Abteilung für Zahnerhaltung und Präventive Zahnmedizin,
Universität Witten/Herdecke

Longitudinale mikromorphologische 15-Jahres-Bewertung von Kompositfüllungen im Seitenzahnbereich unter Anwendung dreidimensionaler Rasterelektronenmikroskopie

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Grades eines Doctor rerum medicinalium

der Universität Witten/Herdecke

Fakultät für Gesundheit

vorgelegt von Wolfram Dietz
aus Erfurt
2012

Dekan:	apl. Prof. Dr. S. Wirth
Mentor:	Prof. Dr. Dr.h.c. P. Gängler
Zweitgutachter:	Prof. Dr. W. H. Arnold
Tag der Disputation:	06.06.2012

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung/ Summary	1
1.1	Zusammenfassung	1
1.2	Summary	3
2	Einführung	5
2.1	Entwicklung der Füllungstherapie	6
2.2	Komposite	6
2.3	Hybridkomposite	9
2.4	Klinische und mikromorphologische Bewertung dentaler Restaurationen	10
2.5	Möglichkeiten der quantitativen Bewertung dentaler Restaurationen	11
2.5.1	Semiquantitative klinisch-mikromorphologische Bewertung	11
2.5.2	Erweiterte quantitative Bewertung	12
3	Ziel der Arbeit	17
4	Material und Methoden	18
4.1	Material	18
4.2	Probanden	19
4.3	Kavitätenpräparation und Applikation des Hybridkomposites	20
4.4	Untersuchungsmethoden	20
4.4.1	Klinische Bewertung	21
4.4.2	Mikromorphologische Bewertung	23
4.4.2.1	Semiquantitative Bewertung nach den M-Kriterien des CPM-Index	23
4.4.2.2	Grenzen der semiquantitativen Bewertung nach den M-Kriterien	26
4.4.2.3	Quantitative Bewertung mit dreidimensionaler Rasterelektronenmikroskopie	29
4.4.2.4	Statistische Prüfung	33
5	Ergebnisse	34
5.1	Überlebensrate	34
5.2	Mikromorphologische Ergebnisse	36
5.2.1	Semiquantitative Bewertung nach den M-Kriterien des CPM-Index	36
5.2.1.1	Oberflächenrauigkeit	36

5.2.1.2 Oberflächentextur 38
5.2.1.3 Randschluss 39
5.2.1.4 Füllungsüberschüsse 41
5.2.1.5 Randabbrüche 43
5.2.1.6 Negative Stufenbildung 45
5.2.1.7 Mikroleakagen und Randspalten 47
5.2.1.8 Weitere Randimperfektionen 48
5.2.2 Quantitative Bewertung mit dreidimensionaler Rasterelektronenmikroskopie 49
5.2.2.1 Typische Einzelergebnisse zum Füllungsrandverhalten 50
5.2.2.1.1 Longitudinaler Verlauf eines perfekten Füllungsrandes (Baseline) zur negativen Stufe 50
5.2.2.1.2 Longitudinaler Verlauf bei Füllungsüberschuss (Baseline) zur negativen Stufe 55
5.2.2.1.3 Longitudinaler Verlauf einer negativen Stufe (Baseline) über 15 Jahre 60
5.2.2.1.4 Longitudinaler Verlauf einer Randvertiefung 65
5.2.2.2 Dynamik des Randverhaltens aller Füllungen 70
5.2.2.2.1 Verlauf der Stufenbildung 70
5.2.2.2.2 Verlauf der Bildung von Randvertiefungen 73

6 Diskussion 79
6.1 Methoden 79
6.1.1 Füllungsapplikation 79
6.1.2 Methoden der Füllungsbewertung 80
6.1.2.1 Methoden der klinischen Bewertung 81
6.1.2.2 Methode der semiquantitativen mikromorphologischen Bewertung 82
6.1.2.3 Quantitative Bewertungsmethoden einschließlich der Bewertung mittels dreidimensionaler Rasterelektronenmikroskopie 84
6.2 Ergebnisse 87
6.2.1 Semiquantitative mikromorphologische Ergebnisse 87
6.2.2 Quantitative mikromorphologische Ergebnisse 90
6.2.3 Longitudinale klinisch-mikromorphologische Gesamtbewertung der Hybridkomposit Visio-Molar X ®-Füllungen 92
6.3 Gesamtbewertung der Methoden und Ergebnis 94

7. Schlussfolgerungen 96

8. Literaturverzeichnis 98

9. Anhang 114
9.1 Abkürzungsverzeichnis 114
9.2 Hersteller der im Text genannten Geräte und Materialien 114
9.3 Daten der semiquantitativen REM Bewertung 115
9.4 Messwerte der quantitativen 3D-REM-Bewertung 116

Lebenslauf 126
Ehrenwörtliche Erklärung 127
Danksagung 128

1. Zusammenfassung/ Summary

1.1 Zusammenfasung

Eine 1987 begonnene in vivo-Studie zur Eignung des Hybridkomposites Visio-Molar X ® (ESPE, Seefeld/ Deutschland) für Füllungen im Seitenzahnbereich (Kavitäten der Klasse I und II) wurde als klinisch-mikromorphologische 5-Jahres-Kontrolle so konzipiert, dass sie danach über 10 Jahre und im Rahmen dieser Arbeit bis zu 15 Jahren fortgeführt werden konnte. Von 194 gelegten Füllungen standen 37 über die gesamte Kontrollzeit lückenlos für die Bewertung zur Verfügung.

Im Vorfeld dieser Arbeit wurden die klinischen Befunde nach den qualitativen und semiquantitativen **C**-Kriterien des CPM (**C**linical, **P**hotographical and **M**icromorphological Coding) -Index von mehreren Zahnärzten erhoben. Über die geprüfte 15-jährige Funktionszeit wurde für dieses Hybridkomposit im Seitenzahnbereich eine gute Bewertung bestätigt. Die Sekundärkariesrate konnte als gering und die Abrasionsresistenz als gut eingeschätzt werden.

Parallel zu der Erhebung der klinischen Befunde wurden jeweils Replikate der mit Kompositfüllungen therapierten Zähne angefertigt und semiquantitativ mikromorphologisch im Rasterelektronenmikroskop kontrolliert. Die Bewertung erfolgte im Rahmen dieser Studie zur Basisuntersuchung sowie nach 1, 5, 10 und 15 Jahren nach den **M**-Kriterien des CPM-Index: Oberflächenrauigkeit, Oberflächentextur, Randschluss, Füllungsüberschuss, Randabbrüche, negative Stufenbildung, Mikroleakagen und Randspalten sowie weitere Randimperfektionen. Vom Untersucher wurden jeder Füllung zu jedem Kontrollzeitpunkt und für jedes Kriterium Qualitätsmerkmale (Code 0 bis 3) zugeordnet. Die rechnergestützte longitudinale Bewertung dokumentierte die 15-jährige Dynamik von Veränderungen der Füllungsoberfläche und des Randverhaltens.

An 10 der 37 bis zu 15 Jahren kontrollierbaren Füllungen wurden an den Füllungsrändern profilometrische Messungen mit dreidimensionaler Rasterelektronenmikroskopie (3D-REM) durchgeführt. Damit konnten Höhen von Füllungsüberschüssen und negativen Stufen und folglich auch der randnahe Materialverlust exakt gemessen werden.

Die kumulative Überlebensrate wurde nach der Kaplan-Meier Methode ermittelt. Die morphometrischen Ergebnisse wurden mittels gepaartem t-Test statistisch geprüft. Die semiquantitativen mikromorphologischen Resultate ergänzten und bestätigten die klinischen Befunde: Die für das Hybridkomposit bereits zu Baseline typisch raue Oberfläche wurde bis zu 5 Jahren weiter aufgeraut und blieb dann nahezu unverändert bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes. Die für den Füllungsrand wesentlichen Kriterien „Randschluss“ und

„negative Stufenbildung“ belegten Qualitätsminderung im ersten Jahr und weiter bis zu 5 Jahren, dann nur noch geringe Verschlechterung und zwischen 10 und 15 Jahren Stagnation oder auch Verbesserung der Bewertung. Randspalten traten nicht auf und nur vereinzelt und temporär nachweisbare Mikroleakagen sowie wenige Randabbrüche beeinträchtigten kaum die Qualität der Füllungen. Mit dem im ersten und bis zum fünften Jahr deutlichen Abbau von Füllungsüberschüssen entstanden zwischenzeitlich perfekte Randabschnitte.

Das quantitative Verfahren mittels 3D-REM führte zu präziseren Ergebnissen und bestätigte, dass sich ab 5 Jahren Funktionszeit die marginale Integrität nur noch gering verschlechterte. Die morphometrischen Messungen zeigten, dass die Höhen der negativen Stufen zwischen 10 (Mittelwert -27,5 µm) und 15 Jahren (Mittelwert -20,5 µm) vielfach stabil oder sogar schwach rückläufig waren, wobei die Veränderungen der Mittelwerte zwischen 5 und 10 bzw. 10 und 15 Jahren nicht signifikant waren ($p=0,703$, $p=0,188$). Ein sich einstellendes Gleichgewicht der Abrasion von randnahem Füllungsmaterial und Schmelz verhinderte folglich eine tiefergehende Freilegung des Kavitätenrandes, was in Übereinstimmung stand mit der klinisch diagnostizierten niedrigen Sekundärkaries-Rate.

Die profilometrische Vermessung der Füllungsränder führte in 52,9% aller Messungen (238 von 450 Messungen) zum Nachweis von Randvertiefungen, die z.T. um ein Mehrfaches unter die Tiefe der negativen Stufen reichten. Diese Randvertiefungen erwiesen sich als zusätzlicher Verlust von Bondingmaterial, möglich durch Schrumpfung beim Legen der Füllung und später durch funktionsbedingte Abrasion des Materials der Bondingzone.

Die Resultate der 15-jährigen Langzeitstudien bestätigten in ihrer Gesamtheit für die Applikation der direkten Glasionomerzement Ketac-Bond®/Hybridkomposit Visio-Molar X®-Restaurationen im Seitenzahnbereich (Kavitätenklassen I und II) akzeptables marginales Verhalten, eine gute Anpassung an die Zahnhartsubstanz und hohe klinische Sicherheit.

Zusammen mit den gegenüber den vorangegangenen 5- und 10-Jahresstudien objektivierten Ergebnissen erwiesen sich die klinische und mikromorphologische Beurteilung als ein sich ergänzender Methodenkomplex zur sicheren longitudinalen Bewertung von Füllungen. Die 3D-REM ermöglichte eine Quantifizierung des Randverhaltens.

Die Dynamik des Randverhaltens über den gesamten Untersuchungszeitraum zeigte, dass Langzeitstudien dieser Größenordnung erforderlich sind. Das Interesse an 10- bis 20-jährigen Untersuchungen steht auch in Übereinstimmung mit der Idealforderung nach lebenslanger Haltbarkeit dentaler Füllungen, auch wenn wegen der hohen Flexibilität des Marktes für Füllungsmaterialien die Ergebnisse mehrjähriger Untersuchungen oft nur noch in die Verbesserung von Folgeprodukten eingebracht werden können.

1.2 Summary

An in-vivo study was started in 1987 monitoring hybrid composite Visio-Molar X ® (ESPE, Seefeld/Deutschland) direct restorations in posterior teeth (cavities Class I and II) and was designed for a clinical-micromorphologial evaluation up to 5 years of function and has been continued over the following 5 years and subsequently up to 15 years. Thirty seven out of 194 originally applied restorations could be longitudinally followed up over this time.

The clinical results according to the **C**-criteria of the CPM (**C**linical, **P**hotographical and **M**icromorphological Coding) index were previously estimated by several dentists and published. Up to 15 years of function a good clinical performance was proved. Additionally a low rate of clinically diagnosed secondary caries and an optimal abrasion resistance was found.

Simultaneously with the clinical investigations two-stage-replicas were taken from the restorations and used for the micromorphological evaluation by means of scanning electron microscopy. In connection with the current 15 year study the replicas at baseline, and after 1, 5, 10, and 15 years of function were evaluated according to the semiquantitative **M**-criteria of the CPM index including surface roughness, surface texture, marginal integrity, excess of material, marginal fractures, negative marginal ledges, marginal leakage and other filling imperfections. The individually coded findings of the fillings were computer assisted evaluated and showed the dynamic behaviour of filling surface and margin.

Additionally the filling margins of 10 out of the 37 fillings available up to 15 years were profilometrically investigated by means of three-dimensional scanning electron microscopy (3D-SEM). This method allowed the measurement of the heights of material excess, negative ledges and of the material loss next to the margin.

The cumulative survival rate of the fillings was calculated using the Kaplan-Meier estimator and the morphometrical results were statistically analysed by means of the paired t-test.

The semiquantitaive micromorphological results supplemented and confirmed the clinical findings: The typical rough hybrid composite surface (at baseline) was found most rough after 5 years without further deterioration up to 15 years. The fundamental criteria “marginal integrity” and “negative marginal ledges” demonstrated, that the most severe deteriorations were generated during the first year of function followed by moderate deterioration up to 5 years and afterwards up to 15 years of function the margin quality was nearly unaltered or lightly improved, respectively. Marginal leakage was not found.

The restoration quality was nearly not affected by sporadically and temporarily proved microleakages and few marginal fractures. Within the first year and up to 5 years of function, the degradation of material excess was resulting in a temporary generation of perfect margin sections.

The 3D-SEM based quantitative evaluation provided detailed results and verified the finding of slight deterioration of marginal integrity between 5 and 15 years: The measured heights of negative ledges were nearly stable or even diminished. Regarding the means of these values, no statistical significance was estimated between 5 and 10 as well as 10 and 15 years ($p=0.703$, $p=0.188$). The equilibrium of abrasive wear of enamel and the filling material next to the margin prevents an advanced exposure of enamel at the cavity margin, which was in agreement with the clinically diagnosed low rate of secondary caries.

In 52.9% of the profilometrical measurements marginal grooves were revealed, often with a depth beneath the level of the negative ledges. These marginal grooves are a result of polymerisation shrinkage during the filling application and following increased abrasive wear of the material of the bonding zone.

Altogether, the longitudinal 15year investigations proved the posterior glass-ionomer cement/ hybrid composite restorations (Ketac-Bond®/ Visio-Molar X®, ESPE, Seefeld/ Germany) to be a dental filling with acceptable marginal behaviour, good adaptation to the dental hard tissues and high clinical safety.

In comparison to the previous 5- and 10-year studies the combination of the clinical and advanced micromorphological investigations turned out to be a methodical complex for the authentic longitudinal evaluation of direct restorations. The 3D-SEM made possible the quantification of marginal behaviour.

The 15 year dynamics of marginal behaviour demonstrated the need for long term investigations in this range. The interest in evaluations over a period of 10 to 20 years is in agreement with the ideal goal of lifelong survival of dental restorations, even though the very fast development of dental materials is causing the circumstance, that the results of long term investigations are only valuable for upgrading secondary products.

