable-Komposite	9
2.5.	Bulk Fill-Komposite	10
2.6.	Adhäsivtechnik	13
2.7.	Versagen von Kompositfüllungen	14
2.8.	Bulk Fill Problemstellungen	17
3.	Material und Methode	17
3.1.	Auswahl Bulk Fill-Komposite	17
3.2.	Auswahl der Versuchsanordnung	18
3.3.	Definition der Gruppen	19
3.4.	Präparation	21
3.5.	Applikation des Ätzmittels	22
3.6.	Applikation des Dentinadhäsivs	22
3.7.	Applikation des Kompositmaterials	23
3.8.	Lichtpolymerisation	24
3.9.	Ausarbeitung und Politur	26
3.10.	Feuchtigkeitslagerung	26
3.11.	Replikatherstellung	27
3.12.	Belastung durch Thermowechselbad	27
3.13.	Belastung durch Kausimulation	28
3.14.	Kritische Punkttrocknung	29
3.15.	Oberflächenbeschichtung durch Sputtern	30
3.16.	Qualitative Randanalyse am Rasterelektronenmikroskop	31
4.	Ergebnisse	33
4.1.	Auswertung der gemessenen Daten	34
4.1.1.	Marginaler Randspalt des schmelzbegrenzten Kastens im Schmelz-Dentin-Bereich	34

4.1.2.	Marginaler Randspalt des dentinbegrenzten Kastens im Schmelz-Dentin-Bereich.....	36
4.1.3.	Marginaler Randspalt mit dentinbegrenztem Kasten	38
4.1.4.	Aufgetretene Frakturen im Schmelz-Bereich	40
4.1.5.	Aufgetretene Frakturen im Dentin-Bereich.....	42
4.2.	Ergebnisse Bulk Fill-Materialien.....	44
4.2.1.	Ergebnisse.....	47
4.2.2.	Bulk Fill-Material SDR.....	49
4.2.3.	Material Tetric Evo Bulk Fill mit normaler und großer Kavität	51
4.2.4.	Material Filtek Bulk Fill zusammen mit Filtek Supreme XTF	52
4.2.5.	Material X-tra fil.....	53
4.2.6.	Material X-tra base mit Grandio SO	53
4.2.7.	Material Venus Bulk Fill mit Venus Pearl	53
4.2.8.	Material Tetric Evo Ceram mit Tetric Evo Flow Basis	54
4.3.	Zusammenfassung der Auswertung	54
4.4.	Grafische Darstellung der Ergebnisse	55
5.	Diskussion	77
5.1.	Material und Methode	77
5.2.	Kavitätenpräparation.....	77
5.3.	Fülltechnik.....	78
5.4.	Lichtpolymerisation	79
5.5.	Ausarbeitung und Politur.....	79
5.6.	Thermische und mechanische Wechselbelastung.....	80
5.7.	Replikatechnik und Quantitative Randanalyse.....	81
5.8.	Diskussion der Ergebnisse	83
6.	Schlussfolgerungen	89
7.	Zusammenfassung	90
8.	Literaturverzeichnis.....	93
9.	Anhang	104
9.1.	Abkürzungen.....	104
9.2.	Materialliste.....	106
9.3.	Danksagungen.....	109
9.4.	Lebenslauf	109
9.5.	Eidesstattliche Erklärung	109

1. Einleitung

Die zahnfarbenen Kunststoffe haben in der Zahnmedizin einen Paradigmenwechsel eingeleitet. War noch vor einigen Jahren Amalgam der Standard für Füllungen, so wird heute stattdessen immer häufiger Komposit verwendet. Komposit bringt jedoch auch Nachteile mit sich. Einer der wesentlichen Nachteile ist die Polymerisations-schrumpfung, die zu einer Volumenreduktion und zu Spannungen in der gefüllten Kavität führt. Es resultiert eine Stresssituation in der Zahnkavität, die zu einer Randspaltbildung im Bereich des Übergangs von der Zahnhartsubstanz zum Komposit führen kann. Randspalten können Schmerzen verursachen und das Risiko für Sekundärkaries erhöhen. Um die beschriebenen Nachteile zu reduzieren, hat sich die Verarbeitung von Komposit in mehreren Schritten durch Applikation in 2 mm-Inkrementenschichten erfolgreich etabliert. Diese Applikation in 2 mm-Inkrementenschichten begründet sich zum einen darin, dass das Licht der Polymerisationslampe zu Beginn der Füllungstherapie mit Kompositen nicht tiefer als 2 mm härten bzw. die 2 mm-Schichten die Polymerisationsschrumpfung auf einen akzeptablen Wert reduzieren können. Um Kosten und Zeit sparen zu können, wurden und werden die Komposite stetig weiterentwickelt. Mit der Einführung von SDR® Smart Dentin Replacement (Dentsply Sirona) wurde ein weiteres Paradigma in Frage gestellt – dasjenige der Applikation von Kompositen in 2 mm-Inkrementen. Mit diesem speziellen Flowable-Komposit schreitet die Weiterentwicklung der Komposite zu sogenannten Bulk Fill-Kompositen weiter fort. Der entscheidende, vom Hersteller propagierte Vorteil soll neben der einfachen und schnellen Verarbeitung im Vergleich zu klassischen Hybridkompositen, die mögliche Applikation von wesentlich dickeren Schichtdicken von bis zu 4 mm sein. Dickere Schichten aus Komposit führten allerdings nach bisheriger Auffassung zu einem deutlichen Anstieg der Polymerisations-schrumpfung bei der Füllungstherapie mit Komposit. So führen bei klassischen Hybridkompositen dickere Schichten zu einer erhöhten Stresssituation in der Zahnkavität und in Folge zu einer verstärkten Randspaltbildung. Um dies zu verhindern, wurde bei modernen Bulk Fill-Kompositen die Monomermatrix optimiert und die Zusammensetzung der Füller verfeinert bzw. wurden vereinzelt die Initiator-Komponenten verändert.

Mit dieser Untersuchung soll dargelegt werden, ob die Optimierungen der Hybridkomposite zu den neuen sogenannten Bulk Fill-Kompositen bei einer Applikation in 4 mm-Schichten zu klinisch akzeptablen Randspalten führen.

2. Literaturübersicht

Nachfolgend werden die Arten und Bestandteile der Komposite sowie deren Verarbeitung beschrieben. Abschließend soll im Allgemeinen auf die Probleme beim Umgang mit Kompositen und im Speziellen mit Bulk Fill-Kompositen eingegangen werden.

2.1. Komposite

Der Begriff Komposit leitet sich vom lateinischen Begriff „compositum“ ab, was so viel wie „Zusammenstellung“ oder „Anordnung“ bedeutet. Darunter wird ferner die Zusammensetzung eines Stoffes aus mindestens zwei Komponenten verstanden.

Die Komposite erfüllen die Anforderungen an zahnärztliche Füllungswerkstoffe und beinhalten Füllkörpersystem, Monomersystem, Silan, Initiatoren, Stabilisatoren, sowie Farbstoffe.

Im Jahr 1928 wurde das Polymethylmethacrylat (PMMA) entwickelt, das auch als Acrylglas oder Plexiglas bezeichnet wurde und 1933 auf dem Markt eingeführt wurde; 1939 entstanden die ersten Kontaktlinsen und 1951 wurde das erste Komposit auf PMMA-Basis entwickelt. Buonocore publizierte erstmals 1955 die Säure-Ätz-Technik (Buonocore, M.G. et al. 1968), woraufhin 1962 das Bowen-Monomer-System etabliert und noch im selben Jahr in der Zahnmedizin eingesetzt wurde (Atai, M. et al. 2004). Im Jahr 1963 folgte die Entwicklung des ersten Komposits mit Quarzfüllern. Die Lichthärtung wurde 1970 als Idee geboren und 1977 eingeführt. 1974 konnten Mikrofüller den Kompositen beigelegt werden. Ab 1980 wurde die Füllkörpertechnologie verfeinert und die ersten Hybridkomposite wurden entwickelt. Es dauerte jedoch noch bis 1985, bevor die Hybridkomposite auch kommerziell eingesetzt werden konnten. Weitere Entwicklungen im Bereich der Zahnheilkunde erfolgten 1993 mit der Einführung von Kompomeren und 1998 mit der von Ormoceren (Hickel, R. et al. 1997).

Heute sind Komposite als Füllungs- und Aufbaumaterialien fester Bestandteil in der Zahnheilkunde. Sie besitzen sehr gute mechanische Eigenschaften und sind für viele Indikationen das Restaurationsmaterial der Wahl (Eichner, K. et al. 2005).

2.1.1. Aufbau, Zusammensetzung und Einteilung

Die zahnärztliche Komposite weisen Füllungswerkstoffe mit einer organischen und einer anorganischen Komponente auf. Diese beiden Komponenten werden durch eine Verbindungskomponente gekoppelt und bilden damit die sogenannte Verbundphase.

Die organische Matrix besteht aus Monomeren, Initiatoren, Stabilisatoren, Farbstoffen, Pigmenten und weiteren Zusätzen. Die anorganischen Füller können auch als disperse Phase bezeichnet werden. Sie optimieren die Zug- und Druckfestigkeit, beeinflussen so das Verschleißverhalten und ermöglichen einen angemessenen Elastizitätsmodul (E-Modul). Bei der Verbundphase wird der Vorteil der Silanisierung genutzt, wobei die Füllstoffe hydrophobisiert werden. Auf diese Weise können die Monomere mit dem Methacrylsäurerest des Silans polymerisieren und eine dauerhafte Verbindung eingehen (Hellwig, E. et al. 1999).

Komposite können nach verschiedenen Kriterien eingeteilt werden. Gebräuchlich ist heute die Einteilung nach Füllkörperart wie Nanofiller, Mikrofiller, Makrofiller und weitere. Ebenso lassen sich Komposite nach der Art der Kunststoffmatrix in Bezug auf die Monomerarten und nach ihrer Viskosität in „packable“, „universal“ und „flowable“ unterscheiden (Eichner, K. et al. 2005).

2.1.2. Organische und anorganische Matrix

Die organische Matrix der zahnärztlichen Komposite besteht aus unterschiedlichen Monomeren. Im Detail handelt es sich um Di- oder Triester der Methacrylsäure mit hochmolekularen Alkoholen. Hauptsächlich kommen Methacrylate vom Typ Bisphenol-A-Glycidylmethacrylat (Bis-GMA) zum Einsatz (Bowen, R.L. et al. 1992). Eine Weiterentwicklung des Bis-GMA konnte 1974 mit Urethandimethacrylat (UDMA) eingeführt werden. Es wird in Kombination mit Bis-GMA verwendet und bewirkt eine bessere Verarbeitung.

Die anorganische Matrix besteht aus anorganischen Füllstoffen. Sie dienen der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und werden der organischen Grundmatrix in Form kleiner Partikel zugefügt. Dabei handelt es sich um feinteiliges Siliziumdioxid mit einer mittleren Partikelgröße von 0,007 bis 0,04 μm sowie um mikrofeines Barium- und Strontiumsilikatglas mit einer mittleren Partikelgröße von 0,7 bis 1,5 μm . Weiter werden die Komposite mit Quarzen, porösen Gläsern und Zirkonoxid kombiniert und weiter verfeinert (Eichner, K. et al. 2005).

Um die besseren mechanischen Eigenschaften nutzen zu können, müssen die organische und die anorganische Matrix miteinander verbunden werden. Auf diese Weise entsteht ein sogenannter Verbundwerkstoff. Durch eine Oberflächenbehandlung mithilfe der Silanisierung der Füllkörper entsteht ein kovalenter und kraftvoller S-O-Si-Verbund zwischen den Füllkörpern und der Matrix. Die anorganischen Partikel erhalten auf diese Weise eine organophile Oberfläche und können so eine optimale S-O-Si-Verbindung eingehen (Eichner, K. et al. 2005).

2.1.3. Hybrid-Präpolymerisate

Um die Volumenschrumpfung noch weiter zu reduzieren, wurden z. B. vom Hersteller Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein die Verwendung von Präpolymerisaten eingeführt (Lendenmann, U. et al. 2004). Dabei handelt es sich um niedrigviskose Polymerisate, die mit Kompositen vermischt, ausgehärtet und gemahlen wurden. Diese 10 bis 30 μm großen, splitterartigen Polymerisate können somit in die Komposite eingemischt werden, um so die Polymerisationsschrumpfung zu reduzieren. Die so entstandenen Präpolymerisate erhöhen die Viskosität nicht wesentlich. Die mechanischen Eigenschaften können damit allerdings nicht verbessert werden, da sich Risse zwischen den Präpolymerisaten und der Polymermatrix bilden können. Erst die seit 2002 verwendeten, kompakten Glaskeramikkfüller und Zusätze von Ytterbiumfluorid im Material Tetric Evo Ceram von Ivoclar Vivadent ermöglichen eine ausreichende mechanische Festigkeit und optimierte Polierbarkeit (Eichner, K. et al. 2005).

2.1.4. Füllstoffe

Insbesondere die anorganischen Füllstoffe sind wesentlich für die physikalischen Eigenschaften von Kompositen verantwortlich. Sie helfen dabei, die Nachteile der Polymerisationsschrumpfung, den hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten sowie die

Quellung der Komposite durch Wasseraufnahme zu reduzieren. Verbessert werden konnten die Komposite im Laufe der Zeit durch Modifikation und die Kombination der Füllkörper miteinander. Als Füllstoffe dienen Quarz, Aluminiumoxid, Boroxid, Zirkoniumoxid und andere Bestandteile. Die folgende Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Füllkörper, sortiert nach ihrer Größe.

Tabelle 1: Einteilung der Komposite nach der Größe des Hauptanteils der Füllkörper (Eichner, K. et al. 2005)

Durchschnittliche Füllkörpergröße	Kategorie
> 100 µm	Megafüller
10–100 µm	Makrofüller (in den ersten Kompositen verwendet)
1–10 µm: < 5 µm Feinpartikelkomposite > 3 µm Feinstpartikelkomposite	Midifüller (überwiegend 1–3 µm durchschnittliche Partikelgröße)
0,1–1 µm	Minifüller oder Submicronglasfillers (Submikrometerfüllkörper)
0,01–1,0 µm	Mikrofüller
0,005–0,01 µm	Nanofüller

Im Jahr 1983 wurde bereits eine Einteilung der Komposite anhand des Füllkörpertyps in Makrofüller, Mikrofüller und Hybridkomposite vorgenommen (Lutz, F. et al. 1983). Waren zu Beginn der Entwicklung nur gemahlene Glasfüllkörper in mittlerer Füllkörpergröße verfügbar, kamen mit einer verbesserten Mahltechnik später Partikelgrößen von < 10 µm bis < 1 µm hinzu (Eichner, K. et al. 2005, Kunzelmann K.-H, et al. 2003). Da die mechanischen Eigenschaften eines Komposites stark von der Art des Füllers und des Füllkörpergehalts abhängen, wird nachfolgend besonders auf die Unterschiede von Füllkörpern eingegangen.

2.1.5. Glasfüllkörper

Mit einer Partikelgröße von 1 bis 100 µm führen gemahlene Glasfüllkörper zu nicht hochglanzpolierbaren Kompositen (Kunzelmann K.-H, et al. 2003). Die an der Füll-

lungsoberfläche gelegenen Füllkörper sind zudem wegen der rauen Oberfläche einer erhöhten Abrasion und Plaqueanfälligkeit ausgesetzt (Minguez, N. et al. 2003). Bei einer Partikelgröße von 0,1 bis 1 μm kann jedoch eine gute Hochglanzpolitur erreicht werden (Eichner, K. et al. 2005). Diese Partikel können sehr gut direkt in die organische Matrix eingebracht werden, was das Herauslösen von Füllkörpern aus der Oberflächenschicht reduziert. Um die Viskosität und damit die Verarbeitungsfähigkeit nicht zu verschlechtern, können nur bis zu einer bestimmten Menge Füllkörper in das Komposit integriert werden. Aus diesem Grund wurden Mikrofüller mit Makrofüllern zu sogenannten Hybridkompositen kombiniert. Die heutigen Hybridkomposite können zusätzlich auch anhand der in ihnen enthaltene Füllkörpergrößen unterschieden werden: Normale Hybridkomposite besitzen eine mittlere Füllkörpergröße bis 10 μm , Feinpartikelhybridkomposite beinhalten eine mittlere Füllkörpergröße bis 5 μm , Feinstpartikelhybridkomposite besitzen eine mittlere Füllkörpergröße bis 3 μm und Submikrometerhybridkomposite verfügen über mittlere Füllkörpergrößen bis unter 1 μm .

Die heutigen „Nanofüller“ entsprechen den ursprünglichen Mikrofüllern, wobei sich lediglich die Nomenklatur geändert hat. Die damals bezeichneten Nanofüller bestanden aus 50 nm großen Primärpartikeln. Sie werden mit Hilfe der Flammenpyrolyse erzeugt und besitzen die Eigenschaft, zu größeren Einheiten zu agglomerieren. Die Firma 3M Espe entwickelte Nanomere, die mit dem Sol-Gel-Verfahren hergestellt wurden. Diese als „Nano-Füller“ bezeichneten Füllkörper sind kleiner als 100 nm und sind so modifiziert, dass sie nicht mehr agglomerieren.

Da der Zusatz „nano“ modern und populär wurde, etablierte die Industrie diesen und fortan wurden unter „Nanofüller“ alle Partikelgrößen unter 100 nm verstanden. Auf diesem Weg sind aus den vormaligen Mikrofüllern die heutigen Nanofüller entstanden. Um noch mehr Nanofüller in ein Komposit einbringen zu können, verwendet 3M Espe ein Brennverfahren, das sogenannten „Calcinieren“, das größere Nanocluster durch Sintern erzeugt. Der Vorteil dieser Nanocluster ist, dass sie sehr gut polierbar und nicht so hart wie Glasfüllkörper sind.

2.2. Hybridkomposite

Hybridkomposite sind Komposite mit einem System, das sich aus unterschiedlich großen Füllkörperfraktionen zusammensetzt. Dabei gibt es eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Kombinationsmöglichkeiten. Um eine große Packungsdichte zu erreichen, werden mittels multimodaler Verteilung unterschiedlich große Füllkörper miteinander kombiniert. Neben der Art und Qualität der Füllkörper ist auch die Quantität und Variation der Füllkörper für die Viskosität eines Hybridkomposites von entscheidender Bedeutung. Das Angebot reicht von niedrigviskosen Flowable-Hybridkompositen über universelle, mittelviskose Hybridkomposite bis hin zu hochviskosen Hybridkompositen, den sogenannten Packables oder Bulk Fill-Hybridkompositen (Eichner, K. et al. 2005).

Um zugleich eine hohe Packungsdichte zu erreichen, wurde auch ein Füllkörpersystem mit polymodaler Füllkörperverteilung entwickelt. Dabei können Füllkörper unterschiedlicher Größe so gemischt werden, dass in den Lücken zwischen größeren Füllkörpern die jeweils kleineren eingebunden werden. Es ist durchaus möglich, dieselben Füllkörpertypen einzusetzen oder unterschiedliche Füllkörpertypen zu kombinieren. Um die guten mechanischen Eigenschaften noch weiter optimieren zu können, sollte der Hersteller viel Erfahrung darin haben, die passende Mischung, das Monomersystem oder die Oberflächenbehandlung zu realisieren.

Ein weiterer Vorteil der Hybridkomposite besteht darin, dass sie eine relativ gute Volumenkonstanz besitzen. Darunter ist zu verstehen, dass sich die Dichte des Werkstoffes bei plastischen Deformationen nicht ändert. Der Füllkörpergehalt von Hybridkompositen lässt sich bis zu 85 Gew.-% steigern, wodurch die Polymerisationsschrumpfung auf ca. 2–3 Vol.-% reduziert werden kann (Unterbrink, G.L. et al. 1995). Wird die Teilchengröße der eingebrachten Makrofüller auf 0,8 bis 1 µm eingestellt, kann zusätzlich zu einer guten Polierbarkeit auch eine optimale Beständigkeit durch eine glatte Oberflächenbeschaffenheit erzielt werden (Lutz, F. et al. 1983). Hybridkomposite weisen einen günstigeren thermischen Expansionskoeffizienten als Schmelz oder Dentin auf und bieten eine geringere Polymerisationsschrumpfung als mikrogefüllte Komposite (Lutz, F. et al. 1984). Die Hybridkomposite bestehen zu ca. 85 bis 90 Gew.-% aus Makrofüllern und zu 10 bis 15 Gew.-% aus Mikrofüllern (Eichner, K. et al. 2005). Innerhalb der Hybridkomposite kommen weitere Modifikati-

onen vor. So gibt es Hybridkomposite, die kompakte Gläser, poröse Füllkörper, Fasern und ionenfreisetzende Füllkörper enthalten – oder eine Kombination aus diesen (Kunzelmann K.-H, et al. 2003).

2.3. Kompositfüllungskonzepte

Bei der Verwendung von Kompositen im Front- und Seitenzahnbereich werden verschiedene Füllungskonzepte verfolgt. Klassische Hybridkomposite werden über die Schichttechnik mit einzelnen Inkrementen in maximal 2 mm-Schichtstärke appliziert (Lutz, F. et al. 1980). Primär geht es bei der Schichttechnik in 2 mm-Inkrementen um die ausreichende Aushärtung in der Tiefe. Im Unterschied dazu können jedoch Bulk Fill-Komposite in 4 mm-Schichtstärke verarbeitet werden. Die Füllungstechnik nimmt hier weniger Einfluss auf die Bildung eines Randspaltes, was jedoch in der Literatur unterschiedlich bewertet wird. Während St. Georges et al. der Meinung sind, dass die Füllungstechnik keinen Einfluss auf einen möglichen Randspalt hat (St. Georges, A. J. et al. 2002), gibt es diesbezüglich auch zahlreiche Gegenstimmen (Wet de, F. A. et al. 1991, Yamazaki, P.C. et al. 2006, Tjan, A. H. et al., 1992).

In diesem Zusammenhang sollte auf die Wirkung des sogenannten „C-Faktors“ näher eingegangen werden. Unter dem C- oder Konfigurationsfaktor wird das Verhältnis von gebundener zu ungebundener Kompositoberfläche verstanden. Je höher der C-Faktor, umso stärker sind die Kontraktionsspannungen und damit der Polymerisationsstress in der mit Komposit gefüllten Kavität.

Durch die Polymerisationsschrumpungen entstehen Kräfte, die sich in Form von Spannungen in der Kavität auswirken. Der Begriff „Spannung“ wird, im technischen Sinne ins Englische übersetzt, als „Stress“ bezeichnet. Der Polymerisationsstress in Kompositfüllungen leitet sich wie folgt her:

$$\sigma = \frac{F \text{ (Kraft)}}{\text{Fläche}} = \left[\frac{N}{\text{mm}^2} = \text{MPa} \right]$$

$$\text{Kontraktionsspannung} = \frac{\text{Kontraktionskraft}}{\text{Gesamte Fläche in der Kavität}} = \left[\frac{N}{\text{mm}^2} = \text{MPa} \right]$$

Um diesen Stress zu reduzieren, gibt es verschiedene Methoden der Füllungstechniken, die in einer Studie von Versluis et al. verglichen wurden. Zu nennen sind die facio-linguale und die gingivo-occlusale Schichttechnik sowie die Oblique- und die U-Oblique-technik (Versluis, A. et al. 1996). Mit der Einführung von Bulk Fill-Kompositen wurde zudem die Fast-Track-Füllungstechnik möglich. Die Vorteile der Schichttechniken bestehen darin, dass stets nur geringe Bereiche der Kavitätenwand mit Komposit benetzt werden und auf diese Weise bei schichtweisem Aushärten der Polymerisationsstress gering ist. Andererseits kann man auch feststellen, dass sich der Polymerisationsstress jeder ausgehärteten Schicht addieren kann (Versluis, A. et al. 1996).

Eine mögliche Erklärung für die Kontraktionsspannungen in Kompositfüllungen wäre, dass mit einem steigenden C-Faktor ein Nachfließen des Komposits bei der Applikation von Komposit während der Prägel-Phase sinkt (Feilzer, A.J. et al. 1987). Je mehr Monomere an der peripheren Oberfläche aushärten, umso geringer ist das Fließvermögen einer Kompositfüllung während der Polymerisation. Dies führt zu Spannungen an den Grenzflächen zwischen Kunststoff und Zahnhartsubstanz, was einen nicht zu unterschätzenden Stress für die mit Komposit gefüllte Kavität darstellt.

Bei vielen einzelnen Inkrementen kann bei einer Schichtdicke von 2 mm die bei der Polymerisationsschrumpfung entstehende Kraft am besten reduziert werden (Nikolajenko, S. et al. 2004, Lutz, E. et al. 1986, Weaver, W.S. et al. 1988, Tjan, A.H. et al. 1992).

2.4. Flowable-Komposite

Eine besondere Rolle kommt den Flowable-Kompositen zugute, denn sie sind vielseitig einsetzbar. Das Spektrum reicht von minimalinvasiven Klasse-I-Mikrokavitäten und elastischen Zwischenschichten zwischen Zahnhartsubstanz und Hybridkomposit über Kavitätenliner mit Farbkontrast-Funktion bis hin zum Füllungsmaterial für kleine Klasse-V-Läsionen. Flowable-Komposite sind als eigenständiges Füllungsmaterial entwickelt worden und können im Gegensatz zu niedrigviskosen Bulk Fill-Kompositen ohne zusätzliche Deckfüllung verwendet werden.

Flowable-Komposite wurden hergestellt, indem man den Füllstoffanteil um ca. 10 % reduzierte und zugleich die Viskosität mit Verdünnern wie TEGDMA (Triethylengly-

coldimethacrylat) erhöhte. Durch die Zugabe von TEGDMA entstanden fließfähige Komposite, die besonders bei minimalinvasiver Therapie Verwendung finden (Bayne, S.C. et al. 1998). Trotz dieser Füllkörperreduktion weisen Flowable-Komposite keine stark abweichenden physikalischen Werte auf. Obwohl sie ein niedriges Biegemodul besitzen, weisen Flowable-Komposite teilweise höhere Ermüdungsgrenzen und eine bessere Biegefestigkeit als die höhergefüllten Hybridkomposite auf (Eichner, K. et al. 2005). Es ist jedoch zu bedenken, dass die Polymerisationsschrumpfung bei den Flowable-Kompositen erhöht und dadurch die mechanische Festigkeit herabgesetzt ist. Sie besitzen zudem weniger Füllkörper, wobei diese auch größer als bei den herkömmlichen Kompositen sind. Das hat zur Folge, dass die Polymerisationsschrumpfung höher ist und die Polierbarkeit schwieriger ist. Hinzu kommt noch der herabgesetzte E-Modul, welcher zu einer erhöhten Abrasion führt. Bei den Bulk Fill-Kompositen SDR, Venus Bulk Fill und X-tra base handelt es sich um niedrigviskose Komposite, die jedoch nicht zu den klassischen Flowable-Kompositen gezählt werden können. Um sie wie klassische Komposite verwenden zu können, sind sie abschließend unbedingt mit einer Deckungsfüllung zu versehen.

2.5. Bulk Fill-Komposite

Mit den in dieser Arbeit untersuchten Bulk Fill-Kompositen lassen sich Kavitäten von bis zu 4 mm Tiefe in einem Inkrement füllen. Nach Angabe der Hersteller wird der Polymerisationsstress hier jedoch nicht zu groß. Erreicht werden die höheren Durchhärtungstiefen durch Erhöhung der Transluzenz bei Bulk Fill-Kompositen. Erzeugt wird diese mithilfe von einer höheren Initiator-Konzentration und der Zugabe von reaktiveren Initiatoren. Aus diesem Grund haben Bulk Fill-Komposite auch hellere Farben und eignen sich aus ästhetischen Gründen hauptsächlich für den Seitenzahnbereich. Die Dentalindustrie bietet Bulk Fill-Komposite auf Grundlage zweier verschiedener Prinzipien an. Zu Beginn führte Dentsply das Material SDR ein, das über eine niedrigviskose Konsistenz verfügt und mit einem Deckkomposit versehen werden muss. Auf diese Weise soll der Schrumpfstress von Flowable-Kompositen begegnet werden, der aus der höheren Schrumpfung resultierende Schrumpfkraft entsteht. Nur mit einer reduzierten Schrumpfkraft ist es möglich, die Bulk Fill-Komposite SDR, Venus Bulk Fill und X-tra base im Seitenzahnbereich einzusetzen.

Andere Bulk Fill-Komposite basieren auf einer Restauration ohne Deckkomposite, womit der Zeitaufwand für die Applikation und Verarbeitung sinkt.

Die American Dental Association (ADA) veröffentlichte schon 1998 die Indikationen und Kontraindikationen für klassische Hybridkomposite, die ein Jahr später durch DGZ und DGZMK noch verfeinert wurden.

Die folgende Übersicht zeigt aktuelle Bulk Fill-Komposite, die nach Viskosität und E-Modul unterteilt sind.

Übersicht 1: Bulk Fill Komposite nach Viskosität und E-Modul:

	ohne Deckfüllung	mit Deckfüllung
niedriges E-Modul Flowable Komposit	Filtek Bulk Fill	SDR Venus Bulk Fill X-tra base
hohes E-Modul Universelles Komposit	Tetric EvoCeram Bulk Fill X-tra Fil <u>QuiXX Posterior Restorative Bulk Fill</u> * <u>HyperFIL</u> * <u>SonicFill</u> **	

* zum Zeitpunkt der Randspaltanalyse noch nicht verfügbar

**nicht getestet, da separates Ultraschall-Handstück erforderlich

Tabelle 2 zeigt die Indikationen und Kontraindikationen für die klassischen Hybridkompositfüllungen gemäß ADA. In Tabelle 3 sind Indikationen und Kontraindikationen für Bulk Fill-Komposite der Hersteller aufgeführt, um Gleichartigkeiten und Unterschiede aufzeigen zu können.

Tabelle 2: Indikationen und Kontraindikationen für klassische Hybridkompositfüllungen gemäß ADA

Indikationen	Kontraindikationen
Fissurenversiegelung	Füllungen, die hohen Kaubelastungen ausgesetzt sind
Erweiterte Fissurenversiegelung	Kavitäten, bei denen keine adäquate Feuchtigkeitskontrolle möglich ist
Primärversorgung für Klasse-I- und Klasse-II-Kavitäten	Patienten mit Allergien gegen Kompositbestandteile (inkl. Adhäsivsystem)
Sekundärversorgung kleiner und mittlerer Klasse-I- und Klasse-II-Kavitäten (Ausdehnung der Kavität in bukkolingualer Richtung < 50 % Höckerspitzenabstand)	
Klasse-V-Kavitäten	
Füllungen bei Patienten mit Allergie gegen Metalllegierungen	

Tabelle 3: Indikationen und Kontraindikationen für Bulk Fill-Komposite gemäß Heraeus Kulzer, 3M-Espe, Quelle Kontraindikationen: (Kunzelmann, K-H., 2005)

Indikationen:	Kontraindikationen:
Füllung mit Schichtstärken bis zu 4 mm bei Kavitäten der Klassen I und II	Füllungen im Bereich hoher Kaubelastungen
Restorationen der Klassen III und V	Füllungen in Kavitäten, die nicht trocken gehalten werden können und bei denen keine adäquate Feuchtigkeitskontrolle möglich ist
Erste Schicht in Kavitäten (sogenannten Kavitäten-Lining) sowie Unterfüllung bei Klassen I und II	Patienten mit Allergie gegen Adhäsivkomponenten und Kompositbestandteile
Nicht okklusionstragende Restorationen	Vorherige phenolische Substanzen wie z.B. Eugenol, da diese die Polymerisation inhibieren können
Ausblocken von Unterschnitten	Einige Hersteller erweitern die Kontraindikationen um die Anwendung im Frontzahnbereich wegen einer zu transluzenten Farbgebung der Bulk Fill-Komposite.
Reparatur kleiner Schmelzausbrüche	
Reparatur kleiner Defekte bei indirekten Restaurationen	
Reparatur provisorischer Materialien auf Kunstharz- und Acrylatbasis	
<u>Filtek Bulk Fill und X-tra fil:</u> Als Stumpfaufbaumaterial, wenn mindestens 50 % Zahnhartmaterial der Zahnkrone vorhanden sind	
<u>Filtek Bulk Fill:</u> Liner (Kavitätenschutzlack) unter direkten Restaurationsmaterialien, um unter sich gehende Stellen auszugleichen	

Im Zusammenhang mit der Verwendbarkeit von Bulk Fill-Materialien sollten herstellereinspezifische Indikationen und Kontraindikationen beachtet werden. Während einige Hersteller nur eine Füllungstherapie im Seitenzahnbereich für die Klassen I und II angeben (SDR, Venus Bulk Fill, X-tra base), bieten andere ein ganzes Bündel von Indikationen an (Tetric EvoCeram Bulk Fill, X-tra Fil), um damit die universelle Verwendbarkeit ihres Materials zu demonstrieren.

2.6. Adhäsivtechnik

Seit Komposite Einzug in die Zahnmedizin halten, können Kavitäten substanzschonender als ursprünglich mit Amalgamfüllungen versorgt werden. Im Gegensatz zu Füllungen mit Amalgam erfolgt die Haftung der Komposite an der Zahnhartsubstanz über die Adhäsion. Unter Adhäsion (lat. adhaerere = anhaften) versteht man dashaften zweier Körper aneinander durch mechanische und/oder chemische Kräfte (Frankenberger R., 2013). Für Amalgamfüllungen ist hingegen eine retentive Präparation erforderlich, da die Haftung rein mechanisch erfolgt. Die Adhäsivtechnik bietet darüber hinaus den wesentlichen Vorteil, die Kavität substanzschonender präparieren zu können (Ernst, C.-P., 2010, Frankenberger R., 2006, Walter D., 2009).

Zwischen der hydrophilen Zahnhartsubstanz und einem hydrophoben Füllungsmaterial, z. B. Komposit, lässt sich ohne Hilfsmittel keine dauerhafte Verbindung herstellen. Ohne Hilfsmittel würden fehlerhafte Randadaptation und Randspalten entstehen. Die Schmelz-Ätz-Technik und die Verwendung von Dentinadhäsiven ermöglichen einen adhäsiven Verbund zwischen der hydrophilen Zahnhartsubstanz und dem hydrophoben Füllungswerkstoff auf mikromechanischer Basis. Behandelt man die Zahnhartsubstanz mit einer 30- bis 40%igen Orthophosphorsäure vor, entsteht ein retentives Ätzmuster zur mikromechanischen Verankerung eines Komposites. Alternativ lässt sich mit Essig-, Salz-, Salpeter- oder Zitronensäure ein ähnlich retentives Ätzmuster erzeugen. Im Schmelz kann bei der Anwendung der genannten Wirkstoffe innerhalb 1 Minute eine 8 bis 10 µm tiefe Ätzung an der Schmelzoberfläche bewirkt werden. Sie trägt dazu bei, dass die Oberfläche für die Verbindung zum Komposit vergrößert wird (Buonocore, M.G., 1955, Swift, Jr., et al. 1995). Neben der Oberflächenvergrößerung dient die zusätzlich entstandene Rauigkeit in der Zahnhartsubstanz, das sogenannten Mikroretentionsrelief, dazu bei, die Oberfläche effektiver mit Hilfsmitteln für eine verbesserte Bindung von Komposit benetzen zu können.

Insgesamt lassen sich drei Ätztypen unterscheiden: Beim Ätztyp I werden Prismenkerne herausgelöst, beim Typ II wird die Peripherie der Prismen angeätzt und beim Ätztyp III werden neben der Peripherie auch die Zentren mit aufgelöst. Letzteres ist nicht gewünscht, da es zu einem für die Adhäsion nicht geeigneten Ätzmuster führt (Silverstone, L. M. et al. 1975).

Dentinhaftvermittler machen es möglich, eine adhäsive Verankerung des hydrophoben Füllungsmaterials mit dem Dentin herzustellen. Sie wirken chemisch und mikro-mechanisch, indem metallische, ionische, polare und unpolare kovalente Bindungen geschaffen werden. Bei der Konditionierung mit Säure findet eine Freilegung der Dentinkanälchen statt, indem die Schmierschicht entfernt wird. Dabei werden auch Dentintubuli aufgelöst. Gleichzeitig entsteht im Dentin eine Demineralisationsschicht, bei der auch Kollagenfasern sichtbar werden (Blunck, U. et al. 1999). Etabliert hat sich dabei die Anwendung von 10- bis 40%iger Phosphorsäure oder 2,5- bis 4%iger Salpetersäure. Alternativ kann auch eine 10%ige Malein- oder Zitronensäure zum Einsatz kommen. Anschließend findet ein auf Wasser, Aceton oder Ethanol basierendes Priming statt, um eine optimale Benetzung des Dentins zu ermöglichen. Die Dentinadhäsive besitzen einen amphiphilen Charakter, sind niedrigviskos und können dadurch die eigentliche Verbindung zwischen Zahnhartsubstanz und Kompositmaterial sicherstellen. Mit Hilfe des Dentinadhäsivs kann eine Verzahnung mit dem Dentin erfolgen, indem es intratubuläre Zapfen ausbildet. Die heutigen Dentinadhäsive können den sich bildenden Smearlayer vollständig entfernen, um in den Dentintubuli sogenannten Kunststoff-Tags auszubilden. Diese sind Teil der gewünschten Hybridlayer, die eine intensive Verbindung zwischen der hydrophilen Zahnhartsubstanz und einem hydrophoben Kompositkunststoff ermöglicht (Roulet, J. F. et al. 1996).