2. Einführung

Die Füllungstherapie ist eine Grundaufgabe in der Zahnheilkunde. Allein zwischen der ersten in unserem Sprachraum bekannten Amalgam-Rezeptur aus dem Jahre 1528 (Riethe 1988a) und der Anwendung von Nanohybridkompositen (Terry 2004, Krämer et al. 2011) liegen beinahe fünfhundert Jahre wissenschaftlicher Bemühungen um die Versorgung kariös geschädigter Zähne. Dabei wurde und wird bis heute das Ziel verfolgt, bei optimaler Bioverträglichkeit (Beer et al. 1990, Schmalz 2002, Sigusch et al. 2012) und möglichst lebenslanger klinischer Akzeptanz (Black 1908) eine sehr große Patientenzahl mit biokompatiblen und langlebigen aber dennoch kostenverträglichen Restaurationen zu versorgen (Manhart et al. 2004).

Vor diesem Hintergrund erscheinen auf dem Markt in einer immer schnelleren Entwicklung neue und fortlaufend modifizierte Werkstoffe. Damit wachsen für die zahnmedizinische Forschung die Anforderungen an eine umfassende Überprüfung von Materialien und deren Applikationen (Downer et al. 1999, Chadwick et al. 2002, Hickel et al. 2007). Es werden umfangreiche materialkundliche und klinische Untersuchungen durchgeführt. Mit Blick auf die langzeitige klinische Akzeptanz der Füllungen sind longitudinale klinische Studien über 10 Jahre und mehr von zunehmender Bedeutung, was durch Metaanalysen aus jüngerer Vergangenheit belegt werden kann (Downer et al. 1999, Brunthaler et al. 2003, Manhart et al. 2004, Soares und Cavalheiro 2010). Gleichzeitig gelten mikromorphologische Untersuchungen seit über 20 Jahren als unverzichtbare optimierende Ergänzung von klinischen Überprüfungen (Hoyer et al. 1988, Gaengler et al. 1994, 2004). Dabei wird die üblicherweise genutzte Rasterelektronenmikroskopie (REM) auch zur quantitativen Bewertung von Oberflächen- und Randverhalten der Füllungen herangezogen (Roulet et al. 1989). Neben der Elektronenmikroskopie werden inzwischen sehr verschiedene und moderne materialkundliche Prüfverfahren zur quantitativen Bewertung der marginalen Adaption und des Verschleißverhaltens von dentalen Materialien genutzt. Beispiele sind die Anwendung von mechanischen (Ozel et al. 2008) und optischen Tastschnittverfahren (Sehr 2007), Farbstoffpenetration (Sauerzweig 2006), Lasertriangulation (Sinseder 2009), Laser-Scanning-Mikroskopie (Heurich et al. 2010) oder optischer Kohärenztomographie (Rominu et al. 2009).

2.1 Entwicklung der Füllungstherapie

Für die Füllungstherapie von kariös geschädigten Zähnen stehen seit Mitte des neunzehnten Jahrhunderts diverse Materialien zur Verfügung (Müller-Schneemayer 2004). In Deutschland wird eine frühe Amalgam-Füllung, die von einem historischen Schädelfund stammt, auf den Zeitraum zwischen den Jahren 1580 und 1600 datiert (Riethe 1988b) Die Applikation von Amalgam wurde zum Standard der Füllungstherapie (Witzel 1899, Shenoy 2008).

Eine erste massiv kontroverse Diskussion zur Anwendung des Succedaneum minerale (Silber-Amalgam) liegt bereits aus dem Jahre 1846 vor (Talma 1846). Während die damalige Ablehnung des Amalgams auf aus heutiger Sicht nicht eindeutigen klinischen Erfahrungen beruhte, wird diese Diskussion bis in die jüngste Zeit auf der Grundlage umfangreicher longitudinaler klinischer und mikromorphologischer Studien sowie nach in vitro-Untersuchungen fortgeführt (DGZ 2002, Müller-Schneemeyer 2004, Bernardo et al. 2007, Shenoy 2008, Corbo et al. 2009).

Obwohl den Silberamalgam-Füllungen im Seitenzahnbereich eine Langlebigkeit von bis zu 20 Jahren bescheinigt wird (Roulet 1997), förderten die anhaltend und kontrovers diskutierten Bedenken zu deren Biounverträglichkeit die parallele Anwendung verschiedener aber auch kostenintensiver Materialien wie Gold oder Keramik. Neben der umstrittenen Forderung nach Ablösung des Amalgams, für die es keine wissenschaftlich stichhaltige Begründung gibt, wuchs mit steigenden kosmetischen Ansprüchen das Interesse an zahnfarbenen Füllungsmaterialien, z.B. Kompositen, wobei dieser Anspruch heute auch für den Seitenzahnbereich erhoben wird (Manhart 2003).

2.2 Komposite

Ein wesentlicher Fortschritt wurde mit dem in den 1970er Jahren beginnenden Einsatz von Kompositen erreicht. Diese Bezeichnung steht für zusammengesetzte zahnfarbene plastische Füllungsmaterialien, die aus einer organischen Kunststoffmatrix bestehen, welche mit anorganischen Füllkörpern versetzt ist. Die Anwendung der Komposite erfolgte zunächst fast ausschließlich im Frontzahnbereich. Nach stetigen Verbesserungen der Materialeigenschaften, insbesondere durch einen erhöhten Füllkörpergehalt, werden sie seit Jahren mit steigendem Erfolg auch im Seitenzahnbereich eingesetzt (Hickel et al. 1994a, b, 2005).

Die kontinuierliche Entwicklung und breite Anwendung der Komposite (Ritter 1998) bis hin zum Universalkomposit für den Front- und Seitenzahnbereich (Manhardt 2003) begann einerseits mit der Verwendung des Bowen-Monomers (Bowen 1962) und andererseits unter Nutzung der Schmelzätztechnik (Buonocore 1955) und der daraus folgenden Adhäsivtechnik (Kunzelmann et al. 1993b, 2001). Bis zum heutigen Zeitpunkt ist diese Entwicklung durch das Bemühen um Materialien und Methoden geprägt, welche die Funktionalität und Stabilität (Phillips et al. 1971, 1981, Roberts et al. 1992, Ritter 1998, Frankenberger et al. 2003, Manhart et al. 2010, van Dijken und Pallesen 2011a) sowie Biokompatibilität (Geurtsen 2000, Staehle 2000, Sigusch et al. 2007) verbessern und die kosmetischen Vorteile von Kompositrestaurationen mit einfacher Verarbeitung und niedrigen Kosten verbinden (Selinka 2006, Pflaum 2009).

Für das Versagen von Kompositfüllungen sind mechanische Probleme verantwortlich (Hickel et al. 2000, Soares und Cavalheiro 2010). Diese verursachen Füllungsfrakturen, Randeinbrüche, Randspalten und Verschleißerscheinungen. Aus biologisch-medizinischer Sicht folgen den zunächst mechanischen Schäden Randspalt- und Sekundärkaries, Pulpairritation und Parodontalerkrankungen, die schließlich zum Misserfolg führen (Hickel und Manhart 2001, Hilton 2002a, b, Guelmann et al. 2002). In diesem Zusammenhang werden auch marginale Verfärbungen genannt.

Folglich werden die mechanischen Eigenschaften der Komposite wie Oberflächenrauigkeit, Druck- und Bruchfestigkeit, Abrasionsverhalten (Tyas und Wassenaar 1991, Willems et al. 1993, Ilie et al. 2005) und Elastizitätsmodul (Dietschi et al. 2002, Ilie et al. 2005), aber auch deren thermisches Verhalten (Krejci und Lutz 1991, Heintze und Lutz 2005, Fasold 2006, Lima et al. 2011) fortlaufend verbessert und möglichst an die entsprechenden Werte von Schmelz und Dentin angeglichen (Roulet 1994b). Besondere Aufmerksamkeit gilt der langzeitigen Stabilität der Kunstharz-Matrix und des Füller-Matrix-Verbundes (Ward 2005, Drummond 2008).

Von großer Bedeutung ist die marginale Integrität von dentalen Restaurationen (Roulet 1994a) und damit das longitudinale Randverhalten der Kompositfüllungen. Dieses wird wesentlich durch die Polymerisationsschrumpfung der Kompositmatrix, die nach Beendigung des Polymerisationsprozesses mit 2,61 bis 3,88 Vol.-% ermittelt wurde (Ellakwa et al. 2007), beeinflusst (Davidson et al. 1984, Alomari et al. 2007, Chiang 2009, Zentgraf 2009). Diese Schrumpfung verursacht Kontraktionsspannungen, welche Randspaltbildung sowie Komposit- und Schmelzrandfrakturen zur Folge haben (Davidson et al. 1984, Airoldi et al. 1992, Kunzelmann und Hickel 2001, Bryant und Mahler 2007). Ein Spalt von wenigen µm

(2µm) Breite erlaubt bereits das Eindringen von Bakterien, in der Folge die Bildung eines Bakterienfilmes und damit Säureproduktion (Brännström et al. 1991, Albrecht 2003). Somit führt der Randspalt zu Sekundärkaries (Roulet und Noak 1991a, Roulet 1994a, Beer 1992). Gleichzeitig wird eine Bakterieninvasion hin zur Pulpa ermöglicht (Roulet und Noak 1991a, Roulet 1994a, Thum 2004).

Zur Vermeidung der Polymerschrumpfung und zur Verbesserung der mechanischen und thermischen Eigenschaften wird bis in die jüngste Zeit an der Zusammensetzung der Kunstharz-Matrix (Alomari et al. 2007, Ellakwa et al. 2007, Spörlein 2010) und an geeigneten Füllstoffen sowie deren Partikelgröße und dem Füller-Matrix-Verbund (Lutz et al. 1983, Ilie et al. 2005, Drummond 2008) gearbeitet.

Zur Stabilisierung des Verbundes von Zahnhartsubstanz und Komposit wurde Glasionomerzement eingesetzt (Hoyer et al. 1989, Beer et al. 1990, Gängler et al. 1995), mit verschiedenen Unterfüllungsmaterialien experimentiert (Fasold 2006) und als wesentlicher Baustein die Anwendung von Adhäsiven als Standard fortlaufend entwickelt (Kunzelmann et al. 1993b, 2001, Manhart 2000, Glomb 2002, Nikaido et al. 2006, Romer 2006, Selinka 2006, van Dijken und Pallesen 2011a).

Die Komposite werden, klassischen Kriterien (Lutz et al. 1983) folgend, heute eingeteilt in

- **Makrofüllerkomposite** mit guten mechanischen Eigenschaften bei einem Einbau von relativ großen Partikeln (um 10 µm) mit einem Füllkörperanteil bis zu 75 Gew.-% (Anetsmann 2009). Diese großen Füllkörper verursachen schlechte Polierbarkeit und können leicht aus dem Verbund herausgerissen werden. Deshalb sind diese Materialien nicht mehr im Einsatz (Hellwig et al. 2003).
- **Mikrofüllerkomposite** mit sehr guten Politurergebnissen aber ungünstigeren mechanischen Eigenschaften. Die kleineren Partikel (bis 0,05 µm) lassen nur einen geringen Füllstoffanteil (50 Gew. %) zu, was zu hoher Polymerisationsschrumpfung führt oder anderenfalls, bei erhöhtem Füllstoffanteil, die Bruchfestigkeit gravierend verschlechtert (Hellwig et al. 2003, Duke 2003).
- **Hybridkomposite**, die durch die Kombination von Makro- und Mikrofüllern einen hohen Füllstoffanteil (bis 85%) ermöglichen, damit die Polymerisationsschrumpfung deutlich verringern und bei guten mechanischen Eigenschaften auch klinisch akzeptable Politurergebnisse aufweisen (Hellwig et al. 2003, Duke 2003).
  - **Feinpartikelhybridkomposite** mit Korngrößen bis 5 µm oder

- **Mikrohybridkomposite** mit mittleren Korngrößen zwischen 0,4 und 1,0 µm (Ernst et al. 2003, Anetsmann 2009, Krämer et al. 2011) und letztendlich

- **Nanokomposite** (Mitra et al. 2003, Sehr 2007) bzw.
- **Nanohybridkomposite**, die als aktuelle Weiterentwicklungen zu betrachten sind (Jandt und Sigusch 2009). Mit dem zuletzt genannten Material soll die Kombination von großen Füllkörpern im Mikrometerbereich und umhüllenden Nanopartikeln zu sehr guten mechanischen Eigenschaften, verringerter Polymerisationsschrumpfung und gleichzeitig optimaler Polierbarkeit und Glanzbeständigkeit führen (Terry 2004, Ward 2005, Anetsmann 2009, Krämer et al. 2011).

2.3 Hybridkomposite

Während für die gegenwärtig sicher sehr interessante Entwicklung der Nanokomposite oder auch von Ormoceren (Fraunhofer-Institut für Silicatforschung, Würzburg 2007; Spörlein 2010) im Rahmen dieser Arbeit keine Wertung vorgenommen werden kann, lässt sich feststellen, dass mit den vor gut 20 Jahren eingeführten Hybridkompositen ein Durchbruch bei der Applikation von Kompositfüllungen erfolgte. Zu den wesentlich verbesserten werkstoffkundlichen Eigenschaften gehören die Anpassung der Abrasionsstabilität des Komposites an die der Zahnhartsubstanz (Braem et al. 1987, Roulet 1994b), gute marginale Adaption, verbesserte Druck- und Biegefestigkeit und gute Farbanpassung an die Zahnhartsubstanz (Leinfelder 1991, Tyas und Wassenaar 1991, Roberts et al. 1992, Gängler et al. 1993, 2001, Krämer et al. 1996, Hellwig et al. 2003, Ilie et al. 2005).

Auf der Grundlage der optimierten Materialeigenschaften werden seit etwa 20 Jahren die Hybridkomposite auch für die Versorgung von Kavitäten im Seitenzahnbereich eingesetzt (Michel 2004, Pflaum 2009). Für derartige Restaurationen werden Glasionomerzement-Unterfüllungen und die Schichttechnik erfolgreich genutzt. Dieses Verfahren verringert Probleme durch Polymerisationsschrumpfung, insbesondere bei Kompositfüllungen größerer Kavitäten, und trägt bei eigener guter Biokompatibilität zum Schutz vor möglichen Pulpairritationen durch biounverträgliche Adhäsiv-oder Kompositbestandteile bei (Beer et al. 1990, Gaengler et al. 1995, 2001, 2005, Staehle 1998).

Inzwischen liegt zu Restaurationen von Klasse-I und -II Kavitäten eine große Zahl von in vitro- und zum Teil über mehrere Jahre verlaufenen in vivo-Bewertungen vor (Braem et al. 1987, Krejci et al. 1990a, 1998, Tyas und Wassenaar 1991, Leinfelder 1991, Pallesen und

Qvist 1995, Langer 1996, Hickel 1997, Nordbo et al. 1998, Gäbler 2002, Bruntaler et al. 2003, Hinz 2006, Dietz et al. 2008, Fagundes et al. 2009). Zu den Hybridkompositen gehört auch das in dieser Studie longitudinal über 15 Jahre bewertete **Visio-Molar X** ® (ESPE, Seefeld/ Deutschland) nach Versorgung von Klasse I- und II- Kavitäten.

An dieser Stelle soll angemerkt werden, dass adhäsive Seitenzahnfüllungen zwar seit längerer Zeit zum Standard gehören, dass aber die Techniksensitivität und die Behandlerabhängigkeit bei diesen Therapien nach wie vor als hoch eingeschätzt wird (Willems et al. 1993, Frankenberger 2009).

2.4 Klinische und mikromorphologische Bewertung dentaler Restaurationen

Die beträchtlichen Fortschritte in der Füllungstherapie konnten erreicht werden, indem die material- und technikbezogenen Entwicklungen kontinuierlich von longitudinalen klinisch kontrollierten Studien begleitet wurden. Mit deren Hilfe wurden und werden klinisches Verhalten und Langlebigkeit von Materialien beurteilt. Das gilt für Amalgamfüllungen (Kosa et al. 1991, Opdam et al. 2010) ebenso wie für Kompositfüllungen (Wilson et al. 1988, Palaniappan et al. 2011) oder auch für Inlays, Onlays oder Kronen (Stoll et al. 1999, Otto und De Nisco 2002, Dajka 2005).

Die Ergänzung der klinisch kontrollierten Studien durch eine mikromorphologische Bewertung der Füllungen führt zu einer unverzichtbaren Optimierung und Objektivierung der Ergebnisse (Hoyer et al. 1989, Gängler et al. 1995). Zur mikromorphologischen Beurteilung von Oberflächen- und Randstrukturen der Füllungen wird routinemäßig das Rasterelektronenmikroskop mit der Standardbilderzeugung im Sekundärelektronen-Modus (SE-Modus) eingesetzt. Um eine kontinuierliche longitudinale Kontrolle der Applikationen zu ermöglichen, werden zu definierten Zeitpunkten neben der klinischen Überprüfung Replikate angefertigt und untersucht (Roulet et al. 1989). Im einfachsten Falle dient das Mikroskop der Beschreibung und Fotodokumentation der Oberflächen- und Randstrukturen und deren longitudinaler Veränderung (Hoyer et al. 1988, Reis et al. 2003, Carstens 2007). Im Allgemeinen erfolgt die unten beschriebene semiquantitative Bewertung (Abschnitt 2.5.1).

Viele Fragen materialkundlicher Art oder auch zu biologischen Problemen können durch in vitro-Testmethoden geklärt werden. Diese Untersuchungen können jedoch nicht die zeitaufwändigeren klinischen und mikromorphologischen Studien ersetzen (Philips 1981, Roulet et al. 1987, 1991b). Insbesondere werden langjährige Bewertungen zur Dokumentation

der klinischen Sicherheit dentaler Füllungen als notwendig erachtet (Roulet 1987, Stassinakis et al. 1999, Gaengler et al. 2004), finden aber aufgrund unterschiedlicher Interessenlagen von Herstellern, gesellschaftlichen Bedürfnissen oder wissenschaftlichen Organisationen geteilte Unterstützung (Jokstad 2002).Im größten Teil der Untersuchungen werden ein- bis fünfjährige Funktionszeiten berücksichtigt. Einige Bewertungen liegen über Zeiträume von etwa 10 Jahren vor (Jokstad et al. 1994, Pallesen und Qvist 1995, 2003, Mair 1998, Dietz et al. 1998, Raskin et al. 1999, Gaengler et al. 2001, 2004, Opdam et al. 2007, van Dijken und Pallesen 2011b), darüber hinaus über 15 Jahre (Gruythusen et al. 1996, Gängler et al. 2005), 17 Jahre (Wilder et al. 1999, da Rosa Rodolpho et al. 2006) oder 20 Jahre (Rezwani-Kaminski et al. 2002).

In diesem Zusammenhang ist festzustellen, dass die heutige rasante Entwicklung dentaler Werkstoffe zu deren ebenso schneller Verdrängung vom Markt führen kann. Folglich muss in Erwägung gezogen werden, dass mit dem Abschluss aktueller aber longitudinaler Studien die erlangten Ergebnisse nur noch für die Verbesserung von Nachfolgeprodukten und/ oder -methoden zur Verfügung stehen (Ernst et al. 2003, Frankenberger et al. 2004, Meineber 2008). Die Schnelllebigkeit der Werkstoffentwicklung darf jedoch die Kontrolle der Langlebigkeit ihrer Anwendung nicht beeinflussen!

2.5 Möglichkeiten der quantitativen Bewertung dentaler Restaurationen

2.5.1 Semiquantitative klinisch-mikromorphologische Bewertung

Die Bewertungen des Langzeitverhaltens von Füllungen erhielt mit den klinisch orientierten **USPHS**-Kriterien (**U**nited **S**tates **P**ublic **H**ealth **S**ervice, San Francisco) (Cvar und Ryge 1971) eine reproduzierbare Basis, die bis in die jüngste Zeit genutzt wird (Bayne und Schmalz 2005, Lindberg et al. 2007, Gordan et al. 2009, Akimoto et al. 2011). Die Überprüfung von Hybridkomposit-Restaurationen im Seitenzahnbereich erforderte ein komplexeres Bewertungssystem, mit dem insbesondere die Dynamik longitudinaler Veränderungen am Füllungsrand sensibler beurteilt werden kann. Mit dem USPHS kompatiblen **CPM**-Index (**C**linical, **P**hotographical und **M**icromorphological Coding) (Hoyer et al. 1988, 1989) wurden klinische Bewertungen durch photographische Dokumentation und mikromorphologische Beurteilung zu einem semiquantitativen System ergänzt, das ebenfalls in vielen Studien

angewendet wird (Kosa et al. 1991, Hoyer et al. 1993, Gängler et al. 1995, Gäbler 2002, Rezwani-Kaminski et al. 2002, Kiene et al. 2004, Bergmann 2007, Meineber 2008).

Die klinische Beurteilung erfolgt mittels Spiegel und Sonde und ist eine subjektive qualitative Bewertung von anatomischer Form, Material- und Oberflächenqualität. Nur bei dem Randschluss und der Verfärbung des Füllungsrandes werden Längenverhältnisse von optimalem und fehlerhaftem Rand quantitativ verglichen (Hoyer et al. 1988).

Ergänzend ist die mikromorphologische Beurteilung nach definierten Kriterien im REM (Blunck 1988, Hoyer et al. 1988, Roulet et al. 1989) zu einer bewährten semiquantitativen Standardmethode geworden (Sauerzweig 2006). Grundlage der Quantifizierung ist die Ermittlung der Anteile von qualitätsmindernden bzw. beschädigten Bereichen von Füllungsoberfläche oder Füllungsrand im Verhältnis zur Gesamtfläche bzw. zur gesamten Randlänge der Füllung. Dazu werden von den restaurierten Zähnen angefertigte Replikate der mikroskopischen Untersuchung zugeführt. Bei longitudinalen in vivo-Studien kann durch dieses nondestruktive Verfahren zu definierten Kontrollzeitpunkten die Herstellung von Replikaten derselben Zähne wiederholt werden. Am mikroskopischen Bild wird das Oberflächenprofil eingeschätzt und einzelne Flächen- bzw. Randabschnitte gemäß den vorgegebenen Kriterien eingeordnet und rechnergestützt bewertet (Roulet et al. 1989, Gaengler et al. 1994, 2004, Dietz et al. 1998, Dietrich et al. 2000, Gäbler 2002, Palichleb 2007, Meineber 2008, Große 2009, Zentgraf 2009). Die für diese Arbeit verwendete Replikatechnik lässt die Darstellung von Feinstrukturen der Zahnoberfläche von weniger als 0,1µm zu (Dietz et al. 2004).

Eine kritische Einschätzung von Arbeitsweise und Standard-Bilderzeugung am REM führt zu der Feststellung, dass die Beurteilung ein- und derselben Füllung nach den jeweils verwendeten Kriterien durch die individuelle Betrachtungsweise verschiedener Untersucher beeinflusst wird und zu Abweichungen bei den jeweiligen Untersuchungsergebnissen führen kann (Steinbrenner et al. 1995, Kostka 1996, Bunte 2001, Dietz et al. 2005, 2008, 2009, Stoll et al. 2007, Große 2009). Die Verknüpfung von individueller Beurteilung und rechnergestützter Bewertung ist folglich als ein semiquantitatives Verfahren zu betrachten.

2.5.2 Erweiterte quantitative Bewertung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 94 Publikationen zur quantitativen Beurteilung dentaler Restaurationen ausgewertet. Davon bedienten sich 61 Untersuchungen der standardmäßigen

REM mit anschließender computergestützter Bewertung gemäß den oben genannten Kriterien.

Mit dem Ziel, die Bewertung des Randverhaltens und der Oberflächen von dentalen Restaurationen weiter zu objektivieren, werden zahlreiche Untersuchungs- und Messverfahren, zum Teil ergänzend zur REM, genutzt. Nachfolgend werden einige der unterschiedlichsten Verfahren dargestellt oder genannt. Die am häufigsten, oft ergänzend verwendete Methode, ist die

- **Farbstoffpenetration.** Dieses effektive, aber destruktive Verfahren ermöglicht die quantitative Beurteilung von Randspalten bezüglich horizontaler und insbesondere vertikaler Ausdehnung. Die Eindringtiefe des Farbstoffes wird nach definiertem Beschleifen der Restauration bewertet (Dietrich et al. 2000) oder an vertikalen Schliffen des Zahnes im Lichtmikroskop gemessen (Haberkorn 2007). Die große Sensibilität ermöglicht den Nachweis minimaler Randundichtigkeiten (Idriss et al. 2003) und ist bezüglich der Information zur Spalttiefe der rasterelektronenmikroskopischen Oberflächendarstellung überlegen (Kostka 1996, Thum 2004). Die marginale Farbstoffkonzentration kann nach Pulverisierung des Objektes auch spektrometrisch ermittelt werden (Aguiar et al. 2002). Nanoleakagen können nach Silberpenetration an Querschliffen im Feldemissions-REM mit Rückstreuelektronen (RE)-Detektor bewertet werden (Kubo et al. 2002).
- Die **Profilometrie**, gelegentlich ebenfalls parallel zur REM genutzt, wird zur Quantifizierung von Oberflächenparametern wie Rauigkeit, aber auch zur Bewertung des Füllungsrandes herangezogen. Es werden sehr unterschiedliche Messverfahren angewendet:
  - Bei dem klassischen **mechanischen Profilometer** wird die Füllungsoberfläche über einen **mechanischen Mikrotaster** im **Tastschnittverfahren** erfasst (Kunzelmann et al. 1993a, Krämer und Kunzelmann 1995), was noch heute zur quantitativen Bewertung der Oberflächenrauigkeit genutzt wird (Hornung 2005, Ozel et al. 2008 Heurich et al. 2010). Ebenfalls im **Tastschnittverfahren**, aber berührungsfrei, werden z.B. die Oberflächen von Hybridkomposit und Nanopartikelkomposit mit einem **Lasertaster** profilometrisch bewertet (Brandt 2006, Anetsmann 2009). Im ersten Fall wird die Oberfläche mechanisch mit einer Diamantspitze abgetastet, im zweiten Fall gewinnt man die Höheninformation über das Nachfokussieren eines das Oberflächenrelief abfahrenden Laserstrahles. Die Topographie kann durch die Tastschnittverfahren bei einer Tastweite, also bewertbarer Höhendifferenz, zwischen einigen zehn und

einigen Hundert Mikrometern bei vertikaler Auflösung von wenigen Mikrometern vermessen werden.

- In der **optischen Profilometrie** stehen gerätetechnisch sehr aufwändige Methoden mit vertikaler Auflösung von etwa 1 nm für die Charakterisierung relativ glatter Oberflächen (Topographie von weniger als 200 nm) zur Verfügung. Dazu gehört die **interferrometrische Analyse** mit **monochromatischem Licht**, wobei über die Laufzeitunterschiede des von der Probenoberfläche reflektierten Lichtes und eines zugehörigen Referenzstrahles die Erstellung eines Höhenprofils ermöglicht wird. Eine vergleichbare Auflösung erreicht die **optische Kohärenztomographie,** die mit **Weißlicht** ebenfalls nach dem Interferrometerprinzip arbeitet. Die unterschiedlichen Fokuslängen der verschiedenen Lichtwellenlängen sind hierbei die physikalische Grundlage für die Berechnung eines Oberflächenmodelles. Das Verfahren findet aktuell Eingang in die medizinische Diagnostik und wird auch zur nichtinvasiven 3D-Darstellung von Randspalten und Materialdefekten von Kompositfüllungen eingesetzt, wobei eine axiale Auflösung im 1 µm-Bereich genannt wird (Rominu et al. 2009). Mit dieser Meßmethode wird auch die klinische Diagnose von Randspalten zur "Früherkennung" des Sekundärkaries-Risikos angestrebt (De Melo et al. 2005).
- Der **3D-Laserscanner**, ursprünglich mit der CAD/CAM-Technologie zur Vermessung und Herstellung von dentalen Restaurationen eingesetzt, wird vielfach für die klinische Verschleißanalyse von Kompositfüllungen genutzt (Teuffel et al. 1995). Nach dem Triangulationsverfahren wird das Objekt mit einer Punktlichtquelle beleuchtet. Eine unter definierten trigonometrischen Bedingungen installierte Digital-kamera erkennt den lateralen Versatz des abgebildeten Lichtpunktes, womit aus bekanntem Winkel und Abstand zwischen Beleuchtung, Objekt und Kamera die Höhe des Lichtpunktes auf dem Objekt berechnet werden kann. Auf dieser Basis werden z.B. vor und nach einem zu untersuchenden Verschleißprozess dreidimensionale Bilder erzeugt, deren rechnergestützte Überlagerung letztendlich über Höhen-differenzen und damit Materialverlust informiert (Angele 2009). Das schnelle Verfahren verarbeitet bis zu 14.000 Bildpunkte pro Sekunde (Uekermann 2007) und ermöglicht eine vertikale Auflösung von etwa 5 µm (Gschoßmann 2002, Teuffel et al. 2005).