2.7. Versagen von Kompositfüllungen

Um eine dauerhafte und stabile Restauration zu erreichen, sind geeignete Füllungsmaterialien notwendig. Da besonders im Seitenzahnbereich von Klasse-II-Restaurationen beim Kauen Kräfte von ca. 400 bis 500 N auftreten (Eichner K., 1963), spielt die Eigenschaften der Kompositmaterialien eine wichtige Rolle. Die wesentliche Herausforderung von Bulk Fill-Kompositen ist die sichere und zuverlässige Polymerisation in der Tiefe. Anstelle von 2 mm-Inkrementen müssen 4 mm-Schichten

ausreichend gehärtet werden. Der Zahnarzt sollte bei der Verwendung eines Materials wissen, welche Spannung das Kompositmaterial in der Kavität erzeugt. Dazu ist es wichtig, den für jedes Material individuellen E-Modul zu kennen. Der E-Modul beschreibt die Eigenschaft eines Materials, einen bestimmten Widerstand gegenüber elastischer Verformung zu leisten. So haben Materialien mit kleinem E-Modul eine geringe Steifigkeit und geben bei Belastung stärker nach als Materialien mit einem hohen E-Modul. In Kompositmaterialien verformt sich bei Krafteinwirkungen durch das Kauen das Polymerisationsnetzwerk des Komposites. Zusammengehalten wird er durch relativ starke, primär ionische, kovalente und metallische Verbindungen. Von besonderer Bedeutung sind aber die sekundären Bindungskräfte, die von den Van-der-Waals-Bindungen und Wasserstoffbrückenbindungen erzeugt werden. Diese halten die einzelnen Polymerketten zusammen. Für den E-Modul von Bedeutung sind ebenfalls der Füllstoffgehalt der Kompositfüllung sowie die Art der Füllkörper. Nimmt der Füllstoffgehalt zu, steigt ebenfalls der E-Modul, dagegen sinkt die Polymerisationsschrumpfung (Ruyter, I. E., 1988). Aus diesem Grund zeigen Komposite mit einem hohen Füllungsanteil trotz einer geringeren Polymerisationsschrumpfung einen hohen Schrumpfstress (van Meerbeek, B. et al. 1992). Um ein vorzeitiges Versagen von Füllungen im Seitenzahnbereich zu verhindern, sind Kompositmaterialien mit einem höheren E-Modul sinnvoll. Grundsätzlich gilt, dass ein hoher E-Modul mit einer hohen Härte korreliert und auf diese Weise im Seitenzahnbereich den Kaukräften besser standhalten kann. Das sogenannten Hertzsche Spannungsfeld (Spannungsmaximum in einer bestimmten Tiefe eines Materials) bleibt klein und die Kaulast wird durch die Füllung getragen (Kunzelmann, K.-H., 1996). Die Höcker deformieren sich weniger stark, was zu einer reduzierten Randspaltbildung führt und so die Kavität weniger stark ermüden lässt. Zu bedenken ist dabei, dass es Ermüdungsrisse an der Oberfläche der Komposite geben kann, da das Hertzsche Spannungsfeld-Maximum nahe der Oberfläche liegt und es daher zum Verlust von Verschleißpartikel kommen kann (Kunzelmann, K.-H., 1996).

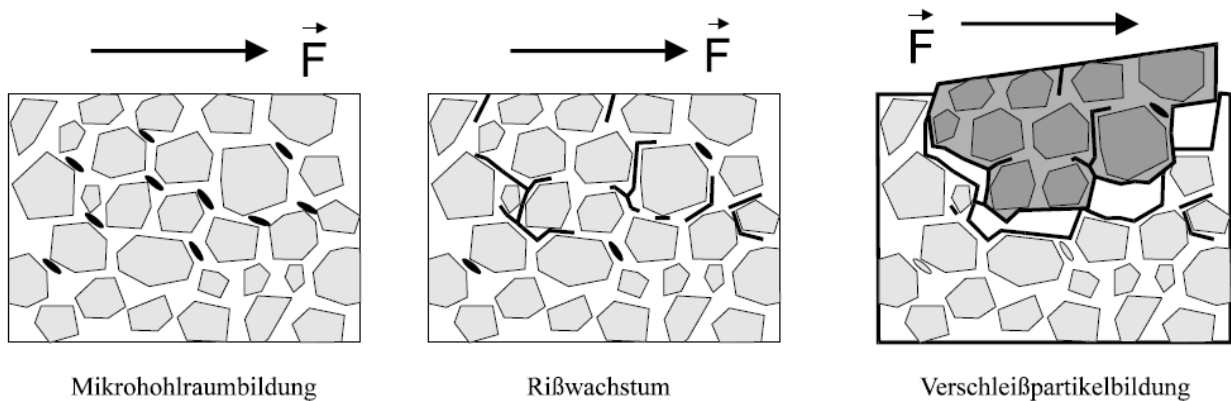


Abbildung 1:

Schematische Erklärung der Verschleißpartikelbildung nach der Delaminations-Theorie (Suh, N.P., 1986). Es können sich Mikrohohlräume bilden, die sich durch Scherkräfte mittels Druck- und Zugspannungen aufbauen, wodurch Verschleißpartikel an der Oberfläche herausgelöst werden können (Kunzelmann, K.-H., 1996).

Im Falle eines niedrigeren E-Modules werden mehr Kaukräfte auf die Kavität übertragen und weitergeleitet. Das Hertzsche Spannungsfeld ist in diesem Falle größer, während die Kaukräfte auf die verbliebenen, dünnen Höcker übertragen werden.

Bei einem niedrigen E-Modul deformieren sich die Höcker leichter, so dass auch mehr Randspalten entstehen können. Dadurch nimmt das Risiko für Höckerfrakturen zu und die Restauration kann somit eher ermüden. Aus diesen Gründen ist es besonders im Seitenzahnbereich sinnvoll, Komposite mit einem hohen E-Modul zu verwenden. Die Bulk Fill-Komposite Tetric EvoCeram Bulk Fill und X-tra Fil verfügen über einen solchen höheren E-Modul.

Selbstverständlich ist der Einsatz von Kompositen mit einem höheren E-Modul auch im Frontzahnbereich sinnvoll. Durch die höhere Viskosität ist jedoch die schlechtere Benetzbarkeit und Adaptation in der Kavität zu berücksichtigen. Flowable-Komposite haben hier einen deutlichen Verarbeitungsvorteil.

Folgende E-Module konnten für die Bulk Fill-Komposite ermittelt werden:

Tabelle 4: E-Module von Bulk Fill Komposite

Bulk Fill Komposit	Viskosität	E-Modul in GPa
Tetric EvoCeram Bulk Fill	hochviskos	0,8
X-tra fil	hochviskos	0,6
X-tra base	niedrigviskos	0,9
Filtek Bulk Fill	niedrigviskos	0,4
SDR	niedrigviskos	0,4
Venus Bulk Fill	niedrigviskos	0,4

Quelle: Ilie, N., 2014

2.8. Bulk Fill Problemstellungen

Die Applikation in Inkrementschichten von 2 mm bei herkömmlichen Hybridkompositen hat sich erfolgreich etabliert. Die Bulk Fill-Materialien können in bis zu 4 mm-Inkrement-Dicke appliziert werden. Mit dieser Untersuchung soll geklärt werden, ob die Bulk Fill-Materialien trotz einer Inkrement-Dicke von 4 mm ebenso wie klassische Hybridkomposite verwendet werden können.

3. Material und Methode

Die Studie erfolgte mit der quantitativen Randanalyse nach der künstlichen Alterung durch Thermowechselbelastung und Kausimulation TML (Thermozyklus und Kausimulation). Alle verwendeten Materialien sind im Anhang in Tabelle 13 unter „Materialien“ aufgeführt.

3.1. Auswahl Bulk Fill-Komposite

Die folgende Tabelle 5 zeigt die Komposite, die in die Untersuchung einbezogen wurden. Die Angaben sind den Produktbeschreibungen und Gebrauchsanweisungen der Hersteller entnommen.

Tabelle 5: Übersicht der Bulk Fill-Komposite mit Schichtstärken- und Viskositätsangabe gem. Hersteller

Bulk Fill	Schichtstärke	Viskosität	Hersteller
SDR	4 mm	fließfähig	Dentsply International, USA
Tetric Evo Bulk Fill	4 mm	modellierbar	Ivoclar Vivadent AG Liechtenstein
Filtek Bulk Fill	4 mm	fließfähig	3M GmbH Deutschland
X-tra fil	4 mm	modellierbar	VOCO GmbH Deutschland
X-tra base	4 mm	fließfähig	VOCO GmbH Deutschland
Venus Bulk Fill	4 mm	fließfähig	Heraeus Kulzer, Deutschland

Beim Vergleich der Produkte muss darauf hingewiesen werden, dass die eine oder andere Produkteigenschaft von den Herstellern unterschiedlich dargestellt wird. Auch in der Zusammensetzung der Bestandteile gibt es signifikante Unterschiede.

3.2. Auswahl der Versuchsanordnung

Für die Studie wurden 104 humane Seitenzähne ohne Defekte verwendet, die weniger als vier Wochen zuvor aus therapeutischen Gründen extrahiert worden waren. Die Zähne wurden stets in Ringer-Lösung Ri-Lac (B. Braun Petzold GmbH, Melsungen, Deutschland) gelagert, um einer Austrocknung vorzubeugen (Hoppenbrouwers, P.M.M. et al. 1987). Nach der Reinigung mithilfe von Scaler und Bürstchen wurden die 104 Zähne anschließend in elf Gruppen aufgeteilt. Die Einteilung richtete sich nach den verschiedenen Kompositmaterialien. Zu Beginn einer jeden Versuchsreihe wurde ein Kompositmaterial ausgewählt und entsprechend die Gebrauchsanweisung studiert.

Um eine bestmögliche Vergleichbarkeit erreichen zu können, wurde die Präparation und Füllung der Zähne in Kastenform durchgeführt (s. Kap. 3.4). Die Zähne wurden nach der Präparation der Kavitäten entsprechend den Herstellerangaben konditioniert, mit Komposit der jeweiligen Hersteller gefüllt, finiert und anschließend poliert. Die so präparierten Zähne wurden 24 h lang in einer 37,5°C warmen Ringer-Lösung gelagert, um die sie nahezu vollständig auszupolymerisieren. Vor Beginn der Belastungssimulation im Kausimulator München 2 erfolgte eine Abformung der gefüllten Präparation mit dem Polyether-Abformmaterial Impregum Penta (3M GmbH, Neuss, Deutschland). Diese Abformung wurde zur Replikatherstellung mit dem Epoxidharz „EpoxyDie“ (Henkel AG & Co. KGaA, Düsseldorf, Deutschland) nach 24 h Ruhezeit ausgegossen, gesputtert und unter dem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Die präparierten und gefüllten Zähne wurden im Thermowechselbad 2000-mal abwechselnd jeweils 30s bei 5°C und bei 55°C getaucht. Anschließend wurden sie im Kausimulator München 2 eingespannt und nach 50 000 Kauzyklen gegen einen definierten Druck von 50 N erneut mit Impregum Abformmaterial abgeformt. Auch von diesen Abformungen wurden Replikate mit EpoxyDie hergestellt, die anschließend mit SEM Autocoating Unit E5200 (Polaron Equipment Ltd, Kent, United Kingdom) unter Luftabschluss und Argon-Gas mit Gold gesputtert sowie unter dem Elektro-

nenmikroskop untersucht, vermessen und nach den in Kapitel 3.16 geschilderten Kriterien bewertet wurden. Abschließend wurden die Messergebnisse vor und nach den Belastungstests TML verglichen und ausgewertet.

3.3. Definition der Gruppen

Bei der Gruppenbildung wurden die verschiedenen Materialien und Kavitätengrößen berücksichtigt. Unter einer „normalen Kavität“ wird eine 3 bis 4 mm tiefe Kavität in oro-vestibulärer Richtung mit einem 4 mm breiten Isthmus definiert (s. Kap. 3.4). Da in der Praxis auch große Kavitäten auftreten, wurden in der Untersuchung „sehr große Kavitäten“ als 5 bis 6 mm tiefe Kavität in oro-vestibulärer Richtung mit einem 4 mm breiten Isthmus definiert (s. Gruppe 2a SDR/große Kavität, Gruppe 2b SDR/große Kavität b und 4). Um den dauerhaften Erfolg einer Füllung gewährleisten zu können, ist die genaue Einhaltung der Gebrauchsanweisung obligatorisch. Im Rahmen der Sprechstunde einer Kassenzahnarztpraxis kann es aus betriebswirtschaftlichen oder zeitlichen Gründen vorkommen, dass gegebenenfalls die notwendige Deckfüllung weggelassen wird. Mit den Gruppen 3 (SDR/normale Kavität) und 4 (SDR/große Kavität) wurde getestet, welche Konsequenzen das Weglassen einer vorgeschriebenen deckenden Füllung mit Hybridkomposit hat. Hier soll gezeigt werden, welche Gefahr mit dieser Abweichung von den Herstellerangaben verbunden ist. In Tabelle 6 ist die Einteilung der Gruppen dargestellt. Sie enthält die getesteten Bulk Fill-Produkte mit Angabe der genauen Materialkonfiguration und der verwendeten Materialien. In Tabelle 13 im Anhang sind detaillierte Informationen zu den Materialien (LOT, Farbe, Hersteller) aufgeführt. Bevor mit den Versuchen begonnen wurde, sind in einer nicht aufgeführten Probegruppe (Nr. 0, hier nicht aufgeführt) das Präparieren und Legen der Füllung sowie die anschließende Auswertung am Rasterelektronenmikroskop geübt worden. Trotz sorgfältiger Arbeitsweise unter Einhaltung der Gebrauchsinformationen sind in den Gruppen 2 und 5 Ergebnisse mit einer sehr großen Streuung entstanden. Viele Werte waren größer als 75 % aller Datenwerte in einer Gruppe (s. Kapitel 4, Abbildung 7: Erklärung Boxplot-Darstellung). Aufgrund dieser beträchtlichen Abweichungen wurden die Gruppen 2 und 5 wiederholt und jeweils mit a und b gekennzeichnet.

Tabelle 6: 11 Gruppen von je 8 Zähnen mit MOD-Kavitäten, die mesial und distal untersucht wurden (BF steht für Bulk Fill)

Gruppe Nr.	Hersteller	Material	Details
Gruppe 1 SDR/normale Kavität	Dentsply	SDR	Normale Kavität + Flowable-Komposit (SDR Bulk Fill) + klassisches Hybridkomposit (Ceram X duo) mit Adhäsiv (XP Bond)
Gruppe 2a SDR/große Kavi- tät	Dentsply	SDR	Sehr große Kavität + Flowable-Komposit (SDR Bulk Fill + klassisches Hybridkomposit (Ceram X duo) mit Adhäsiv (XP Bond)
Gruppe 2b SDR/große Kavi- tät <i>Wiederholung</i>	Dentsply	SDR	Sehr große Kavität + Flowable-Komposit (SDR Bulk Fill) + klassisches Hybridkomposit (Ceram X duo) mit Adhäsiv (XP Bond)
Gruppe 3 SDR/normale Kavität	Dentsply	SDR	Normale Kavität + Flowable-Komposit (SDR Bulk Fill) – kein klassisches Hybridkomposit mit Adhäsiv (XP Bond)
Gruppe 4 SDR/große Kavi- tät	Dentsply	SDR	Sehr große Kavität + Flowable-Komposit (SDR Bulk Fill) – kein Komposit mit Adhäsiv (XP Bond)
Gruppe 5a Tetric Evo BF/große Kavität	Ivoclar	Tetric Evo Flow + Tetric EvoCeram Bulk Fill	Normale Kavität Komposit Tetric Evo Ceram Bulk Fill mit Tetric Evo Flow-Unterfüllung und Adhäsiv DBA Exite F
Gruppe 5b Tetric Evo BF/große Kavität <i>Wiederholung</i>	Ivoclar	Tetric Evo Flow + Tetric EvoCeram Bulk Fill	Normale Kavität Komposit Tetric Evo Ceram Bulk Fill mit Tetric Evo Flow-Unterfüllung und Adhäsiv DBA Exite F (Wiederholung)
Gruppe 6 Filtek BF/normale Kavität	3M Espe	Filtek Bulk Fill + Filtek Supreme XTF	Normale Kavität + Filtek Bulk Fill + klassisches Hybridkomposit Filtek Supreme XTF mit Adhäsiv Scotchbond Universal
Gruppe 7 X-tra fil/normale Kavität	Voco	X-tra fil	Normale Kavität + klassisches Hybridkomposit X-tra fil mit Adhäsiv Futurabond DC
Gruppe 8 X-tra base/ normale Kavität	Voco	X-tra base + Grandio SO	Normale Kavität + X-tra base + Komposit Grandio SO mit Adhäsiv Futurabond DC
Gruppe 9 Venus BF/normale Kavi- tät	Heraeus Kulzer	Venus Bulk Fill + Venus Pearl	Normale Kavität + Venus Bulk Fill + klassisches Hybridkomposit Venus Pearl mit Adhäsiv iBond Total Etch + iBond Etch 35 Gel

Gruppe 10 Tetric Evo Ceram Flow+BF/normale Kavität	Ivoclar	Tetric Evo Flow + Tetric Evo Ceram Bulk Fill	Normale Kavität + Tetric Evo Flow + Tetric Evo Ceram Bulk Fill und Adhäsiv DBA Exite F
Gruppe 11 Referenz Tetric Evo Ceram / normalee Kavität	Ivoclar	Tetric Evo Flow + Tetric Evo Ceram	Normale Kavität + Tetric Evo Flow + klassisches Hybridkomposit und Adhäsiv DBA Exite F

Während der Versuche zeigte die Verwendung von hochviskosen Bulk Fill-Kompositen, wie schwer diese in der Kavität zu adaptierten waren. Aus diesem Grund wurde bei Gruppe 10 Tetric Evo Ceram BF/normale Kavität im Kavitätenboden ein dünnes Tetric Evo Flow-Inkrement appliziert.

Um die Verwendung von Bulk Fill-Kompositen wie klassischen Hybridkomposite beurteilen zu können, wurde in Gruppe 11 Referenz Tetric Evo Ceram/normale Kavität ein klassisches Hybridkomposit (Tetric Evo Ceram) verwendet.

Getestet wurden normale und große Kavitäten, die mit niedrigviskose und hochviskose Bulk Fill-Komposite gefüllt wurden. Um die Konsequenzen des Weglassens einer deckenden Füllung zu verdeutlichen, sind bei dem Bulk Fill-Komposit SDR jeweils bei einer normalen und einer großen Kavität die Deckfüllungen weggelassen worden (Gruppe 3 SDR/normale Kavität und 4).

3.4. Präparation

Mit einem KaVo-Rotring-Winkelstück (Übersetzung 1:5) bei einer Motordrehzahl von ca. 40 000 U/min unter maximaler Wasserkühlung und einem zylinderförmigen 100 µm-Diamantschleifer Nr. 835KR (Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland) wurde eine MOD-Kavität angelegt. Die MOD-Kavität wurde nach Abbildung 2 (Kunzelmann, K.-H. et al. 2000) hergestellt. An jedem Zahn wurden je ein schmelzbegrenzter und ein dentinbegrenzter approximaler Kasten präpariert. Die Präparationsgrenze lag bei der normal großen, schmelzbegrenzten Kavität ca. 1,5 mm koronal und bei der normal großen, dentinbegrenzten Kavität ca. 1,5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze. Die Breite der Kavität betrug in oro-vestibulärer Richtung ca. 4 mm. Okklusal wurde bei jedem Zahn ein 4 mm breiter Isthmus mit einer Tiefe von ca. 3 bis 4 mm präpariert. Bei der großen Kavität betrug die schmelzbe-

grenzte Kavität ebenfalls ca. 1,5 mm, die dentinbegrenzte Kavität betrug apikal der Schmelz-Zement-Grenze ca. 1,5 mm. Die Breite der großen Kavität betrug jedoch ca. 6 mm. Mit einem gekörnten, zylinderförmigen 50 µm-Finierdiamanten Nr. 8836KR (Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland) wurde jede Kavität finiert und abschließend mit Wasserspray gereinigt.

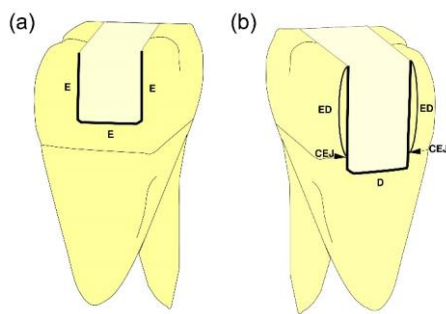


Abbildung 2: Kunzelmann, K.-H. 2000, (a) Kavität nur im Schmelz verlaufend, (b) Kavität im Schmelz und Dentin verlaufend – Quelle: Takahashi, R. et al. 2012

3.5. Applikation des Ätzmittels

Im Dentin befinden sich zahlreiche Dentintubuli, die sogenannten Odontoblastenfortsätze aufweisen und einen odontoblastischen Raum enthalten. Dieser ist mit Dentinflüssigkeit und organischen Substanzen gefüllt. Bei der mechanischen Bearbeitung eines Zahnes und dem Anlegen einer Kavität entsteht eine sogenannte Schmierschicht aus Zahnhartmaterial und Flüssigkeiten (Perdigão, J. et al. 1999). In vivo treten zusätzlich Mikroorganismen, deren Stoffwechselprodukte sowie Blut und Speichel auf. Um die Schmierschicht erfolgreich entfernen zu können, wird im Allgemeinen jede Kavität mit Total Etch, einem 37%igen Phosphorsäure-Ätzel, für 20 s konditioniert. Bei der Applikation der Bulk Fill-Komposite wurde jeweils das vorgeschriebene und empfohlene Etching-Produkt verwendet (siehe Tabelle 6).

3.6. Applikation des Dentinadhäsivs

Nach der Präparation der Kavität wurden alle Schmelz- und Dentin-Bereiche mit Wasserspray gereinigt, mit einem Luftpuster getrocknet und mit dem entsprechenden Produkt konditioniert. Wichtig dabei war, die übermäßige Trocknung des Dentins zu vermeiden. Um eine optimale Haftung zu erzielen, wurde das Dentinadhäsiv entsprechend seiner Einwirkzeit stets in Bewegung gehalten. Zum Abschluss der Kondi-

tionierung wurde die vorbereitete Kavität je nach Produkt für 10 bis 20 s lichtgehärtet. Es kamen folgende Dentinadhäsive zum Einsatz: DBA Exite F, XP Bond von Dentsply, 3M-Espe Scotchbond Universal, Futura DC (dualhärtendes Self-Etch-Bond mit Nano-Füllern verstärkt) und iBond Total Etch. Alle Produkte wurden entsprechend ihrer Gebrauchsanweisung appliziert und verarbeitet.

3.7. Applikation des Kompositmaterials

Anstelle der Inkrementtechnik, bei dem schichtweisen je ca. 2 mm dicken Auftragen und dem Lichtpolymerisieren des Komposites, kam bei den untersuchten Materialien die sogenannten Bulk Fill-Technik (Fast-Track-Methode) zum Einsatz. Bei dieser Methode können größere Schichtdicken von bis zu 4 mm appliziert werden.

Um die Kavitäten in-vitro möglichst praxisnah mit Bulk Fill-Kompositen zu füllen, wurden bei allen Gruppen die MOD-Kavitäten für die Aufnahme des Komposits vorbereitet und nacheinander gefüllt. Bei hochviskosem Bulk Fill-Komposit (s. Tabelle 5: Schichtstärke und Viskosität) war es möglich, die Kavitäten in 4 mm dicken Inkrementen zu füllen. Im Gegensatz dazu konnte bei den niedrigviskosen Bulk Fill-Kompositen eine facio-linguale Schichttechnik angewendet werden (Versilius, A. et al. 1996). Sofern eine deckende Füllung notwendig war, wurde im Anschluss an die Bulk-Fülltechnik die schräge Inkrementtechnik angestrebt, bei der die Inkremente in max. 2 mm Schichtdicke schichtweise einzeln appliziert und ausgehärtet wurden.

Während Gruppe 1 eine normal große Kavität erhielt (Gruppe 1 SDR/normale Kavität), sollte in Gruppe 2 SDR/große Kavität eine sehr große Kavität gefüllt werden (s. Gruppe 2a SDR/große Kavität und Gruppe 2b SDR/große Kavität). Gruppe 2 SDR/große Kavität wurde zweimal durchgeführt (Gruppe 2a SDR/große Kavität und 2b/SDR/große Kavität), da die Auswertung der ersten Gruppe 2a SDR/große Kavität SDR/große Kavität bedeutende Schwankungen in den Ergebnissen zeigte.

Die Wirkung ohne Deckkomposit in einer normal großen Kavität wurde in Gruppe 3 SDR/normale Kavität getestet. In Gruppe 4 SDR/große Kavität ist eine große Kavität getestet worden, bei der ebenfalls absichtlich auf die Verwendung eines Deckkomposites verzichtet wurde. Gruppe 5a Tetric Evo BF/große Kavität und Gruppe 5b Tetric Evo BF/große Kavität erhielten je eine Füllung mit Tetric Evo Ceram Bulk Fill der Firma Ivoclar Vivadent und wurden mit dem klassischen Hybridkomposit Tetric

Evo Flow des gleichen Herstellers als Deckkomposit verschlossen. Für die Gruppe 5 erfolgte die Durchführung zur Kontrolle ebenfalls zweimalig (Gruppe 5a Tetric Evo BF/große Kavität und Gruppe 5b Tetric Evo BF/große Kavität). Gruppe 6 Filtek BF/normale Kavität wurde mit Filtek Bulk Fill Flowable gefüllt und mit Filtek Bulk Fill Universal von 3M-Espe verschlossen. Während Gruppe 7 X-tra fil/normale Kavität eine Füllung mit X-tra fil der Firma Voco erhielt und nicht verschlossen wurde, bekam Gruppe 8 X-tra base/normale Kavität das Material in der Farbe A2 von Voco einen Verschluss mit GranndioSO des gleichen Herstellers. Gruppe 9 Venus BF/normale Kavität erhielt das Material Venus Bulk Fill sowie Venus Pearl als Deckkomposit von der Firma Heraeus Kulzer. Da das Hybridkomposit Tetric Evo Ceram in der Zahnheilkunde sehr weit verbreitet ist, wurde die Gruppe aus Gründen der Kontrolle zwei Mal getestet (s. Gruppe 5a Tetric Evo BF/große Kavität und Gruppe 5b Tetric Evo BF/große Kavität). Die letzte Gruppe 11 Referenz Tetric Evo Ceram/normale Kavität diente als Referenzgruppe mit herkömmlichem Tetric Evo Ceram Hybridkomposit und einer 1-2 mm dicken Schicht Tetric Evo Flow auf dem Boden der Kavität. Diese diente als „Stress breaker“ zwischen der Dentinschicht und der darüber befindlichen Hybridkompositfüllung (Krejci I., et al. 1988). Des Weiteren verbesserte die Schicht von Tetric Evo Flow die Benetzbarkeit innerhalb der Kavität (Payne, J. H., 1999). Man kann somit nicht sicher differenzieren, ob die bessere Benetzung der Kavität, der Spannungsausgleich oder beide von Vorteil sind.

3.8. Lichtpolymerisation

Für eine optimale und langlebige Füllung mit Komposit ist eine gute und ausreichende Lichtpolymerisation wichtig. Die suffiziente Applikation von 2 mm-Inkrementen beim Einsatz von Hybridkompositen und eine anschließende Lichtpolymerisation gelten als etabliert.

Da beim Einsatz von Bulk Fill-Kompositen 4 mm-Inkmente appliziert werden, muss die Lichtenergie in der Lage sein, in tiefere Schichten eindringen zu können. In den Gebrauchsanweisungen der Bulk Fill-Komposite werden 10 oder 20 s Polymerisation bei Lichtstärken von 500 bis 1000 mW/cm² angegeben, um eine möglichst hohe Konversionsrate im gesamten Füllungsbereich zu erzielen (s. Tabelle 7).

Aus einer anderen Studie ist bekannt, dass die Konversionsraten von Bulk Fill-Kompositen bis zu einer Schichtstärke von 4 mm konstant bleiben (Czasch, P. et al. 2012). Dies setzt allerdings voraus, dass die vom Hersteller angegebenen Polymerisationszeiten genau eingehalten werden. Nachfolgende Polymerisationszeiten wurden den Gebrauchsanweisungen entnommen:

Tabelle Nr. 7: Übersicht Lichtintensität und Polymerisationszeiten

Name	Viskosität	Lichtintensität	Polymerisationszeit	Farbe
Tetric EvoCeram Bulk Fill	hoch	$\geq 500 \text{ mW/cm}^2$ $\geq 1000 \text{ mW/cm}^2$	20 s 10 s	IVA Bulk
X-tra fil	hoch	500–800 mW/cm ² $\geq 800 \text{ mW/cm}^2$	20 s 10 s	Universal
SDR	niedrig	$\geq 550 \text{ mW/cm}^2$	20 s	Universal
X-tra base	niedrig	500–800 mW/cm ² > 800 mW/cm ²	10 s 10 s	Universal
Venus Bulk Fill	niedrig	$\geq 550 \text{ mW/cm}^2$	20 s	Universal
Filtek Bulk Fill	niedrig	550–1000 mW/cm ² 1000–2000 mW/cm ²	20 s 10 s	Universal

Um eine ausreichende Polymerisation in tieferen Schichten gewährleisten zu können, haben die Hersteller von Bulk Fill-Kompositen verschiedene Lösungen verfolgt. Eine erfolgreiche Methode, um eine höhere Durchhärtungstiefe zu erreichen, ist etwa die Erhöhung der Transluzenz eines Bulk Fill-Komposites. Je transluzenter ein Komposit ist, umso tiefer kann die Energie der Lichtpolymerisationsgeräte in die Füllung dringen und umso besser kann diese auch in der Tiefe ausgehärtet werden. Die für Bulk Fill-Komposite nötige Durchhärtungstiefe kann auch erreicht werden, indem die Füllstoffmengenzusammensetzung bei der Herstellung angepasst wird.

Tabelle 8: Vergleich der Eigenschaften verschiedener Composite-Klassen von Prof. Dr. Ilie, Zahnklinik München)

Komposit-Art	Füllkörper Vol.- %	Füllkörper Gew.- %
Flowable-Komposite	51,1	69,9
Hybridkomposite	63,8	78,2
Niedrigviskose Bulk Fill Komposite (SDR, X-tra base, Venus Bulk Fill, Filtek Bulk Fill)	46,0	68,1
Hochviskose Bulk Fill Komposite (Tetric Evo Ceram Bulk Fill, X-tra fil)	65,5	83,4

Eine weitere Methode zur Erhöhung der Durchhärtungstiefe ist die Optimierung der eingesetzten Initiatoren, die am Polymerisationsprozess beteiligt sind. Die Firma Ivoclar Vivadent setzt für ihr Bulk Fill-Komposit Tetric EvoCeram Bulk Fill zusätzlich einen selbstentwickelten, lichtaktiveren Initiator ein, das sogenannten „Ivocerin“. Ivocerin enthält neben Kampferchinon auch Lucirin, welches laut Herstellerangaben den Polymerisationsprozess beschleunigen soll. Dies soll eine höhere Lichtaktivität in der gesamten Bulk Fill-Kompositfüllung ermöglichen

(Quelle:<http://www.ivoclarvivadent.ch/zoolu-website/media/document/17022/Tetric+EvoCeram+Bulk+Fill>).

Die Firma Dentsply Sorona hingegen entwickelte nach eigenen Angaben einen urethane dimethacrylatbasierten Polymerisationsmodulator (UDMA). Laut Herstellerangaben soll dieser eine um 60 bis 70 % reduzierte Schrumpfspannung bewirken (Ilie, N. et al. 2010).

Wie wichtig eine ausreichende Polymerisation und Durchhärtungstiefe der untersuchten Bulk Fill-Komposite ist, zeigt eine Untersuchung mit unterschiedlichen Lichtintensitäten (Ilie, N. et al. 2014). Es konnte aufgezeigt werden, dass die verschiedenen Bulk Fill-Komposite unterschiedlich lange Lichtintensitäten benötigen, um suffizient auszuhärten zu können.

3.9. Ausarbeitung und Politur

Die gefüllten Kavitäten wurden wie bei regulären Behandlungen im Rahmen der Füllungstherapie ausgearbeitet und poliert. Mit einem Diamantbohrer (Nr. 837KREF, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland), der eine Körnung von 25 µm aufwies, wurden die Füllungen finiert und mit Sof-Lex Ausarbeitungs- und Polierscheiben (3M Espe GmbH, Seefeld, Deutschland) poliert. Eingesetzt wurden feine Sof-Lex (1982 F) und eine sehr feine Sof-Lex (1982 SF) mit einem Durchmesser von jeweils 9,5 mm. Die Politur mittels Sof-Lex wurde entsprechend der Gebrauchsanweisung mit ausreichend Wasser durchgeführt.

3.10. Feuchtigkeitslagerung

Um die Kompositfüllungen bestmöglich auspolymerisieren zu können, wurden die Zähne für 24 h in einer Ringer-Lösung bei 37,5°C gelagert.

3.11. Replikatherstellung

Von jeder Kavität wurde vor und nach der Belastung ein Replikat der zu untersuchenden Füllung hergestellt, um die Auswirkungen der thermischen und mechanischen Belastungen TML messen zu können. Nach einer 24-stündigen Lagerung wurden alle Zähne mit einer weichen Zahnbürste gereinigt. Mithilfe des Polyether-Abformmaterials Impregum (Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Lichtenstein) wurde jede gefüllte Zahnkavität abgeformt, um nach dem Ausgießen der Abformungen mit EpoxyDie (Henkel AG & Co. KGaA, Düsseldorf, Deutschland) eine identische Detailwiedergabe zu ermöglichen.

3.12. Belastung durch Thermowechselbad

Da die mit Komposit gefüllten Zähne im Alltag durch den Genuss kalter und heißer Lebensmittel unterschiedlichen Temperaturschwankungen ausgesetzt sind, soll dem durch eine thermische Wechselbelastung in vitro Rechnung getragen werden. Die Expansionskoeffizienten von Bulk Fill-Komposit, Schmelz und Dentin sind unterschiedlich, so dass es bei Temperaturwechseln zu verschiedenartigen Volumenänderungen und infolge dessen zu Scherspannungen am Übergang vom Zahn zur Kompositfüllung kommt. Besonders die Haftung an der Verbundgrenze zwischen Schmelz und Dentin zum Bulk Fill-Komposit kann sich auf diese Weise verschlechtern. Das Kontraktionsverhältnis zwischen Schmelz, Dentin und einem klassischen Hybridkomposit beträgt ca. 1:3,5 bis 1:8,5 (Janda, R., 1988). Sich wiederholende Temperaturschwankungen führen zu Spannungen, die sich in Form von Randspalten bemerkbar machen können (Gale, M.S. et al. 1999).

Mithilfe eines Thermowechselbades (s. Abbildung 3) wurden die präparierten und mit Komposit gefüllten Zähne 2000-mal für jeweils 30 s einem Temperaturwechsel von 5°C auf 55°C ausgesetzt. Zwischen den beiden Bädern wurde eine Tropfzeit von 5 s eingestellt.



Abbildung 3: Thermowechselbad Haake W 15, Firma Willytec München

3.13. Belastung durch Kausimulation

Neben der thermischen Wechselbelastung soll auch die mechanische Belastung nachempfunden werden. Entsprechend wurden die Zähne in einem sogenannten Kausimulator „Münchner Modell Muc 2“ der Firma Willytec (s. Abbildung 3), München zusätzlich auch einer mechanischen Belastung ausgesetzt. Die zuvor präparierten Zähne wurden mit einem lichthärtenden Kunststoff auf Aluminium-Probenträgern fixiert, die auf Gummisockeln lagerten. Hierbei wurde darauf geachtet, dass alle mit Komposit gefüllten, approximalen Zahnflächen senkrecht zur Arbeitsebene ausgerichtet wurden und den gleichen Abstand zur Zahnoberfläche hatten. Der Antagonist wurde so eingestellt, dass er stets auf die Mitte der okklusalen Füllung auftraf. Auf diese Weise konnten jeweils acht parallel fixierte Zähne computergesteuert im destillierten Wasserbad bei Zimmertemperatur 50 000-mal mit 50 Newton gegen eine Degussit-Kugel mit einem Durchmesser von 3 mm als Antagonist gestoßen werden. So konnte eine okklusale Kraft simuliert werden, die antagonistisch auf eine mit Komposit gefüllte mesiale, okklusale und distale Kavität wirken konnte. Diese Simulation soll eine Verweildauer von ca. 5 Jahren im Mund entsprechen.