➢ Das **Lichtmikroskop** wird in verschiedenen Varianten zur quantitativen Bewertung von Restaurationen herangezogen:

- Sowohl das Stereomikroskop (Denner 2003) als auch das übliche Auflichtmikroskop mit Digitalkamera und Bildanalyseprogramm erlauben eine quantitative Randspalt-Analyse sowohl von Kronen (Rudolph 2006) als auch von Kompositfüllungen (Frankenberger et al. 2003). Die Evaluierung erfolgt am extrahierten Zahn oder am Replikat und lässt z.B. im Messmikroskop eine Genauigkeit von +/- 10µm zu (Blößer 2000). Das Fluoreszenzmikroskop wird z.B. zur in vitro-Bewertung der Füllungsränder von Klasse-V Restaurationen eingesetzt (Heintze et al. 2005).
- Bildstapel von Schnittserien im 100µm-Abstand durch Restaurationen werden mit Hilfe eines **digitalen Mikroskops** und analytischer Software zur 3D-Darstellung und quantitativen Bewertung von Spaltbildungen herangezogen (Iwami et al. 2005).
- Das **Laser-Scanning-Mikroskop** kann unter Anwendung der Konfokaltechnik über die Erzeugung von Bildstapeln ebenfalls dreidimensionale Oberflächenmodelle erstellen und ermöglicht so eine quantitative Bewertung von Kompositfüllungen (Heintze 2005, Rominu et al. 2009, Heurich et al. 2010) bei vertikaler Auflösung von 0,5 µm bzw. 0,2 µm lateraler Auflösung.

➢ Auch die **Röntgentomographie** wird in jüngster Zeit zur Erzeugung dreidimensionaler Bilder von Kompositfüllungen herangezogen, wobei eine laterale Auflösung von 8 µm genannt wird (Drummond 2008, Chiang 2009).

➢ Die **Rasterelektronenmikroskopie** bietet ebenfalls Möglichkeiten zur Objektivierung der üblichen semiquantitativen Bewertung:

- Das klassische **stereomikroskopische Prinzip** kann auch hier für die räumliche Darstellung der Oberflächentopographie genutzt werden (Gotthardt 1942). Die notwendige Tiefeninformation wird üblicherweise und aufwändig über die aufeinanderfolgende Anfertigung zweier Bilder derselben Objektstelle bei unterschiedlichen aber definierten Kippwinkeln des Objektes gewonnen (Hemmleb 2002).
- Für die **dreidimensionale Rasterelektronenmikroskopie** steht seit einigen Jahren mit der Anwendung eines Vier-Quadranten-Rückstreuelektronen-Detektors (4Q-RE-Detektor) und nachfolgender topographischer Bildverarbeitung eine elegante technische Lösung zur Verfügung (Point electronic GmbH 2010) Mit der digitalen simultanen Aufzeichnung von vier Einzelbildern unter jeweils verschiedenen aber definierten Kippwinkeln - ähnlich dem oben genannten Stereoprinzip - wird das Datenmaterial für die Berechnung von Stereobildern, eines dreidimensionalen Oberflächenmodelles und von Höhenprofilen bereitgestellt.

Dieses zuletzt genannte System der 3D-REM wurde im Rahmen zahnmedizinischer Untersuchungen erstmalig in einem Pilotprojekt zur dreidimensionalen Darstellung und profilometrischen Bewertung der marginalen Adaption sowie der Oberflächen von dentalen Füllungen erprobt (Dietz et al. 2005, Meineber 2008, Dietz et al. 2009). Es wurde im Rahmen der hier vorgelegten Untersuchungen zur Überprüfung der Langlebigkeit (15 Jahre) des Hybridkomposites Visio-Molar X ® verwendet (Dietz et al. 2008, 2012), wobei die zur Verfügung stehende gerätetechnische Ausstattung eine z-Auflösung von besser als 0,1µm ermöglichte.

3. Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit war:

1. Kompositfüllungen (Hybridkomposit Visio-Molar X ®, ESPE Seefeld/ Deutschland) der Kavitätenklassen I und II über einen Zeitraum von 15 Jahren mikromorphologisch bezüglich Oberflächen- und Randverhalten zu bewerten und
2. diese Bewertung mit den Ergebnissen der parallel verlaufenen klinischen Untersuchungen an denselben Restaurationen zu vergleichen.
3. Daneben sollten Eignung und Grenzen der mikromorphologischen Kriterien des langjährig genutzten CPM-Index (Clinical-Photographical-Micromorphological Coding) durch einen Vergleich dieser Langzeitstudie mit den vorangegangenen 5- und 10-Jahresstudien an denselben Restaurationen eingeschätzt werden und
4. eine objektivere mikromorphologische Beurteilung sollte durch Anwendung einer neueren dreidimensionalen rasterelektronenmikroskopischen Methodik und der damit verbundenen Quantifizierung der Angaben zu Stufenbildung und zum randnahen Materialverlust ermöglicht werden.

4 Material und Methoden

Grundlage dieser Arbeit ist eine klinisch und mikromorpholgisch kontrollierte Studie zur Eignung von Hybridkomposit-Füllungen mit Ketac-Bond/ Visio-Molar X ® (ESPE, Seefeld/ Deutschland) bei Kavitäten der Klasse I und II im Seitenzahnbereich, die 1987 begonnen und nunmehr über einen 15-Jahres-Zeitraum fortgesetzt wurde.

Diese Untersuchungen wurde unter der Studienleitung von Herrn Prof. Dr. Dr.h.c. P. Gängler und Frau Prof. Dr. I. Hoyer in der Poliklinik für Konservierende Zahnheilkunde der Sektion Stomatologie an der Medizinischen Akademie/ Hochschule Erfurt begonnen und waren so konzipiert, dass sie als longitudinale 10- bis 20-Jahres-Studie fortgeführt werden konnten. Der klinische Teil des Projektes wurde von Frau Dr. R. Montag und die mikromorphologischen Untersuchungen vom Autor dieser Arbeit, Dipl.-Phys. W. Dietz, geleitet. Die 10- und 15-Jahres-Studien wurden in diesem Rahmen an der Klinik für Konservierende Zahnheilkunde am Universitätsklinikum der Friedrich-Schiller-Universität Jena in Kooperation mit der Abteilung für Konservierende Zahnheilkunde der Fakultät für Gesundheit/ Zahn-Mund-und Kieferheilkunde an der Universität Witten/ Herdecke ausgeführt.

Über den gesamten Untersuchungszeitraum wurden die Füllungen sowohl klinisch kontrolliert als auch das Oberflächen- und Randverhalten der Restaurationen mikromorphologisch beurteilt. Die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen und Bewertungen zu den 5- und 10-Jahres-Studien wurden von mehreren Zahnärzten ausgeführt und wie folgt publiziert: 5-Jahres-Studie: Hoyer et al. 1993, Langer 1996, 10-Jahrestudie: Dietz et al. 1998, Gäbler 2002, Gaengler et al 2004.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die semiquantitativen mikromorphologischen Bewertungen von Baseline bis zu 10 Jahren Funktionszeit erneut ausgeführt und um die 15-Jahres-Resultate sowie um die quantitativen Resultate der dreidimensionalen Rasterelektronenmikroskopie für den Zeitraum von Baseline bis zu 15 Jahren ergänzt.

4.1 Material

Die Füllungen der Kavitätenklassen I und II wurden nach Unterfüllung mit Ketac-Bond ® (ESPE Seefeld/ Deutschland) mit dem röntgensichtbaren lichthärtenden Hybridkomposit Visio-Molar X ® (ESPE Seefeld/ Deutschland) in Schichttechnik gelegt. Das Visio-Molar X ® wird vom Hersteller wie in Tabelle 1 aufgelistet charakterisiert:

Tab. 1: Bestandteile und physikalisch-mechanische Eigenschaften des Hybridkomposites Visio-Molar X®

Hybridkomposit Visio-Molar X ®		
Bestandteile		Gewichts-%
organische Matrix	bifunktionelles Methacrylat	12%
anorganische Phase (silanisiert)	Quarz	63,2%
	hochdisperses SiO_2	7,0%
	röntgensichtbares Übergangsmetallfluorid	16,8%
	Fotoinitiator/ Pigmente	1,0%
physialisch-mechanische Eigenschaften:		Einheit
	Druckfestigkeit	400 MPa
	Biegefestigkeit	120 MPa
	Oberflächenhärte	600 MPa
	Wasseraufnahme	0,2mg/cm²
	Polymerisationsschrumpfung	2,5%
	Polymerisationstiefe	3,0 mm
	Radioopazität	250 % AL

4.2 Probanden

In die Studie wurden Probanden (Alter von 15 bis 52 Jahren) mit primär kariösen Läsionen kleineren und mittleren Ausmaßes (Kavitätenklassen I und II) an Prämolaren und Molaren einbezogen. Nach Freigabe der Studie durch die Ethikkommission der Medizinischen Akademie Erfurt und Aufklärung der Probanden erfolgte deren Einverständniserklärung.

Von ursprünglich 194 gelegten Füllungen verblieben insgesamt 37 Füllungen bei 16 Patienten für die sowohl klinische als auch mikromorphologische kontinuierliche Bewertung über 15 Jahre. Von diesen 37 Restaurationen waren 30 in der Kavitätenklasse I und 7 in der Kavitätenklasse II eingeordnet.

4.3 Kavitätenpräparation und Applikation des Hybridkomposites

194 Füllungen wurden 1987 von vier Zahnärzten der Poliklinik für Konservierende Zahnheilkunde der Sektion Stomatologie an der Medizinischen Hochschule Erfurt gelegt. Mit retentiv-mikroretentiver Präparationstechnik erfolgte eine substanzschonende Kavitätenpräparation mit leichter zirkulärer Anschrägung der Schmelzränder. Die approximale Stufe bei Füllungen der Klasse II lag stets im Schmelzbereich. Die Kavitätenränder aller Füllungen sollten nicht in Okklusionskontakt sein und die okklusionstragenden Höcker wurden erhalten. Nach Farbauswahl und Kofferdamanlage wurden die Kavitäten mit physiologischer Kochsalzlösung gereinigt und eine Unterfüllung mit dem Glasionomerzement Ketac-Bond ® (ESPE, Seefeld/ Deutschland) gelegt. Auf die angeschrägten Schmelzränder wurde ein Ätzgel (ESPE, Seefeld/ Deutschland) appliziert und eine Minute belassen, danach wurde 30 Sekunden mit Wasser abgespült und schließlich getrocknet. Nach der Benetzung der Kavitätenränder mit dem Universalbond-Material Visio-Bond ® (ESPE, Seefeld/ Deutschland),welches dünn verblasen und polymerisiert wurde, erfolgte incremental der Aufbau der Kompositfüllung mit Visio-Molar X ®, wobei jede Schicht separat eine Minute mit dem Lichtleitgerät Elipar ® (ESPE, Seefeld/ Deutschland) polymerisiert wurde. Für die optimale Polymerisation der approximalen Füllungsanteile wurden Lichtkeile und transparente Matrizen genutzt. Mit feinstkörnigen Diamanten und Strips erfolgte die End- und Feinausarbeitung, mit Silikongummipolierern und Polierstrips wurde das Finishing abgeschlossen.

4.4 Untersuchungsmethoden

Zur longitudinalen Bewertung der Füllungen wurden über den gesamten Untersuchungszeitraum von den in die Studie involvierten Zahnärzten der Polikliniken für Konservierende Zahnheilkunde der Sektion Stomatologie an der Medizinischen Hochschule Erfurt bzw. am Universitätsklinikum der Friedrich-Schiller-Universität Jena die klinischen Befunde erhoben.

Weiterhin wurden in den Elektronenmikroskopischen Zentren der Medizinischen Hochschule Erfurt und des Universitätsklinikums der Friedrich-Schiller-Universität Jena mikromorphologische Untersuchungen durchgeführt. Diese Untersuchungen erfolgten für die vorangegangenen 5- und 10- Jahres-Studien sowie für die nun vorgelegte 15-Jahres-Studie stets an Replikaten und jeweils für den gesamten Untersuchungszeitraum und durch

verschiedene Untersucher. Grundlage der Bewertungen war der **CPM**-Index (**C**linical, **P**hotographical and **M**icromorphological Coding) (Hoyer et al. 1988, Kosa et al. 1991).

Für die mikromorphologische Bewertung wurden im Rahmen dieser Studie von jeweils 10 Füllungen die bereits vorliegenden Replikate bis zu 10 Jahren Funktionszeit erneut und die nachfolgend angefertigten Replikate ergänzend bis zum Ende des 15-jährigen Zeitraumes untersucht.

Eine erste mikromorphologische Bewertung erfolgte analog zu den vorangegangenen Studien nach den semiquantitativen M-Kriterien des CPM-Index im REM.

In einer zweiten, parallel durchgeführten Bewertung wurden die neuen Möglichkeiten der 3D-REM mittels 4Q-RE-Detektor im REM und anschließender digitaler Bildverarbeitung zur verbesserten quantitativen Erfassung von mikromorphologischen Veränderungen an den Kompositfüllungen genutzt (Dietz 2008). Dieses Verfahren war zuvor in einer Pilotstudie bei einer vergleichenden Untersuchung von Komposit- und Amalgamfüllungen geprüft worden (Dietz et al. 2005, Meineber 2008, Dietz et al. 2009).

4.4.1 Klinische Bewertung

Die klinische Bewertung mittels Spiegel und Sonde erfolgte nach den in Tabelle 2 definierten C-Kriterien des CPM-Index. (Hoyer et al. 1988, Gäbler 2002). Im Rahmen der vorangegangenen 5- und 10-Jahres-Studien waren die Kontrollzeitpunkte unmittelbar nach Legen der Füllungen (Baseline), nach 6 Monaten Tragezeit und dann über 10 Jahre jährlich festgelegt worden. Für diese 15-Jahres-Studie wurden die Bewertungen zu Baseline, nach 1, 5, 10 und 15 Jahren berücksichtigt.

Parallel wurden von einigen Füllungen standardisierte Color-Photographien (M 1:10) angefertigt und nach den mit Tabelle 2 äquivalenten P-Kriterien ausgewertet.

Daneben wurde zu jeder klinischen Untersuchung ein thermischer (F12-Spray, Laborchemie Apolda/ Deutschland bzw. Coolan, Voco, Cuxhaven/ Deutschland) und ein elektrischer Sensibilitätstest (Sensitest, MLW, Berlin/ Deutschland) durchgeführt (Langer 1996, Gäbler 2002, Gaengler et al. 2005).