Abbildung 4: Kausimulator „Münchner Modell Muc 2“, Fa. Willytec, München

3.14. Kritische Punkttrocknung

Nachdem die Zähne mit Bulk Fill-Komposit gefüllt und 24 h gelagert wurden, erfolgte die Herstellung von Replikaten aus EpoxyDie für die Untersuchung am Rasterelektronenmikroskop. Nach den Belastungstests (TML: Thermozyklus und Kausimulation) wurden für die Gruppen 1 - 6 erneut Replikate aus EpoxyDie hergestellt und ausgewertet. Während der quantitativen Randanalyse am Rasterelektronenmikroskop (s. Kapitel 3.15) stellte sich heraus, dass die gefüllten Zähne nach den Belastungstests im Original nach der Kritischen Punkttrocknung deutlich besser am Rasterelektronenmikroskop ausgewertet werden konnten. Aus diesem Grund wurden alle gefüllten Zähne der Gruppen 6 bis 11 nach den Belastungstests einer Kritischen Punkttrocknung unterzogen und so im Original mit dem Rasterelektronenmikroskop ausgewertet.

Für die Begutachtung der gefüllten Zähne im Rasterelektronenmikroskop unter Vakuum war es von Bedeutung, dass die Proben trocken sind. Dazu wurden die gefüllten Original-Zähne zunächst geteilt und für jeweils 20 Minuten in eine Alkohol-Reihe von 10- bis 100%igem Alkohol eingelegt. Anschließend wurden die Original-Zähne kontaktfrei im Schiffchen des Emitech Kritisch-Punkt-Trockners (GaLa Gabler Labor

GmbH, Bad Schwalbach, Deutschland) platziert und mit Alkohol in 90%iger Konzentration leicht bedeckt. Auf diese Weise konnte der Wasseranteil in den Zähnen signifikant reduziert werden. Beim Kritischen Punkttrockner (s. Abbildung 5) wird das in den Original-Zähnen enthaltene Wasser über Alkohol als Zwischenstufe durch flüssiges CO₂ ersetzt. Eine in mehreren Schritten durchgeführte Kritischer Punkt-Trocknung hat zudem den Vorteil, dass auf die Oberfläche wirkende Kräfte reduziert werden können. Der größte Vorteil dieser aufwendigen Methode ist jedoch die an der Luft stattfindende Trocknung, wodurch die daraus resultierenden Spannungen an den Original-Zähnen vermieden werden sollen.



Abbildung 5: EMITECH Kritisch-Punkt-Trockner
Quelle: GaLa Gabler Labor Instrumente Handels GmbH

3.15. Oberflächenbeschichtung durch Sputtern

Um eine Probe im Rasterelektronenmikroskop untersuchen zu können, muss diese trocken und elektrisch leitfähig sein. Da es sich bei den gefüllten Zähnen um organische Proben handelt, muss vor der elektronenmikroskopischen Untersuchung eine Vorbereitung stattfinden, indem die Proben elektrisch leitend beschichtet werden. Dazu wurden die Proben in einem Zerstäubungsprozess im Sputter Coater von Edwards (s. Abbildung 6: Polaron Equipment Ltd, Kent, United Kingdom) unter Argon-Gas dünn mit ca. 10 nm Gold beschichtet. Die Replika aus EpoxyDie sowie die echten Original-Zähne ab Gruppe 6 Filtek BF/normale Kavität erhielten so ihre elektrische Leitfähigkeit und konnten dadurch im Rasterelektronenmikroskop untersucht werden.



Abbildung 6: SC7610 Sputter Coater

3.16. Qualitative Randanalyse am Rasterelektronenmikroskop

Im Rasterelektronenmikroskop AMR 1200 (Wetzlar Network, Wetzlar, Deutschland), nachfolgend REM genannt, wurde jeweils der Übergang vom Zahn zur Kompositfüllung untersucht und beurteilt. Dabei wurden die Kriterien der quantitativen Randanalyse angewendet. Die Beurteilung des Randspaltes erfolgte abschnittsweise bei 200-facher Vergrößerung mit Hilfe eines Computers (s. Abbildung 7), wobei eine Rasterelektronenspannung von 15 kV gewählt wurde. Die am REM erstellten Fotos des Randspaltes wurden auf einen angeschlossenen Computer übertragen. Die Auswertung der übertragenen Fotos erfolgte anschließend an diesem Computer unter Zuhilfenahme der Software jQuantiGap. Die Software wurde eigens für diesen Zweck von Prof. Kunzelmann entwickelt und bietet im Längenmodus die Möglichkeit, den Bereich des Randspaltes nachzuzeichnen. Die dabei gemessenen Längen sind nach den folgenden, unten genannten Kriterien zu bewerten. Die vermessenen Randspaltenabschnitte der vorbereiteten Proben wurden in dieser Arbeit mithilfe vier verschiedener Qualitätsmerkmale bewertet und zugeordnet. Auf diese Weise konnten die Länge einer Kavität sowie ihr prozentualer Anteil an der gemessenen Gesamtlänge registriert werden. Folgende Einteilungsmöglichkeiten wurden berücksichtigt:

„Optimaler Rand“:

Ein Rand galt als optimal, wenn der Randspalt gleichmäßig und ohne Unterbrechungen gekennzeichnet war. Auflösungserscheinungen im Randspaltbereich zwischen der Kompositfüllung und dem Zahnhartmaterial kamen nicht vor.

„Randspalt“:

Der dargestellte Bereich verfügte über einen Randspalt, der eine Kontinuitätsunterbrechung zwischen Füllungsrand und Zahnhartsubstanz aufwies.

„Quellung im Randspaltbereich“:

Wies der Randspalt eine deutliche Überschussbildung auf, die jedoch auf den Bereich der Klebefuge beschränkt war, so konnte von einer Quellung der Kompositfüllung ausgegangen werden. Das Kompositmaterial reichte über die Zahnhartsubstanz hinaus.

„Artefakt/nicht beurteilbarer Überschuss“:

Der Randspalt ist optisch nicht beurteilbar.

Die so ermittelten Daten wurden mit Hilfe des Statistikprogramms R CRAN (Kurt Hornik, Institute for Statistics and Mathematics, Wien, Österreich) eingelesen und ausgewertet.

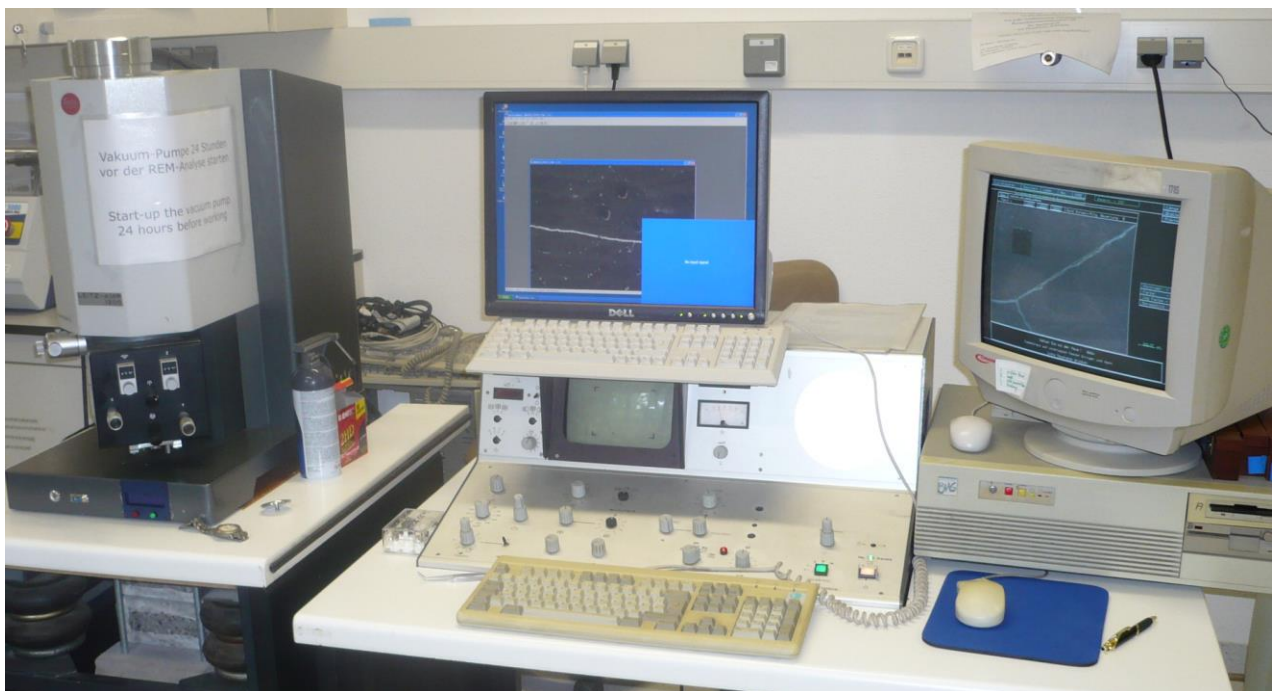


Abbildung 7: Rasterelektronenmikroskop (Mitte)

Auf dem Foto sieht man rechts den Computer für die Auswertung mit QuantiGap. Das Programm wurde von Prof. Kunzelmann weiterentwickelt und kann unter der Bezeichnung jQuantiGap über www.kunzelmann.de bezogen werden.

4. Ergebnisse

Alle ermittelten Ergebnisse wurden statistisch ausgewertet und in Form von Boxplot-Diagrammen dargestellt. Der Vorteil dieser Diagramme besteht darin, einen schnellen Überblick zu erhalten, in welchem Bereich sich die meisten Daten befinden. Alle Werte werden bei der Boxplot-Darstellung in der sogenannten Fünf-Punkte-Zusammenfassung abgebildet. Diese besteht aus dem Median und jeweils den beiden Quartilen und Extremwerten (s. Abbildung 8). Ein wesentlicher Vorteil von Boxplot-Diagrammen besteht darin, dass einzelne sehr große Abweichungen den Mittelwert (hier Median) nicht signifikant beeinflussen.



Abbildung 8: Erklärung Boxplot-Darstellung

Die folgenden Boxplot-Diagramme zeigen alle Komposite im Vergleich. Unter „Baseline“ werden alle Messergebnisse ohne Belastungstests (TML: Thermozyklus und Kausimulation) verstanden. „Fatigued“ bezeichnet die Messergebnisse nach den Belastungstests und die ermüdete Füllung. Es werden zuerst die Materialien miteinander verglichen. Im Abschluss wird jedes Material einzeln dargestellt.

Die Diagramme bilden die intakte und die ermüdete Füllung ab, sortiert nach Bulk Fill-Herstellern. Die Daten konnten mit dem Programm jQuantiGap gewonnen und statistisch ausgewertet werden. Das Programm R gab die Daten als Boxplot-Programme aus. Nachfolgend werden Prozentwerte angegeben, die im Boxplot-

Diagramm abgelesen werden können und sich auf den Medianwert beziehen. Boxplot-Auswertungen bieten den Vorteil, Unterschiede zwischen den Gruppen mit Hilfe der Einweg-Rangvariantenanalyse zu überprüfen (Tukey, J.W. et al. 1978).

4.1. Auswertung der gemessenen Daten

Um die jeweiligen Ergebnisse des marginalen Randspaltes nach Art des Zahnhartmaterials zu beurteilen, werden in den folgenden Boxplot-Darstellungen jeweils Schmelz, Dentin und der Übergang von Schmelz zum Dentin separat dargestellt.

4.1.1. Marginaler Randspalt des schmelzbegrenzten Kastens im Schmelz-Dentin-Bereich

Das Boxplot-Diagramm 1 (s. Abbildung 9) zeigt die Bildung eines marginalen Randspaltes mit einem schmelzbegrenzten Kasten:

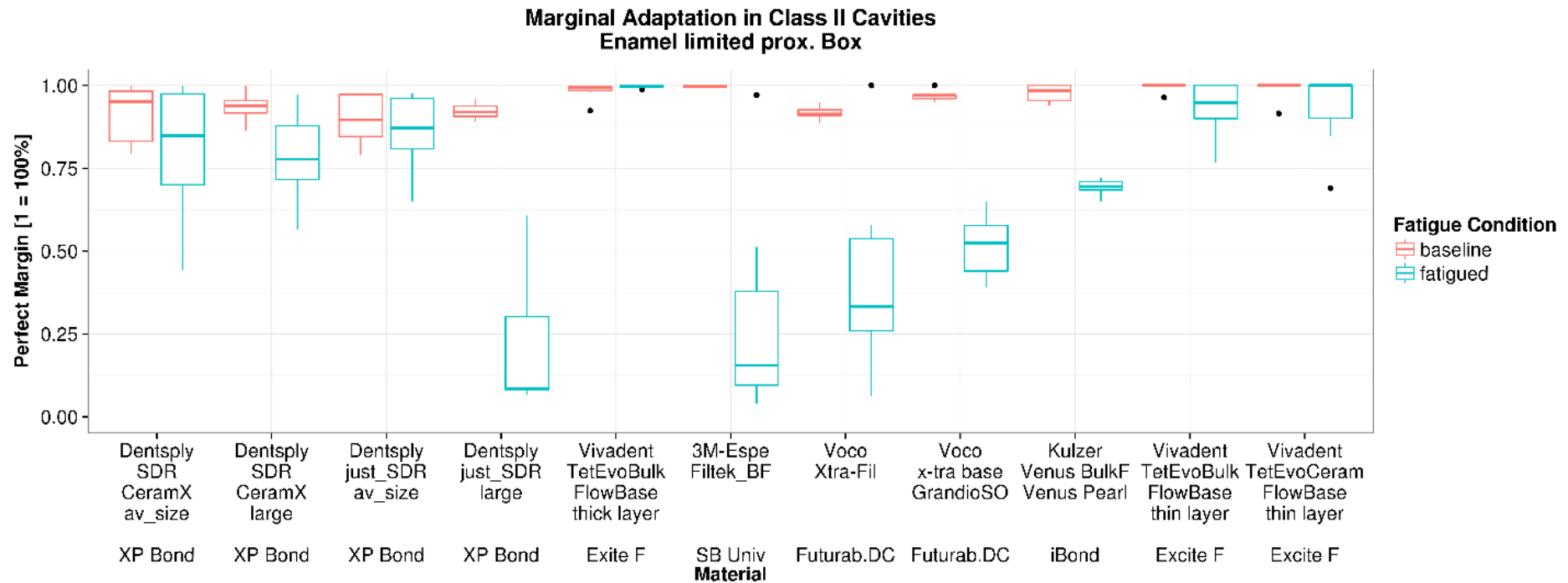


Abbildung 9: Boxplot-Diagramm 1

Legende:

Y-Achse: Perfect Margin (% der gesamten Füllung)

X-Achse: Bulk Fill-Komposit mit baseline und fatigued pro Material und Vergleich mit Gruppe 11 Tetric Evo Ceram/normale Kavität (Referenz)

Baseline: Zustand vor Belastungstests

Fatigued: Zustand nach Belastungstests

Aus dem Boxplot-Diagramm 1 geht hervor, dass alle Bulk Fill-Komposite in einem schmelzbegrenzten Kasten mit einer Randspaltqualität von ca. 85 bis 100 % hergestellt werden konnten (s. rote Boxplot-Mediane). Die blauen Boxplot-Mediane entsprechen den Ergebnissen der in Kapitel 5 beschriebenen Belastungstests TML. Als Haupttendenz lässt sich feststellen, dass das Bulk Fill-Komposit Tetric Evo Bulk Fill in großen Kavitäten am besten abschneidet und hier auch nach den Belastungstests so gut wie keine Randspalten sichtbar wurden. Wenn man in der Grafik den prozentualen Anteil des annähernd perfekten Randspaltes links überprüft, verfügen ca. 65 % aller Bulk Fill-Füllungen über eine Randspaltqualität von ca. 80 bis 100 % (s. Perfect Margin 1 = 100 %). Auffällig ist, dass das Bulk Fill-Komposit SDR mit einer großen Kavität und ohne die vom Hersteller vorgeschriebene Deckfüllung am schlechtesten abschneidet.

4.1.2. Marginaler Randspalt des dentinbegrenzten Kastens im Schmelz-Dentin-Bereich

Das Boxplot-Diagramm 2 (s. Abbildung 10) zeigt die Bildung eines marginalen Randspaltes mit einem dentinbegrenzten Kasten im Schmelz-Dentin-Bereich.

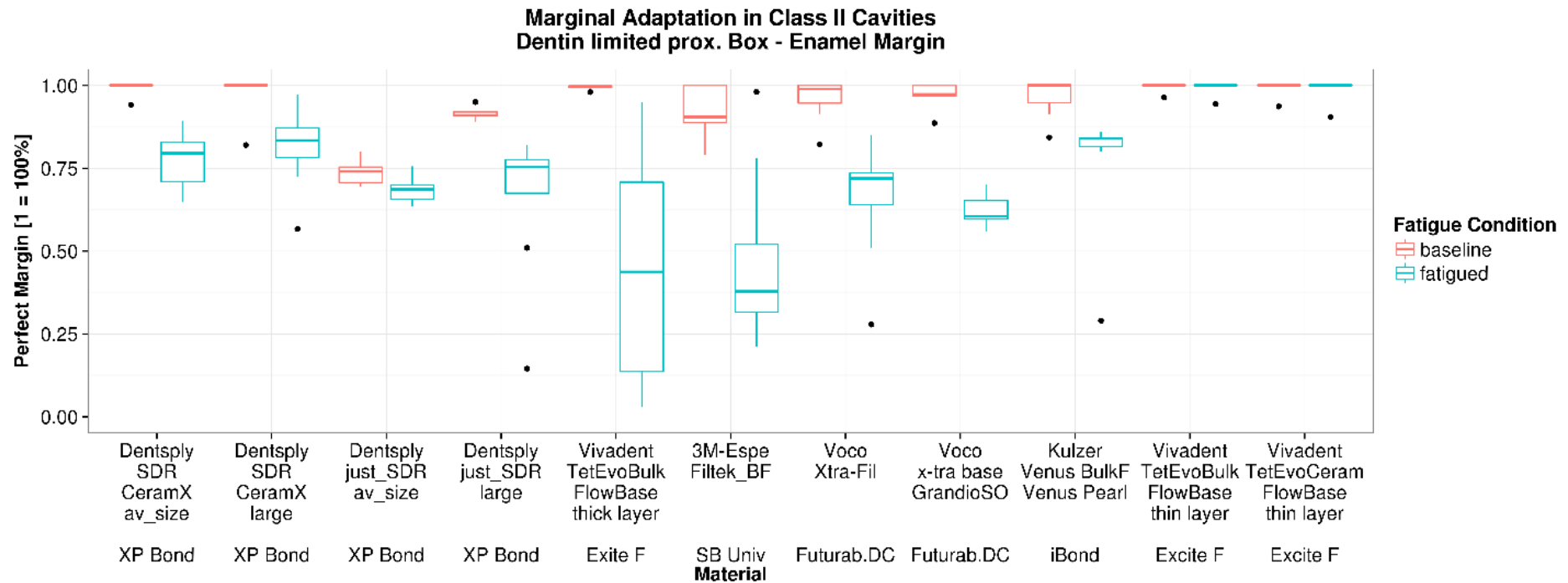


Abbildung 10: Boxplot-Diagramm 2

Legende:

Y-Achse: Perfect Margin (% der gesamten Füllung)

X-Achse: Bulk Fill-Komposit mit baseline und fatigued pro Material und Vergleich mit Gruppe 11 Tetric Evo Ceram/normale Kavität (Referenz)

Baseline: Zustand vor Belastungstests

Fatigued: Zustand nach Belastungstests

Im Vergleich zum vorhergehenden Boxplot-Diagramm 1 fällt auf, dass sich insgesamt die Qualität der Bulk Fill-Füllungen verschlechtert hat. Überprüft man im Boxplot-Diagramm 2 den annähernd perfekten Randspalt mit dem dentinbegrenzten Kasten, besitzen nur noch ca. 45 % der Füllungen eine Randspaltqualität von ca. 80 bis 100 % (s. Perfect Margin 1 = 100 %). Dafür hat sich jedoch die Anzahl der sehr schlechten Bulk Fill-Füllungen reduziert: Sie liegt insgesamt nur noch bei ca. 20 %. Im Falle des Tetric Evo Bulk Fill-Komposites mit großer Kavität gab es eine auffallend große Spannweite an Ergebnissen, sowie einen sehr großen Abstand zwischen oberem und unterem Whisker.

4.1.3. Marginaler Randspalt mit dentinbegrenztem Kasten

Das Boxplot-Diagramm 3 zeigt die Bildung eines marginalen Randspaltes mit einem reinen dentinbegrenzten Kasten (s. Abbildung 11).

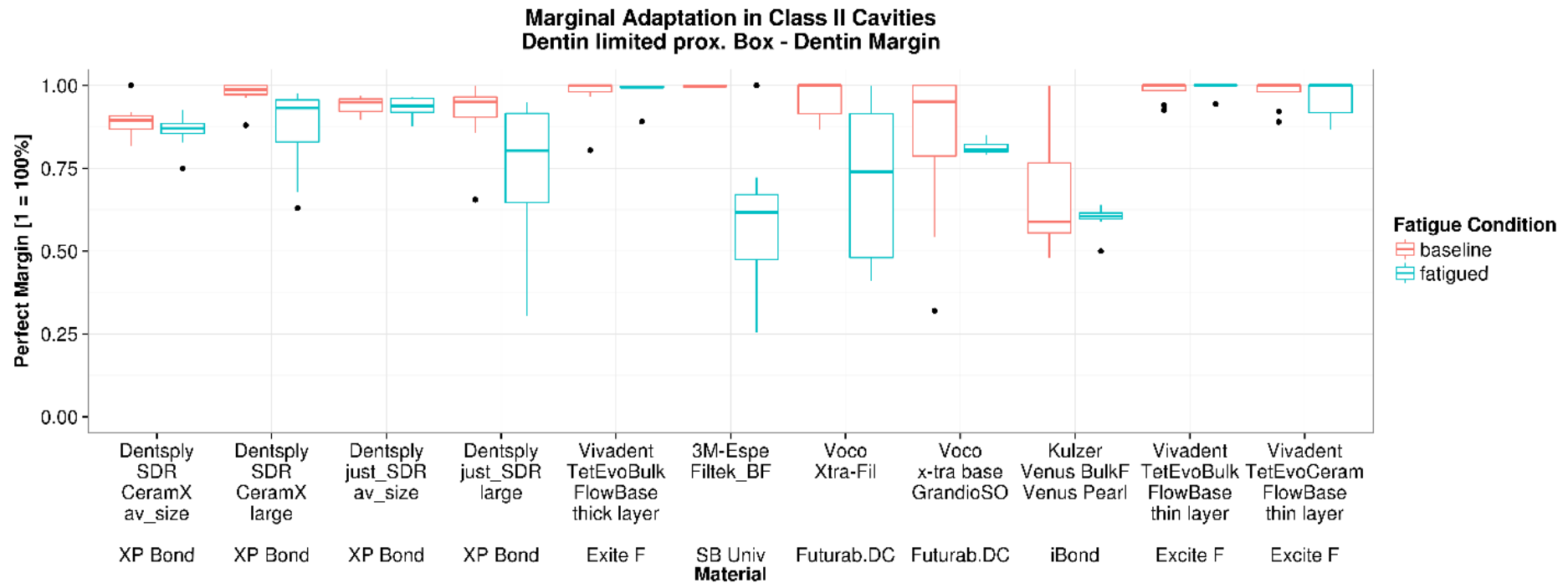


Abbildung 11: Boxplot-Diagramm 3

Legende:

Y-Achse: Perfect Margin (% der gesamten Füllung)

X-Achse: Bulk Fill-Komposit mit baseline und fatigued pro Material und Vergleich mit Gruppe 11 Tetric Evo Ceram/normale Kavität (Referenz)

Baseline: Zustand vor Belastungstests

Fatigued: Zustand nach Belastungstests

Obwohl die Haftung von klassischen Kompositen im Schmelz besser ist als im Dentin, zeigt sich im Boxplot-Diagramm 3, dass der Anteil von nahezu perfekten Randspalten im Dentin-Bereich hier besser ist als erwartet. So ergibt sich eine Bandbreite von 75 bis 100 % der nahezu perfekten Randspalten (s. Perfect Margin 1 = 100 %). Es fällt auf, dass der Anteil der sogenannten Ausreißer mit einer Tendenz zu mehr perfekten Randspalten bei „nur“ ca. 37 % liegt.

4.1.4. Aufgetretene Frakturen im Schmelz-Bereich

Das Boxplot-Diagramm 4 zeigt die aufgetretenen Frakturen bei Bulk Fill-Kompositfüllungen, die im Schmelz enden (s. Abbildung 12).

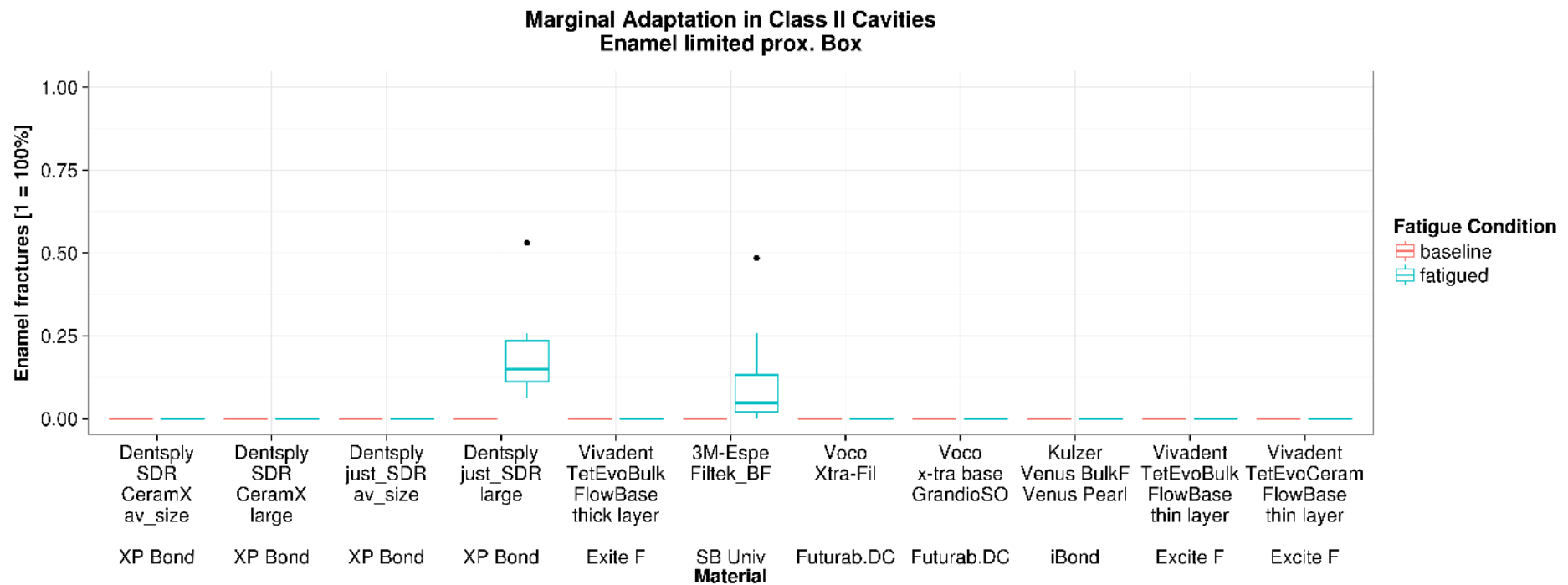


Abbildung 12: Boxplot-Diagramm 4

Legende:

Y-Achse: Perfect Margin (% der gesamten Füllung)

X-Achse: Bulk Fill-Komposit mit baseline und fatigued pro Material und Vergleich mit Gruppe 11 Tetric Evo Ceram/normale Kavität (Referenz)

Baseline: Zustand vor Belastungstests

Fatigued: Zustand nach Belastungstests

Aus dem Boxplot-Diagramm 4 geht hervor, dass Frakturen der Bulk Fill-Kompositfüllungen bei zwei Materialien aufgetreten sind und damit einen Anteil von ca. 20 % ausmachen (s. Perfect Margin 1 = 100 %). Das Dentin-Bonding-Adhäsiv löst sich zuerst an der schwächeren Stelle, was eine mögliche Erklärung darstellen kann. Die verbliebenen und gebundenen Bereiche stehen dabei nicht mehr so stark unter Spannung. Aus diesem Grund muss neben der separaten Randspalt-Betrachtung von Schmelz und Dentin immer auch der Übergang vom Schmelz zum Dentin mit begutachtet werden.

4.1.5. Aufgetretene Frakturen im Dentin-Bereich

Das Boxplot-Diagramm 5 (s. Abbildung 13) zeigt die aufgetretenen Frakturen bei Bulk Fill-Komposit-Füllungen, die im Dentin enden und sowohl vom Schmelz, als auch vom Dentin begrenzt werden.

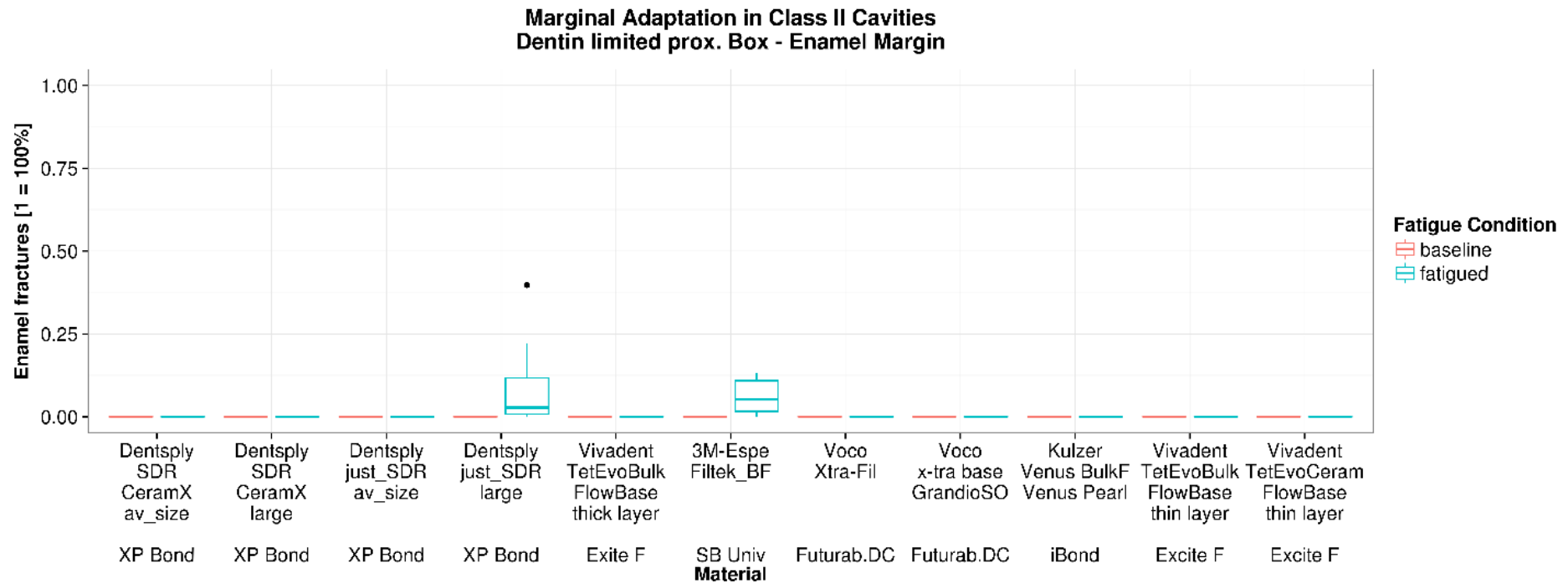


Abbildung 13: Boxplot-Diagramm 5

Legende:

Y-Achse: Perfect Margin (% der gesamten Füllung)

X-Achse: Bulk Fill-Komposit mit baseline und fatigued pro Material und Vergleich mit Gruppe 11 Tetric Evo Ceram/normale Kavität (Referenz)

Baseline: Zustand vor Belastungstests

Fatigued: Zustand nach Belastungstests

Im Boxplot-Diagramm 5 ist zu erkennen, dass dieselben Bulk Fill-Komposite im Dentin-Bereich ebenfalls frakturiert sind und einen Anteil von ca. 20 % ausmachen (s. Perfect Margin 1 = 100 %).

4.2. Ergebnisse Bulk Fill-Materialien

Um eine so große Datenmenge anschaulich darzustellen, wurden Boxplot-Diagramme erstellt (1–5). So lassen sich die Werte für einen nahezu perfekten Randspalt in % der Gesamtfüllung an der Y-Achse für das entsprechende Bulk Fill-Komposit ablesen (s. Perfect Margin 1 = 100 %). Die statistischen Unterschiede wurden mit der Methode „Anov“ des Programms R überprüft. Als Post-Hoc-Test wurde der TukeyHSD post-hoc Test verwendet.