Tab. 2: Klinische und gleichzeitig photographische Kriterien des **CPM**-Index (**C**-, **P**-Kriterien)

Klinische (und fotografische) Kriterien des CPM-Index	
Kriterium	Codierung - Beschreibung
1. Anatomische Form	0 - korrekte anatomische Form 1 - mangelhafte Umrissgestaltung 2 - mangelhafte Füllungskontur 3 - Umrissgestaltung und Füllungskontur mangelhaft 4 - Fraktur der Füllung oder Füllungsverlust (teilweise bis vollständig) 5 - Fraktur der Füllung oder Füllungsverlust bei mangelhafter Füllungskontur und/ oder Umrissgestaltung
2. Farbverhalten	0 - entspricht dem des Zahnschmelzes, glänzend 1 - entspricht dem des Zahnschmelzes, nicht glänzend 2 - zu hell 3- zu dunkel
3. Oberflächenqualität	0 - glatte, homogene Oberfläche 1 - glatte, inhomogene Oberfläche 2 - raue, homogene Oberfläche 3 - raue, inhomogene Oberfläche
4. Abrasion	0 - kein Substanzverlust 1 - lokalisierter Substanzverlust entsprechend individueller Muster 2 - lokalisierter Substanzverlust 3 - ausgeprägter Substanzverlust
5. Randschluss	0 - nicht sondierbarer Füllungsrand 1 - sondierbarer Füllungsrand im Bereich von Fissurenausläufern, Nischen u.ä. an bis zu 1/3 des Gesamtumfanges 2 - sondierbarer Füllungsrand im Bereich weitgehend gerader Randteile an zu bis 1/3 des Gesamtumfanges 3 - sondierbarer Füllungsrand an mehr als 1/3 des Gesamtumfanges 4 - Randspalt
6. Stufenbildung	0 - keine Stufenbildung 1 - Füllungsüberschuss 2 - negative Stufenbildung 3 - sowohl positive als auch negative Stufenbildung
7. Verfärbungen des Füllungsrandes	0 - keine Verfärbungen 1 - erkennbare Verfärbungen im Bereich von Fissurenausläufern, Nischen u. ä. an bis zu 1/3 des Gesamtumfanges 2 - erkennbare Verfärbungen im Bereich weitgehend gerader Randteile an bis zu 1/3 des Gesamtumfanges 3 – an mehr als 1/3 des Füllungsrandes erkennbare Verfärbung 4 - Sekundärkaries mit Kavitation
8. Klinische Akzeptanz	0 - korrekte Füllung 1 - geringe Abweichung von der Regel , klinisch akzeptabel 2 - klinisch nicht akzeptabel, korrigierbar 3 - Füllung sollte aus präventiven Gründen ersetzt werden 4 - Füllung muss unverzüglich ersetzt werden

4.4.2 Mikromorphologische Bewertung

4.4.2.1 Semiquantitative Bewertung nach den M-Kriterien des CPM-Index

Die mikromorphologischen Untersuchungen wurden zur Objektivierung und Ergänzung der klinischen Befunde mittels Replikatechnik im Rasterelektronenmikroskop durchgeführt. Für diese nondestruktive, indirekte Methode wurden die restaurierten Zähne zu den Kontrollzeitpunkten der klinischen Untersuchungen (im Rahmen dieser Studie zu Baseline, nach 1, 5, 10 und 15 Jahren) mit Hilfe eines Korrekturabdruckes mit Vinylpolysiloxan Permagum ® Putty und Permagum ® Light (ESPE, Seefeld/ Deutschland) abgeformt. Aus methodisch-technischen Gründen konnte nur der okklusale Teil der Restaurationen erfasst werden. Nach Säuberung und Entfettung mit Äthylalkohol wurden die Abformungen mit dem Epoxidharz Epon ® (Serva, Heidelberg/ Deutschland) ausgegossen. Die ausgehärteten Epon-Modelle wurden einer stereomikroskopischen Kontrolle bezüglich Verunreinigungen der Oberflächen unterzogen und gegebenenfalls gereinigt. Danach wurden die Epon-Replikate in der Hochvakuumbedampfungsanlage B 30 (Hochvakuumtechnik Dresden/ Deutschland) bzw. im Sputter-Coater SCD 005 (BAL-TEC/ Liechtenstein) mit ca. 30 nm Gold beschichtet. Die elektronenmikroskopischen Untersuchungen zu den mikromorphologischen Kriterien erfolgten am REM Philips SEM 515 (Philips, Eindhoven/ Niederlande) bei 20 kV im Standard-Sekundärelektronen-Modus.

Zur mikrofotografischen Dokumentation wurden stets REM-Übersichtsaufnahmen (M: etwa 20:1) angefertigt. Von auffälligen Veränderungen bzw. besonders charakteristischen Bereichen des Füllungsrandes und auch von den Füllungsoberflächen wurden Detailaufnahmen (bis zu M: 5000:1) erstellt. Zur Beurteilung des zeitlichen Verlaufes von Veränderungen wurden diese ausgewählten Objektstellen zu allen Untersuchungszeitpunkten bei den vorgegebenen Vergrößerungen dokumentiert.

Die mikromorphologische Kontrolle erfolgte nach den modifizierten M-Kriterien des CPM-Index (Gäbler 2002). Grundlage dieser semiquantitativen Bewertung war die Ermittlung der Anteile von qualitätsmindernden Bereichen von Füllungsoberfläche und Füllungsrand. Diese Daten wurden zu den Kontrollzeitpunkten durch subjektive Beurteilung im REM für jede Füllung nach den verschiedenen Kriterien und gemäß den zugehörigen Codierungen erstellt, tabellarisch zusammengefasst und graphisch dargestellt. Mit den in Tabelle 3 definierten M-Kriterien wurden die nachfolgend charakterisierten Eigenschaften der Füllungsoberflächen und -ränder in ihren zeitlichen Veränderungen bewertet.

- Das Kriterium „**Oberflächenrauigkeit**“ beschreibt den material- und herstellungsbedingten Oberflächenzustand und die physikalisch, chemisch und biologisch bedingten Veränderungen (normalerweise Aufrauung) der Oberfläche. Als optimal (Code 0) gilt eine glatt polierte, aus werkstoffkundlicher und klinischer Sicht einwandfreie Oberfläche.
- Die „**Oberflächentextur**“ erfasst verarbeitungs- und/ oder nutzungsbedingte Inhomogenitäten der Füllung, wie zum Beispiel abrasionsbedingt eröffnete Poren, Kratzer oder lokale Destruktionen in Bereichen mit direktem Antagonistenkontakt. Dieses Kriterium ergänzt die Bewertung der Oberflächenrauigkeit.
- Die Qualität des „**Randschlusses**“ wird vom Anteil des perfekten Füllungsrandes an dessen Gesamtlänge bestimmt. Ein perfekter Füllungsrand liegt vor, wenn in dessen Umgebung der Übergang vom Schmelz zur Füllung nur an einer Veränderung der Oberflächenstruktur erkennbar ist. In die Bewertung des Randschlusses fließen auch die Ergebnisse der vier nachfolgenden Kriterien ein.
- Der „**Füllungsüberschuss**“ registriert die beim Legen der Füllung entstandenen positiven Stufen.
- Das Kriterium „**Randabbrüche**“ bewertet den Anteil von freigelegten Bereichen des Kavitätenrandes, die durch randnahen Bruch des Füllungsmaterials entstanden sind. Dieses sowie die zwei folgenden Kriterien sind in Bezug auf Randspalt- und Sekundärkaries von besonderer Bedeutung.
- Mit der „**negativen Stufenbildung**“ werden Randbereiche berücksichtigt, bei denen das Niveau der Füllungsoberfläche tiefer als der Kavitätenrand liegt und folglich präparierter Schmelz frei liegt. Ursache sind Materialunterschuss beim Legen der Füllung oder überwiegende Abrasion des Füllungsmaterials.
- Das Kriterium „**Mikroleakagen und Randspalten**“ erfasst die Randanteile mit Mikrospalten von geringer Ausdehnung und Tiefe. Diese können sowohl herstellungs- als auch nutzungsbedingt entstanden sein. Darüber hinaus werden mit dem Code 3 unabhängig von ihrer Längsausdehnung und deutlich in die Tiefe reichende Trennungen zwischen Füllung und Zahnhartsubstanz, also Randspalten, berücksichtigt.
- Mit den „**weiteren Randimperfektionen**“ werden Frakturen randnaher Füllungsanteile und Schmelzfrakturen bewertet.

Tab. 3: Mikromorphologische Kriterien (**M**-Kriterien) des **CPM**-Index

Mikromorphologische Kriterien des **CPM**-Index	
Kriterium	Codierung
1. Oberflächenrauigkeit	0 - die gesamte Oberfläche ist glatt 1 - lokale Rauigkeiten, mindestens 2/3 der Oberfläche sind glatt 2 - 1/3 bis 2/3 der Oberfläche sind glatt 3 - weniger als 1/3 der Oberfläche ist glatt
2. Oberflächentextur	0 - die Oberfläche ist homogen und weist keine oder regelmäßig verteilte Substrukturen auf 1 - lokale Inhomogenitäten, mindestens 2/3 der Oberfläche sind homogen und ohne regelmäßig verteilte Substrukturen 2 - 1/3 bis 2/3 der Oberfläche sind homogen und weisen keine oder regelmäßig verteilte Substrukturen auf 3 - weniger als 1/3 der Oberfläche ist homogen und weist keine oder regelmäßig verteilte Substrukturen auf
3. Randschluss	0 - perfekter Rand 1 - lokale Randimperfektionen, mindestens 2/3 des Füllungsrandes sind perfekt 2 - 1/3 bis 2/3 des Füllungsrandes sind perfekt 3 - weniger als 1/3 des Füllungsrandes ist perfekt
4. Füllungsüberschüsse	0 - keine Füllungsüberschüsse 1 - Füllungsüberschüsse an bis zu 1/3 des Gesamtumfanges 2 - Füllungsüberschüsse an 1/3 bis 2/3 des Gesamtumfanges 3 – Füllungsüberschüsse an mehr als 2/3 des Gesamtumfanges
5. Randabbrüche	0 - keine Randabbrüche 1 - Randabbrüche an bis zu 1/3 des Gesamtumfanges 2 - Randabbrüche an 1/3 bis 2/3 des Gesamtumfanges 3 - Randabbrüche an mehr als 2/3 des Gesamtumfanges
6. Negative Stufenbildung	0 - keine negative Stufenbildung 1 - negative Stufenbildung an bis zu 1/3 des Gesamtumfanges 2 - negative Stufenbildung an 1/3 bis 2/3 des Gesamtumfanges 3 - negative Stufenbildung an mehr als 2/3 des Gesamtumfanges
7. Mikroleakagen und Randspalten	0 - keine Mikroleakagen, keine Randspalten 1 - vereinzelte Mikroleakagen im Grenzflächenbereich 2 - ausgeprägte Mikroleakagen 3 - Mikroleakagen und Randspalten
8. Weitere Randimperfektionen (Frakturen randnaher Füllungsanteile und Schmelzfrakturen)	0 - keine weiteren Randimperfektionen 1 - weitere Randimperfektionen an bis zu 1/3 des Gesamtumfanges 2 - weitere Randimperfektionen an 1/3 bis 2/3 des Gesamtumfanges 3 - weitere Randtimperfektionen an mehr als 2/3 des Gesamtumfanges

4.4.2.2 Grenzen der semiquantitativen Bewertung nach den M-Kriterien

Ein kritischer Vergleich der vorangegangenen 5- und 10-Jahres-Studien (Langer 1996, Gäbler 2002) und dieser 15-Jahres-Studie zu den Visio-Molar X ®-Füllungen zeigte, dass die Beurteilung ein und derselben Füllung (an ein und demselben Replikat) nach den Kriterien dieses semiquantitativen Bewertungssystems durch die individuelle Betrachtungsweise der verschiedenen Untersucher beeinflusst werden kann.

Mit Tabelle 4 und den Abbildungen 1, 2 und 3 wird diese Problematik für das Kriterium „negative Stufenbildung“ erkennbar. Am Beispiel des prozentualen Anteils von Füllungen mit Codierung 3 (Tab. 4, fett umrandeter Bereich und Abb. 1, 2 und 3, Fünf-Jahressäule) zeigte sich, dass jeweils nach 5 Jahren Funktionszeit von Untersucher A (5-Jahresstudie) dieser deutlich geringer (58%), von Untersucher B (10-Jahresstudie) dagegen höher (85%) eingeschätzt wurde als von Untersucher C (15-Jahresstudie) mit 70%.

Tab. 4: Mikromorphologische Bewertungen von Visio-Molar X ®-Füllungen nach dem **CPM**-Index (**M**-Kriterien): Vergleich der Ergebnisse von Untersucher A, B und C am Beispiel der negativen Stufe und der Codierungen 2 und 3 (Anteil der Füllungen in Prozent)

Code	Untersucher	Baseline	1 Jahr	5 Jahre	10 Jahre	15 Jahre
2 (negative Stufe an 1/3 - 2/3 des Randes)	A	0%	30%	33%		
	B	2%	7%	11%	9%	
	C	13%	38%	27%	30%	30%
3 (negative Stufe an mehr als 2/3 des Randes)	A	0%	8%	58%		
	B	0%	78%	85%	89%	
	C	0%	32%	70%	70%	65%

Problematisch für das üblicherweise angewendete Quantifizierungsverfahren erwies sich die Tatsache, dass durch die individuelle Arbeitsweise der Untersucher am REM mit der Wahl von z.B. Kippwinkel der Probe oder gewählten Kontrastverhältnissen die Angaben zum Füllungsrandverhalten wie Stufenverlauf und -höhe und damit Aussagen zu Material-überschuss oder -verlust nicht immer exakt reproduzierbar waren (Steinbrenner et al. 1995, Dietz et al.2005, 2009, Stoll et al. 2007). Es ist festzustellen, dass für die hier untersuchten Füllungen am Beispiel des wesentlichen Kriteriums „negative Stufenbildung“ die drei Untersucher die Dynamik der Qualitätsverschlechterung eindeutig dokumentiert, aber den Maßstab für die Codierung deutlich unterschiedlich angesetzt haben (Abb. 1, 2 und 3).