Abbildung 7a: Vor den Belastungstest: Anova-Auswertung des Schmelz-Bereich es der Bulk Fill-Komposite inkl. Referenzgruppe (Vivadent Tetric EvoCeram FlowBase normale Kavität) im reinen Schmelz

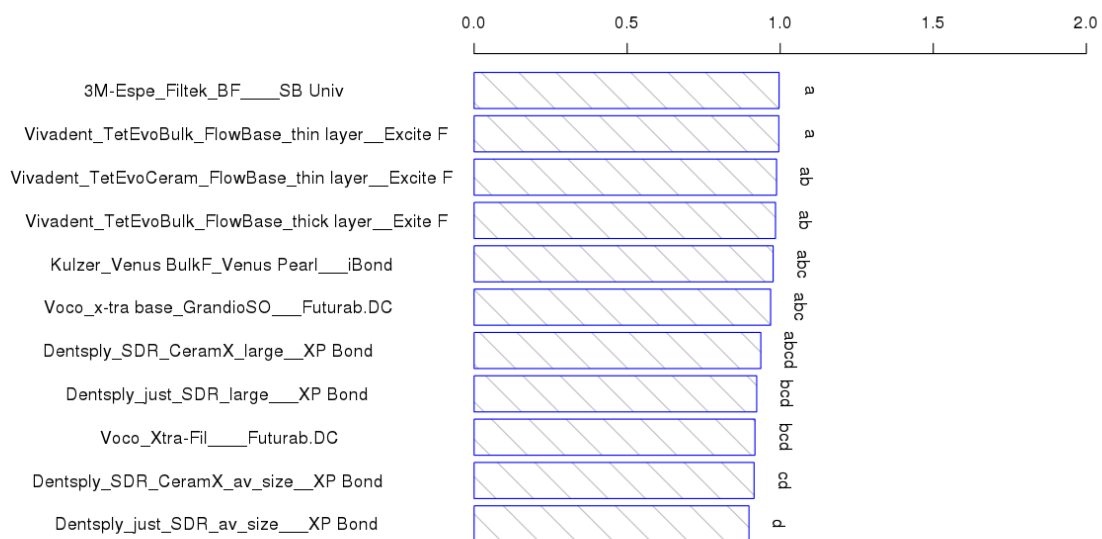


Abbildung 7b: Nach den Belastungstest: Anova-Auswertung des Schmelz-Bereich es der Bulk Fill-Komposite inkl. Referenzgruppe (Vivadent Tetric EvoCeram FlowBase normale Kavität) im reinen Schmelz

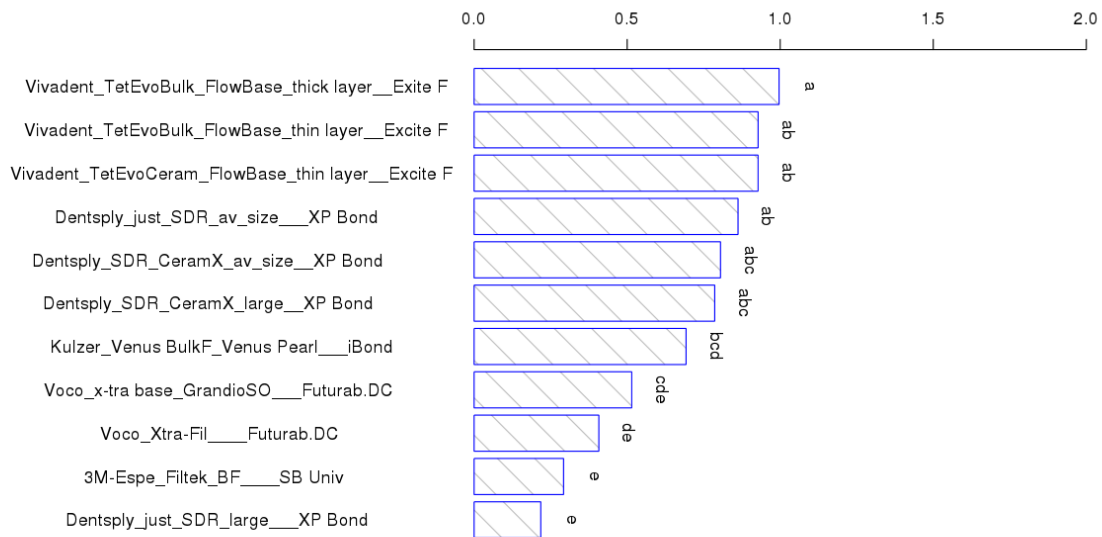


Abbildung 8a: Vor den Belastungstest: Anova-Auswertung des Dentin-Bereich es der Bulk Fill-Komposite inkl. Referenzgruppe (Vivadent Tetric EvoCeram FlowBase normale Kavität) im reinen Dentin

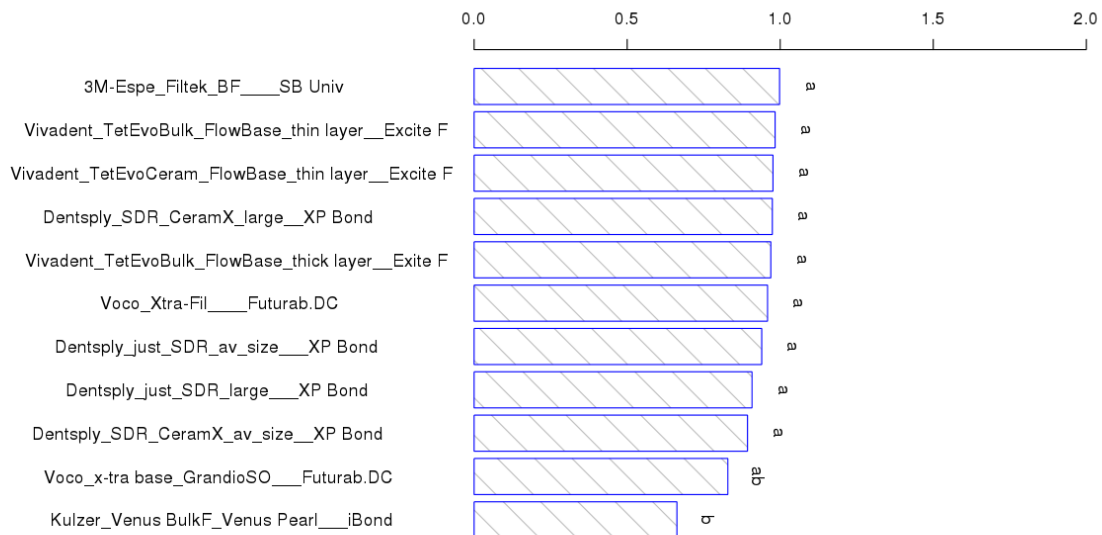


Abbildung 8b: Nach den Belastungstest: Anova-Auswertung des Dentin-Bereich es der Bulk Fill-Komposite inkl. Referenzgruppe (Vivadent Tetric EvoCeram FlowBase normale Kavität) im reinen Dentin

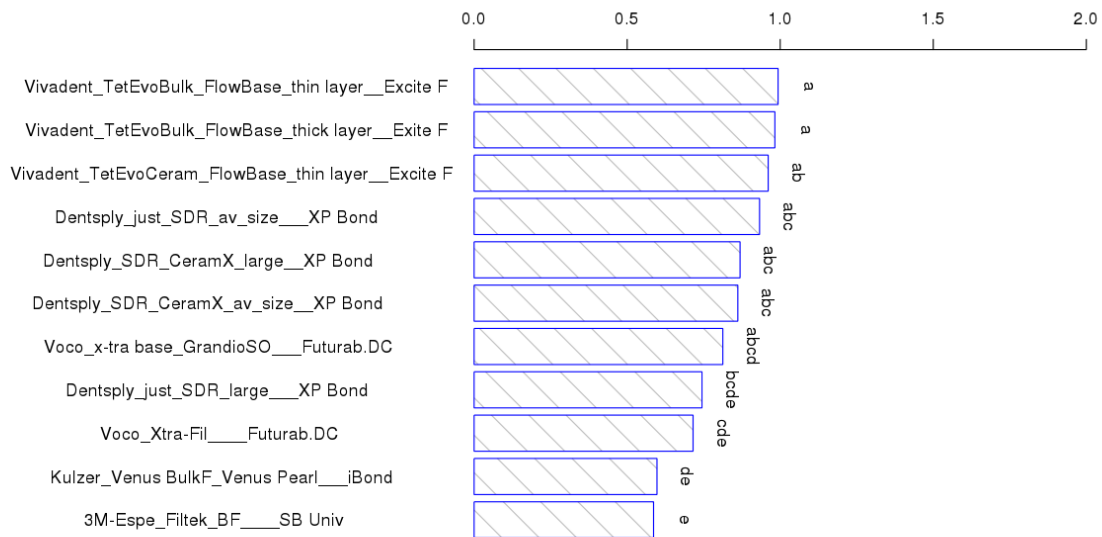


Abbildung 9a: Vor den Belastungstest: Anova-Auswertung des Schmelz-Dentin-Bereiches der Bulk Fill-Komposite inkl. Referenzgruppe (Vivadent Tetric EvoCeram FlowBase normale Kavität) im Schmelz und Dentin

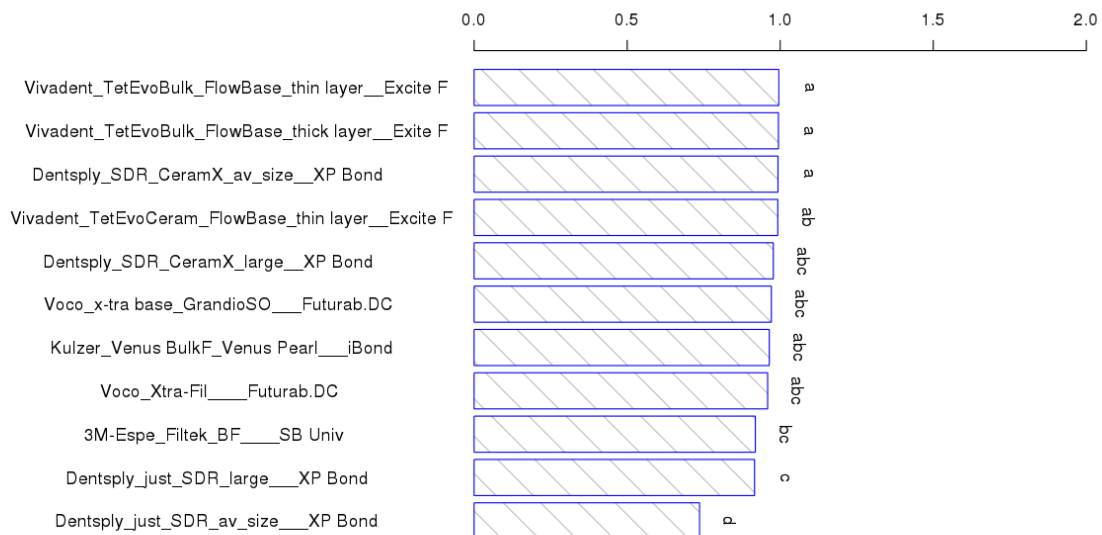
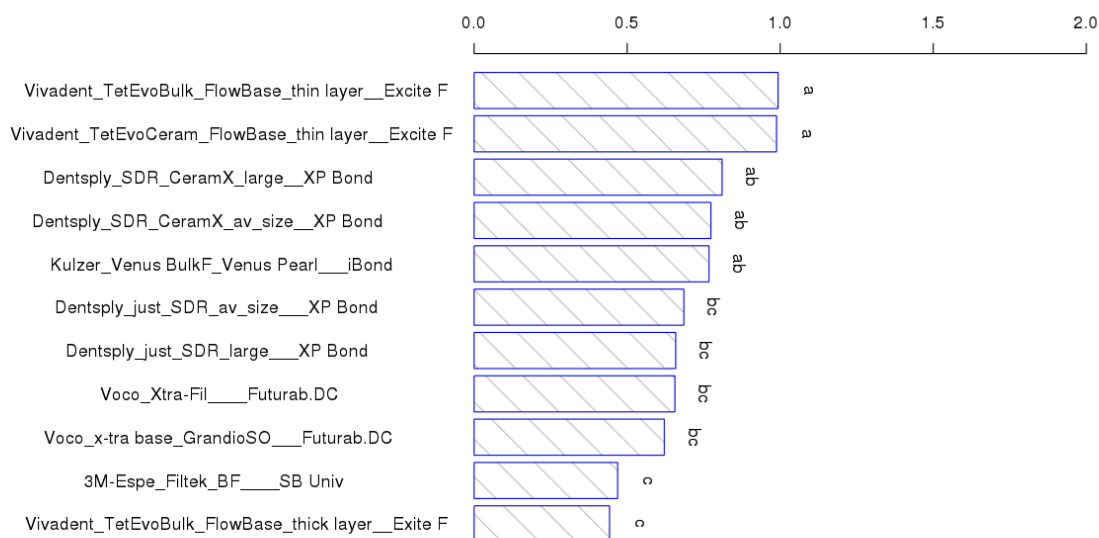


Abbildung 9b: Nach den Belastungstest: Anova-Auswertung des Schmelz-Dentin-Bereiches der Bulk Fill-Komposite inkl. Referenzgruppe (Vivadent Tetric EvoCeram FlowBase normale Kavität) im Schmelz und Dentin



4.2.1. Ergebnisse

In den nachfolgenden Tabellen wird die Anova-Auswertung tabellarisch dargestellt.

Tabelle 9a: Anova-Auswertung der Bulk Fill-Komposite inkl. Referenzgruppe (Vivadent Tetric EvoCeram FlowBase normale Kavität)

Nicht perfekter Randspalt im Schmelz-Bereich in %	DBA	vorher	nachher	Verschlechterung
Dentsply SDR CeramX normale Kavität	XP Bond	8,5 %	19,5 %	11,0 %
Dentsply SDR CeramX grosse Kavität	XP Bond	6,3 %	21,4 %	15,1 %
Dentsply nur SDR normale Kavität	XP Bond	10,2 %	13,8 %	3,6 %
Dentsply nur SDR grosse Kavität	XP Bond	7,7 %	57,7 %	50,0 %
Vivadent TetEvoBulk FlowBase grosse Schicht	Exite F	1,5 %	1,7 %	0,1 %
3M Espe Filtek Bulk Fill	SB Universal	0,4 %	58,8 %	58,5 %
Voco Xtra-Fil	Futura Bond DC	8,2 %	59,3 %	51,0 %
Voco x-tra base GrandioSO	Futura Bond DC	3,1 %	48,5 %	45,4 %
Kulzer Venus Bulk Fill Venus Pearl	iXP Bond	2,3 %	30,7 %	28,4 %
Vivadent TetEvoBulk FlowBase dünne Schicht	Excite F	0,5 %	7,2 %	6,8 %
Vivadent TetEvoCeram FlowBase normale Kavität	Excite F	1,2 %	7,2 %	6,0 %

Tabelle 9b: Anova-Auswertung der Bulk Fill-Komposite inkl. Referenzgruppe (Vivadent Tetric EvoCeram FlowBase normale Kavität)

<u>Nicht perfekter Randspalt im Dentin-Bereich in %</u>	DBA	vorher	nachher	Verschlechterung
Dentsply SDR CeramX normale Kavität	XP Bond	10,7 %	13,8 %	3,2 %
Dentsply SDR CeramX grosse Kavität	XP Bond	2,6 %	13,1 %	10,5 %
Dentsply nur SDR normale Kavität	XP Bond	6,0 %	6,7 %	0,7 %
Dentsply nur SDR grosse Kavität	XP Bond	9,2 %	25,6 %	16,3 %
Vivadent TetEvoBulk FlowBase grosse Schicht	Exite F	3,1 %	3,1 %	0,0 %
3M Espe Filtek Bulk Fill	SB Universal	0,2 %	41,4 %	41,2 %
Voco Xtra-Fil	Futura Bond DC	4,1 %	28,5 %	24,3 %
Voco x-tra base GrandioSO	Futura Bond DC	17,1 %	18,7 %	1,7 %
Kulzer Venus Bulk Fill Venus Pearl	iBond	33,7 %	40,2 %	6,5 %
Vivadent TetEvoBulk FlowBase dünne Schicht	Exite F	1,7 %	1,7 %	0,0 %
Vivadent TetEvoCeram FlowBase normale Kavität	Exite F	2,4 %	3,9 %	1,6 %

Tabelle 9c: Anova-Auswertung der Bulk Fill-Komposite inkl. Referenzgruppe (Vivadent Tetric EvoCeram FlowBase normale Kavität)

<u>Nicht perfekter Randspalt im Schmelz im Schmelz-Dentin-Bereich in %</u>	DBA	vorher	nachher	Verschlechterung
Dentsply SDR CeramX normale Kavität	XP Bond	0,7 %	13,8 %	13,1 %
Dentsply SDR CeramX grosse Kavität	XP Bond	2,3 %	13,1 %	10,9 %
Dentsply just SDR normale Kavität	XP Bond	26,3 %	6,7 %	-19,6 %
Dentsply just SDR grosse Kavität	XP Bond	8,4 %	25,6 %	17,2 %
Vivadent TetEvoBulk FlowBase grosse Schicht	Exite F	0,6 %	1,7 %	1,2 %
3M Espe Filtek Bulk Fill	SB Universal	8,1 %	41,4 %	33,2 %
Voco Xtra-Fil	Futura Bond DC	4,1 %	28,5 %	24,4 %
Voco x-tra base GrandioSO	Futura Bond DC	2,9 %	18,7 %	15,9 %
Kulzer Venus Bulk Fill Venus Pearl	iBond	3,6 %	40,2 %	36,7 %
Vivadent TetEvoBulk FlowBase dünne Schicht	Exite F	0,5 %	0,7 %	0,2 %
Vivadent TetEvoCeram FlowBase thin	Exite F	0,8 %	3,9 %	3,1 %

Tabelle 9d: Anova-Auswertung der Bulk Fill-Komposite inkl. Referenzgruppe (Vivadent Tetric EvoCeram FlowBase normale Kavität)

<u>Nicht perfekter Randspalt im Dentin im Schmelz-Dentin-Bereich in %</u>	DBA	vorher	nachher	Verschlechterung
Dentsply SDR CeramX normale Kavität	XP Bond	13,8 %	22,6 %	8,8 %
Dentsply SDR CeramX grosse Kavität	XP Bond	13,1 %	19,0 %	5,9 %
Dentsply just SDR normale Kavität	XP Bond	6,7 %	31,5 %	24,7 %
Dentsply just SDR grosse Kavität	XP Bond	25,6 %	24,5 %	-1,0 %
Vivadent TetEvoBulk FlowBase grosse Schicht	Exite F	1,7 %	55,8 %	54,0 %
3M Espe Filtek Bulk Fill	SB Universal	41,4 %	47,0 %	5,7 %
Voco Xtra-Fil	Futura Bond DC	28,5 %	34,4 %	5,9 %
Voco x-tra base GrandioSO	Futura Bond DC	18,7 %	37,9 %	19,1 %
Kulzer Venus Bulk Fill Venus Pearl	iBond	40,2 %	23,3 %	-17,0 %
Vivadent TetEvoBulk FlowBase dünne Schicht	Exite F	0,7 %	0,7 %	0,0 %
Vivadent TetEvoCeram FlowBase thin	Exite F	3,9 %	3,9 %	0,0 %

4.2.2. Bulk Fill-Material SDR

Insgesamt wurden fünf Gruppen mit SDR unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt, um unterschiedliche Situationen aus dem Alltag untersuchen zu können (s. Kapitel 3.3.). Zu Beginn der Untersuchung fand die herkömmliche Verwendung von SDR mit einem überdeckenden klassischen Hybridkomposit statt (Gruppe 1 SDR/normale Kavität). Des Weiteren wurde im Verlauf der Untersuchung eine große Kavität gewählt. Der Versuch der Gruppe 2 SDR/große Kavität wurde wiederholt (s. Gruppe 2a SDR/große Kavität, Gruppe 2b SDR/große Kavität). Es folgten abschliessend eine Gruppe mit normaler Kavität, sowie eine Gruppe mit großer Kavität, aber jeweils ohne vorgeschriebenes deckendes Hybridkomposit.

Bei der Gruppe 1 SDR/normale Kavität konnten Füllungen hergestellt werden, die im Schmelz nur 8,5 % schlechte Randspalten (s. Tabelle 9a Dentsply SDR CeramX normale Kavität) und im Dentin nur 10,7 % aufwiesen (s. Tabelle 9b Dentsply SDR CeramX normale Kavität). Nach den Belastungstests waren im Schmelz-Bereich nur 19,5 % und im Dentin-Bereich noch ca. 13,8 % nicht zufriedenstellend. Das bedeutet, dass sich die Qualität des Randspaltes durch die Belastungssimulation im Schmelz-Bereich um ca. 11 % und im Dentin-Bereich um ca. 3,2 % verschlechtert hat.

Bei Füllungen, die sowohl im Schmelz als auch im Dentin einen Rand aufwiesen (s. Tabelle 9c: Dentsply SDR CeramX normale Kavität), konnten Füllung mit SDR gelegt werden, die fast im gesamten Randspaltbereichs vor den Belastungstest nahezu perfekt waren (99,3 % perfekter Randspalt). Nach den Belastungstests konnten 13,8 % Randspalten beobachtet werden.

Wurde eine sehr große Kavität mit SDR Bulk Fill gefüllt (Gruppe 2a SDR/große Kavität inkl. Gruppe 2b SDR/große Kavität) und anschliessend mit einem deckenden klassischen Hybridkomposit versehen, so wies die Füllung vor der Belastung im reinen Schmelz-Bereich zu ca. 6,3 % (s. Tabelle 9a: «Dentsply SDR CeramX grosse Kavität») und mit Dentin-Bereich zu ca. 2,6 % einen fehlerhaften Randspalt auf (s. Tabelle 6b: «Dentsply SDR CeramX grosse Kavität»). Nach der Belastung stieg der Anteil für fehlerhafte Randspalten auf ca. 21,4 % im reinen Schmelz-Bereich und auf ca. 13,1% im Dentin-Bereich an. Betrachtet man die Ergebnisse bei Füllungen, die sowohl im Schmelz-, als auch im Dentin-Bereich liegen (s. Tabelle 9c und 9d: «Dentsply SDR CeramX grosse Kavität»), so stiegen die Randspalten im Schmelz auf 13,1 % und im Dentin auf 19,0 % an. Die Ergebnisse verweisen auf eine bemerkenswerte Verschlechterung gegenüber dem Ausgangswert.

In Gruppe 3 SDR/normale Kavität wurde auf das überdeckende Komposit in einer normal großen Kavität verzichtet, was nachfolgend aufgrund der niedrigen Viskosität dazu führte, dass die Füllungen deutlich schwieriger fertiggestellt werden konnten. Vor Belastung waren im Schmelz-Bereich ca. 10,2 % (s. Tabelle 9a: «Dentsply nur SDR normale Kavität») und im Dentin-Bereich ca. 6,0 % (s. Tabelle 9b: «Dentsply nur SDR normale Kavität») der Randspalten mangelhaft. Nach Belastung konnten im Schmelz ca. 13,8 % und im Dentin 13,1 % der Füllungen als ungenügend festgestellt werden. Im schmelz- und dentinbegrenzten Bereich verschlechterten sich nach den Belastungstests die Randspalten im Schmelz von 26,3 % auf 26,7 % und im Dentin von 6,7 % auf 31,5 % (s. Tabelle 9c und 9d «Dentsply nur SDR normale Kavität»).

In der SDR-Gruppe 4, SDR/große Kavität und ohne Deckfüllung, konnten im Schmelz in der Ausgangssituation nur 7,7 % und im Dentin nur 9,2 % fehlerhafte Randspalten entdeckt werden (s. Tabelle 9a und 9b «Dentsply nur SDR grosse Kavität»). Nach den Belastungstests stiegen die Werte für schlechte Randspalten für Schmelz signifikant auf 57,7 % und für Dentin auf ca. 25,6 %. Im Übergangsbereich

von Schmelz zum Dentin verschlechterte sich die Qualität des Randspaltes im Schmelz von 8,4 % auf 25,6 % und im Dentin von 5,6 % auf 24,5 % (s. Tabelle 9c und 9d «Dentsply nur SDR grosse Kavität»).

In Abbildung 12 des Boxplot-Diagramms 4 und in Abbildung 13 des Boxplot-Diagramms 5 werden die Ergebnisse der Frakturen im Schmelz- und im Dentin-Bereich dargestellt. Während die Füllungen aus den ersten drei SDR-Gruppen keine Frakturen aufwiesen, konnten in der letzten Gruppe 4 SDR/große Kavität und ohne Deckfüllung im Schmelz in ca. 20 % der Fälle und im Dentin in ca. 10 % der Fälle Frakturen nachgewiesen werden.

4.2.3. Material Tetric Evo Bulk Fill mit normaler und großer Kavität

Das Bulk Fill-Komposit Tetric Evo Bulk Fill wurde zwei Mal in Verbindung mit einer normalen Kavität (Gruppe 5a und 5b Tetric Evo Ceram BF/normale Kavität) und einmal in Verbindung mit einer normalen Kavität inklusive einer dünnen Schicht Tetric Evo Flow im Kavitätenboden getestet (Gruppe 10 Tetric Evo Ceram Flow+BF/normale Kavität).

Die Ergebnisse von Tetric Evo Bulk Fill (Gruppe 9a und 9b Tetric Evo Ceram BF/normale Kavität) sind im Schmelz- und Dentin-Bereich sowohl vor, als auch nach den Belastungstests als gut zu bewerten.

Nach den Belastungstests stiegen bei normalen Kavitäten die Randspalten der Füllungen im Schmelz von nur 0,5 % auf 7,2 %. Die Randspalten der Füllungen von normalen Kavitäten im Dentin blieben unverändert bei 1,7 % (s. Tabelle 9a und 9b «Vivadent Tetric Evo Bulk Flow Base normale Kavität»).

Im Schmelz-Dentin-Bereich stieg die Anzahl der Randspalten nach den Belastungstests bei normalen Kavitäten im Schmelz von nur 0,5 % auf 0,7 %. Die Randspalten von normalen Kavitäten im Dentin blieben dabei unverändert bei 0,7 % (s. Tabelle 9c und 9d «Vivadent Tetric Evo Bulk Flow Base normale Kavität»).

Bei großen Kavitäten ist ein ähnlicher Verlauf festzustellen. Nach den Belastungstests stiegen bei großen Kavitäten die Randspalten der Füllungen im Schmelz von nur 1,5 % auf 1,7 %. Die Randspalten der Füllungen von großen Kavitäten im Dentin

blieben dabei unverändert bei 1,7 % (s. Tabelle 9a und 9b «Vivadent Tetric Evo Bulk Flow Base großen Kavität»).

Im Schmelz-Dentin-Bereich stiegen die Randspalten bei den Füllungen nach den Belastungstests in großen Kavitäten im Schmelz von nur 0,5 % auf 0,7 %. Die Randspalten der Füllungen von großen Kavitäten im Dentin blieben unverändert bei 0,7 % (s. Tabelle 9c und 9d «Vivadent Tetric Evo Bulk Flow Base großen Kavität»).

In der als Referenz dienenden Gruppe bei Anwendung von Tetric Evo Ceram zusammen mit Tetric Evo Flow (Gruppe 11 Tetric Evo Ceram Flow/normale Kavität) besitzt der Schmelz-Bereich nur 1,2 % und der Dentin-Bereich nur 2,4 % defekte Randspalten bei Füllungen vor den Belastungstests (s. Tabelle 6a und 6b «Vivadent Tetric Evo Ceram Flow Base normale Kavität»). Nach den Belastungstests wurden im Schmelz lediglich 7,2 % und im Dentin nur 3,9 % schlechte Randspalten festgestellt.

Bei Füllungen im Schmelz-Dentin-Bereich konnten ebenfalls wenig Randspalten nachgewiesen werden. Im Schmelz stiegen sie von 0,8 % auf nur 3,9 % und im Dentin-Bereich blieben sie konstant bei 3,9 %. In diesem Falle zeigten die Belastungstests keine negativen Auswirkungen (s. Tabelle 9c und 9d «Vivadent Tetric Evo Ceram Flow Base normale Kavität»).

Frakturen im Schmelz- oder Dentin-Bereich konnten nicht festgestellt werden (Abbildung 12 und 13 der Boxplot-Diagramme 4 und 5).

4.2.4. Material Filtek Bulk Fill zusammen mit Filtek Supreme XTF

Die Ergebnisse der Gruppe 6 Filtek BF/normale Kavität blieben hinter den Erwartungen zurück. Der Anteil der Randspalten der Füllungen im Schmelz- und Dentin-Bereich betrug zu Beginn nur 0,4 % bzw. 0,2 % (s. Tabelle 9a und 9b «3M Espe Filtek Bulk Fill»). Nach den Belastungstests konnten im Schmelz-Bereich 58,8 % und im Dentin-Bereich 41,4 % der Randspaltbereiche als fehlerhaft erkannt werden. Im schmelz- und dentinbegrenzten Kavitätsbereich verschlechterte sich der Anteil guter Randspalten im Schmelz von 8,1 auf 41,4 % und im Dentin-Bereich von 1,4 % auf 47,0 %. (s. Tabelle 9a und 9b «3M Espe Filtek Bulk Fill»).

Wie in den Abbildungen 12 und 13 der Boxplot-Diagramme 4 und 5 zu erkennen ist, gab es im Schmelz und im Dentin ca. 5 % Frakturen.

4.2.5. Material X-tra fil

Dieses Bulk Fill-Material wies bei Füllungen im Schmelz-Bereich 8,2 % und im Dentin-Bereich 0,2 % Randspaltbildung auf (s. Tabelle 9a und 9b «Voco Xtra-Fil»). Nach den Belastungstests stiegen die Werte jedoch im Schmelz auf 59,8 % und im Dentin auf 28,5 %. In schmelz- und dentinbegrenzten Kavitäten verschlechterten sich die Werte ebenfalls im Schmelz von 4,1 % auf 28,5 % und im Dentin von 28,5 % auf 34,4 % (s. Tabelle 9c und 9d «Voco Xtra-Fil»). Frakturen im Schmelz oder im Dentin konnten nicht beobachtet werden (s. in Abbildung 12 und 13 der Boxplot Diagramm 4 und 5).

4.2.6. Material X-tra base mit Grandio SO

Im reinen Schmelz-Bereich zeigten die Füllungen vor Beginn der Versuche ca. 3,1 % und im Dentin-Bereich ca. 17,1 % aller Kavitätenbereiche Beanstandungen (s. Tabelle 9a und 9b «Voco xtra base GrandioSO»). Nach den Belastungstests traten im Schmelz 48,5 % und im Dentin ca. 18,7 % Randspaltendefekte auf. In schmelz- und dentinbegrenzten Kavitäten verschlechterte sich der Anteil der eher guten Randspalten von 2,9 % auf 18,7 % und im Dentin-Bereich von 18,7 % auf 37,9 %. (s. Tabelle 9c und 9d «Voco x-tra base GandiSO»). Frakturen im Schmelz oder im Dentin konnten nicht beobachtet werden (s. Abbildungen 12 und 13 der Boxplot-Diagramme 4 und 5).

4.2.7. Material Venus Bulk Fill mit Venus Pearl

Vor Beginn der Untersuchung konnte bei 2,3 % der Füllungen schlechte Ergebnisse mit Randspalten im Schmelz von ca. 33,7 % und im Dentin nachgewiesen werden. Nach den Belastungstests sind im Schmelz 30,7 % und im Dentin 40,2 % eher schlechte Randspalten aufgetreten (s. Tabelle 9a und 9b «Kulzer Venus Bulk Fill Pearl»). Im Schmelz-Dentin-Bereich (s. Tabelle 9c und 9d «Kulzer Venus Bulk Fill Pearl») verschlechterte sich der Anteil der Füllungen mit Randspalten im Schmelz von 3,6 % auf 40,2 %. Eine mögliche Erklärung wäre, dass das Dentin-Adhäsiv aufgrund des hydrophilen Dentins die Tendenz zum Quellen besitzt. Dadurch kann es zu einer Spaltbildung kommen, die jedoch nicht unbedingt sichtbar ist – vergleichbar

einem Sektkorken in einer Sektflasche. Frakturen im Schmelz oder im Dentin konnten nicht beobachtet werden (s. Abbildungen 12 und 13 der Boxplot-Diagramme 4 und 5).

4.2.8. Material Tetric Evo Ceram mit Tetric Evo Flow Basis

Die letzte Gruppe stellt die Referenz-Gruppe der Füllungen mit Tetric Evo Ceram und normaler Kavität dar (Gruppe 11 Referenz Tetric Evo Ceram/normale Kavität). Vor und nach den Belastungstests sind im Schmelz, Dentin und in der schmelz- und dentinbegrenzten Kavität von fast 100 % eher guten Randspalten ebenso viele eher schlechte Randspalten vorhanden. Frakturen im Schmelz oder im Dentin konnten nicht beobachtet werden (s. Abbildungen 12 und 13 der Boxplot-Diagramme 4 und 5).

4.3. Zusammenfassung der Auswertung

In der folgenden Tabelle 9 werden alle Ergebnisse der Belastungstests zusammengefasst und nach Materialien sortiert (s. Perfect Margin 1 = 100 % in den Boxplot-Diagrammen).

Tabelle 9: Übersicht der Ergebnisse nach Belastungstests, sortiert nach Material (die eingefärbten Felder zeigen den Anteil in % zusätzlich grafisch an)

Bulk-Fill-Komposit	vor Belastung	nach Belastung	Verschlechterung
SDR normale Kavität im Dentin, Deckfüllung Tetric Evo Ceram (Gruppe 1)	100%	83%	18%
SDR normale Kavität im Schmelz, Deckfüllung Tetric Evo Ceram (Gruppe 1)	95%	87%	9%
SDR grosse Kavität im Dentin, Deckfüllung Tetric Evo Ceram (Gruppe 2a, 2b)	100%	85%	25%
SDR grosse Kavität im Schmelz, Deckfüllung Tetric Evo Ceram (Gruppe 2a, 2b)	95%	80%	16%
SDR normale Kavität im Dentin, ohne Deckfüllung (Gruppe 3)	75%	70%	7%
SDR normale Kavität im Schmelz, ohne Deckfüllung (Gruppe 3)	91%	88%	3%
SDR grosse Kavität im Dentin, ohne Deckfüllung (Gruppe 4)	94%	77%	18%
SDR grosse Kavität im Schmelz, ohne Deckfüllung (Gruppe 4)	94%	9%	90%
Tetric Evo Ceram Bulk-Fill grosse Kavität im Dentin, ohne Deckfüllung (Gruppe 5)	100%	45%	55%
Tetric Evo Ceram Bulk-Fill grosse Kavität im Schmelz, ohne Deckfüllung (Gruppe 5)	100%	100%	0%
Filtec Bulk-fil normale Kavität im Dentin, Deckfüllung Filtec Supreme (Gruppe 6)	92%	38%	59%
Filtec Bulk-fil normale Kavität im Schmelz, Deckfüllung Filtec Supreme (Gruppe 6)	100%	15%	85%
Xtra-Fil normale Kavität im Dentin, ohne Deckfüllung (Gruppe 7)	98%	73%	26%
Xtra-Fil normale Kavität im Schmelz, ohne Deckfüllung (Gruppe 7)	93%	34%	63%
X-tra base normale Kavität im Dentin, Deckfüllung GrandioSO (Gruppe 8)	97%	62%	36%
X-tra base normale Kavität im Schmelz, Deckfüllung GrandioSO (Gruppe 8)	97%	53%	45%
Venus Bulk-Fill normale Kavität im Dentin, Deckfüllung Venus Pearl (Gruppe 9)	100%	86%	14%
Venus Bulk-Fill normale Kavität im Schmelz, Deckfüllung Venus Pearl (Gruppe 9)	98%	71%	28%
Tetric Evo Ceram Bulk-Fill, normale Kavität im Dentin, ohne Deckfüllung (Gruppe 10)	100%	100%	0%
Tetric Evo Ceram Bulk-Fill, normale Kavität im Schmelz, ohne Deckfüllung (Gruppe 10)	100%	95%	5%
Tetric Evo Ceram normale Kavität im Dentin, Flow Basis (Gruppe 11 - Reference Gruppe)	100%	100%	0%
Tetric Evo Ceram normale Kavität im Schmelz, Flow Basis (Gruppe 11 - Reference Gruppe)	100%	100%	0%

4.4. Grafische Darstellung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt sollen rasterelektronenmikroskopische Bilder mit einer 200-fachen Vergrößerung dargestellt werden, wobei jeweils der Ausschnitt einer kastenförmigen Präparation mit Bulk Fill-Kompositfüllung gezeigt wird.

Die Angaben in den nachfolgenden Rasterelektronenmikroskopbildern werden in der Uhrzeiten-Position angegeben:

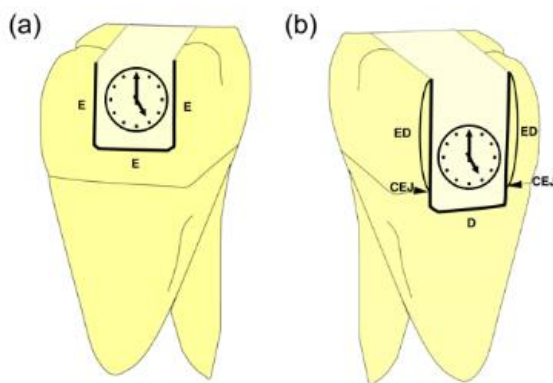


Abbildung 14: Schematische Darstellung des REM Ausschnitts

(a) Kavität nur im Schmelz (E) verlaufend

(b) Kavität im Schmelz-Dentin (ED) sowie im Übergang (CEJ) verlaufend

Gruppe 1: SDR/große Kavität

Normale Kavität mit SDR Bulk Fill-Komposit und klassisches Hybridkomposit Ceram X duo mit Adhäsiv XP Bond (s. Abbildung 15 - 17):

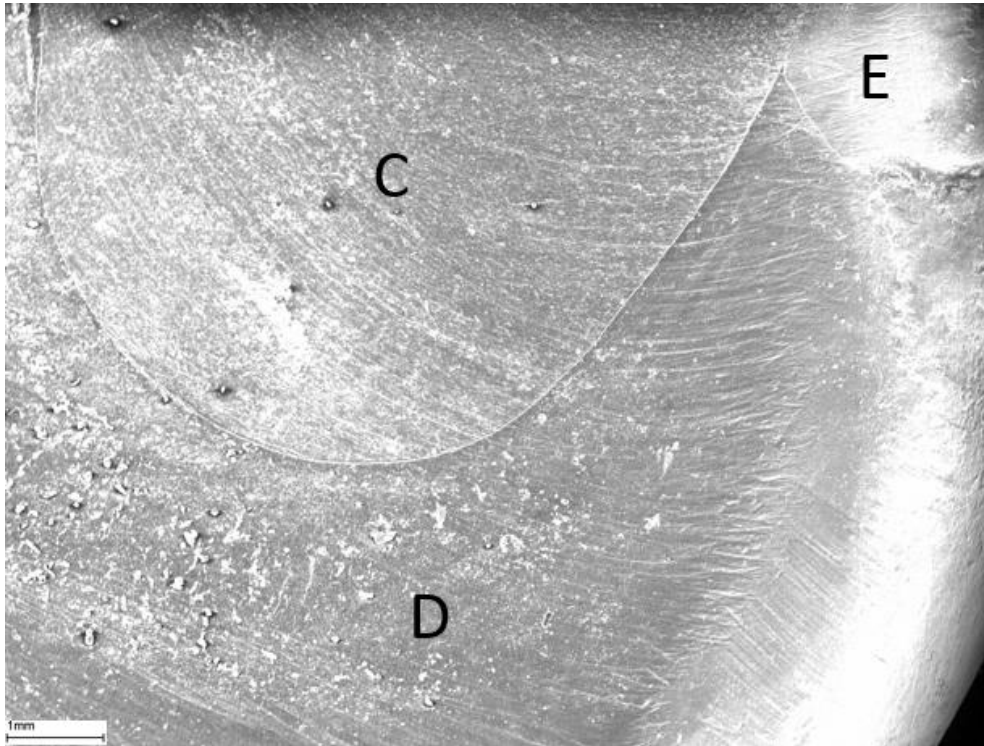
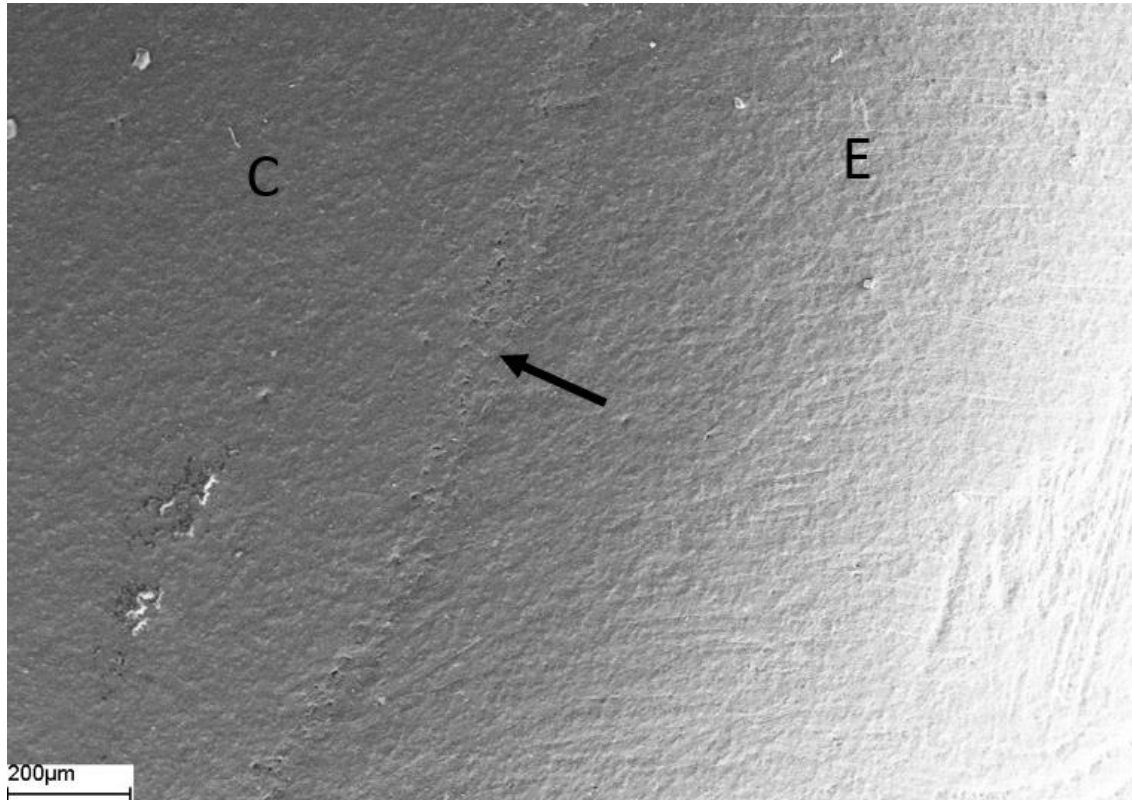


Abbildung 15: SDR mit Deckkomposit 20x
(E) Schmelz (D) Dentin (C) Komposit

In Abbildung 15 ist der Ausschnitt auf die Kavität bei einer Vergrößerung von 20 × zu sehen. Die Kavität am Übergang vom Komposit zur Zahnhartsubstanz scheint ohne Spalt zu sein. Bei der weiteren Vergrößerung werden die Defekte am Randspalt jedoch sehr gut sichtbar (s. Abbildung 16).



**Abbildung 16: SDR mit Deckkomposit
(E) Schmelz (D) Dentin (C) Komposit**

Abbildung 16, 4-Uhr-Position: Bei der 200-fachen Vergrößerung ist der Übergang vom Schmelz (E) zum Bulk Fill-Komposit (C) dargestellt. Markiert (←) ist der Übergang vom Schmelz zur Kompositfüllung. Der abgebildete Bereich des Randspaltes wurde als „nahezu perfekt“ eingestuft.

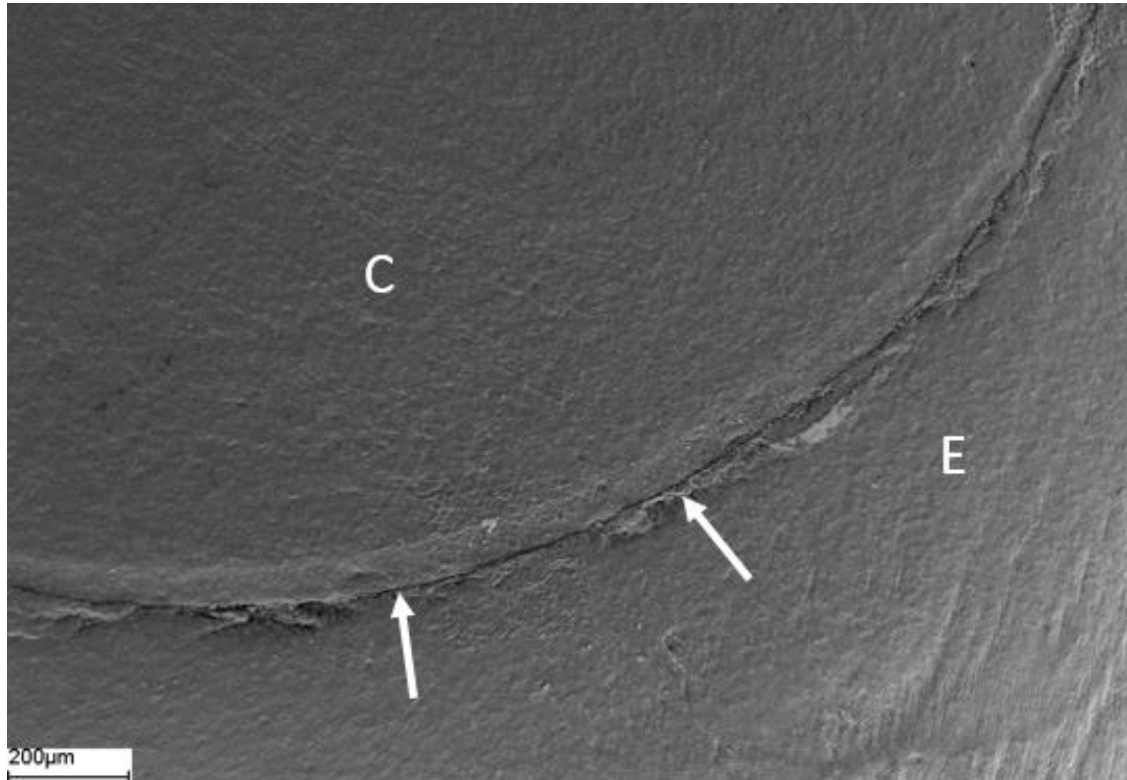


Abbildung 17: SDR mit Deckkomposit

Abbildung 17, 5-Uhr-Position: Zu sehen ist der Übergang vom Schmelz (E) zum Bulk Fill-Komposit (C). Der Übergangsbereich zeigt eine ca. 50 μm dicke Bonding-Schicht (XP-Bond), die durch die Politur stärker abgetragen wurde. Auf den Abbildungen 18 ff sind die Bonding-Schichten weniger dick dargestellt. An der Markierung (←) ist ein Randspalt zu erkennen, der sich als langer Spalt beurteilen lässt. Im Bild sind ferner auf der Schmelzseite (E) Schmelzfragmente zu erkennen, die von einer partiellen Anschrägung des Kavitätenrandes stammen könnten. Ebenso ist im Bereich der Schmelzfragmente ein Riss in der Klebefuge zu erkennen.

Gruppe 2: SDR/große Kavität

Sehr große Kavität mit SDR und klassischem Hybridkomposit Ceram X duo mit Adhäsiv XP Bond (s. nachstehende Abbildung 18):

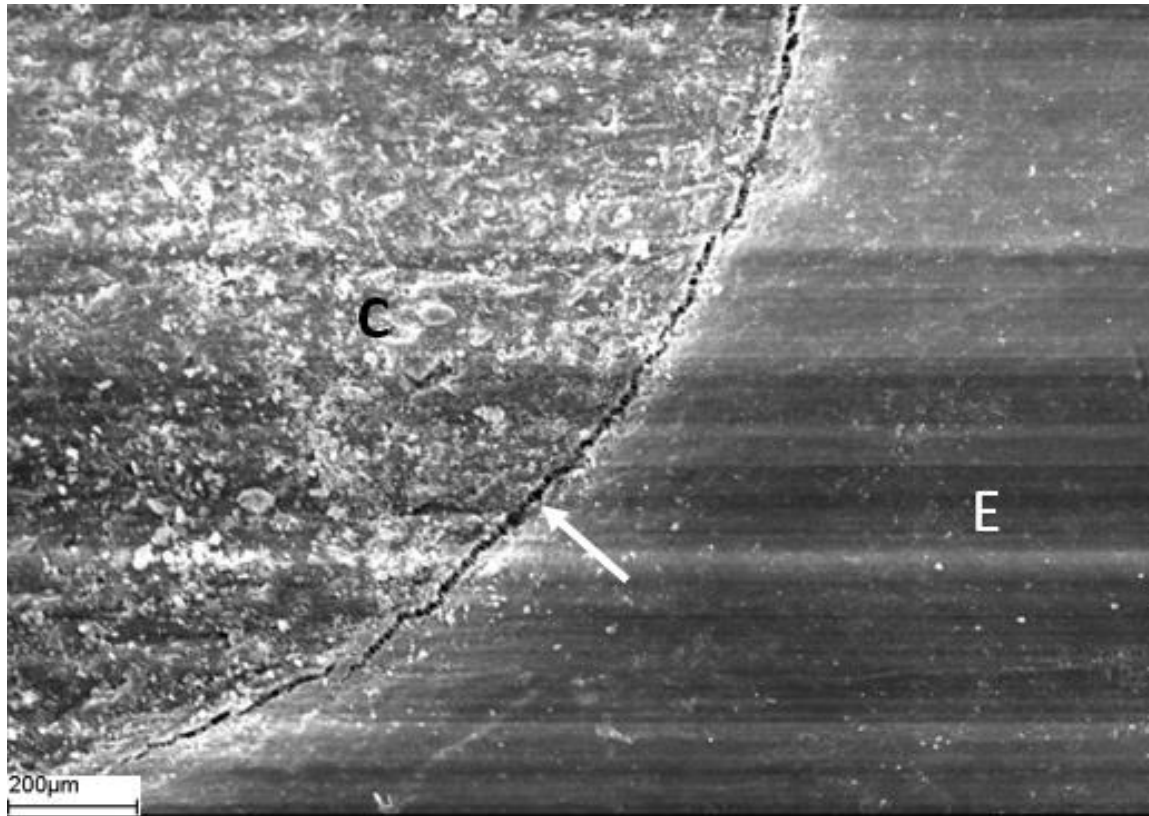


Abbildung 18: SDR mit Deckkomposit

Abbildung 18, 4-Uhr-Position: Nach Belastung durch Temperaturwechsel, Lagerung und Kausimulation wird der Übergang vom Schmelz (E) zum SDR-Komposit (C) dargestellt. Im Übergangsbereich ist eine Frakturlinie im Randspaltbereich zu erkennen. Die Ursache für das Versagen im markiertem Spaltbereich (←) kann durch diese Untersuchung nicht hinreichend erklärt werden. Die Gründe könnten sowohl durch Versagen des jeweiligen Bondings, als auch des Bulk Fill-Komposits oder in einer Kombination aus beiden Komponenten liegen.

Gruppe 3: SDR/normale Kavität

Normale Kavität mit SDR ohne deckendes Komposit mit Adhäsiv XP Bonds (s. Abbildung 19)

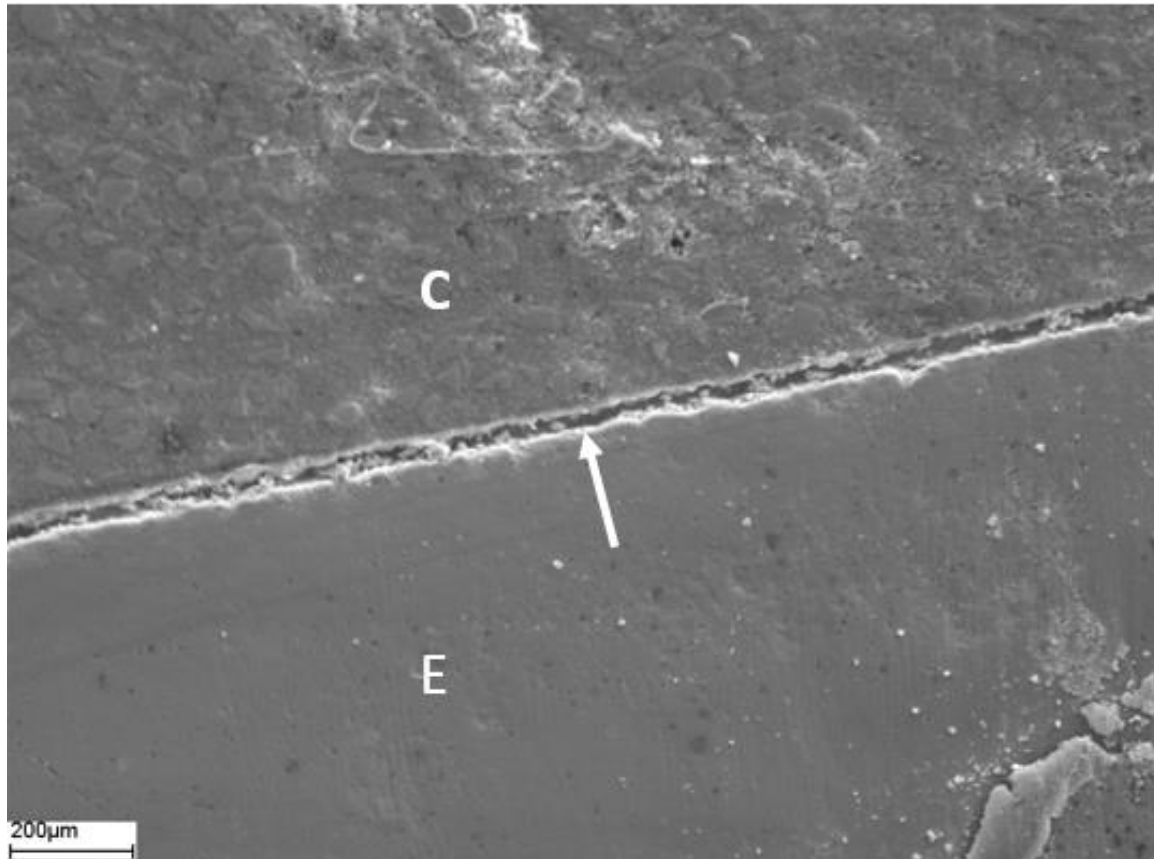


Abbildung 19: SDR

Abbildung 19, 6-Uhr-Position: Dargestellt wird der Übergang von Schmelz (E) zum SDR-Komposit (C), bei dem eine deckende Kompositschicht nicht appliziert wurde. Auffällig ist eine Frakturlinie im Randspaltbereich (←). Oben links im Bild (siehe Kreise) sind große Füllkörper zu erkennen. Auffällig ist auch, dass man keine DBA-Schicht sehen kann. In diesem Bereich scheint sie sehr dünnfließend zu sein und keinen dicken Film zu bilden.

Gruppe 4: SDR/große Kavität

Sehr große Kavität mit SDR-Komposit ohne Deckkomposit mit Adhäsiv XP Bond (s. Abbildung 20–22):

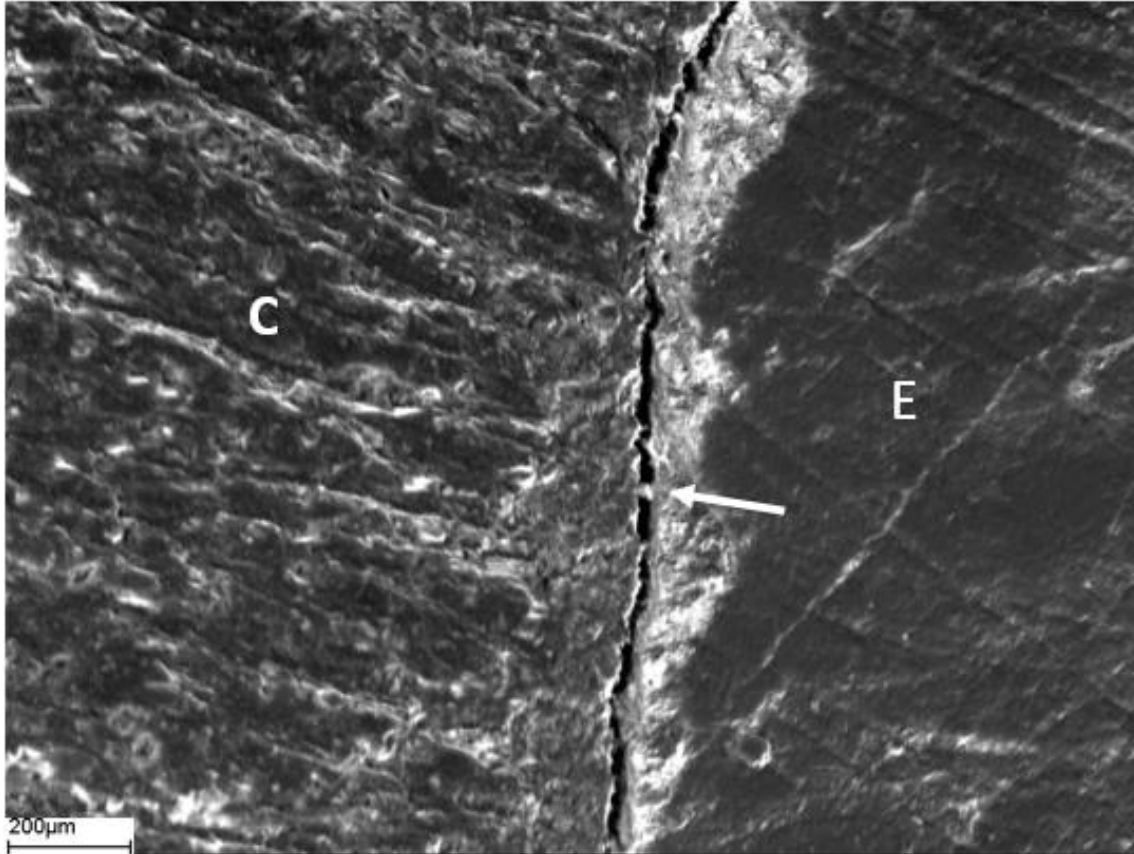


Abbildung 20: SDR

Abbildung 20, 2-Uhr-Position: Dargestellt wird der Übergang vom Schmelz zum SDR-Komposit ohne eine deckende Kompositschicht. Entlang der Frakturlinie sind Schmelzanteile weggebrochen (←). Im Bruchspalt sind kleine Verbindungsbrücken in der Bondingschicht sichtbar. Die Bondingschicht wurde gedehnt, ist aber nicht komplett abgerissen, da kleine Brücken zu erkennen sind (←).

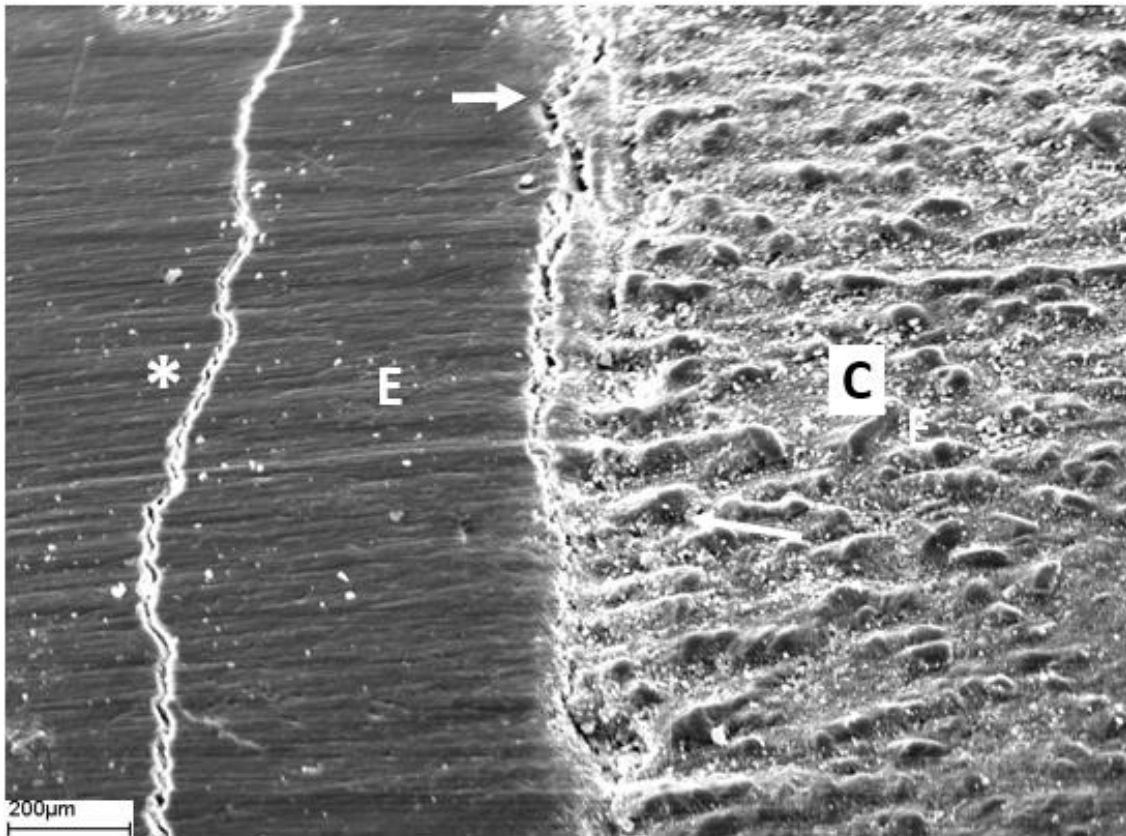


Abbildung 21: SDR

Abbildung 21, 9-Uhr-Position: Rechts neben dem Randspalt ist das Komposit (C) mit einer rauen Oberfläche dargestellt. Die raue Oberfläche zeigt zudem Füllkörper. Im linken Schmelz-Bereich (E) hat sich parallel zum Randspalt eine weitere Fraktur (*) gebildet. Erklärbar wäre diese Frakturlinie mit einem durch die Trocknung entstandenen Riss im Dentin (D).

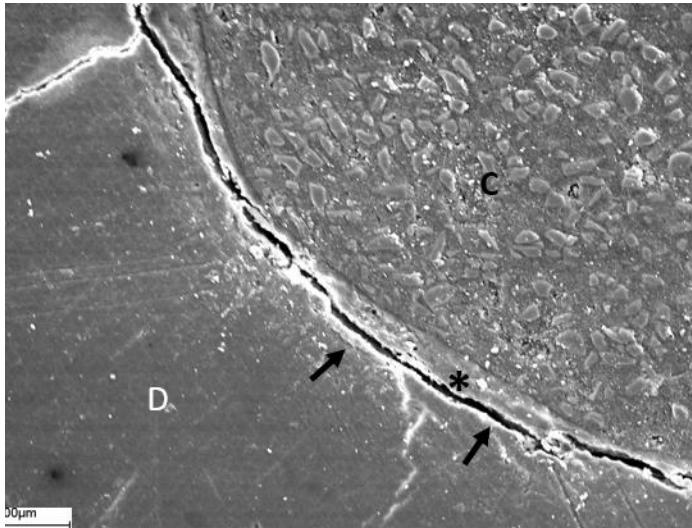


Abbildung 22 a: SDR

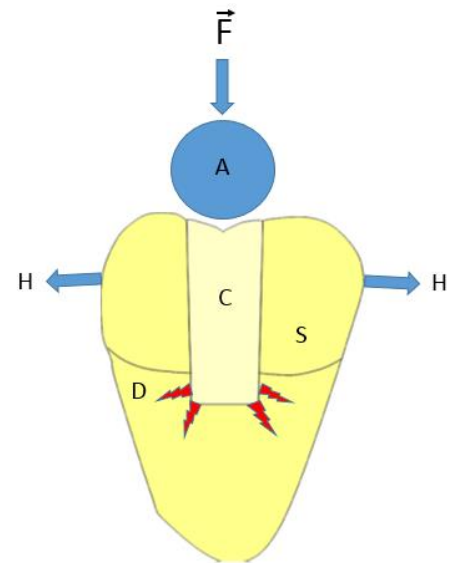


Abbildung 22 b: Ermüdung durch Überlastung

Abbildung 22 a, 8-Uhr-Position: Die dargestellte Frakturlinie verläuft im Bereich des Kavitätenrandes. Die Kräfte könnten so stark gewesen sein, dass der am Kavitätenrand des Schmelzes mit sehr großen Füllkörpern (E) verlaufende Dentin-Bereich (D) mitfrakturiert (\rightarrow) ist. Oben links ist ein weiterer Riss dargestellt, der möglicherweise durch Ermüdung und/oder Überlastung entstanden sein kann. Zu erkennen ist eine dickere Bondingschicht (*), die sich ebenfalls durch die Rissbildung vom Dentin (D) gelöst hat.

Abbildung 22 b zeigt schematisch, wie die Kräfte des Antagonisten (A) auf die Kompositfüllung (C) abgeleitet und an den Schmelz (S) und das Dentin (D) weitergegeben werden. Es bilden sich Risse (rote Pfeile), wie sie vergleichbar in Abbildung 22 a aufgetreten sind. Durch die okklusale Belastung wird das Zahnfüllungssystem deformiert. Die Last trägt dabei das Material mit dem höchsten E-Modul. Komposite haben einen E-Modul, der kleiner ist als der von Dentin. Je geringer der E-Modul des Komposits ist, umso höher ist die Belastung der Höcker. Langfristig kann dies zu Ermüdungsfrakturen führen, wie sie auch bei der Verwendung von Amalgam-Füllungen beschrieben werden.

Gruppe 5a/b: Tetric Evo Ceram Bulk Fill-Komposit

Normale Kavität mit Tetric Evo Ceram Bulk Fill-Komposit und Tetric Evo Flow-Unterfüllung und Adhäsiv DBA Exite F (s. Abbildungen 23/24):

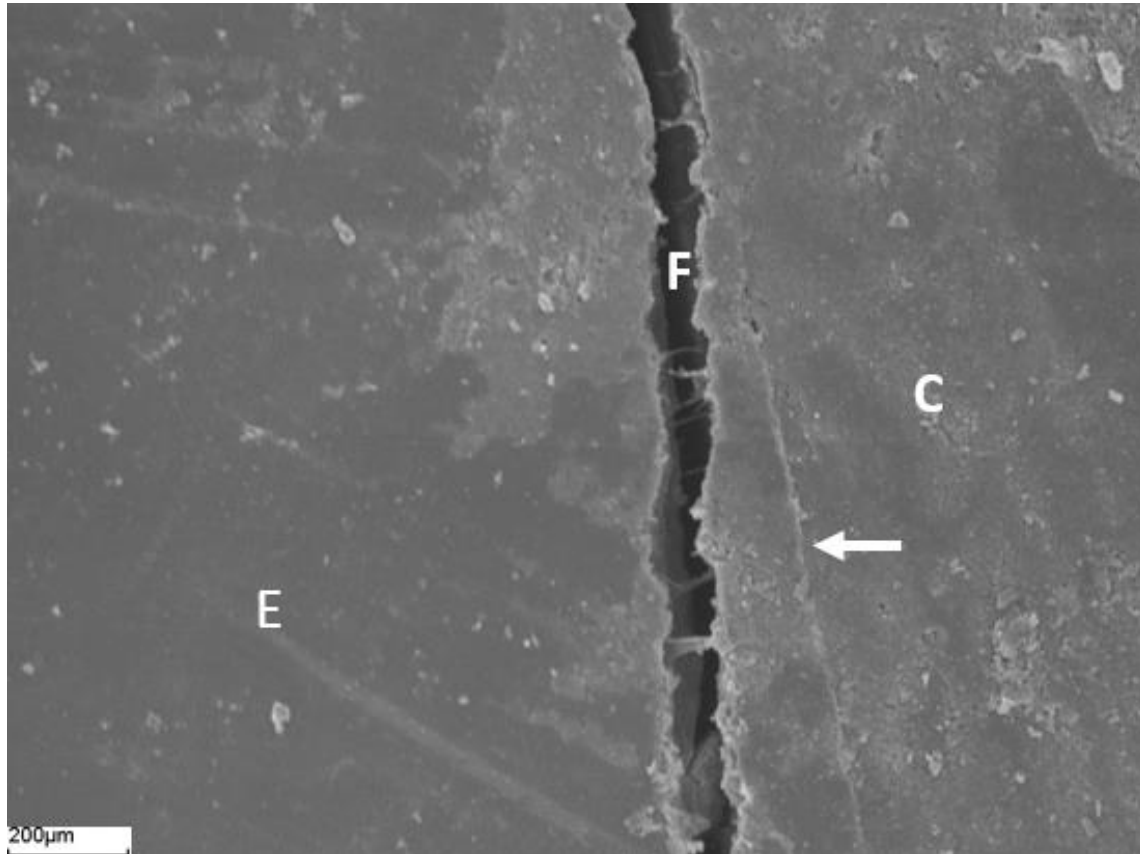


Abbildung 23: Tetric Evo Ceram Bulk Fill

Abbildung 23, 10-Uhr-Position: Die Fraktur verläuft parallel zum eigentlichen Kavitätenrand im Bereich einer zu dicken DBA-Schicht (←). Im Bruchspalt (F) sind Verbindungen zu erkennen, die man als gestreckte Polymerketten interpretieren könnte. Möglicherweise ist zuerst eine plastische Verformung durch die Temperaturwechsel-, Lager- und Kausimulationsbelastung eingetreten. Infolge dessen könnte sich der Riss gebildet haben.

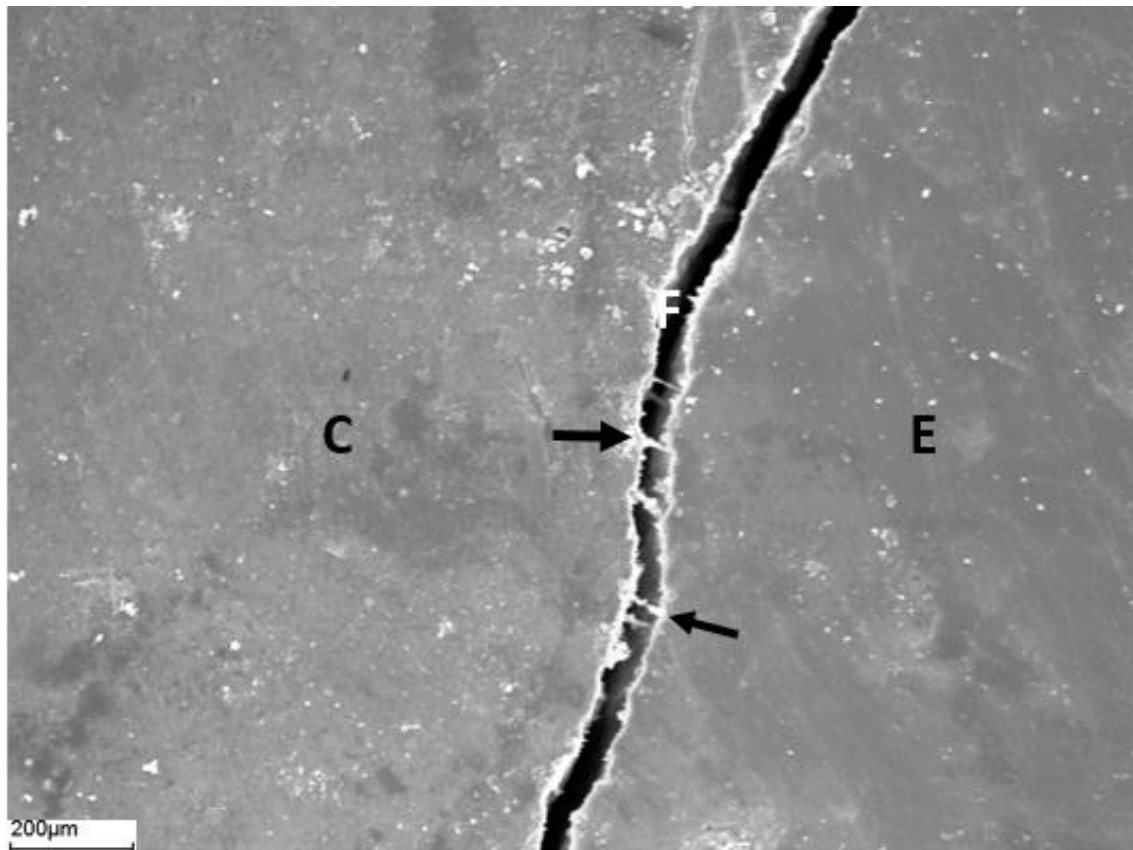


Abbildung 24: Tetric Evo Bulk Fill Komposit

Abbildung 24, 4-Uhr-Position: Im Bruchspalt werden wie in Abbildung 23, mögliche gestreckte Polymerketten dargestellt (←).

Gruppe 6: Filtek Bulk Fill

Normale Kavität mit Filtek Bulk Fill-Komposit und klassischem Hybridkomposit Filtek Supreme XTE mit Adhäsiv Scotchbond Universal (s. Abbildungen 25–28):

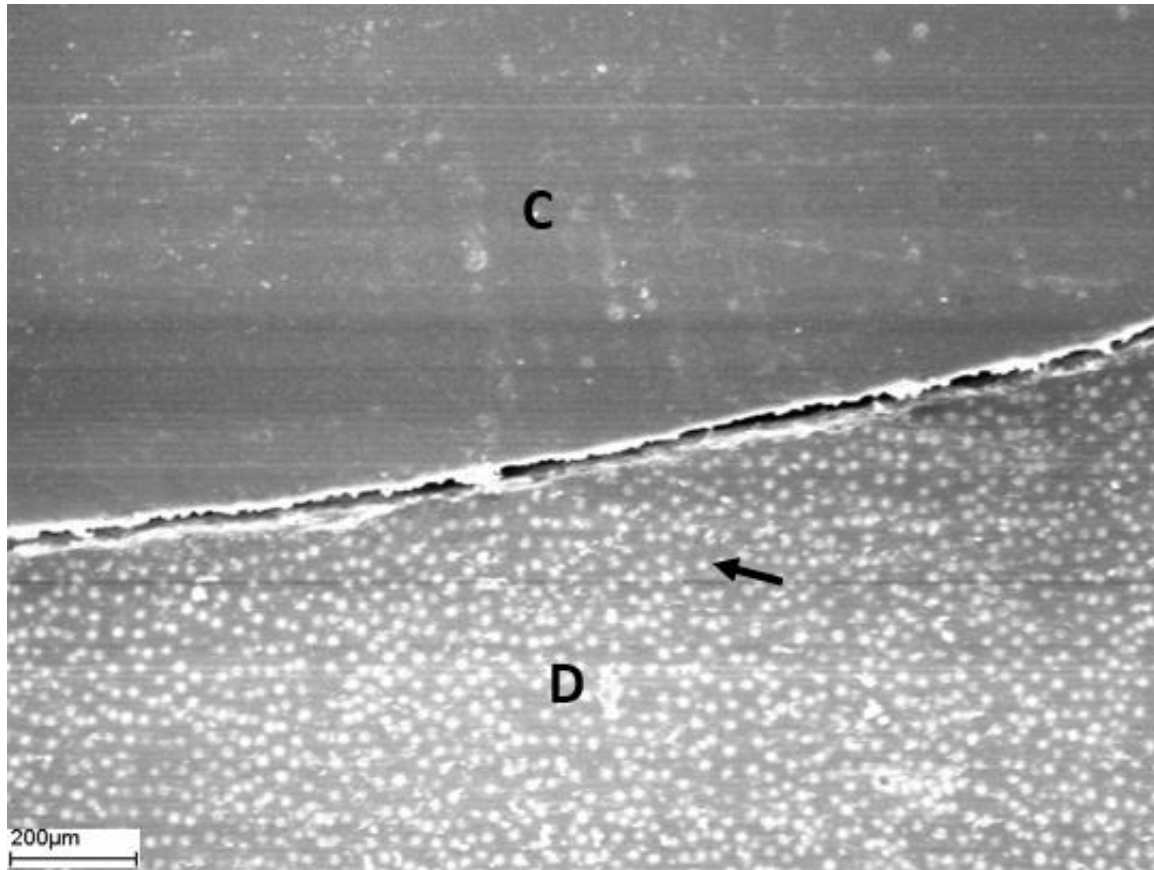


Abbildung 25: Filtek Bulk Fill

Abbildung 25, 5-Uhr-Position: Die Fraktur wird deutlich dargestellt. Das Dentin (D) ist bei der Politur möglicherweise so stark bearbeitet worden, dass sich die Wurzelzement-schicht aufgelöst hat. Zu erkennen sind weiße Tüpfelchen, die als eröffnete und mit Bonding verschlossene Dentintubuli (←) interpretiert werden können.