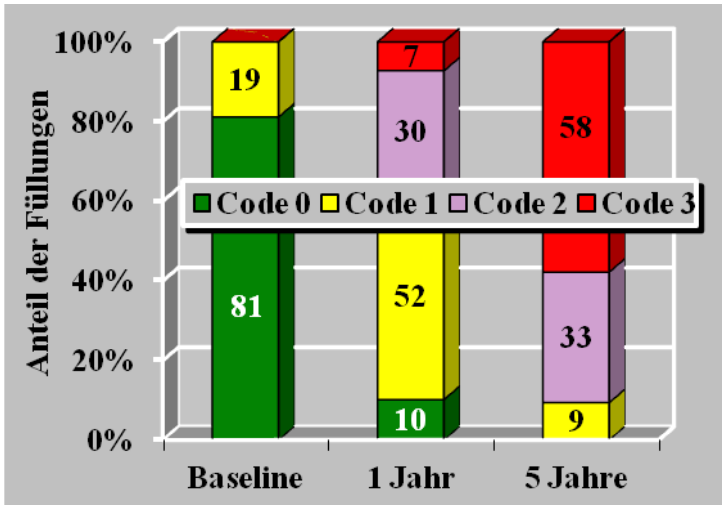


Abb. 1: Kriterium „negative Stufenbildung“ in der 5-Jahres-Studie, Codierung 0-3, Bewertung durch Untersucher A (Anteile der Füllungen in Prozent, n=64)

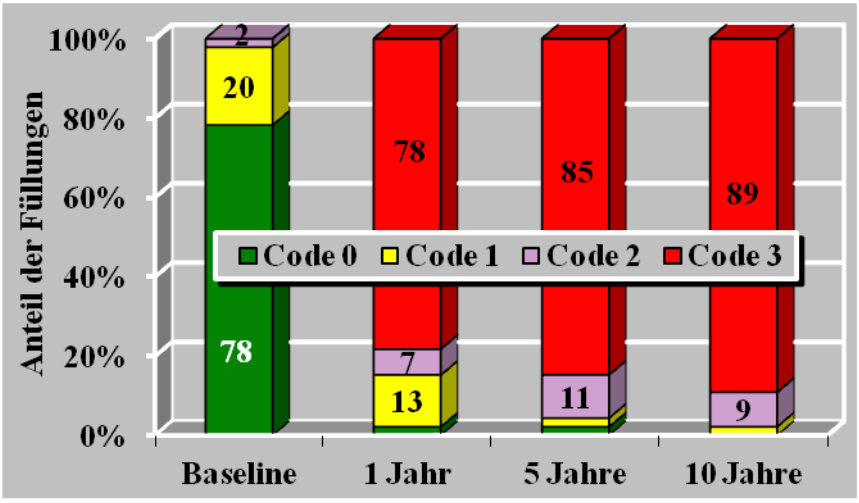


Abb. 2: Kriterium „negative Stufenbildung“ in der 10-Jahres-Studie, Codierung 0-3, Bewertung durch Untersucher B (Anteile der Füllungen in Prozent, n=46)

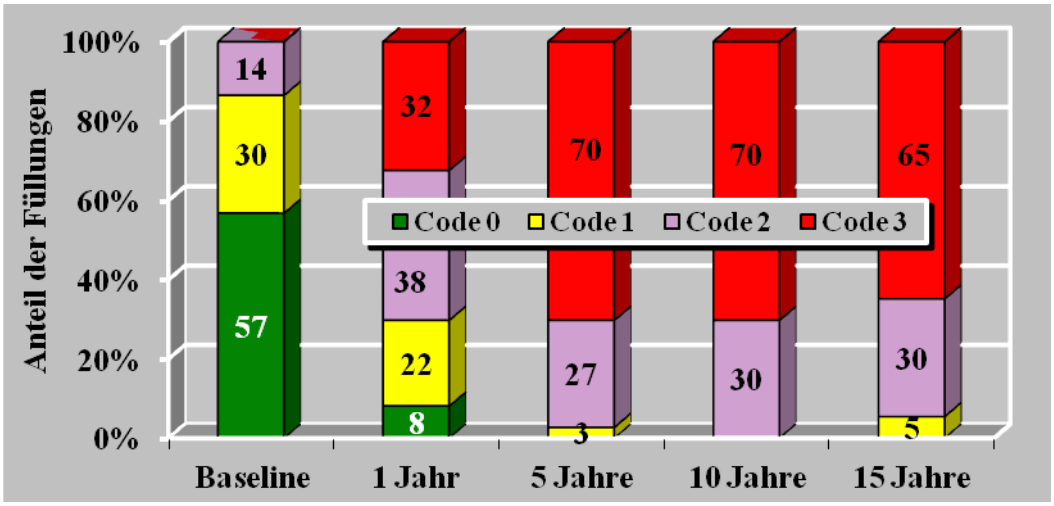


Abb. 3: Kriterium „negative Stufenbildung“ in der 15-Jahres-Studie, Codierung 0-3, Bewertung durch Untersucher C (Anteile der Füllungen in Prozent, n=37)

Die Begrenzung auf eine nur „semiquantitative“ Bewertung des Füllungsrandes ist mit der im REM üblicherweise genutzten Bilderzeugung und -auswertung gegeben. Im REM werden für die Bilderzeugung im Standardmodus von den verschiedenen Wechselwirkungen zwischen Elektronenstrahl und Probe die im Objekt generierten Sekundärelektronen (SE) genutzt (Abb. 4). Einerseits ist die Ausbeute an Sekundärelektronen unter anderem vom Oberflächenrelief abhängig, andererseits werden diese aus dem kompletten Raum über der Probe vom SE-Detektor „angesaugt“ und dienen folglich „winkelunabhängig“ dem Bildaufbau. Tatsächlich ermöglicht das mit Sekundärelektronen erzeugte Standardbild nicht ad hoc eine quantitative Beschreibung des Oberflächenprofils. Somit erfolgt die in vielen Studien praktizierte und auch von uns genutzte rasterelektronenmikroskopische Bewertung von dentalen Füllungen gemäß den M-Kriterien des CPM-Index durch eine individuelle Beurteilung des Oberflächenreliefs im mikroskopischen Bild. Eine mögliche Verbesserung wären aufeinanderfolgende Aufnahmen ein und derselben Objektstelle bei unterschiedlichen aber definierten Kippwinkeln (des Objektes) entsprechend dem Stereoprinzip, die eine rechnergestützte topographische Auswertung erlaubten. Diese aufwändige Technik wird für die longitudinale Bewertung von Füllungen nicht routinemäßig verwendet.

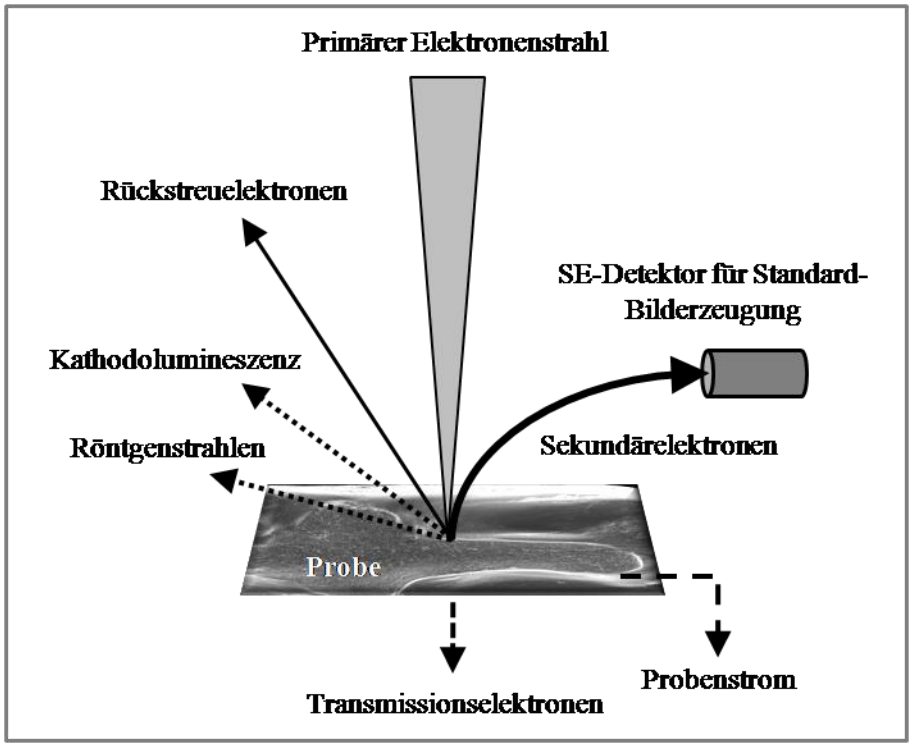


Abb. 4: Wechselwirkung zwischen Elektronenstrahl und Probe im Rasterelektronenmikroskop, Sekundärelektronen werden im Standardmodus zur Bilderzeugung genutzt

4.4.2.3 Quantitative Bewertung mit dreidimensionaler Rasterelektronenmikroskopie

Im Rahmen dieser 15-Jahresstudie wurde eine neue Möglichkeit der dreidimensionalen Rasterelektronenmikroskopie genutzt. Die mit der oben beschriebenen REM-Standard-Technik durchgeführte und individuell geprägte semiquantitative Bewertung konnte damit für die wesentlichen Kriterien „**negative Stufenbildung**“ und „**Füllungsüberschuss**“ objektiviert werden, zusätzlich wurde die Quantifizierung von **marginalem Materialverlust** möglich.

Die Bilderzeugung erfolgt bei diesem Verfahren über die ebenfalls übliche Detektierung von Rückstreuelektronen (RE, Abb. 5). Hierbei tragen nur die vom Objekt rückgestreuten Elektronen des Primärstrahles, die auf geradlinigem Wege die Detektorfläche treffen, zur Bilderzeugung bei. Damit wird der Bildinhalt abhängig vom „Blickwinkel“ des Detektors. Eine elegante Möglichkeit der topographischen Bildauswertung ergibt sich über einen unter dem Objektiv des REM fest installierten Vierfach-Detektor (Abb. 5). Dieser Vier-Quadranten-Rückstreuelektronen-Detektor (4Q-RE-Detektor, Point electronic, Halle/ Deutschland) erlaubt - ohne zusätzlichen Arbeitsaufwand - die gleichzeitige Aufnahme von jeweils vier Bildern aus vier verschiedenen aber definierten Blickwinkeln von einer ausgewählten Objektstelle. Damit steht mit einem Arbeitsgang eine ähnlich dem stereo-mikroskopischen Prinzip erzeugte Vierfach-Bildkombination zur Verfügung (Abb. 6), die mit der topographischen Software Mex 4.1 (Alicona Imaging, Grambach/ Österreich) verarbeitet werden kann. Unter Berücksichtigung der geometrischen Daten des Detektors (Einfallswinkel der Rückstreuelektronen), des Arbeitsabstandes Objekt - Detektor und der mikroskopischen Vergrößerung wird sowohl eine dreidimensionale Rekonstruktionen der Oberfläche als Digitales Oberflächenmodell (DOM, Abb. 7) erstellt als auch eine profilometrische Bewertung der Höhenverhältnisse am Füllungsrand möglich (Abb. 8). Daneben können informative Stereobilder angefertigt werden (Abb. 9). Die Auswertung der Höhenprofile gestattet in der uns zur Verfügung stehenden Ausstattung und unter den Arbeitsbedingungen am REM (20 kV, Arbeitsabstand 25mm, Vergrößerung bis ca. 6000x nutzbar) die Bestimmung von Stufenhöhen mit einer Genauigkeit von 0,1µm.

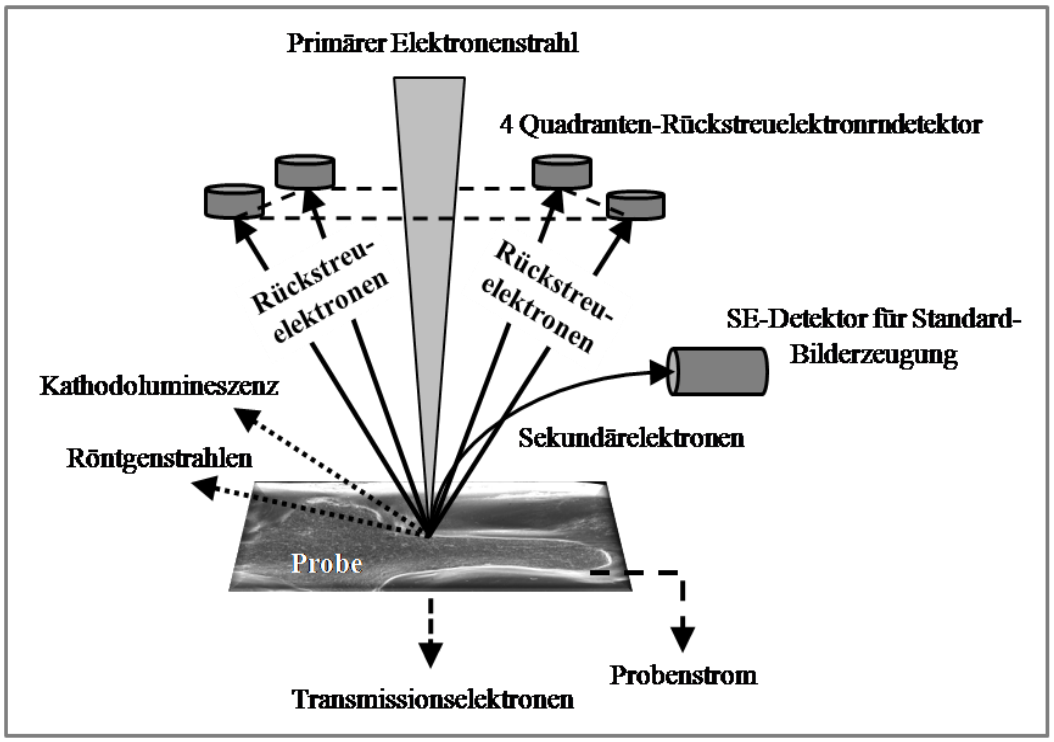


Abb. 5: Wechselwirkung zwischen Elektronenstrahl und Probe im Rasterelektronenmikroskop, Detektierung von Rückstreuelektronen unter vier definierten „Blickwinkeln“