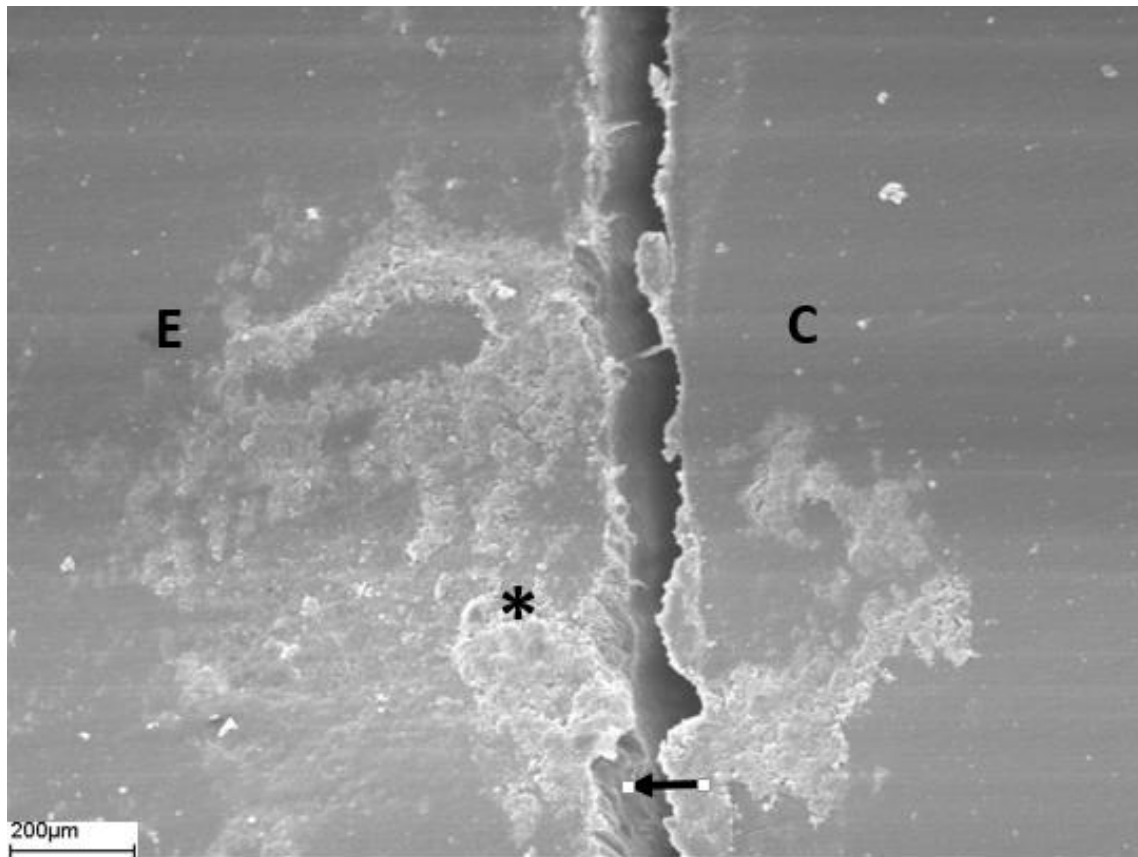


Abbildung 26: Filtek Bulk Fill

Abbildung 26, 10-Uhr-Position: Neben dem Brauchspalt mit vereinzelt Fäden aus Polymerketten sind Reste von Bonding oder Debridement an der Schmelz- und Dentinoberfläche zu erkennen (*). Der Pfeil (←) zeigt auf einen Bereich, in dem Schmelzprismen frakturiert sind.

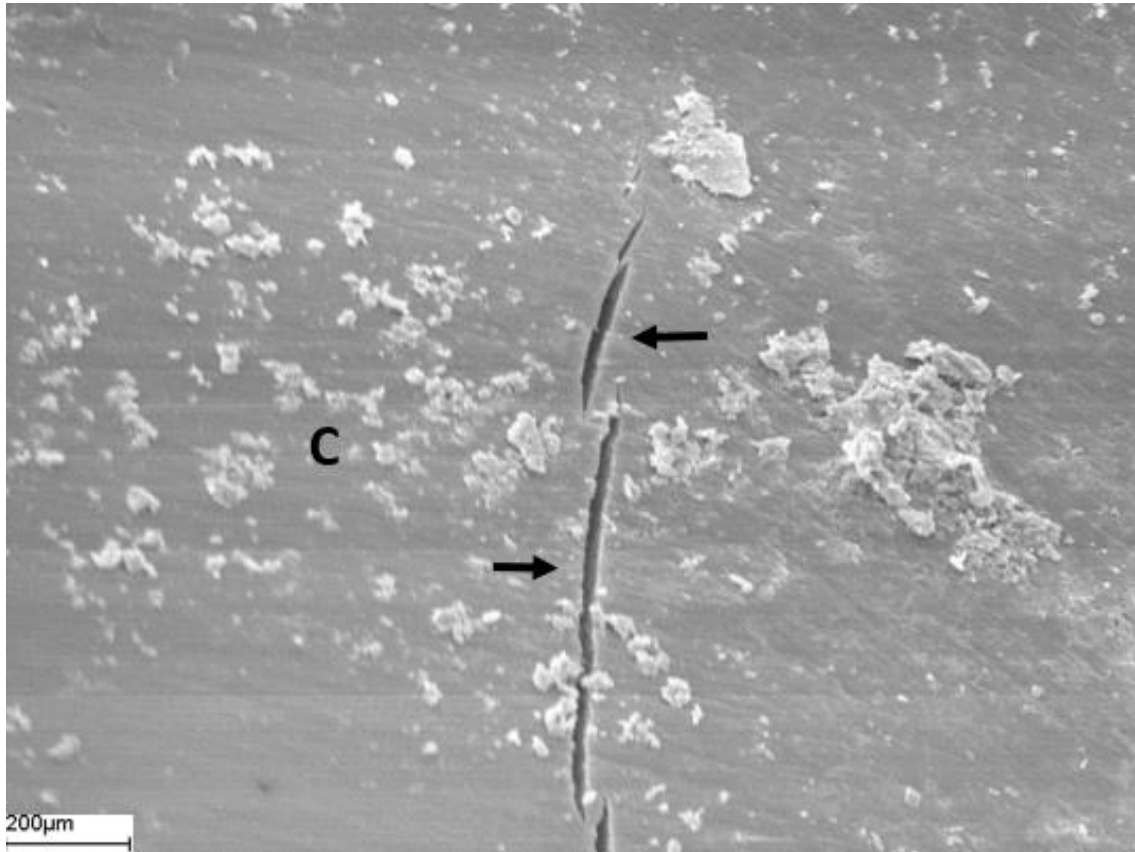


Abbildung 27: Filtek Bulk Fill

Position innerhalb der Bulk Fill-Kompositfüllung (C): Zu sehen sind durch innere Spannungen entstandene Risse (\leftarrow und \rightarrow) im Bereich der Bulk Fill-Kompositfüllung. Dies kann beispielsweise auftreten, wenn der Verbund an den Kavitätänden sehr gut ist, so dass eine Spaltbildung am Randspalt verhindert wird.

Wenn jedoch die inneren Spannungen innerhalb des Komposits so stark zunehmen, können diese beim Aushärten durch die Volumenschwindung entstehenden Spannungen nicht mehr ausgeglichen werden. Mikro- und Makrorisse sind die Folge, auch wenn der Zahn gar nicht unter funktioneller Belastung steht.

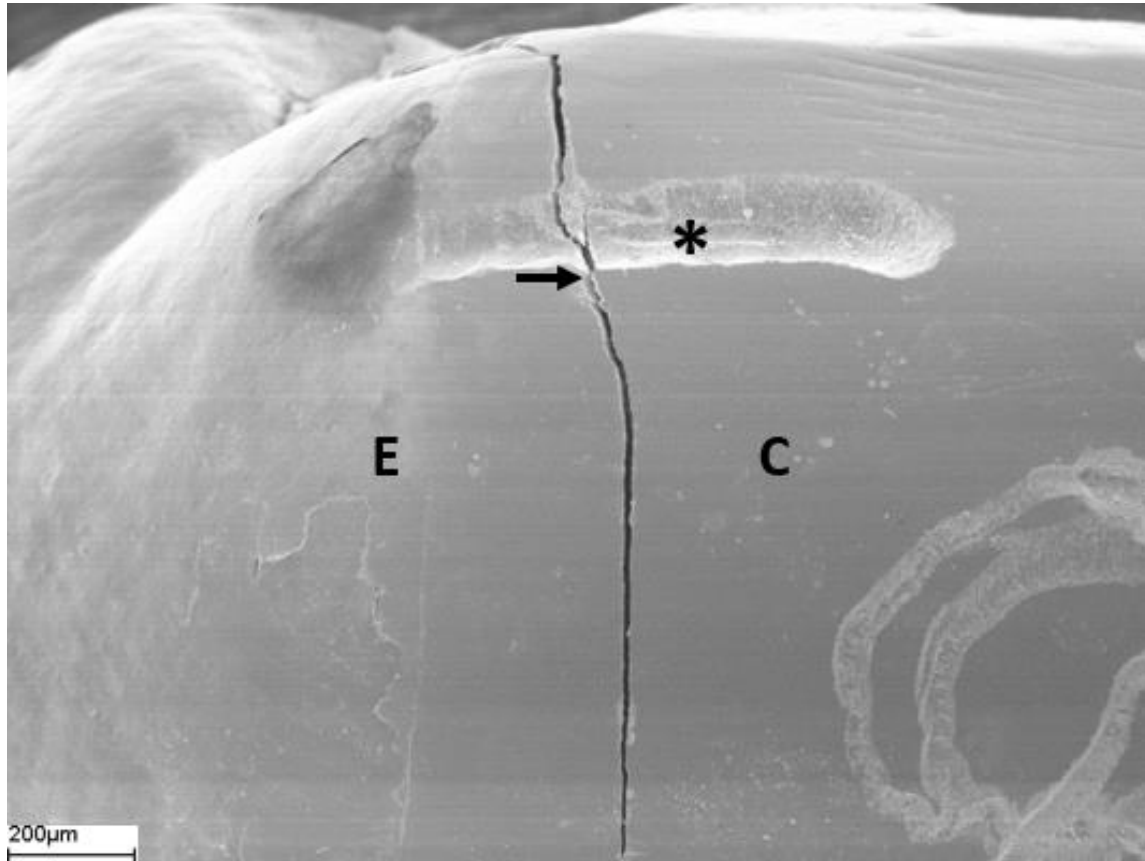


Abbildung 28: Filtek Bulk Fill

Abbildung 28 zeigt eine Aufnahme in 20-facher Vergrößerung. Zu erkennen ist das komplette Versagen der Bulk Fill-Füllung. Bei der horizontal verlaufenden Rille (*) handelt es sich um eine Markierung zum Start der Messung (→). Rechts im Bild befindet sich ein Teil der Markierung einer Gruppe.

Gruppe 7: X-tra fil/normale Kavität

Normale Kavität und klassisches Hybridkomposit X-tra fil mit Adhäsiv Futurabond DC (s. Abbildungen 29/30):

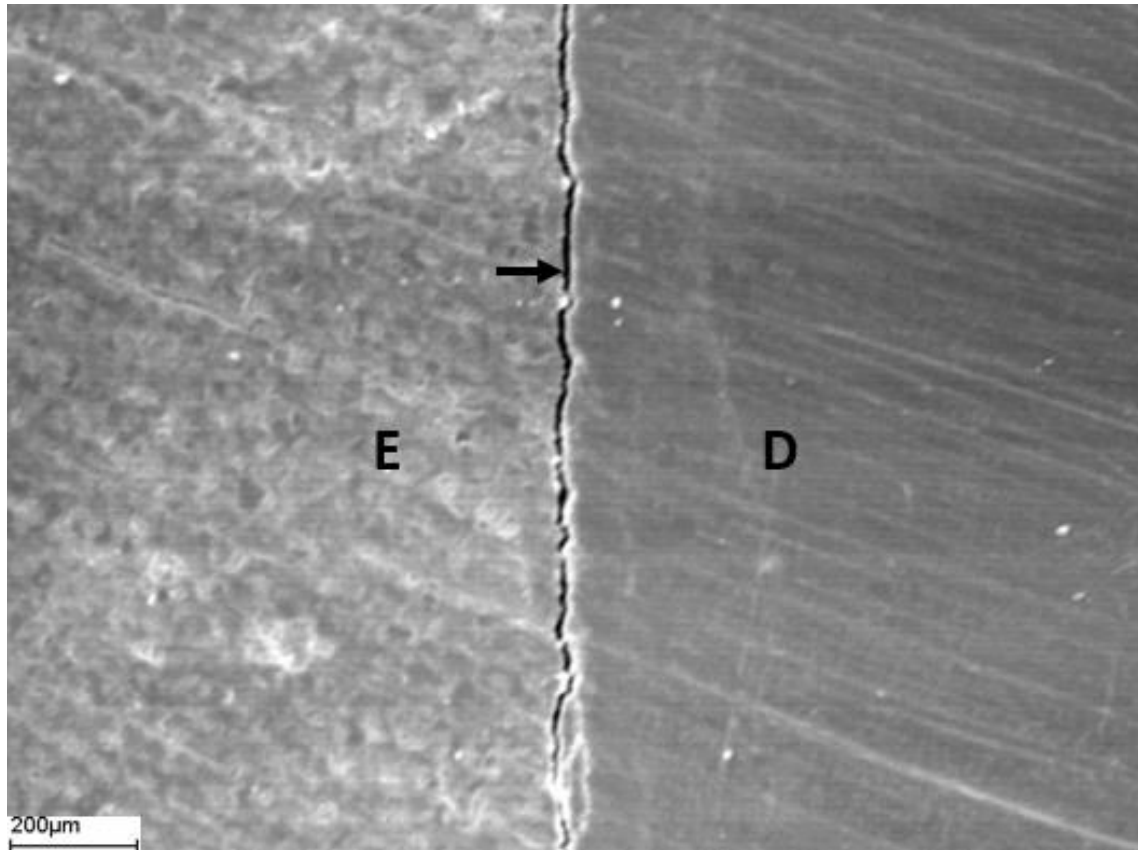


Abbildung 29: X-tra fil

Abbildung 29, 4-Uhr-Position: Im Übergang vom Komposit (C) zum Dentin (D) wird ein Randspalt entlang des Präparationsrands dargestellt (→). Obwohl Futurabond DC einen sehr guten Film in der Kavität ausbildet, könnte hier im abgebildeten Bereich keine ausreichende Benetzung stattgefunden haben.

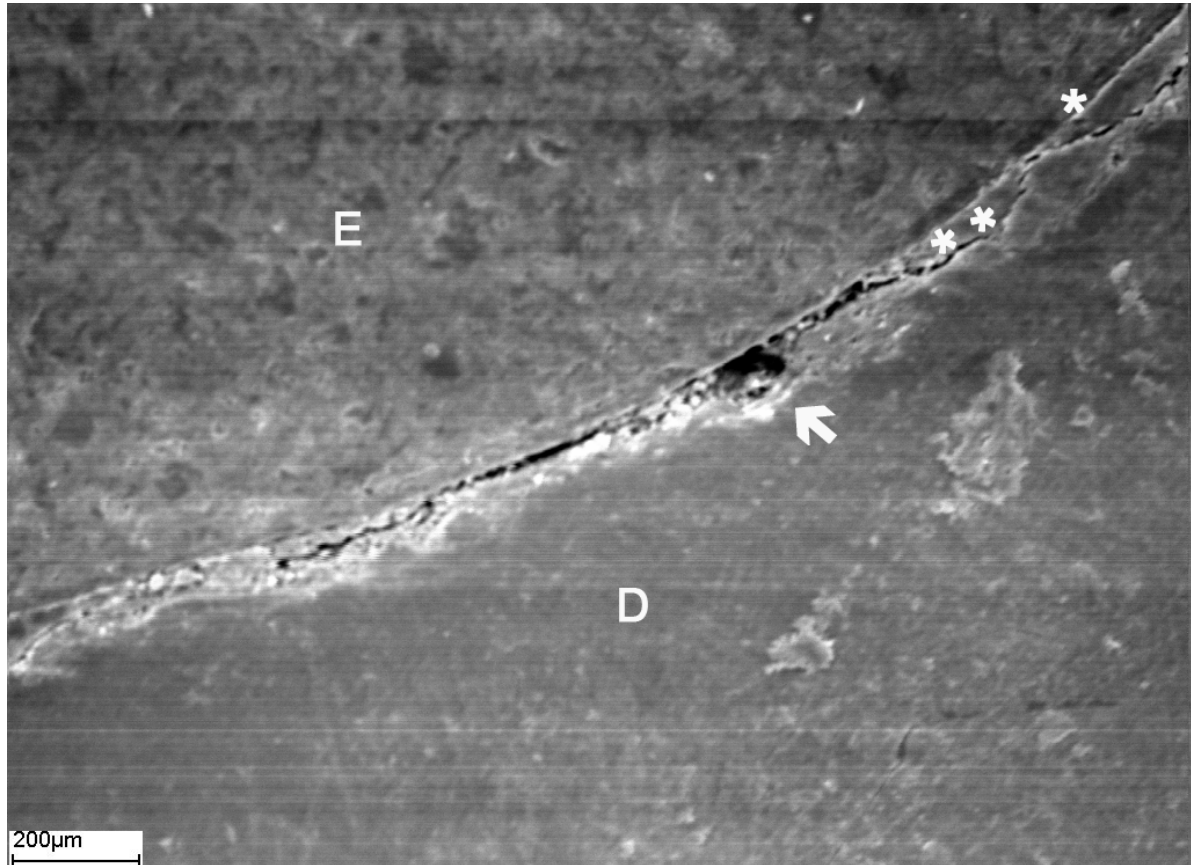


Abbildung 30: X-tra fil

Abbildung 30, 5-Uhr-Position: Entlang des Bruchspalts sind größere Ausbrechungen (↙) im Dentin (D) zu erkennen. Der Bruchspalt verläuft nicht immer entlang des Kavitätenrandes. In dem mit * markierten Bereich ist die Bondingschicht zu dick geraten. An der Stelle ** hält die Bondingschicht so gut, dass durch die Temperaturwechsel-, Lager- und Kausimulatorbelastung Teile des Dentins (D) mitfrakturiert sind.

Gruppe 8: X-tra base/normale Kavität

Normale Kavität mit X-tra base Komposit und klassischem Hybridkomposit Grandio SO mit Adhäsiv Futurabond DC (s. Abbildungen 31-32)

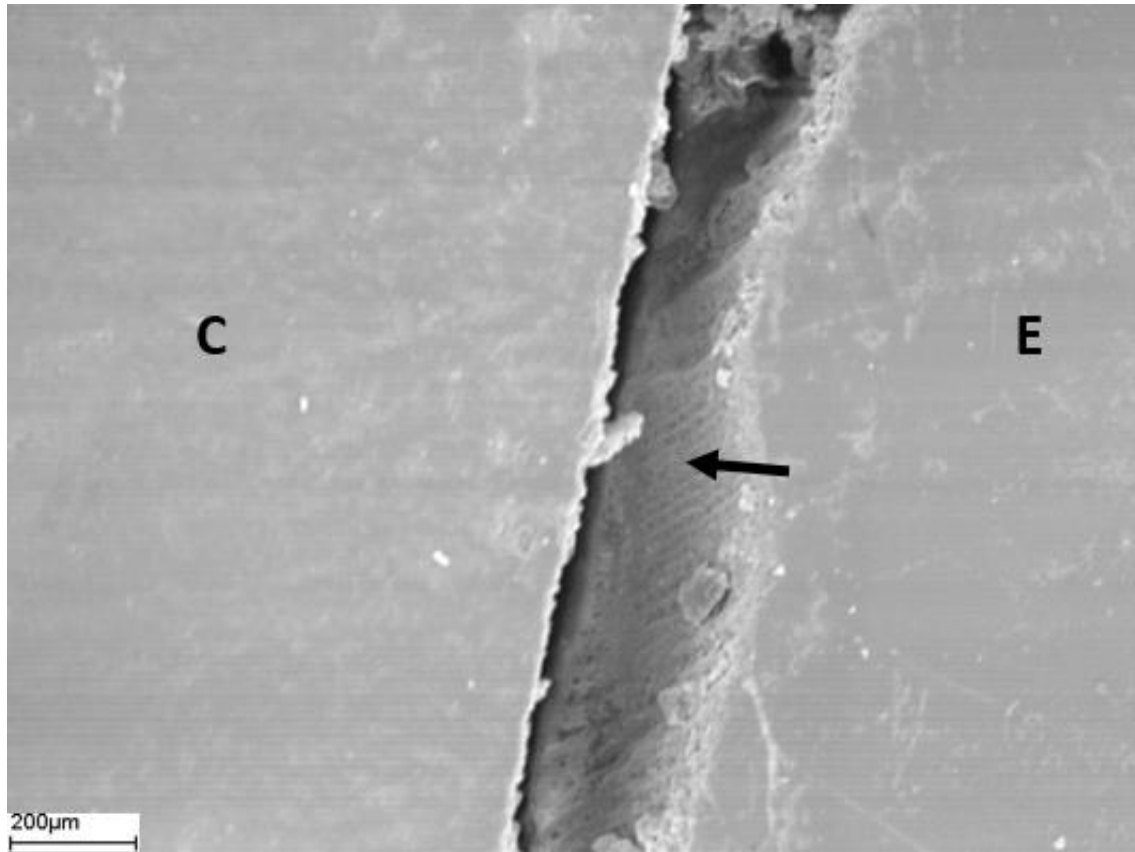


Abbildung 31: X-tra base

Abbildung 31, 4-Uhr-Position: Aus dem Bruchspalt ist ein größeres Stück Schmelz (E) herausgebrochen. An der Bruchstelle ist die schmelzprismenartige Struktur sehr gut zu erkennen (←).

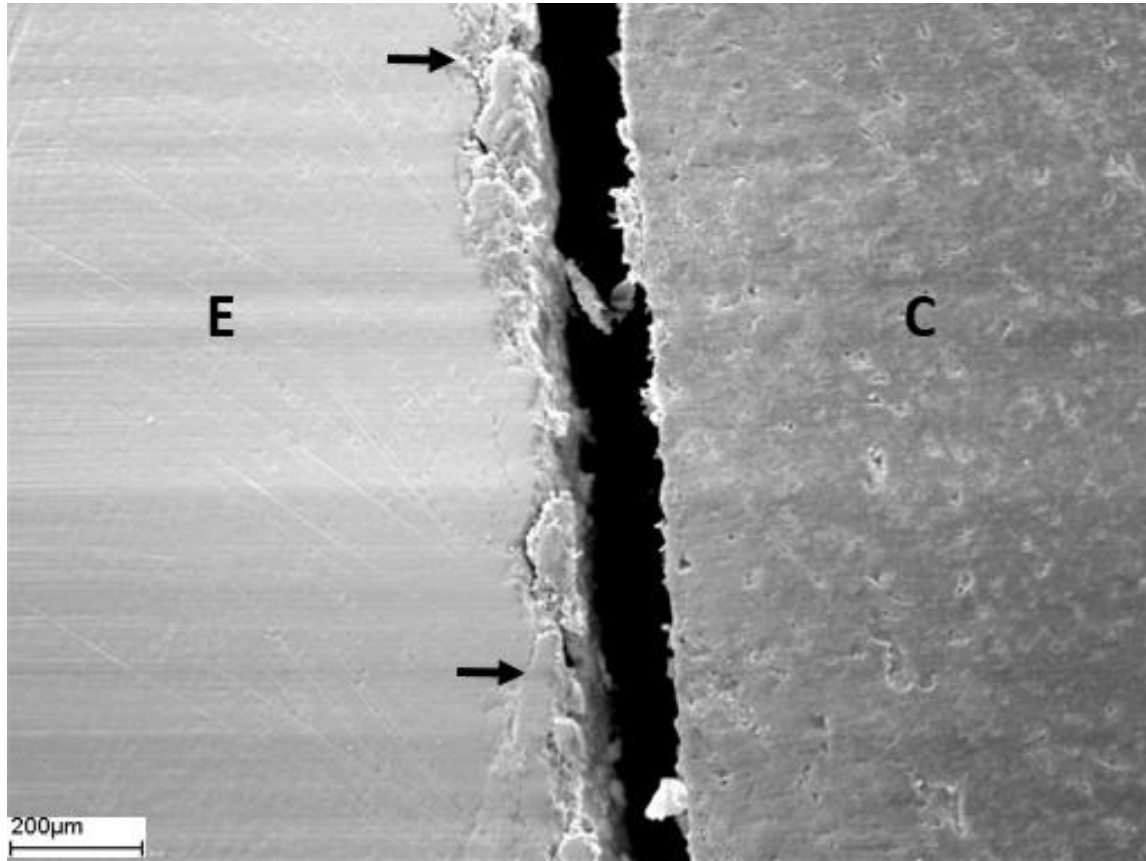


Abbildung 32: X-tra base

Abbildung 32, 9-Uhr-Position: Zu erkennen ist ein großer Bruchspalt. Bemerkenswert ist der ausgefranst wirkende Schmelzrand (→). Möglicherweise ist der diamantierte 100 μm -Bohrer für ein Versagen an dieser Stelle mitverantwortlich.

Gruppe 9: Venus BF/normale Kavität

Normale Kavität mit Venus Bulk Fill und klassischen Hybridkomposit Venus Pearl mit Adhäsiv iBond Total Etch + iBond Etch 35 Gel (s. Abbildungen 33–35):

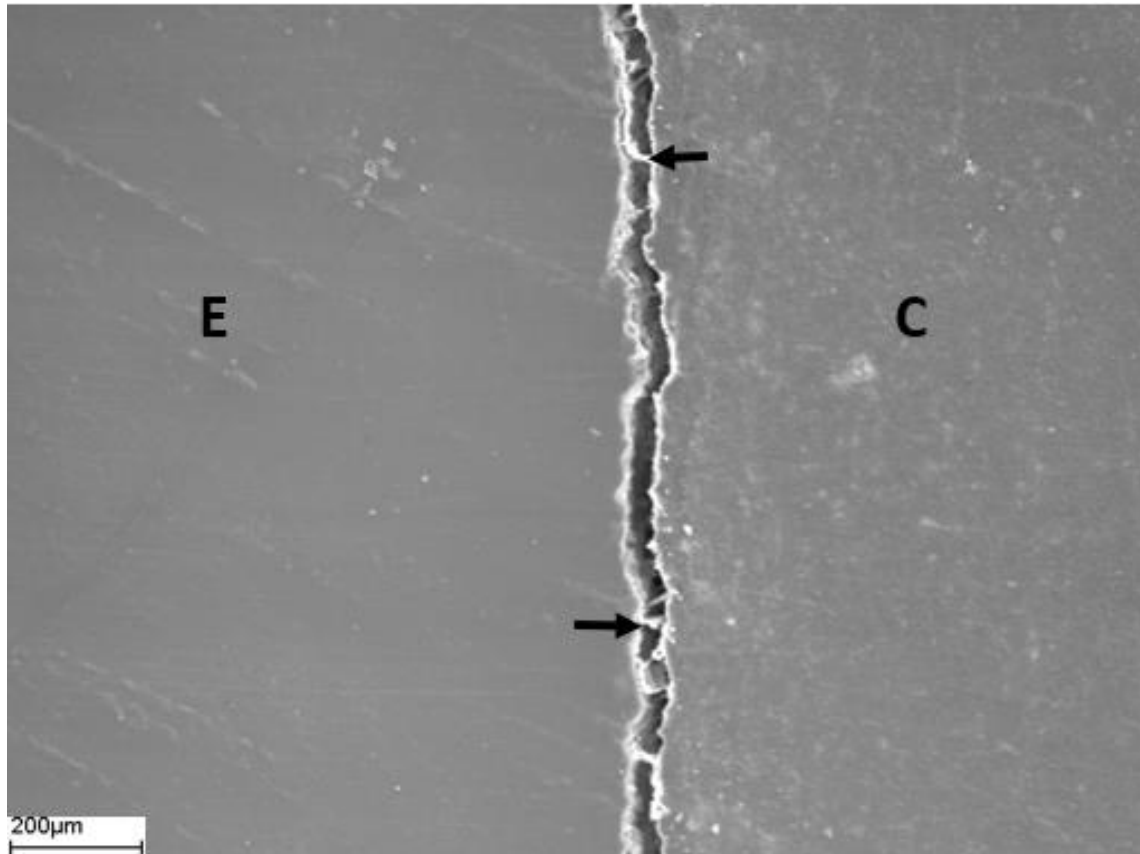


Abbildung 33: Venus Bulk Fill

Abbildung 33, 9-Uhr-Position: Dargestellt wird ein großer Bruchspalt. Auffallend ist der asymmetrische Verlauf. Gut zu erkennen sind mögliche Polymerisationsfäden im Spalt (← und →).

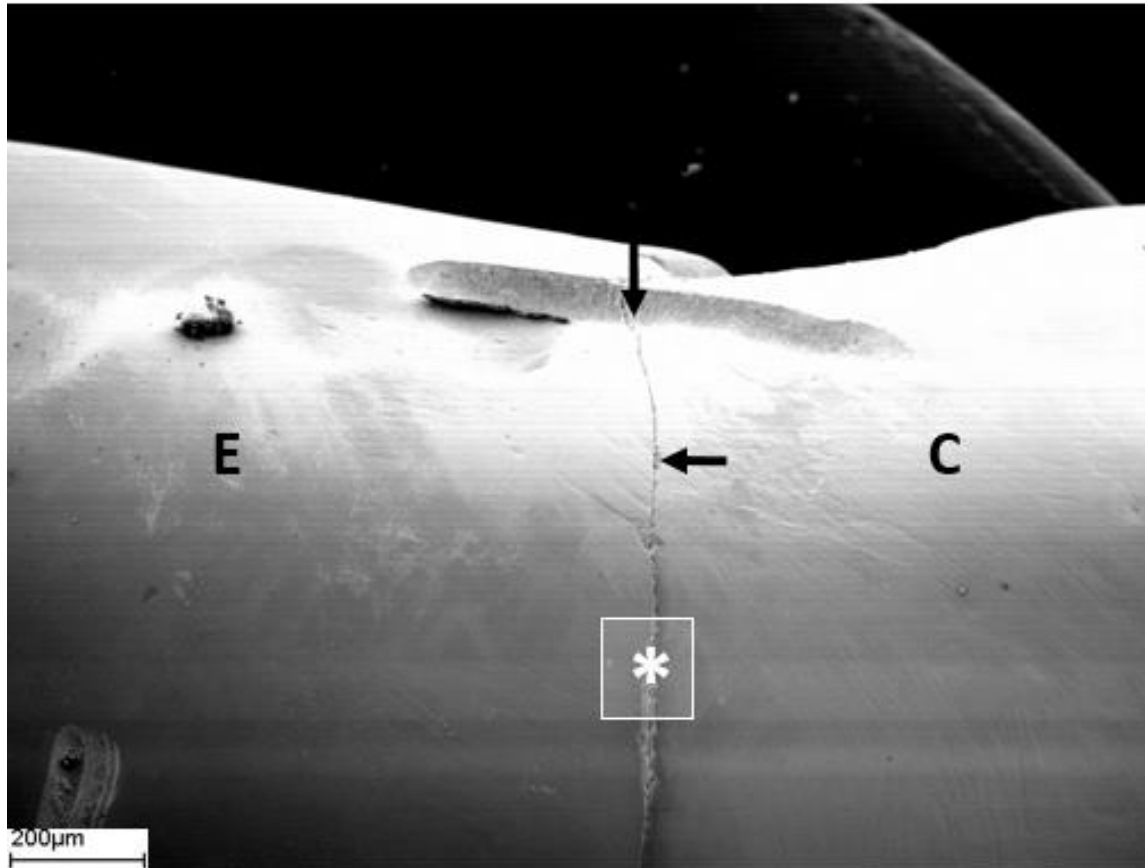


Abbildung 34: Venus Bulk Fill

Abbildung 34 zeigt eine Übersichtsaufnahme in 20-facher Vergrößerung. Zu erkennen ist ein durchgehender Bruchspalt (←). Die Markierungskerbe (↓) diente dazu, den Beginn der Messung vor und nach den Belastungstests festzulegen. Der helle Ausschnitt (*) wird in der Abbildung 35 vergrößert dargestellt.

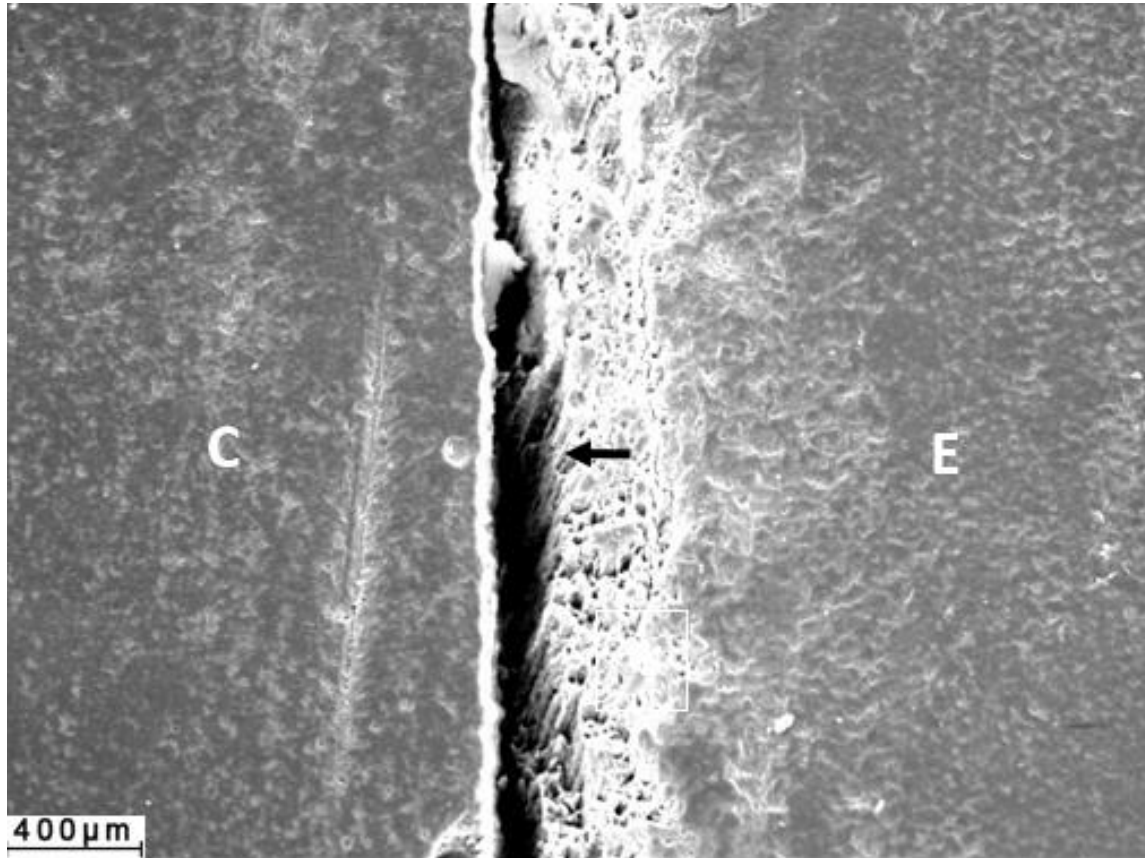


Abbildung 35: Venus Bulk Fill

Abbildung 35, 3-Uhr-Position: In der 400-fachen Ausschnittvergrößerung ist ein Materialverlust am Schmelzrand zu erkennen (←). Obwohl die Politur im diesem Bereich angesichts fehlender Politurkratzer gut zu sein scheint, sind Gefügeerschütterungen zu erkennen. Eine mögliche Ursache kann die ausgeführte Präparation sein, da einige Schmelzprismen am Übergang zur Bulk Fill-Füllung verlorengegangen sind.

5. Diskussion

Klassische Hybridkomposite werden schon sehr lange eingesetzt. Die Bulk Fill-Komposite sind dagegen im Vergleich zu den klassischen Hybridkompositen noch vergleichsweise neu. Daher ist es mit heutigem Stand schwierig, endgültige Aussagen über die Akzeptanz einer restaurativen Methode mit Bulk Fill-Kompositen in 4 mm-Inkrementen zu treffen. Ob man Bulk Fill-Komposite mit 4 mm Inkrementenschichtdicke heutzutage wie die klassischen Hybridkomposite mit 2 mm Inkrementenschichtdicke verwenden kann, müssen zusätzliche in-vitro-Untersuchungen klären. Die Untersuchung des Füllungsrandes von Bulk Fill-Kompositfüllungen nach Belastungstests TML kann Aufschluss geben, ob die Bulk Fill-Komponenten wie klassische Hybridkomposite eingesetzt werden können. Sind die Bulk Fill-Komposite so optimiert worden, dass sie in Bezug auf die Qualität der Füllungsråder mit den konventionellen klassischen Hybridkompositen mithalten können?

5.1. Material und Methode

Kontrollierte klinische Langzeituntersuchungen können Ergebnisse liefern, um Aussagen über die Verwendung von Bulk Fill-Kompositen zu liefern. In-vitro-Untersuchungen von Komposit-Materialien sind in ihrem Aussagewert eingeschränkt und erlauben nur begrenzt Schlussfolgerungen auf ihr In-vivo-Verhalten. Hingegen sind In-vitro-Studien vor und nach der Einführung von neuen Materialien wie die untersuchten Bulk Fill-Komposite unverzichtbar (Roulet, J.-F. et al. 1984).

Die in dieser Untersuchung angewandte Methode ist in zahlreichen Untersuchungen angewendet worden und kann als etabliert bezeichnet werden (Krejci, I., et al. 1990). Zu beachten ist aber, dass es in den verschiedenen Versuchsanordnungen Unterschiede geben kann. Neben der Konstruktion des verwendeten Kausimulators, kann es in der Versuchsanordnung zahlreiche Variationsmöglichkeiten geben. Als Beispiele sind die Anzahl der Kauzyklen, die Wiederholungen der Thermowechselbadzyklen und die Methode zur Auswertung der Ergebnisse und weitere zu nennen.