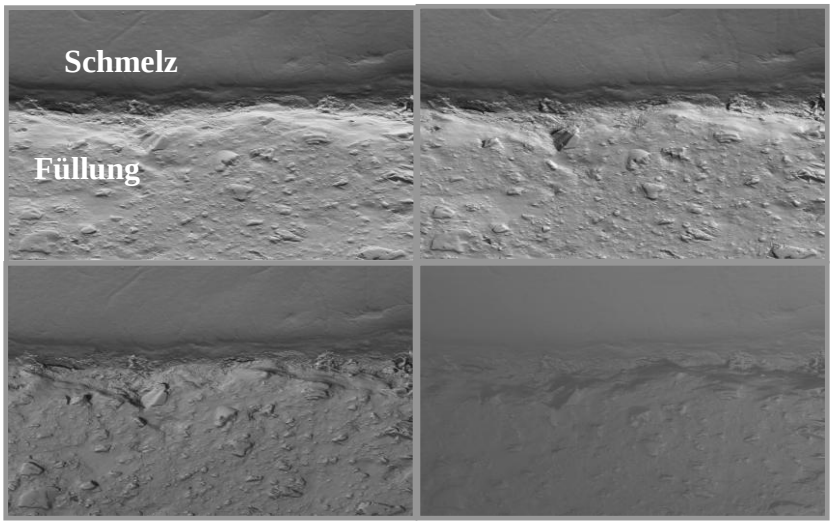


Abb. 6: 4Q-RE-Bildkombination eines Komposit-Füllungsrandes

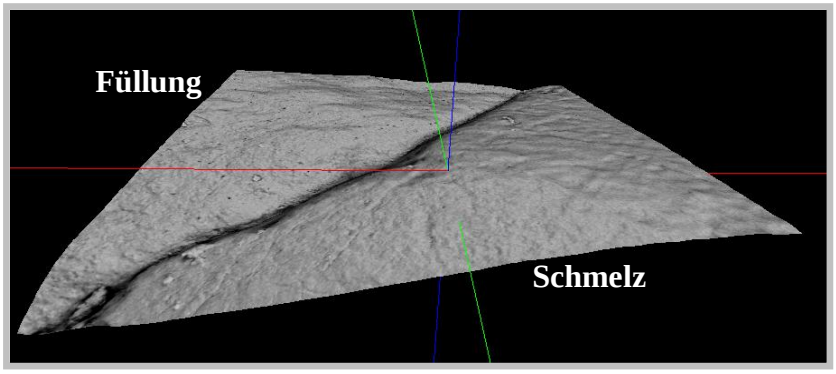
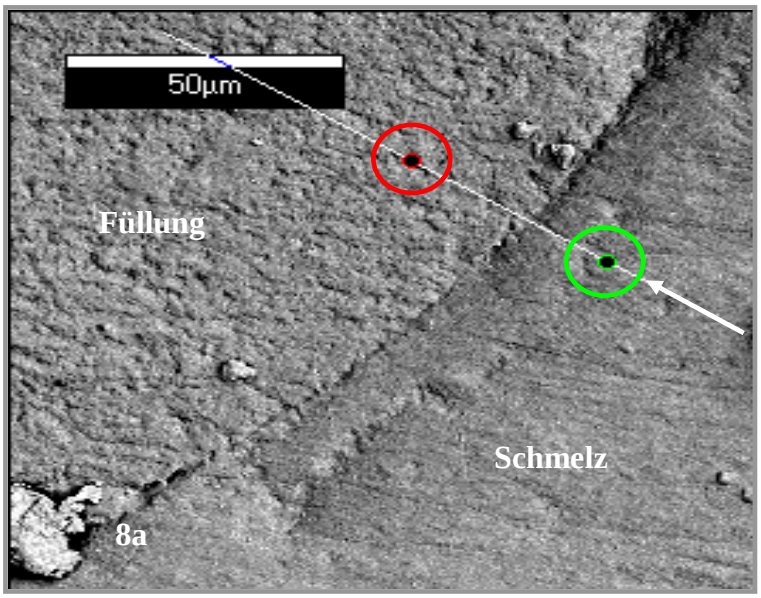


Abb. 7: Digitales Oberflächenmodell (DOM) eines Komposit-Füllungsrandes (nach 6-monatiger Funktionszeit, negative Stufenbildung) aus der 4Q-RE-Bildkombination berechnet



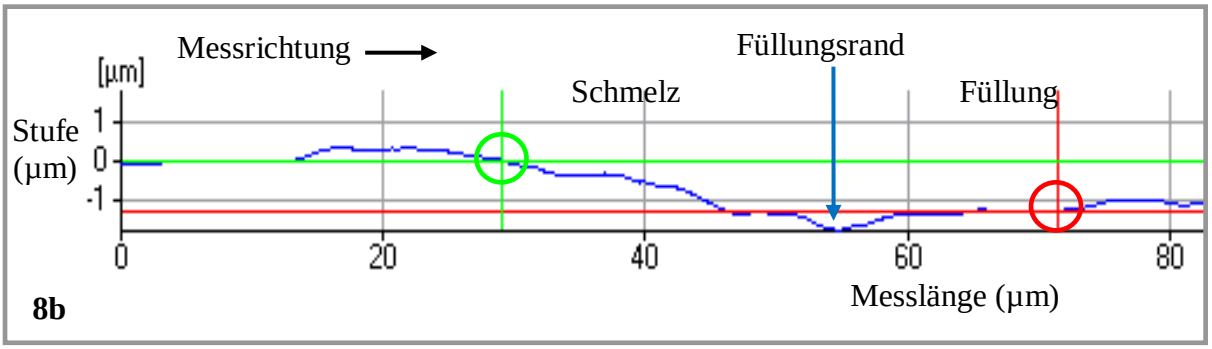
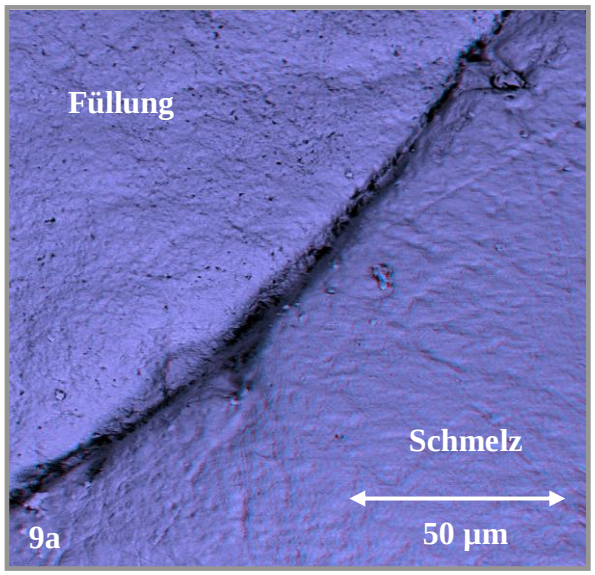


Abb. 8: Profilometrische Bewertung eines Komposit-Füllungsrandes (nach 6-monatiger Funktionszeit)
a: Aus der 4Q-RE-Bildkombination berechnetes Texturbild mit Höhenprofil-Messlinie (L), Messrichtung von grünem zu rotem Punkt (Pfeil), mikr. Vergr. 400:1
b: Entlang der Messlinie (Abb. 8a) erstelltes Höhenprofil, geringfügige negative Stufe (-1,3µm)



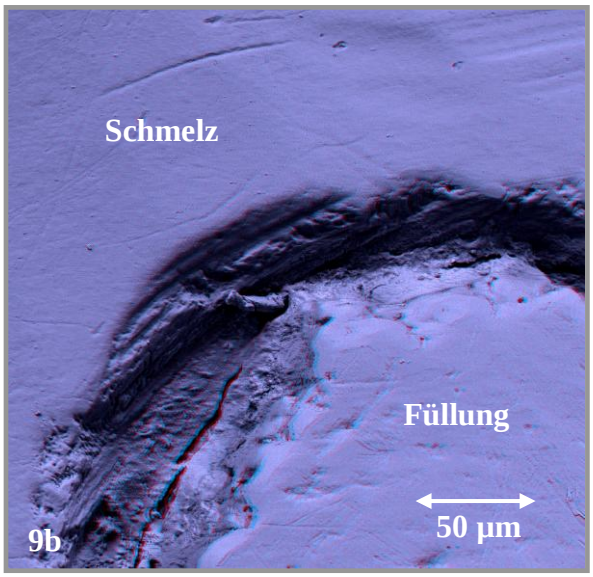


Abb. 9: Beispiele von Stereobildern, Füllungsränder, aus 4Q-RE-Bildkombinationen berechnet
a: Komposit-Füllungsrand, nach 6-monatiger Funktionszeit, Füllung und Messbereich wie Abb. 7, 8
b: Amalgam-Füllungsrand, nach 6-monatiger Funktionszeit, positive (!) Stufe mit Randvertiefung und Mikroleakage (ML), mikr. Vergr. 200:1 (mit beiliegender Stereobrille zu betrachten)

Von den in der 15-Jahres-Studie für die standardmäßige mikromorphologische Untersuchung noch zur Verfügung stehenden 37 Füllungen, die kontinuierlich nachuntersucht werden konnten, wurden 10 mit diesem 3D-REM Verfahren bewertet. Zu den ausgewählten Untersuchungszeitpunkten Baseline, 1, 5, 10 und 15 Jahre wurden jeweils von drei charakteristischen Bereichen des Füllungsrandes dreidimensionale Bilder erstellt und in jedem Bereich je drei Messstellen profilometrisch ausgewertet. Folglich bestand die Aufgabe, 90 Messstellen auf den zu den fünf festgelegten Kontrollzeitpunkten gehörenden Replikaten eindeutig wiederzufinden und mit dem 4Q-RE-Detektor zu erfassen. Insgesamt erfolgten somit 450 quantitative Bewertungen.

Der Arbeitsaufwand dieses Verfahrens begrenzt die Quantifizierung auf nur kleine Abschnitte des Füllungsrandes. Hinzu kommt die technische Einschränkung, dass der 4Q-RE-Detektor nur Bilder von gering geneigten Flächen zulässt, was trotz Kippung des mikroskopischen Objekttisches nicht für den gesamten Füllungsumfang realisierbar ist. Eine weitere Begrenzung möglicher Messstellen ist die Forderung, dass die ausgewählten Objektstellen auf den Replikaten zu allen fünf Untersuchungszeitpunkten artefaktfrei und gut wiedergegeben zur Verfügung stehen müssen.

Die über die errechneten Höhenprofile ermittelten topographischen Messdaten wurden tabellarisch erfasst und graphisch dargestellt. Die Berücksichtigung positiver Stufen war hierbei möglich. Im Falle eines Füllungsüberschusses zu Baseline war der Füllungsrand von Komposit überdeckt und es lag folglich keine Stufe vor. Um einen annähernd realistischen Wert zu nutzen, wurde für die Messstellen mit Füllungsüberschuss bei Baseline die Stufenhöhe der 1-Jahres-Messung übernommen, sofern zu diesem Zeitpunkt nach Randabbruch eine positive Stufe vorhanden und somit messbar war. Mit längerer Funktionszeit konnte dann der Trend zur negativen Stufe ermittelt werden.

4.4.2.4 Statistische Prüfung

Die kumulative Überlebensrate der Füllungen wurde nach der Kaplan-Meier Methode (Kaplan und Meier 1968) ermittelt. Die statistische Analyse der quantitativen Bewertung zum longitudinalen Randverhalten erfolgte mittels gepaartem t-Test mit wiedeholten Messungen, wobei die arithmetischen Mittelwerte und Standardabweichungen bestimmt wurden. Für die statistischen Berechnungen wurde die Software IBM PASW Statistics for Windows, Version 18.0.3 genutzt (IBM Deutschland, Ehningen/ Deutschland). Das Signifikanzniveau wurde mit $p<0,05$ festgesetzt. Die statistische Bearbeitung der Untersuchungen erfolgte mit Unterstützung von Herrn Dr. M. Walther am Institut für Medizinische Statistik, Informatik und Dokumentation am Universitätsklinikum der Friedrich-Schiller-Universität Jena (Dietz et al. 2012).

5. Ergebnisse

Von den insgesamt 194 gelegten Füllungen (73 Probanden) konnte, beginnend mit dem Jahr 1987, der zeitliche Verlauf von Oberflächenveränderungen und Randverhalten an 37 Füllungen (30 Füllungen der Kavitätenklasse I, 7 Füllungen der Kavitätenklasse II) über den Zeitraum von 15 Jahren lückenlos klinisch und mikromorphologisch-semiquantitativ bewertet und mikrofotografisch dokumentiert werden. Zusätzlich wurden die Replikate von 10 der 37 verbliebenen Füllungen, ebenfalls beginnend bei Baseline, profilometrisch bewertet.

Mit dieser Studie wurden die Resultate der longitudinalen semiquantitativen REM-Untersuchung über 15 Jahre Funktionszeit dargestellt, durch die auf der 3D-REM basierenden Quantifizierung des Randverhaltens objektiviert und mit den Ergebnissen der vorausgegangenen klinischen und mikromorphologischen Untersuchungen vergleichend diskutiert.

5.1 Überlebensrate

Für 112 von den ursprünglich 194 applizierten Restaurationen standen die Patienten nicht über 15 Jahren zur Verfügung (drop out von Patienten 57,7%, Gaengler et al. 2005, Dietz et al. 2012). 25 Füllungen fielen durch Karies an anderer Lokalisation und/ oder prothetischer Versorgung aus (drop out von Zähnen 12,9%). 20 Füllungen waren aufgrund von Füllungsversagen zu ersetzen (Tab. 5, drop out wegen Füllungsversagen 10,3%). Die Ursachen waren Füllungsbruch (n=4), teilweiser Füllungsverlust (n=8), totaler Füllungsverlust (n=1) und Sekundärkaries (n=7).

Mit der Kaplan-Meier-Kurve wurden für die kumulative Überlebensrate nach 6 Jahren 91,4 %, nach 9 Jahren 81,3% und nach 13 Jahren 73,6% ausgewiesen (Abb. 10). Für die jährliche Ausfallrate wurden 1,92% ermittelt (Dietz et al. 2012).

Tab. 5: Verlust von Visio-Molar X ®-Füllungen im Seitenzahnbereich über 15 Jahre, Baseline (B): 194 Füllungen

Jahre	B	½	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Untersuchte Füllungen (n)	194	175	167	137	92	90	69	47	52	50	47	46	42	42	41	39	37
Füllungsversagen insgesamt		1	2	2	2	2	1		4	1	1				2		2
- davon Füllungsbruch		1	1	1											1		
- davon partieller Füllungsverlust				1	2	2	1			1					1		
- davon totaler Füllungsverlust			1														
- davon Sekundärkaries									4		1						2

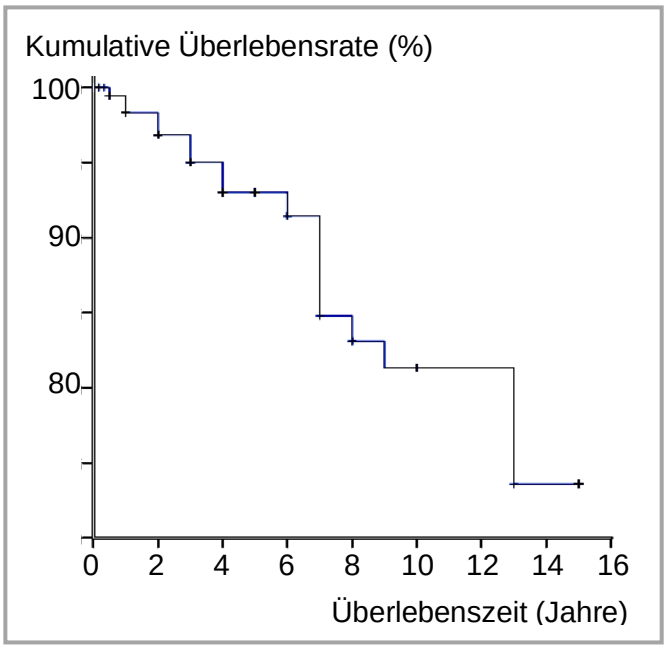


Abb 10: Kumulative Überlebensrate von Visio-Molar X ®- Füllungen im Seitenzahnbereich nach der Kaplan-Meier-Methode

5.2 Mikromorphologische Ergebnisse

5.2.1 Semiquantitative Bewertung nach den M-Kriterien des CPM-Index

Bis zum Abschluss der 15-Jahre-Studie wurden die oben genannten 37 Kompositfüllungen parallel zur klinischen Bewertung mikromorphologisch untersucht.