5.2. Kavitätenpräparation

Bei der Untersuchung wurde eine Präparationsform gewählt, die bereits mehrfach verwendet worden ist (s. Abbildung 2, Kapitel 3.4). Da in der Praxis auch grössere

Füllungen versorgt werden müssen, wurden zusätzlich auch grössere Kavitäten präpariert. Dabei wurde berücksichtigt, dass die grösseren Präparationen die Aufnahme von klassischem Hybridkomposit und auch Bulk Fill-Komposit möglich war. Es wurde sichergestellt, dass in den normalen und grossen Kavitäten auch das Überleben von Amalgam-Füllungen möglich gewesen wäre. Aus technischen Gründen wurde auf die Ansträgung der Schmelzprismen am Kavitätenrand verzichtet.

5.3. Fülltechnik

Vor Beginn der Füllung von Kavitäten wurden alle Gebrauchshinweise sorgfältig geprüft und bei der Herstellung der Füllungen alle Anweisungen genau berücksichtigt. Alle Bulk Fill-Materialien wurden entsprechend der Herstellerangaben gruppenweise appliziert. Einen besonderen Fall stellt die Gruppe 3 (SDR/normale Kavität) und die Gruppe 4 (SDR/große Kavität) dar. Hier wurde absichtlich auf die vorgeschriebenen Deckfüllungen verzichtet. Die Ergebnisse sollen zeigen, wie sich das Weglassen der vorgeschriebenen Deckfüllungen auswirkt. Zur Vergleichbarkeit mit klassischen Hybridkompositen erfolgte die Füllung der Kavitäten der Gruppe 11 Referenz Tetric Evo Ceram/normale Kavität mit der Inkrementtechnik (Krejci, I. et al. 1987).

Bei der Füllung von Kavitäten mit Bulk Fill-Kompositen hat sich gezeigt, dass die Rheologie, also das Fließ- und Deformationsverhalten, eine wichtige Rolle spielt. Die untersuchten Bulk Fill-Komposite wiesen Unterschiede in ihrer Viskosität auf. Die Verwendung der Bulk Fill-Komposite Voco Xtra-fil und Tetric Evo Ceram Bulk Fill waren durch ihre höhere Viskosität schwieriger zu applizieren. Diese Bulk Fill-Komposite hafteten im Vergleich zu den niedrigviskosen Typen schlechter an den Kavitätenwänden. Dies führte dazu, dass für das Legen der Füllungen mehr Zeit aufgebracht werden musste. Hingegen liessen sich diese Bulk Fill-Komposite jedoch sehr gut modellieren.

Die niedrig viskosen Materialien SDR, Venus Bulk Fill und X-tra base adaptierten sich dafür sehr gut an die Kavitätenwände. Besonders das Bulk Fill-Material SDR zeigte hier Qualitäten. Dafür liessen sich die niedrigviskosen Materialien schlechter modellieren. Dieser Nachteil wurde jedoch wieder ausgeglichen, da für die niedrigviskosen Materialien eine gut modellierbare deckende Schicht mit einem Hybridkomposite vorgeschrieben ist und diese wieder gut modellierbar war

Durch die Applikation einer vorgeschriebenen deckenden Hybridkomposit-Füllung und die Modellation der okklusalen Morphologie war der Zeitaufwand bei den niedrigviskosen Bulk Fill-Kompositen etwas höher. Zusätzliche Zeit wurde benötigt, wenn der Wechsel einer Compula-Spritze erfolgte und eine zusätzliche Lichthärtung durchgeführt werden musste. Für den Behandler in der Praxis bedeutet dies, dass mehr Material am Behandlungsplatz vorgehalten werden muss. Der Aufwand für Logistik und Sterilisation erhöht sich dadurch und verlängert die effektive Behandlungszeit so leicht um ca. 2 - 5 Minuten. Da beim Legen von hochviskosen Bulk Fill-Kompositen die Deckfüllung entfällt, kann die letzte Schicht einfacher modelliert und ausgehärtet werden.

5.4. Lichtpolymerisation

Eine ausreichend lange und starke Lichtpolymerisation ist für ein Bulk Fill-Komposit ein wichtiger Erfolgsfaktor. Nur mit ihr ist eine ausreichende Durchhärtungstiefe von 4 mm-Inkrementeschichten möglich. Infolge dessen sind die korrekte Polymerisationszeit, eine ausreichend hohe Lichtintensität sowie eine bestmögliche Positionierung des Lichtaustrittsfensters der Polymerisationslampe an der Bulk Fill-Füllung besonders wichtig. Werden in der Praxis unterschiedliche Komposite eingesetzt, so muss den verschiedenen Polymerisationszeiten Rechnung getragen werden. Auch die Wahl einer geeigneten Polymerisationslampe für alle verwendeten Komposite in der Praxis ist von hoher Bedeutung.

Da die Bulk Fill-Komposite eine höhere Transluzenz besitzen, sind diese nur in wenigen Farbvariationen erhältlich. Unter Umständen kann das ästhetische Ergebnis die im Allgemein gestiegenen Ansprüche der Patienten nicht zufriedenstellen.

5.5. Ausarbeitung und Politur

Für die Beständigkeit einer Komposit-Füllung ist eine optimale Politur von hoher Bedeutung. In der Untersuchung war die Ausarbeitung der Bulk Fill-Füllungen deutlich einfacher als im Patientenmund. Die Füllungsüberstände konnten in vitro sehr gut mit dem gelben Finierdiamanten Nr. 8836KR (Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo, Deutschland) entfernt und mit den Sof-Lex Ausarbeitungs- und Polierscheiben (3M Espe GmbH, Seefeld, Deutschland) poliert werden. Für die Ausarbeitung der Füllung standen eine Lupenbrille mit 2,5-facher Vergrößerung sowie ein Dentalmikroskop der

Firma Zeiss mit fünffachem Vergrößerungswechsler zur Verfügung. Im Unterschied zu den beengten Verhältnissen im Patientenmund, konnte die Ausarbeitung der Bulk Fill-Füllungen in vitro bestmöglich durchgeführt werden.

Die Polierbarkeit und der bestmögliche Glanz einer Kompositfüllung sind abhängig von der im Kompositen enthaltenen kleinen und großen Füller. Da große Füller keine so glatten und glänzenden Oberflächen ermöglichen, haben die Hersteller von Bulk Fill-Kompositen mehr kleine Partikel in ihre Bulk Fill-Materialien eingebracht. Bei Tetric Evo Ceram Bulk Fill ist im Verhältnis zu den anderen Bulk Fill-Kompositen ein höherer Anteil von kleinen Füllergrößen enthalten. Daneben besitzt dieses Bulk Fill-Komposit zusätzlich ca. 17 % Präpolymerisate. Dies führte in der Untersuchung zu einer leicht schwierigeren Polierbarkeit. Aus diesem Grund ist bei Bulk Fill-Kompositen der zeitliche Aufwand für die Ausarbeitung und Politur der Füllung höher. Eine weniger gute Ausarbeitung und Politur von höherviskosen Füllungsmaterialien kann sich beim Herausbrechen von Verschleißpartikel ergeben (s. Verschleißpartikelbildung, Kapitel 2.7, Versagen von Kompositfüllungen). Die Folge ist eine rauere Oberfläche, die zu einer vermehrten Plaqueretention und zu Verfärbungen führen kann (Roeters, J. et al. 1991).

5.6. Thermische und mechanische Wechselbelastung

Das Zahnhartmaterial und der Bulk Fill-Kompositwerkstoff besitzen unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten. Im Mund kommt es durch heiße und kalte Speisen zu Temperaturschwankungen, die in der Verbundzone von Zahnhartsubstanz und Restauration zu Spannungen führen. Mithilfe der thermischen und mechanischen Wechselbelastung TML wurde diese Beanspruchung simuliert. In anderen Untersuchungen haben sich bei der thermischen Belastungssimulation eine Temperaturdifferenz von 5 zu 50°C mit einer Verweildauer von 30 s, 5 s Abtropfzeit und insgesamt 2 000 Wiederholungen durchgesetzt (Blunck U., 1988, Kunzelmann K.H., 1998). Zur optimalen Auspolymersation der Bulk Fill-Füllungen, diese für 24 h bei 37,5°C in einer Ringer-Lösung gelagert. Um eine im Mund entsprechende Belastung der Füllung zu simulieren, wurde mit einem computergesteuerten Kausimulator München 2 der Firma Willytec im Wasserbad bei gleichbleibender Temperatur (Zimmertemperatur) eine nahezu realistische Nachbildung der Kaubelastung durchgeführt (Krejci, I., et al. 1990, Kunzelmann K.H., 1998). Die mit Bulk Fill-Komposit gefüllten

Zähne wurden auf Hartgummisockeln gelagert und okklusal mit einer senkrecht einwirkenden Kraft von 50 N belastet, die jeweils für weniger als 1 s einwirkte. Jeder Zahn wurde auf diese Weise mit 50 000 Zyklen belastet. Die Hartgummilagerung ermöglichte dabei geringe Ausgleichsbewegungen, die eine gewisse Eigenbeweglichkeit des Zahnes im Parodont simulierte. Als Antagonisten dienten kugelförmige Degussit-Körper, die einen Durchmesser von ca. 3 mm aufwiesen. Diese Degussit-Körper entsprechen nahezu der Härte und dem Abrasionsverhalten des Zahnschmelzes (Kunzelmann K.H., 1998) und (Wassell, R.W. et al. 1992). Die durchgeführte thermische und mechanische Wechselbelastung konnte so eine Tragedauer von ca. 5 Jahren simulieren, die mögliche Risse offenbart und Zeit und Kosten optimal ausnutzt (Kunzelmann K.H., 1998).

5.7. Replikattechnik und Quantitative Randanalyse

In vielen Untersuchungen werden heutzutage dieselben Materialien getestet. Dabei variieren die Ergebnisse oft. Etablierte Testmethoden für Kompositmaterialien sind z. B. die am weitesten verbreiteten einfachen Zug- und Scherhaftungstests (Versluis et al., 1997). Obwohl diese Tests einfach durchzuführen sind, bieten sie nicht die Möglichkeit, die anatomischen Verhältnisse von Zähnen nachzubilden. Auch kann die Schrumpfung des Komposits lediglich in einer Dimension berücksichtigt werden. Ein weiterer Nachteil von Zug- und Scherhaftungstests ist, dass der C-Faktor nicht realitätsnah simuliert werden kann. In echten Zahnkavitäten ist der C-Faktor höher als in den Proben (Frankenberger, 2001). Als weiterer Nachteil ist zu nennen, dass die Ergebnisse von Zug- und Scherhaftungstests eine große Streubreite aufweisen können (Finger, J. W. 1988).

Eine andere Untersuchungsmethode basiert auf Farbstoffpenetrationstests, die heutzutage aber nicht mehr favorisiert werden. Obwohl Undichtigkeiten farblich gut dargestellt werden, können die Ursachen für die Undichtigkeiten nicht eindeutig dem Kompositmaterial oder dem Dentin-Bonding-Agent-System zugeordnet werden. Bei der Untersuchung von Bulk Fill-Materialien wird stets eine Kombination aus einem Bulk Fill-Material und einem empfohlenen Adhäsivsystem getestet. Die Undichtigkeiten können dabei verschiedene Ursachen haben, die mit der Hydrophilie des Dentins oder dem Versagen des Adhäsivsystems zusammenhängen können.

Vielversprechender sind zurzeit für Untersuchungen an mit Bulk Fill-Komposit versorgten Zähnen die Verwendung eines „OCT 3D“ Gerätes (Optical coherence tomography) oder eines „MicroCT“ Gerätes (Micro-computed x-ray tomographic). Bei der Untersuchung mit einem OCT 3D handelt es sich um ein bildgebendes Verfahren, das nahezu genaue reproduzierbare dreidimensionale Darstellungen ermöglicht. Ein großer Vorteil ist, dass bei der dreidimensionalen Untersuchung die Probe nicht verändert wird. Der Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass die Darstellung bei heutiger Technik auf eine Tiefe von 2 bis 3 mm limitiert ist (Fujimoto J.G. et al). Im Gegensatz dazu bietet die MicroCT 3D-Technik eine wesentlich höhere Untersuchungstiefe mit einer höheren Auflösung. Mit einem heutigem MicroCT 3D sind dreidimensionale Darstellungen von ca. $8 \mu\text{m}^3$ im High Resolution-Modus möglich. Dabei wird jedoch die zu untersuchende Probe mittels Substrat irreversibel verändert. Nach der Penetration von Silbernitrat diffundiert dieses in die Probe und offenbart damit in einen möglichen Spalt. Bei der Verwendung eines MicroCT 3D-Gerätes lässt sich jedoch schwer bestimmen, ob ein Spalt durch eine Kompositablösung in der Tiefe der Kavität oder durch die thermomechanische Belastung an der Oberfläche entstanden ist.

Bei dieser Untersuchung wurde die Oberfläche von Bulk Fill-Füllungen nach einer Thermozyklus- und Kausimulation (TML) beurteilt. Dabei wurde der Anteil der schlechten Randspalten in der gesamten Bulk Fill-Füllung gemessen und bewertet. Besitzt eine Bulk Fill-Füllung einen grossen Anteil von schlechten Randspalten, ist die Gefahr von Sekundärkaries erhöht und die Haltbarkeit einer Bulk Fill-Füllung herabgesetzt. Um die Randspalten von Füllungen bewerten zu können, hat sich die quantitative Randanalyse mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops in zahlreichen Studien durchgesetzt. Für dieses Verfahren spricht, dass mit Hilfe der erstellten Replika der Bulk Fill-Füllungen eine sehr hohe Abform- und Wiedergabegenauigkeit erreicht werden kann. Damit erreicht die Methode eine hohe Genauigkeit und Präzision (Krejci et al., 1994). Es ist von Vorteil, dass die Bulk Fill-Füllungen bei dieser Methode unverändert bleiben können und die Herstellung weiterer Replika möglich ist (Roulet, J. F. et al. 1987). Replika von Bulk Fill-Füllungen können mit dem Abformmaterial Impregum Penta Soft hergestellt werden, die über eine Genauigkeit von ca. $60 \mu\text{m}$ verfügen (3M Espe Impregum Penta Soft: Technisches Produkt Profil). Die auf diese Weise hergestellten Replika können frakturierte Bulk Fill-Füllungen zei-

gen oder Randspalten von ca. 25 µm sichtbar machen (Roulet, J.F. et al. 1987, Gängler et al., 1990). Mit der Auswertungssoftware QuantiGap und jQuantiGap (www.kunzelmann.de) lassen sich die Randspaltbereiche quantifizieren (Blunck, U. 1989). Auf diese Weise lassen sich die Messungen von guten und schlechten Randspalten innerhalb einer Bulk Fill-Füllung erfassen (Kunzelmann et al., 1993, Krejci et al., 1994). Anschliessend ist eine statistische Auswertung mit dem Statistikprogramm „R CRAN“ möglich (Kurt Hornik, Institute for Statistics and Mathematics, Wien, Österreich, Haller, B. 1994).

5.8. Diskussion der Ergebnisse

Bei der Bewertung von Bulk Fill-Füllungen wurde angenommen, dass eine Füllung noch akzeptabel ist, wenn nahezu 80 % und mehr des Randspaltenbereichs einer Füllung perfekt sind. Die folgenden Tabellen zeigen den prozentualen Anteil der perfekter Randspalten der jeweiligen Bulk Fill-Füllung im Schmelz- oder Dentinbereich.

Tabelle 10: Ergebnisse der Randspaltanalyse im Schmelz

Bulk-Fill-Komposit	vor Belastung	nach Belastung	Verschlechterung
Tetric Evo Ceram Bulk-Fill grosse Kavität im Schmelz, ohne Deckfüllung (Gruppe 5)	100%	100%	0%
Tetric Evo Ceram normale Kavität im Schmelz, Flow Basis (Gruppe 11 - Reference Gruppe)	100%	100%	0%
Tetric Evo Ceram Bulk-Fill, normale Kavität im Schmelz, ohne Deckfüllung (Gruppe 10)	100%	95%	5%
SDR normale Kavität im Schmelz, ohne Deckfüllung (Gruppe 3)	91%	88%	3%
SDR normale Kavität im Schmelz, Deckfüllung Tetric Evo Ceram (Gruppe 1)	95%	87%	9%
SDR grosse Kavität im Schmelz, Deckfüllung Tetric Evo Ceram (Gruppe 2a, 2b)	95%	80%	16%
Venus Bulk-Fill normale Kavität im Schmelz, Deckfüllung Venus Pearl (Gruppe 9)	98%	71%	28%
X-tra base normale Kavität im Schmelz, Deckfüllung GrandioSO (Gruppe 8)	97%	53%	45%
Xtra-Fil normale Kavität im Schmelz, ohne Deckfüllung (Gruppe 7)	93%	34%	63%
Filtec Bulk-fil normale Kavität im Schmelz, Deckfüllung Filtec Supreme (Gruppe 6)	100%	15%	85%
SDR grosse Kavität im Schmelz, ohne Deckfüllung (Gruppe 4)	94%	9%	90%

In den schmelzbegrenzten Kavitätsabschnitten ergab die Analyse der Bulk Fill-Kompositen ein heterogenes Bild. Die Bulk Fill-Gruppen mit SDR und einer normalen Kavität sowie die Gruppe Tetric Evo Bulk Fill, lieferten brauchbare Ergebnisse und unterschritten die 80 %-Marke nicht. Alle anderen getesteten Bulk Fill-Komposite schneiden in den schmelzbegrenzten Kavitätsabschnitten nach den Belastungstests TML (Thermozyklus und Kausimulation) deutlich schlechter ab. Sobald die Kavität größer wurde oder das SDR-Komposit nicht überdeckt war, nahm die Qualität erwartungsgemäß signifikant ab. Das schlechteste Ergebnis erzielten Bulk Fill-Füllungen mit SDR-Komposit mit absichtlich weggelassener Deckfüllung. Hier zeigen sich die Konsequenzen, wenn bewusst oder unbewusst die vorgeschriebene Deckfüllung weggelassen wurde. Waren vor den Belastungstests noch 95 % aller Randspalten

akzeptabel, so waren danach nur noch 9 % aller Randspalten in Ordnung (s. Tabelle 8: SDR große Kavität, ohne Deckfüllung). Das vollständige Versagen von SDR in großen Kavitäten ohne Deckfüllung markiert sehr deutlich die Grenzen der Einsatzfähigkeit solcher Bulk Fill-Komposite. Diese Ergebnisse zeigen, dass beim Weglassen einer vorgeschriebenen Deckfüllung Bulk Fill-Komposite mit einem niedrigen E-Modul nicht erfolgreich in 4 mm-Inkrementsschichten appliziert werden können.

Tabelle 11: Ergebnisse der Randspaltanalyse im Dentin

Bulk-Fill-Komposit	vor Belastung	nach Belastung	Verschlechterung
Tetric Evo Ceram Bulk-Fill, normale Kavität im Dentin, ohne Deckfüllung (Gruppe 10)	100%	100%	0%
Tetric Evo Ceram normale Kavität im Dentin, Flow Basis (Gruppe 11 - Reference Gruppe)	100%	100%	0%
Venus Bulk-Fill normale Kavität im Schmelz, Deckfüllung Venus Pearl (Gruppe 9)	100%	86%	14%
SDR grosse Kavität im Dentin, Deckfüllung Tetric Evo Ceram (Gruppe 2a, 2b)	100%	85%	25%
SDR normale Kavität im Dentin, Deckfüllung Tetric Evo Ceram (Gruppe 1)	100%	83%	18%
SDR grosse Kavität im Dentin, ohne Deckfüllung (Gruppe 4)	94%	77%	18%
Xtra-Fil normale Kavität im Dentin, ohne Deckfüllung (Gruppe 7)	98%	73%	26%
SDR normale Kavität im Dentin, ohne Deckfüllung (Gruppe 3)	75%	70%	7%
X-tra base normale Kavität im Dentin, Deckfüllung GrandioSO (Gruppe 8)	97%	62%	36%
Tetric Evo Ceram Bulk-Fill grosse Kavität im Dentin, ohne Deckfüllung (Gruppe 5)	100%	45%	55%

Auch in den dentinbegrenzten Kavitätsabschnitten erreichen nur wenige Bulk Fill-Komposite ein zufriedenstellendes Ergebnis.

Im Vergleich zu den klassischen Hybridkompositen besitzen die Bulk Fill-Komposite eine ähnliche chemische Zusammensetzung. Die organische Matrix der Bulk Fill-Komposite besteht ebenfalls aus Bis-GMA, UDMA, TEGDMA und/oder EBPDMA. Wie die klassischen Hybridkomposite, besitzen Bulk Fill-Komposite anorganische Füllkörper. Die folgende Tabelle 12 zeigt die Inhaltsstoffe von Bulk Fill-Kompositen und ihre Zusammensetzung.

Tabelle 12: Inhalt und Zusammensetzung der untersuchten Bulk Fill-Komposite inklusiv E-Modul

Bulk Fill Komposit	Viskosität	Monomermatrix	Füllerkörperart	Füllkörperanteil	E-Modul in GPa
Tetric Evo Ceram Bulk Fill	hoch	Bis-GMA, UDMA	Ba-Al-Si-Glas, Yb-F3, Präpolymerisate, Mischoxide	79-81 Gew.-% 60-61 Vol.-%	0,8
X-tra fil	hoch	Bis-GMA, UDMA, TEGDMA	Ba-B-Al-Si-Füller	86 Gew.-% 70,1 Vol.-%	0,6
X-tra base	niedrig	Bis-GMA, UDMA	nicht genau bekannt	75 Gew.-%	0,9
Filtek Bulk Fill	niedrig	Bis-GMA, UDMA, Bis-EMA, Procrylat-Harze	Yb-F3, Zr-SiO ₂	64,5 Gew.-% 42,5 Vol.-%	0,4
SDR	niedrig	UDMA modifiziert, ethoxyl. Bis-GMA, TEGDMA, und weiteres	Ba-Al-F-B-Silikatglas, St-Al-F-Silikatglas	68 Gew.-% 45 Vol.-%	0,4
Venus Bulk Fill	niedrig	UDMA, EBADMA	Yb-F3, Ba-Al-F-B-Silikatglas	38 Vol.-%	0,4
Tetric Evo Ceram	hoch	Bis-GMA, UDMA, Ethoxiliertes Bis-EMA	Yb-F3, Ba-Al-F-B-Mischoxid, Präpolymer	48,5 Gew.-%	0,1

Quelle: Prof. Dr. Ilie, Zahnklinik München

Der grösste Einfluss auf das wichtige E-Modul und damit auf die Widerstandskraft einer Kompositfüllung kann durch die Füllerart und -zusammensetzung bewirkt werden. Im Gegensatz zu den klassischen Hybridkompositen, sind deshalb bei den Bulk Fill-Kompositen Veränderungen an der Art und Zusammensetzung der Füller vorgenommen worden. Durch die Reduktion des Fülleranteils werden Bulk Fill-Komposite niedrigerviskos (X-tra base, Filtek Bulk Fill, SDR, Venus Bulk Fill). Mit Ausnahme von X-tra base besitzen die niedrigviskosen Bulk Fill-Komposite einen niedrigen E-Modul (ca. 0,4 GPa) und sind somit nicht so widerstandsfähig wie die hochviskosen Bulk Fill-Komposite (Tetric Evo Ceram Bulk Fill und X-tra fil). Dafür adaptieren die niedrigviskosen Bulk Fill-Komposite besser in der Kavität und können auf diese Weise einer Randspaltbildung besser entgegenwirken. Durch die Reduktion sind die niedrigviskosen Bulk Fill-Komposite transluzenter und können mit einer Polymerisationslampe tiefer ausgehärtet werden. Nur auf diese Weise können mit niedrigviskosen Bulk Fill-Kompositen bis zu 4 mm starke Inkremente appliziert werden. Je nach Leistung der Polymerisationslampen beträgt die notwendige Lichtleistung bei Bulk Fill-Kompositen 20 s bei 500 mW/cm², 10 s ab 1 000 mW/cm² und 4 s ab 2 000 mW/cm². Die andere Gruppe der hochviskosen Bulk Fill-Komposite besitzt größere Füllkörper, was zu einem E-Modul von ca. mit 0,6 bis ca. 0,8 GPa führt. Sie sind so entwickelt worden,

dass sie den Kaukräften im Seitenzahnbereich ohne Deckfüllung standhalten. Es ist verständlich, dass die Hersteller unter anderem auch die Herstellungsverfahren sowie die Behandlung der Füllerkörper (z. B. ihre Silanisierung) und die weitergehende Verarbeitung geheim halten. Auch gibt es wenig detaillierte Informationen über die modifizierte Monomermatrix oder über die neuen Initiatorsysteme, wie sie z. B. bei Tetric Evo Ceram Bulk Fill eingesetzt werden (Isocerin).

Bei der Untersuchung von Hybridkompositen und Bulk Fill-Füllungen ist Hybrid-schicht in einer Zahnkavität zu von Bedeutung. Mit Hilfe eines Dentin-Bonding-Systems (DBA) wird das eher inhomogene hydrophile Dentin für die Verbindung mit homogenem und hydrophobem Komposit vorbereitet. In allen Bulk Fill-Füllungen sind zurzeit übliche All-in-one-Adhäsive verwendet worden. Bei der Untersuchung von Bulk Fill-Kompositen handelt es sich um eine Untersuchung von einer Kombination aus Bulk Fill-Material und einem empfohlenen Dentin-Bonding-Systems. Aus diesem Grund ist es schwierig, die Ursache von Randspaltbildungen dem Bulk Fill-Komposit oder dem DBA zuzuschreiben. Die folgende Tabelle verdeutlicht die unterschiedlichen DBA-Eigenschaften (hier Scherhaftwerte) in Verbindung mit den untersuchten Bulk Fill-Kompositen.

Tabelle 13: Übersicht der für Bulk Fill-Füllungen verwendeten Dentin-Bonding-Systeme

Bulk Fill Komposit	Dentin-Bonding-Agent	Schmelzscherhaftung in MPa	Dentinscherhaftung in MPa
Tetric EvoCeram Bulk Fill	Exite F	17	9
x-tra Fil	Futurabond DC	13,5	8
x-tra base	Futurabond DC	13,5	8
Filtek Bulk Fill	Scotchbond Universal	22,5	18
SDR	XP Bond	17	12
Venus Bulk Fill	iBond Total Etch	14,5	11,5
Tetric EvoCeram	Exite F	14	12

Quelle: Dr. Christoph Thalacker (<http://www.zmk-aktuell.de>)

Ein wesentlicher Vorteil von Bulk Fill-Komposite ist das Abfüllungen 4 mm-Inkrementen, da dadurch Zeit eingespart werden kann. Die bisherige Verarbeitung von klassischen Hybridkompositen wird des Öffern als zu zeitaufwendig und technikintensiv beschrieben. Ein einfacher zeitlicher Vergleich zeigt dagegen, wie gering die Einsparung in der Untersuchung war.

Tabelle 14: Vergleich Zeitaufwand 4 mm vs. 2 mm-Inkrementtechnik mit normaler Polymerisationslampe

Füllungsart	Klassisches Hybridkomposit*	Bulk Fill-Komposit*	
Inkmente	5 x 20 sec = 100 sec	3 x 20 sec = 60 sec	2 x 20 sec = 40 sec
mit Deckfüllung (niedrigviskos)	ohne		1 x 20 sec = 20 sec
ohne Deckfüllung (hochviskos)			
gesamt	100 sec	60 sec	60 sec
Ersparnis		40 sec	40 sec

*LED-Polymerisationslampe (1200 mW/cm²)

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass die Zeitersparnis beim Legen einer Kompositfüllung mit Bulk Fill-Komposit gegenüber Hybridkomposit nicht sehr gross ist. Mit in die Betrachtung einbezogen werden muss der logistische Aufwand für das zusätzliche Bulk Fill-Material am Behandlungsplatz.

Auf der anderen Seite ist ein höheres Risiko gegeben, mit dem Bulk Fill-Material einen schlechteren Randspalt zu erhalten. Abstiche in dem ästhetischen Ergebnis sind ebenfalls zu bedenken, da es für Bulk Fill-Materialien nur wenig Schmelz- und dentinfarben gibt.

Um einen spürbaren Zeitvorteil zu erzielen, könnte ein Behandler dazu verleitet werden, beim Einsatz von niedrigviskosen Bulk Fill-Kompositen die vorgeschriebene deckende Hybridkompositschicht wegzulassen. In der folgenden Abbildung 36 sind die Konsequenzen erkennbar für das Weglassen der Deckfüllung beim Bulk Fill-Komposit SDR.

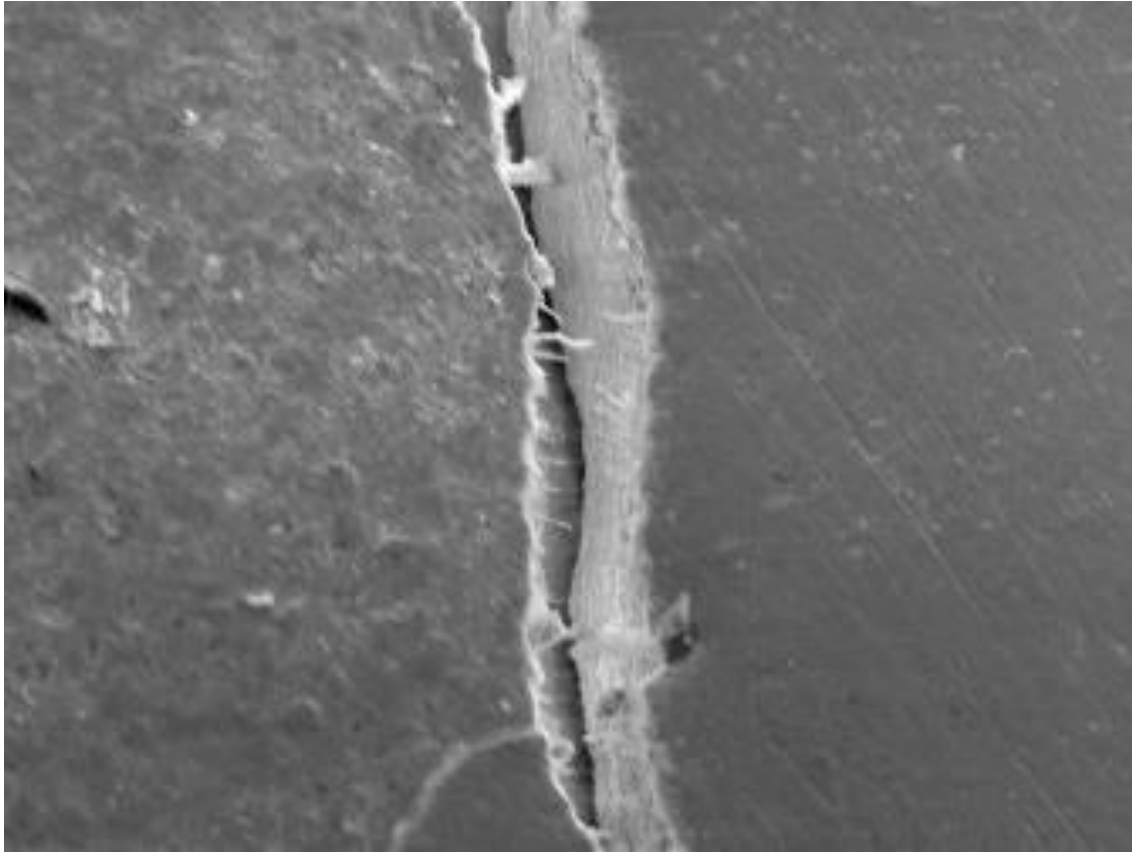


Abbildung 36: SDR Gruppe 4 SDR/große Kavität in 4-Uhr-Position

Die Ursache für den in der Abbildung 36 dargestellten Randspalt einer SDR-Füllung könnte sein, dass eine stärkere Polymerisationsschrumpfung am Kavitätenrand des Bulk Fill-Komposites stattgefunden hat.

Bei der Untersuchung ist weiter aufgefallen, dass bei der Beurteilung der Randdspalten wenig Bulk Fill-Füllungen mit Quellungen nachgewiesen wurden. Insgesamt wiesen nur 5 % der Randspalten Quellungen auf, weshalb das Merkmal Quellung bei der Auswertung gänzlich vernachlässigt werden konnte. Als Ursache für den geringen Anteil von Quellungen könnte die bestmögliche Ausarbeitung der Bulk Fill-Füllungen in vitro sein.

Bei Füllungen mit dem herkömmlichen Hybridkomposit Tetric Evo Ceram in der Kontrollgruppe zeigte sich, dass die 2 mm-Inkrementeschichttechnik das beste Ergebnis in Bezug auf die Qualität des Randspaltes lieferte. Das Ergebnis lässt sich dadurch erklären, dass die 2 mm-Inkrementeschichttechnik seit vielen Jahren etabliert ist und die Handhabung seit zum Standard zählt.

6. Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung lassen eine Reihe von Schlussfolgerungen zu. Die Ausgangshypothese, dass Bulk Fill-Komposite wie klassische Hybridkomposite verwendet werden können, wurde widerlegt. Wenngleich Bulk Fill-Komposite wie die klassischen Hybridkomposite aufgebaut sind, weisen sie Unterschiede im Detail auf. Die niedrigviskosen Bulk Fill-Komposite können aufgrund ihres niedrigen E-Moduls nicht wie die klassischen Hybridkomposite im kaulasttragenden Seitenzahnbereich eingesetzt werden. Sie erfordern eine deckende Schicht mit einem klassischen Hybridkomposit. Allerdings besitzen niedrigviskose Bulk Fill-Komposite den Vorteil, dass sich diese Komposite sehr gut an die Wände der Kavitäten adaptieren lassen. Gute Ergebnisse lieferte das Bulk Fill-Komposit SDR mit seinen modifizierten Inhaltsstoffen. In normal großen Kavitäten erfüllte es mit einem deckenden klassischen Hybridkomposit die Anforderungen von ausreichend guten Randspalten. Im Gegensatz dazu sind die hochviskosen Bulk Fill-Komposite mit einem höheren E-Modul für große Defekte im Seitenzahnbereich besser geeignet. Sie erfordern keine zusätzlichen Deckfüllungen und können einfach ausgearbeitet werden. Bei den hochviskosen Bulk Fill-Kompositen zeigte Tetric EvoCeram Bulk Fill noch brauchbare Ergebnisse.

Es zeigte sich, dass die untersuchten Bulk Fill-Komposite nicht besser, sondern eher schlechter geeignet waren als das zur Referenz eingesetzte klassische Hybridkomposit Tetric Evo Ceram (Gruppe 11). Besonders für spezielle Anwendungen wie direkte Unterfüllungen, Stumpfaufbauten, Restaurationen im Milchzahngebiss usw. sind bestimmte Bulk Fill-Komposite durchaus von Vorteil.

In allen Aussagen ist zu berücksichtigen, dass es sich bei dieser Untersuchung von Bulk Fill-Kompositen um eine Kombination von Bulk Fill-Kompositen und einem empfohlenem Dentin-Bonding-Agent handelt. Weitere Bulk Fill-Komposit-Untersuchungen mit verschiedenen Dentin-Bonding-Agents könnten von Bedeutung sein. Auch eine Ursachenforschung bei Kenntnis aller Inhaltsstoffe und Herstellungsmethoden bietet Raum für weitere Untersuchungen.

Die Werbeaussagen der Hersteller, dass Bulk Fill-Komposite zeitsparender und weniger technikaufwendiger zu applizieren sind als klassische Hybridkomposite, konn-

ten nicht bestätigt werden. Für eine geringe Zeitersparnis im Sekundenbereich geht der Anwender von Bulk Fill-Kompositen das Risiko von mehr Randspalten bei Bulk Fill-Füllungen ein. Neben dem zusätzlichen logistischen Aufwand für ein weiteres Komposit sowie ggf. eines Dentin-Bonding-Agents am Behandlungsplatz, muss der Anwender zusätzlich Einschränkungen in der Ästhetik in Kauf nehmen. Es stehen für Bulk Fill-Komposite nur Universalfarben zur Verfügung, um die Applikation in 4 mm-Inkrementen zu ermöglichen. Auch aus diesem Grund ist die Verwendung von Bulk Fill-Kompositen nur im Seitenzahnbereich sinnvoll.

Es versteht sich von selbst, dass bei der Anwendung von Bulk Fill-Kompositen eine besonders sorgfältige Arbeitsweise erforderlich ist. Mögliche Fehlerquellen wie Reste sklerotischen Dentins, unvollständige Monomerumwandlungen durch eine unzureichende Lichtpolymerisation, zu viel Feuchtigkeit in der Kavität oder auch die Verwendung eines nicht geeigneten DBA können dazu beitragen, dass noch mehr schlechte Randspalten als bei klassischen Hybridkompositen entstehen.

Nicht vergessen werden darf, dass einige der durchgeführten Untersuchungen mit Bulk Fill-Kompositen von ihren Herstellern initiiert und finanziell unterstützt wurden. Entsprechend sind die Aussagen in den Untersuchungen zu bewerten.

7. Zusammenfassung

Die klassischen Hybridkompositen sind heute in der Therapie von mit Karies befallenen Zähnen fest etabliert und verdrängen die Amalgamfüllungen immer mehr. Die guten Ergebnisse im Front- und Seitenzahnbereich sprechen dafür, die klassischen Hybridkomposite immer weiter zu optimieren und weitere Produkte auf Kompositbasis auf den Markt zu bringen. Für die Untersuchung von Bulk Fill-Kompositen wurden 104 humane Seitenzähne ohne Defekte verwendet, die per Zufall in Gruppen eingeteilt wurden. Pro Zahn wurden jeweils zwei Klasse-II-Kavitäten mit je einer schmelz- und einer dentinbegrenzten approximalen Extension in einem kaulasttragenden Bereich präpariert. Die Präparationsgrenze lag bei der schmelzbegrenzten Kavität ca. 1,5 mm koronal und bei der im Dentin begrenzten Kavität ca. 1,5 mm apikal der Schmelz-Zement-Grenze, um die Haftung im Schmelz-, Dentin- und Schmelzdentin-Bereich zu überprüfen. Die Breite der Kavität betrug in oro-vestibulärer Richtung ca. 4 mm. Okklusal wurde bei jedem Zahn 3–4 mm tief ein 4 mm breiter Isthmus präpa-

riert. Die ersten fünf Gruppen von je acht Zähnen wurden für eine Bulk Fill-Füllung mit SDR vorbereitet, wobei Gruppe 2 SDR/große Kavität wegen Abweichungen wiederholt wurde (s. Gruppe 2a SDR/große Kavität und Gruppe 2b SDR/große Kavität). In den Untersuchungen der Gruppen 5 bis 10 wurden alle anderen Bulk Fill-Materialien getestet. Die Gruppe 5 mit dem Material Tetric Evo BF/große Kavität wurde wegen der grossen Ergebnisbandbreite ebenfalls wiederholt (s. Gruppe 5a Tetric Evo BF/große Kavität und Gruppe 5b Tetric Evo BF/große Kavität).

Um die Bulk Fill-Komposit-Ergebnisse beurteilen zu können, wurde eine Gruppe untersucht, bei der die Füllungen mit einem klassischen Hybridkomposit hergestellt worden sind (s. Gruppe 11: Tetric Evo Ceram normale Kavität mit Tetric Evo Flow).

Mittels Finierdiamanten sowie Ausarbeitungs- und Polierscheiben wurden die Füllungen fertiggestellt und nach 24-stündiger Lagerung in Ringer-Lösung bei 37,5°C einer thermischen Wechselbadbelastung unterzogen (abwechselnd 5 und 55°C bei 2 000 Wiederholungen). Im Münchner Kausimulator 2 erfolgte eine mechanische Belastung mit 50 N bei 50 000 Wiederholungen senkrecht auf die zentrale Fissur. Diese Belastungstests entsprechen einer Verweildauer von fünf Jahren im Patientenmund. Vor und nach den Belastungstests wurden Replikate mit EpoxyDie von den mit Bulk Fill gefüllten Zähnen angefertigt und mithilfe eines Sputter Coaters 10 nm Gold zur Begutachtung im Rasterelektronenmikroskop oberflächenbeschichtet. Um noch bessere Ergebnisse im Rasterelektronenmikroskop zu erhalten, wurden die Untersuchungen ab Gruppe 6 Filtek BF (Filtek Bulk Fill, X-tra fil, X-tra base, Venus Bulk Fill, Tetric Evo Ceram Bulk Fill und Tetric Evo Ceram) anstelle von Replikaten nach den Belastungstests mit den Originalzähnen durchgeführt. Die so vorbereiteten Replikaten und Proben sind im Rasterelektronenmikroskop bei 200-facher Vergrößerung untersucht und mit Hilfe des Software-Programmes QuantiGap im Randspaltbereich der Füllungen vermessen und beurteilt worden. Die dabei gewonnenen Daten sind statistisch ausgewertet und zur besseren Übersichtlichkeit in Boxplot-Diagrammen dargestellt worden.

Um den auftretenden Polymerisationsspannungen bei der Applikation in 4 mm-Inkrementen entgegenzuwirken, haben die Bulk Fill-Hersteller unterschiedliche Lösungen angewendet. Im Vergleich zu den klassischen Hybridkompositen wurden die Füllkörper in ihrer Art, Größe und Zusammensetzung verändert und die Bestandteile

der Monomermatrix angepasst (z. B. durch neue Initiatorsysteme). Entstanden sind Bulk Fill-Komposite, die in niedrig- und hochviskose Ausprägungen eingeteilt werden können. Die niedrigviskosen Bulk Fill-Komposite adaptieren sich sehr leicht in der Kavitätenwand und besitzen einen niedrigen E-Modul. Sie müssen aus diesem Grund für den Einsatz im Seitenzahnbereich noch mit einem klassischen Hybridkomposit überdeckt werden. Die hochviskosen Bulk Fill-Komposite besitzen einen höheren E-Modul und benetzen die Kavitätenwand nicht so gut. Dafür sind sie besser modellierbar und ohne deckendes Hybridkomposit im Seitenzahnbereich einsetzbar.

Bei der Untersuchung der Randspalten vor und nach den Belastungstests TML stellte sich heraus, dass alle Bulk Fill-Komposite mehr Randspalten aufwiesen als die Referenzgruppe mit dem klassischen Hybridkomposit Tetric Evo Ceram. Jedoch konnte bei den niedrigviskosen Bulk Fill-Kompositen das speziell optimierte SDR mit seinem besonders guten Anfließen in den Kavitätenwänden überzeugen. Durch die Applikation einer deckenden Füllung mit klassischem Hybridkomposit waren noch ca. 80 % aller Randspalten akzeptabel. Bei den hochviskosen Bulk Fill-Kompositen konnte Tetric Evo Ceram Bulk Fill noch brauchbare Ergebnisse erreichen, ohne dass es eine Deckfüllung benötigte.

Der oft von den Herstellern genannte Zeitvorteil und Einfachheit beim Füllen von Kavitäten mit Bulk Fill-Komposit in 4 mm-Inkrementen konnte relativiert werden. Der Einsparung im Sekundenbereich stehen mehr schlechte Randspalten, ein nicht unerheblicher zusätzlicher Logistikaufwand und eine schlechtere Ästhetik durch eine reduzierte Anzahl von Bulk Fill-Kompositfarben gegenüber.

Es hat sich gezeigt, dass die untersuchten Bulk Fill-Komposite nicht ohne nennenswerte Einschränkungen wie klassische Hybridkomposite eingesetzt werden können.

Friedrich Löchner (1915–2013), ein Dichter, Pädagoge und Autor sagte einmal: „Es wird viel zu viel Neues versucht, ehe das Alte genügend erprobt ist.“ Für die klassischen Hybridkomposite gilt jedoch: Ihre Applikation in 2 mm-Inkrementen ist ausreichend erprobt und noch immer erfolgversprechender als die 4 mm-Inkremententechnik der untersuchten Bulk Fill-Komposite.

8. Literaturverzeichnis

Atai, M. et al. (2004). Physical and mechanical properties of an experimental dental composite based on a new monomer: Bowen-Monomer-System. *Dent Mater*, 20(7), 663–668. doi:10.1016/j.dental.2003.08.008

Bausch, J. et al. (1982). Clinical significance of polymerization shrinkage of composite resins. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 48(1), 59–67. doi:10.1016/0022-3913(82)90048-8

Bayne, S.C. et al. (1998). A characterization of first generation flowable composites. *Journal of the American Dental Association*, 129(5), 567–577.

Belli, S. et al. (2005). Effect of hybrid layer on stress distribution in a premolar tooth restored with composite or ceramic inlay: an FEM study. *Journal of biomedical materials research*, 74(2), 665–668. doi:10.1002/jbm.b.30181

Black, G.V. et al. (1914). *Konservierende Zahnheilkunde: Die Technik der Zahnfüllung* (2nd ed.). Berlin: Meusser.

Blunck, U. (1988). Rasterelektronenmikroskopische Beurteilung von Kompositfüllungs-rändern im Dentin in vitro. *Deutsche Zahnärztliche Zeitung*, 1988(43), 939–943.

Blunck, U. (1989). Vergleich zweier Kavitätenformen für die Prüfung der Wirksamkeit von Dentinhaftmitteln. *Dtsch Zahnärztl Z* 44:513-516.

Blunck, U. et al. (1999). Klassifikation von Bondingsystemen. *Quintessenz*, 50, 1021–1033.

Bowen, R.L. (1979). Compatibility of Various Materials with Oral Tissues. I: The Components in Composite Restorations. *Journal of Dental Research*, 58(5), 1493–1503. doi:10.1177/00220345790580051301

Bowen, R.L. et al. (1983). Adhesive bonding of various materials to hard tooth tissues: forces developing in composite materials during hardening. *Journal of the American Dental Association*, 106(4), 475–477.

Bowen, R.L. et al. (1992). Dental composites glass ionomers: the materials. *Advances in Dental Research*, 6, 44–49.

- Brännström, M. et al. (1991). Materials techniques for lining composite resin restorations: a critical approach. *Journal of Dentistry*, 19(2), 71–79. doi:10.1016/0300-5712(91)90093-E
- Brauer, G.M. et al. (1981). Marginal Adaptation of BIS-GMA-based Composites Containing Various Diluents. *Journal of Dental Research*, 60(12), 1966–1971. doi:10.1177/00220345810600120701
- Buonocore, M.G. et al. (1955). A Simple Method of Increasing the Adhesion of Acrylic Filling Materials to Enamel Surfaces. *Journal of Dental Research*, 34(6), 849–853. doi:10.1177/00220345550340060801
- Buonocore, M.G. et al. (1968). Penetration of resin dental materials into enamel surfaces with reference to bonding. *Archives of Oral Biology*, 13(1), 61–IN20. doi:10.1016/0003-9969(68)90037-X
- Burtscher, P. (2011). Von geschichteten Inkrementen zur Vier-Millimeter-Bulk Fill-Technik – Anforderungen an Komposit und Lichthärtung. *Die Zahnarzt Woche*, 2011(39), 6–8.
- Czasch, P. et al. (2013). In vitro comparison of mechanical properties and degree of cure of bulk fill composites. *Clin Oral Investig* 2013;17:227-235.
- Davidson, C.L. et al. (1984). The Competition between the Composite-Dentin Bond Strength and the Polymerization Contraction Stress. *Journal of Dental Research*, 63(12), 1396–1399. doi:10.1177/00220345840630121101
- Davidson, C.L. et al. (1997). Polymerization shrinkage and polymerization shrinkage stress in polymer-based restoratives. *Journal of Dentistry*, 25(6), 435–440. doi:10.1016/S0300-5712(96)00063-2
- Demarco, F. et al. (2012). Longevity of posterior composite restorations: not only a matter of materials. *Academy of Dental Materials*, 28(1), 87–101. doi:10.1016/j.dental.2011.09.003
- Dentsply Detrey DETREY GmbH. (2011). SDR Wissenschaftliches Kompendium. Retrieved from <http://www.dentsply.de>

Die Zukunft der Composite-Technologie. Jetzt erhältlich. Wissenschaftliche Dokumentation (2013) <http://www.ivoclarvivadent.ch/zoolu-website/media/document/17022/Tetric+EvoCeram+Bulk+Fill>

Dudda, S. (2014). Entwicklung eines neuen Applikationsverfahrens für fließfähige Komposite zur Reduktion polymerisationsbedingter Spannungen (Inaugural Dissertation). Philipps Universität Marburg, Marburg Deutschland. Retrieved from <http://www.uni-marburg.de>

Eichner, K. (1963). Messung der Kräfte bei Kauvorgängen. Dtsch Zahnärztl Z, 1963(18), 915–924.

Eichner, K. et al. (2005). Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung: Grundlagen und Verarbeitung (8th ed., Vol. 1). Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG.

Ernst, C.-P. (2010). Komposit im Seitenzahnbereich: Möglichkeiten und Grenzen. Die Quintessenz, 2010(61(5)), 545–557.

Ernst, C.-P. (2006). Two-year clinical performance of a nanofiller vs a fine-particle hybrid resin composite. Clinical Oral Investigations, 10(2), 119–125. doi:10.1007/s00784-006-0041-8

Ernst, C.-P. (2010). Die 20 beliebtesten Fehler beim Kleben. Der Freie Zahnarzt, 54(11), 66–83. doi:10.1007/s12614-009-0469-8

Fasold, A. (1996). Glassionomer Cements, Hybrid-Glassionomers and Comonomerslaboratory Trials-Wear Resistance (Dissertation). Ludwig-Maximilians-Universität, München.

Feilzer, A.J. et al. (1987). Setting Stress in Composite Resin in Relation to Configuration of the Restoration. Journal of Dental Research, 66(11), 1636–1639. doi:10.1177/00220345870660110601

Feilzer, A.J. et al. (1987). Setting Stress in Composite Resin in Relation to Configuration of the Restoration. Journal of Dental Research, 66(11), 1636–1639. doi:10.1177/00220345870660110601

- Feilzer, A.J. et al. (1990). Quantitative determination of stress reduction by flow in composite restorations. *Dental Materials*, 6(3), 167–171. doi:10.1016/0109-5641(90)90023-8
- Finger, W. J. (1988). Dentin bonding agents. Relevance of in vitro investigations. *American journal of dentistry*, 1, 184-188. Retrieved from <http://ci.nii.ac.jp/naid/10010685867/en/>
- Ferracane, J. L. (1995). Current Trends in Dental Composites. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine*, 6(4), 302–318. doi:10.1177/10454411950060040301
- Frankenberger, R. (2001). Die Adhäsivtechnologie. Ein Leitfaden für Theorie und Praxis.: Materialkundliche Grundlagen der Adhäsivtechnik. Dent Net Masters 3M Espe AG, 2001, 12–27.
- Frankenberger, R. (2006). Bonding 2006 - Zeitersparnis versus Langzeiterfolg. *Die Quintessenz*, 2006(57), 499–506.
- Frankenberger, R. (Ed.). (2013). Adhäsiv-Fibel: Adhäsive Zahnmedizin - Wege zum klinischen Erfolg (3rd ed.): Spitta Verlag, Balingen.
- Fujimoto, J.G., et al. (2000). Optical coherence tomography: an emerging technology for biomedical imaging and optical biopsy. *Neoplasia* 2000;(2): 9–25.
- Gale, M.S. et al. (1999). Thermal cycling procedures for laboratory testing of dental restorations. *Journal of Dentistry*, 27(2), 89–99. doi:10.1016/S0300-5712(98)00037-2
- Gängler, P. Et al. (1990). Biologie testing and clinical trial of a visible light-curing composite resin restorative material. *Quintessence Int* 21: 833-842.
- Gottlieb, E.W. et al. (1982). An optimal concentration of phosphoric acid as an etching agent. Part I: Tensile bond strength studies. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 48(1), 48–51. doi:10.1016/0022-3913(82)90046-4.
- Govaerts, P.J. et al. (1998). Box and whisker plots for graphic presentation of audiometric results of conductive hearing loss treatment. *Otolaryngology - Head and Neck Surgery*, 118(6), 892–895. doi:10.1016/S0194-5998(98)70293-1

Haberkorn, K.E. (2006). Randschluss von Fast-Track-Kompositfüllungen im Vergleich zu Amalgam-und Glasionomerezementfüllungen (Dissertation). Medizinischen Fakultät der Universität Ulm, Ulm.

Haller, B. (1994). Mechanismus und Wirksamkeit von Dentinhaftvermittlern.

Dtsch Zahnärztl 749: 750-759.

Haller, B. et al. (2012). Sind selbstkonditionierende Bondingsysteme praxistauglich? Und wenn ja, wofür? Teil 1: Grundlagen, Zusammensetzung, Haftmechanismus, Klassifikation. Die Quintessenz, 2012(63), 711–732. Teil 2: Indikationsbezogene Bewertung selbstkonditionierender Bondingsysteme. Die Quintessenz, 2012(63), 857.

Hansen, E.K. et al. (1989). Marginal adaptation of posterior resins: Effect of dentin-bonding agent and hygroscopic expansion. Dental Materials, 5(2), 122–126. doi:10.1016/0109-5641(89)90142-5

Hellwig, E. et al. (1999). Einführung in die Zahnerhaltung (2. Aufl). München: Urban & Fischer Verlag.

Hickel, R. et al. (2012). Neueste Komposite – viele Behauptungen. Bayerisches Zahnärzteblatt, 49(49), 50–53. Retrieved from http://www.bzb-online.de/nov12/50_53.pdf

Hoppenbrouwers, P.M.M. et al. (1987). The mineral solubility of human tooth roots. Archives of Oral Biology, 32(5), 319–322. doi:10.1016/0003-9969(87)90085-9

Idriss, S. et al. (2007). Factors associated with microleakage in Class II resin composite restorations. Operative dentistry, 32(1), 60–66. doi:10.2341/06-16

Ilie, N. et al. (2011). Investigations on a methacrylate-based flowable composite based on the SDR technology. Academy of Dental Materials, 27(4), 348–355. doi:10.1016/j.dental.2010.11.014

Ilie, N. et al. (2014). An in-vitro assessment of the shear bond strength of bulk-fill resin composites to permanent and deciduous teeth. Journal of Dentistry, 42(7), 850–855. doi:10.1016/j.jdent.2014.03.013

Ilie. N, et al. (2014). Curing behaviour of high-viscosity bulk-fill composites. J Dent 2014; 42: 977-985.

Janda, R. (1988). Conditioning tooth hard substance with acids and complex-builders. 2. Dentin. Phillip Journal für restaurative Zahnmedizin, 1988(5.5), 265.

Janda, R. (1989). Kunststoffverbundsysteme: Grundlagen, Anwendung, Verarbeitung, Prüfung (1st ed.). Weinheim Schweiz: Wiley-VCH.

Kemp-Schulte, C.M. et al. (1990). Complete Marginal Seal of Class V Resin Composite Restorations Effected by Increased Flexibility. Journal of Dental Research, 69(6), 1240–1243. doi:10.1177/00220345900690060301

Krejci, I. et al. (1987). Dreischichtiges Lichthärteverfahren mit herkömmlichen Komposit-Kunststoffen für Black-Klasse-II-Restaurationen. Quintessence Verlag, (38), 1217–1229.

Krejci, I., et al. (1990). In-vitro-Testverfahren zur Evaluation dentaler Restaurationssysteme: 1. Computergesteuerter Kausimulator. Schweiz Monatsschr Zahnmed, 1990(100.8), 953–960.

Krejci, I., et al. (1992). In vitro evaluation of dentinal bonding agents in mixed Class V cavity preparations. Quintessence International, 23(5), 355–362.

Krejci, I. et al. (1994). Klinik der Dentinadhäsive - Das Konzept der differenzierten Applikation: Totales und Selektives Bonding und Dentinversiegelung, Der Freie Zahnarzt 1994 (9): 243-262.

Kunzelmann, K.-H., et al. (1993). Dentinhaftung von Kompositfüllungen und Keramikinlays in Klasse-II-Kavitäten. Dtsch Zahnärztl Z 48: 724-727.

Kunzelmann, K.-H., et al. (2001). Die Adhäsivtechnologie. Ein Leitfaden für Theorie und Praxis.: Klinische Aspekte der Adhäsivtechnik mit plastischen Werkstoffen. Dent Net Masters 3M Espe AG, 2001, 12–27.

Kunzelmann K.-H., (2003). Werkstoffkunde über Komposite. Retrieved from <http://www.dent.med.uni-muenchen.de/~kkunzelm/infokollegen/komposite.html>

- Kunzelmann, K.-H., (2003). Ästhetische Zahnkorrekturen mit Kompositen: Nanokomposite. Retrieved from <http://www.dent.med.uni-muenchen.de/~kkunzelm/infokollegen/aesthet-korrekturen-front/aesthetische %20zahnkorrekturen %20mit %20kompositen.htm>
- Kunzelmann, K.-H., (2003). Werkstoffkunde über Komposite. Retrieved from <http://www.dent.med.uni-muenchen.de/~kkunzelm/infokollegen/komposite.html>
- Kunzelmann, K.-H., (2005). Seitenzahnrestaurationen mit Komposit: Anwendungsbe-
reiche von Komposit. Retrieved from <http://www.dent.med.uni-muenchen.de/~kkunzelm>
- Labella, R. et al. (1999). Polymerization shrinkage and elasticity of flowable composites and filled adhesives. *Dental Materials*, 15(2), 128–137. doi:10.1016/S0109-5641(99)00022-6
- Lendenmann, U. et al. (2004). Tetric Evoceram: Wissenschaftliche Dokumentation. Retrieved from <http://www.ivoclarvivadent.com/zoologywebsite/media/document/828/Tetric+EvoCeram+-+Tetric+EvoFlow>
- Lösche, G. et al. (1988). Die Schmelz-Ätz-Technik. *Zahnärztl Welt* 97, 1988(838-841).
- Lutz, F. et al. (1980). The development of a posterior tooth composite system, in-vitro investigation. *Schweizer Monatsschrift Zahnmed*, 1980(5).
- Lutz, F. et al. (1983). A classification and evaluation of composite resin systems. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 50(4), 480–488. doi:10.1016/0022-3913(83)90566-8
- Lutz, F. et al. (1983). Komposits-Klassifikation und Wertung. *Schweizer Monatsschrift Zahnmed*, 93, 914–929.
- Lutz, F. et al. (1984). In vivo and in vitro Wear of Potential Posterior Composites. *Journal of Dental Research*, 63(6), 914–920. doi:10.1177/00220345840630062201
- Lutz, F. et al. (1985). Optimizing the marginal adaptation of MOD composite restorations. *St Paul*, (3), 405–420.

- Lutz, E. et al. (1986). Elimination of polymerization stresses at the margins of posterior composite resin restorations: a new restorative technique. *Die Quintessenz*, 1985(17(12)), 777–784.
- Manhart, J. et al. (2014). Bulk Fill-Komposite. *Swiss Dental Journal*, 2014(124), 19–28.
- McCullock, A. et al. (1986). In vitro studies of cuspal movement produced by adhesive restorative materials. *British Dental Journal*, 161(11), 405–409. doi:10.1038/sj.bdj.4805990
- Minguez, N. et al. (2003). Advances in the history of composite resins. *Journal of the history of dentistry*, 51(3), 103–105.
- Miguez, P. et al. (2004). Effects of flowable resin on bond strength and gap formation in Class I restorations. *Academy of Dental Materials*, 20(9), 839–845. doi:10.1016/j.dental.2003.10.015
- Nikolaenko, S. et al. (2004). Influence of c-factor and layering technique on microtensile bond strength to dentin. *Dent Mater*, 20(6), 579–585. doi:10.1016/j.dental.2003.08.001
- Opdam, N. et al. (2010). 12-year survival of composite vs. amalgam restorations. *Journal of Dental Research*, 89(10), 1063–1067. doi:10.1177/0022034510376071
- Pashley, D. et al. (1997). Dentine permeability and dentine adhesion. *Journal of Dentistry*, 25(5), 355–372. doi:10.1016/S0300-5712(96)00057-7
- Paul, S.J. et al. (1999). Nanoleakage at the dentin adhesive interface vs microtensile bond strength. *Oper Dent*, 1999(24). Retrieved from 181-188
- Perdigão, J. et al. (1999). Dentin bonding-state of the art 1999. *Compend Contin Educ Dent*, 20(12), 1151-1158, 1160-1162.
- Peutzfeldt, A. (1997). Resin composites in dentistry: the monomer systems. *European Journal of Oral Sciences*, 105(2), 97–116. doi:10.1111/j.1600-0722.1997.tb00188.x

Roeters, J. et al. (1991). Kosmetische Zahnheilkunde mit Hilfe von Komposit: Praktische Anwendung der direkten Technik. Berlin: Quintessenz Verlag-GmbH.

Roggendorf, m. et al. (2011). Marginal quality of flowable 4-mm base vs. conventionally layered resin composite. *Journal of Dentistry*, 39(10), 643–647. doi:10.1016/j.jdent.2011.07.004

Roulet, J.F. et al. (1984). Quantitative SEM-analysis of composite inlay margins after fatigue stress. *Journal of the history of dentistry*, 1984(63), 37–41.

Roulet, J.F. (1987). A materials scientist's view: assessment of wear and marginal integrity. *Quintessence International*, 1987(8), 543–552.

Roulet, J.F., et al. (1989). Quantitative margin analysis in the scanning electron microscope. *Scanning Microscopy* 1989 (3.1): 147-58.

Roulet, J.F. et al. (1989). Quantitative margin analysis in the scanning electron microscope. *Scanning Microscopy*, 3(1), 147-158, 158-159.

Roulet, J.F. et al. (1996). Probleme und Lösungsansätze der Adhäsivtechnik im Seitenzahnbereich. *Neue Gruppe*, (9), 10–13.

Rueggeberg, F. et al. (1995). Resin cure determination by polymerization shrinkage. *Dental Materials*, 11(4), 265–268. doi:10.1016/0109-5641(95)80060-3

Ruyter, I.E. (1988). Composites - Characterization of Composite Filling Materials: Reactor Response. *International and American Associations for Dental Research*, 1988. doi:10.1177/08959374880020010401

Sakaguchi, R.L. et al. (1992). Effects of polymerization contraction in composite restorations. *Journal of Dentistry*, 20(3), 178–182. doi:10.1016/0300-5712(92)90133-W

Schenck, L. (2011). Die Vier-Millimeter-Füllung: In einer Schicht gelegt und mit einer Belichtung polymerisiert. *Die Zahnarzt Woche*, 2011(38), 3–5.

Schmidseder, J. et al. (2009). Ästhetische Zahnmedizin: Direkte Seitenzahnfüllungen. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG.

- Silikas, N. et al. (2000). Light intensity effects on resin-composite degree of conversion and shrinkage strain. *Dental Materials*, 16(4), 292–296. doi:10.1016/S0109-5641(00)00020-8
- Silverstone, L.M. et al. (1975). Variation in the Pattern of Acid Etching of Human Dental Enamel Examined by Scanning Electron Microscopy. *Caries Research*, 9(5), 373–387. doi:10.1159/000260179
- Sorensen, J.A. et al. (1991). Porcelain-composite interface microleakage with various porcelain surface treatments. *Dental Materials*, 7(2), 118–123. doi:10.1016/0109-5641(91)90057-6
- St Georges, A.J. et al. (2002). Microleakage of Class V composites using different placement and curing techniques: an in vitro study. *American Journal of Dentistry*, 2002(15), 244–247.
- Suliman, A.-H. et al. (1994). Polymerization shrinkage of composite resins: Comparison with tooth deformation. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 71(1), 7–12. doi:10.1016/0022-3913(94)90247-X
- Swift, Jr., et al. (1995). Bonding to enamel and dentin: a brief history and state of the art. *Quintessence International*, (26.2), 95–110.
- Taschner, M. et al. (2010). Role of preliminary etching for one-step self-etch adhesives. *European Journal of Oral Sciences*, 118(5), 517–524. doi:10.1111/j.1600-0722.2010.00769.x
- Tjan, A.H. et al. (1992). Effect of various incremental techniques on the marginal adaptation of class II composite resin restorations. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 67(1), 62–66. doi:10.1016/0022-3913(92)90051-B
- Tukey, J.W. et al. (1978). Variations of Box Plots. *The American Statistician*, 32(1), 12–16. doi:10.1080/00031305.1978.10479236
- Unterbrink, G.L. et al. (1995). Influence of light intensity on two restorative systems. *Journal of Dentistry*, 23(3), 183–189. doi:10.1016/0300-5712(95)93577-O

van Landuyt, K.L. et al. (2006). Bond strength of a mild self-etch adhesive with and without prior acid-etching. *Journal of Dentistry*, 34(1), 77–85. doi:10.1016/j.jdent.2005.04.001

van Meerbeek, B. et al. (1992). Factors affecting adhesion to mineralized tissues. *Operative dentistry*, Suppl 5, 111–124.

van Meerbeek, B. et al. (1998). The clinical performance of adhesives. *Journal of Dentistry*, 26(1), 1–20. doi:10.1016/S0300-5712(96)00070-X

Versluis, A., et al. (1997). Why do shear bond tests pull out dentin? *Journal of Dental Research*, 76(6), 1298-1307.

Versluis, A. et al. (1996). Does an Incremental Filling Technique Reduce Polymerization Shrinkage Stresses? *Journal of Dental Research*, 75(3), 871–878. doi:10.1177/00220345960750030301

Walter, D. (2009). Präparationstechnik für Adhäsivfüllungen. Quintessence Verlag, 2009(60), 693–702.

Wassell, R.W. et al. (1992). Subsurface deformation associated with hardness measurements of composites. *Dental Materials*, 8(4), 218–223. doi:10.1016/0109-5641(92)90088-T

Weaver, W.S. et al. (1988). A visible-light-activated resin cured through tooth structure. *European Journal of General Dentistry*, (36), 236–237.

de Wet, F.A. et al. (1991). The effect of placement technique on marginal adaptation of posterior resins.

Willems, G. et al. (1992). A classification of dental composites according to their morphological and mechanical characteristics. *Dental Materials*, 8(5), 310–319. doi:10.1016/0109-5641(92)90106-M

www.wikipedia.com. (2014). Wikipedia: Nanocomposite. Retrieved from <http://en.wikipedia.org/w/index.php?oldid=634119646>

www.wikipedia.de. (2014). Wikipedia: Komposit Zahnmedizin. Retrieved from [http://de.wikipedia.org/wiki/Komposit_\(Zahnmedizin\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Komposit_(Zahnmedizin))

Yamazaki, P.C. et al. (2006). Microleakage evaluation of a new low-shrinkage composite restorative material. Operative dentistry, 31(6), 670–676. doi:10.2341/05-129

Zantner, C. (2001). In-vitro-Studie zum Verschleiß von kommerziell verfügbaren Kompositen im Kausimulator (Dissertation). Ludwig-Maximilians-Universität, München. Retrieved from <http://books.google.de/books?id=QlJoYgEACAAJ>

9. Anhang

9.1. Abkürzungen

Abkürzung	Erklärung
ADA	American Dental Association
Bis-GMA	Bisphenol-Diglycidylmethacrylat: 2,2-Bis-(4-(2-Hydroxy-3-Methacryloxypropoxy)phenyl)propan sogenannten "Bowen-Monomer"
C-Faktor	Konfigurationsfaktor
DGZ	Deutsche Gesellschaft für Zahnmedizin
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
MOD-Präparation	Präparation mesial occlusal und distal
PMMA	Polymethylmethacrylat
REM	Rasterelektronenmikroskop
Ringer-Lösung	Isotonische Kochsalzlösung

tags	Verbund aufgrund rheologischer und geometrischer Effekte zwischen Zahnhartsubstanz, Bonding und Komposit
TEGDMA	Triethylenglykol-dimethacrylat
UDMA	Urethandimethacrylat

9.2. Materialliste

Tabelle 15: Aufstellung der Materialien und verwendeten Geräte

Lfd. Nr.	Materialname	Charge	Hersteller
1	SDR Farbe: A3	Lot: 090603 Lot: 1204000732	Dentsply Sirona International Susquehanna Commerce Center 221 W. Philadelphia Street P.O. Box 872, York, PA 17405-2558 United States
2	Ceram X duo Farbe: E3	Lot: 1011002281	VOCO GmbH Anton-Flettner-Straße 1 D-27472 Cuxhaven
3	Tetric Evo Ceram Bulk Fill Farbe: A3	Lot: 090603	Ivoclar Vivadent AG Bendererstrasse 2 FL-9494 Schaan
4	Filtek Bulk Fill Flowable Res- torative Farbe: A3	Lot: N371894	3M Deutschland GmbH Carl-Schurz-Straße 1 D-41460 Neuss
5	Voco X-tra fil Farbe: A3	Lot: 1221367	VOCO GmbH Anton-Flettner-Straße 1 D-27472 Cuxhaven
6	Voco X-tra base Farbe: A2	Lot: 1219179	VOCO GmbH Anton-Flettner-Straße 1 D-27472 Cuxhaven
7	GrandioSO Farbe: A2	Lot: 1221099	VOCO GmbH Anton-Flettner-Straße 1 D-27472 Cuxhaven
8	Venus Pearl Farbe: A2	Lot: 010022	Heraeus Kulzer GmbH Schlätterstraße 2 D-88142 Wasserburg
9	Total Etch Ivoclar Vivadent	Lot: R29459, N59212	Ivoclar Vivadent AG Bendererstrasse 2 FL-9494 Schaan
10	Total Etch Scotchbond 3M Espe	Lot: 496561	3M Deutschland GmbH Carl-Schurz-Straße 1 D-41460 Neuss
11	XP Bond	Lot: 1002000450, Lot: 1111002061	DENTSPLY Sirona Interna- tional Susquehanna Com- merce Center 221 W. Philadelphia Street P.O. Box 872, York, PA 17405-2558 United States

Materialliste

12	DBA Exite F	Lot: 3723848	Ivoclar Vivadent AG Bendererstrasse 2 FL-9494 Schaan
13	Futura Bond	Lot: 1216213	VOCO GmbH Anton-Flettner-Straße 1 D-27472 Cuxhaven
14	iBond	Lot: 010042	Heraeus Kulzer GmbH Schlätterstraße 2 D-88142 Wasserburg
15	SB universal	Lot: 041111	Kuraray Europe GmbH Philipp-Reis-Str. 4 D-65795 Hattersheim am Main
16	Bluephase	SN: 1100003832	Ivoclar Vivadent AG Bendererstrasse 2 FL-9494 Schaan
17	Elipar Free Light 2 430-480 nm	SN: 939823001486	3M Espe GmbH Espe-Platz D-82229 Seefeld
18	Occlubrush Kerrhawe		Kerrhawe SA Dr. H. von Weissenfluh AG Via Strecce 4 CH-6934 Bioggio, Schweiz
19	Diamantschleifer 100 µm	Nr: 835KR	Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG Trophagener Weg 25 D-32657 Lemgo Deutschland
20	Diamantfinierer 50 µm Diamantfinierer 25 µm	Nr: 8836KR Nr: 837KREF	Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG Trophagener Weg 25 D-32657 Lemgo Deutschland
21	Sof-Lex, mittel: 1982, fein: 1982 F		3M St. Paul MN 55144-1000 United States
22	Präparierdiamant Komet		Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG Trophagener Weg 25 D-32657 Lemgo
23	Finierdiamant Komet		Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG Trophagener Weg 25 D-32657 Lemgo
24	Rasterelektronenmikroskop	Leitz AMR 1200	Wetzlar Network Ernst-Leitz-Straße 30 D-35573 Wetzlar
25	Quantitative Randalanalyse Quanti-Gap (1990)		Stefan Küppers med. Softwarelösung Haagstr. 10 D-91054 Erlangen

26	Software für Statistik: R + CRAN for Windows GNU (General Public License)		Kurt Hornik http://CRAN.R-project.org Wirtschaftsuniversität Wien Institute for Statistics and Mathematics Welthandelsplatz 1 A-1020 Vienna
27	Sputteranlage	SEM Au-tocoating Unit E5200	Polaron Equipment Ltd Judges House Lewes Road Kent, United Kingdom
28	Sputter Coater	SC7620 Edwards	Polaron Equipment Ltd Judges House Lewes Road Kent, United Kingdom
29	Thermowechselbad Haake W15		Willytec GmbH Frankfurter Ring 193a D-80807 München
30	Emitech Kritisch Punkt-Trockner		GaLa Gabler Labor Intrumente Handels GmbH An der Schmalmach 42 D-65307 Bad Schwalbach
31	Impregum		Ivoclar Vivadent AG Bendererstrasse 2 FL-9494 Schaan
32	Epoxy DIE		Henkel AG & Co. KGaA Henkelstrasse 67 D-40589 Düsseldorf

9.3. Danksagungen

Herrn Herr Prof. Dr. med. dent. Karl-Heinz Kunzelmann danke ich für die freundliche Überlassung des interessanten Themas, die Auswertung der statistischen Daten und die hervorragende Unterstützung während dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. Reinhard Hickel möchte ich sehr für die Nutzung der Ressourcen der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie danken.

Mein besonderer Dank gilt dem Team des Forschungslabors Frau Gisela Dachs, Frau Evi Köbele und Frau Indra Nyamaa für fabelhafte Zusammenarbeit.

Herrn Dipl.-Ing. Thomas Obermeier danke ich herzlichst für die große Hilfsbereitschaft beim Betrieb des Rasterelektronenmikroskops und der Datenverarbeitung.

Bedanken möchte ich mich bei meiner Familie für die jahrelange Unterstützung während meines Studiums und der Anfertigung dieser Arbeit. Danke für den liebevollen Rückhalt und die stetige Motivation.

9.4. Lebenslauf

Der Lebenslauf enthält private Daten, die nicht zur Veröffentlichung vorgesehen sind.

9.5. Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Rainer Awiszus, die vorliegende Dissertation selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt zu haben.

Bei der Verfassung der Dissertation wurden keine anderen als die im Text aufgeführten Hilfsmittel verwendet.

Ein Promotionsverfahren wurde zu keinem früheren Zeitpunkt an einer anderen Hochschule oder bei einem anderen Fachbereich beantragt.

Fröndenberg, den 19.01.2017

Rainer Awiszus