Entsprechend den acht definierten M-Kriterien wurden die tabellarisch erfassten Bewertungen jeweils als prozentualer Anteil von der Gesamtzahl der überprüften Füllungen graphisch dargestellt. Daneben wurde das Randverhalten im Untersuchungszeitraum und die longitudinalen Oberflächenveränderungen mit typischen Beispielen aus der mikromorphologischen Bilddokumentation demonstriert.

Insgesamt wiesen diese Untersuchungen im ersten Jahr und weiter bis zu einer Funktionszeit von 5 Jahren die stärksten Qualitätsverluste auf. Von 5 bis zu 15 Jahren waren die Veränderungen nur noch geringfügig.

5.2.1.1 Oberflächenrauigkeit

Das 1987 eingesetzte, zum damaligen Zeitpunkt hoch aktuelle Hybridkomposit Visio-Molar X ® wies im Rahmen unserer elektronenmikroskopischen Beobachtungen eine relativ grobe Eigenstruktur mit Füllkörpergrößen von bis zu 70 µm auf.

Aufgrund dieser Materialspezifik wurden bereits unmittelbar nach Legen der Füllungen (Baseline) die größten Anteile der Füllungsoberflächen als „rau“ klassifiziert (Abb. 11). Vollständig glatte Oberflächen (Code 0) und nur lokale Rauigkeiten (Code 1) wurden nicht ausgewiesen. 41% der Füllungen wurden mit noch 1/3 bis 2/3 der Oberfläche als glatt bewertet (Code 2) und 59% mit weniger als 1/3 glatter Oberfläche (Code 3). Die Rauigkeit nahm bis zu 5 Jahren Funktionszeit zu: nur noch 16% der Füllungen wurden zu diesem Zeitpunkt mit Code 2, aber 84% mit Code 3 eingestuft. Danach blieb diese Bewertung nahezu unverändert bis zu 15 Jahren.

Abb. 12a-c dokumentiert bei zunehmender negativer Stufe am Füllungsrand eine konstante Oberflächenrauigkeit der Füllung über die gesamte 15-jährige Funktionszeit. Das aus der ergänzenden 4Q-RE-Bildkombination errechneten Stereobild (Abb. 12d) veranschaulicht die räumlichen Verhältnisse.

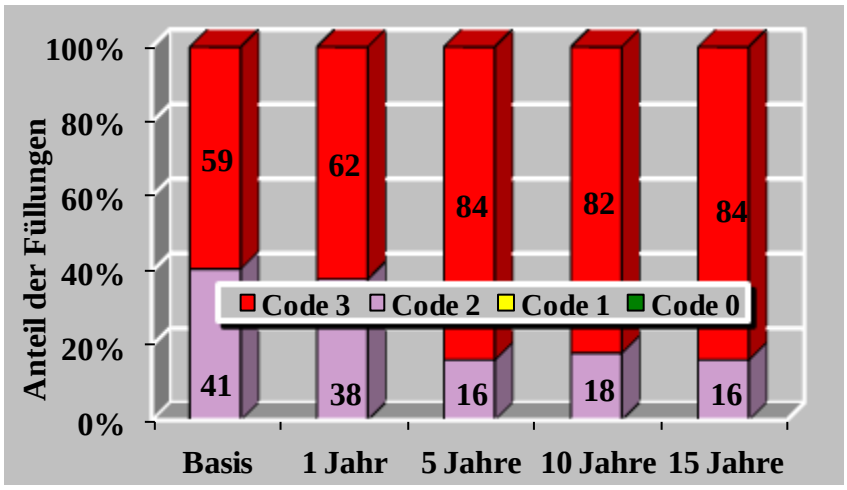


Abb. 11: Mikromorphologisches Kriterium „Oberflächenrauigkeit“, Visio-Molar X®-Füllungen (n=37) über 15 Jahre, prozentualer Anteil der Füllungen mit Code 0 bis 3

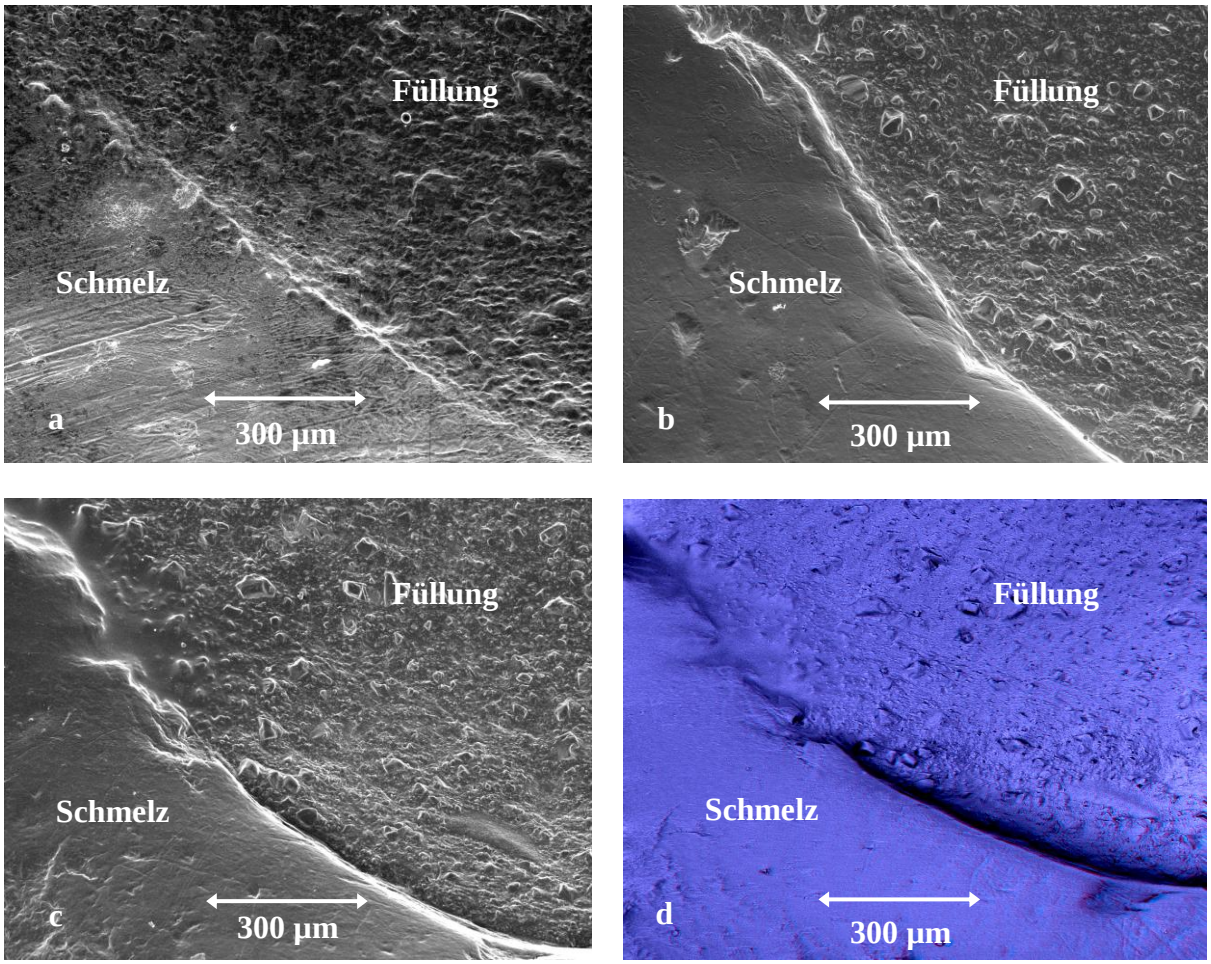


Abb. 12: Beispiel zum Kriterium „Oberflächenrauigkeit, Visio-Molar X®-Füllung, mikr. Vergr. 100:1, longitudinaler Verlauf an einer definierten Füllungsrand-Stelle
a: Baseline, perfekter Rand, Füllkörper bereits in der Matrix sichtbar, REM-Standardbild
b: nach 5 Jahren Funktionszeit, negative Stufe, herausragende Füllkörper, REM-Standardbild
c: nach 15 Jahren, deutliche negative Stufe, Füllkörperbild unverändert, REM-Standardbild
d: wie Bild c (nach 15 Jahren), aus zugehöriger 4Q-RE-Bildkombination errechnetes Stereobild (mit beiliegender Stereobrille zu betrachten)

5.2.1.2 Oberflächentextur

Zum Zeitpunkt Baseline war die Oberflächentextur in allen Fällen homogen und wurde mit Code 0 bewertet (Abb13, Abb. 14a). In der 5-jährigen Funktionsperiode nahm der Anteil vollständig homogener Oberflächen (Code 0) stetig bis auf 49% der Füllungen ab. Nach 5 Jahren lagen bei 41% lokale Inhomogenitäten (Code 1) vor, die häufig den abrasionsbedingten Verlust von oberflächennahen Kompositanteilen dokumentierten (Abb. 14b). In diesen Fällen wurden mindestens 2/3 der Oberfläche als homogen eingestuft. Die restlichen 10% der Restaurationen wurden zu diesem Zeitpunkt mit 1/3 bis 2/3 der Fläche als homogen klassifiziert (Code 2). Von 5 bis 15 Jahren blieb der homogene Anteil der Füllungen (Code 0) konstant bei 49%, die Anteile von Code 1 und 2 verschoben sich etwas nach dem inhomogeneren Code 2 (32% Code 1, 19% Code2). Homogenität auf weniger als 2/3 der Oberfläche (Code 3) wurde zu keinem Zeitpunkt ermittelt.

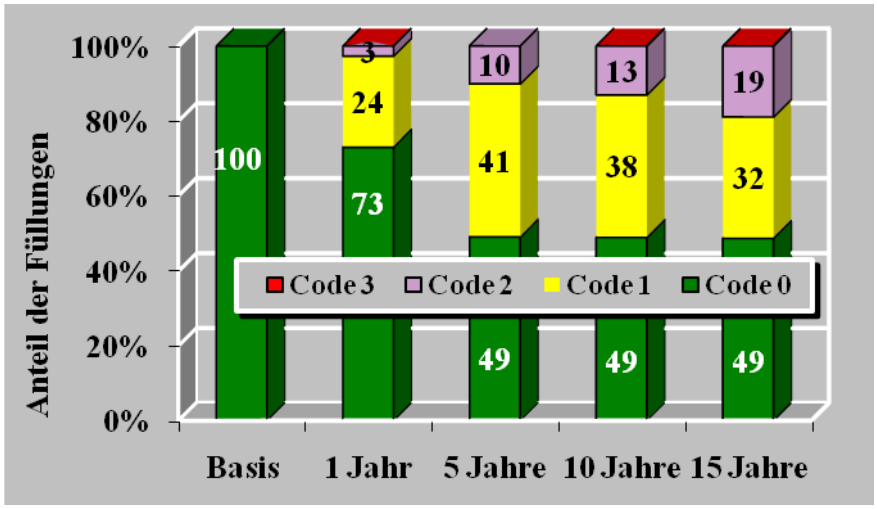


Abb. 13: Mikromorphologisches Kriterium „Oberflächentextur“, Visio-Molar X ®-Füllungen (n=37) über 15 Jahre, prozentualer Anteil der Füllungen mit Code 0 bis 3

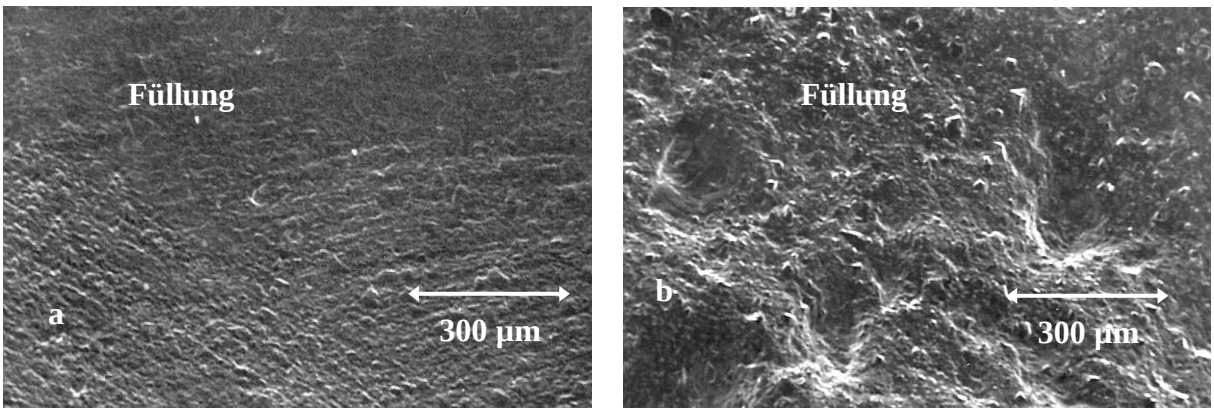


Abb. 14: Beispiele zum Kriterium „Oberflächentextur, Visio-Molar X ®-Füllung, mikr. Vergr. 100:1, REM-Standardbilder
a: Baseline, homogene Oberfläche
b: nach 5 Jahren, inhomogene Oberfläche nach lokalen Verlusten von Kompositanteilen

5.2.1.3 Randschluss

In dieser Studie konnte kein komplett perfekter Füllungsrand, der per definitionem auf ganzer Länge nur durch die Strukturänderung der Oberfläche am Übergang zwischen Zahnhartsubstanz und Füllung erkennbar war, klassifiziert werden (Code 0).

Bereits unmittelbar nach Applikation der Restaurationen (Baseline) wurden bei 43% der Füllungen lokale Randimperfektionen (Code 1) nachgewiesen, bei 46% waren 1/3 bis 2/3 des Randes perfekt (Code 2) und 11% der Füllungen wurden mit weniger als 1/3 des Randes als perfekt (Code 3) bewertet. Bis zum fünften Jahr nahm der Anteil des perfekten Randes kontinuierlich ab: 3% Code 1, noch 27% Code 2 und 70 % Code 3. Bis zu 10 Jahren verringerten sich die perfekten Randanteile nur noch geringfügig: 0% Code 1, 30% Code 2 und 70% Code 3. Nach 15 Jahren wies die Bewertung eine leichte Verbesserung perfekter Randanteile auf: Code 1 stieg geringfügig auf 5%, Code 2 konstant 30% und Code 3 nur noch 65% (Abb. 15).

Abb. 16 demonstriert einen typischen longitudinalen Verlauf für Baseline, nach 1 und 15 Jahren vom perfekten Füllungsrand zur negativen Stufe, wobei eine sehr gute marginale Adaption erhalten blieb.

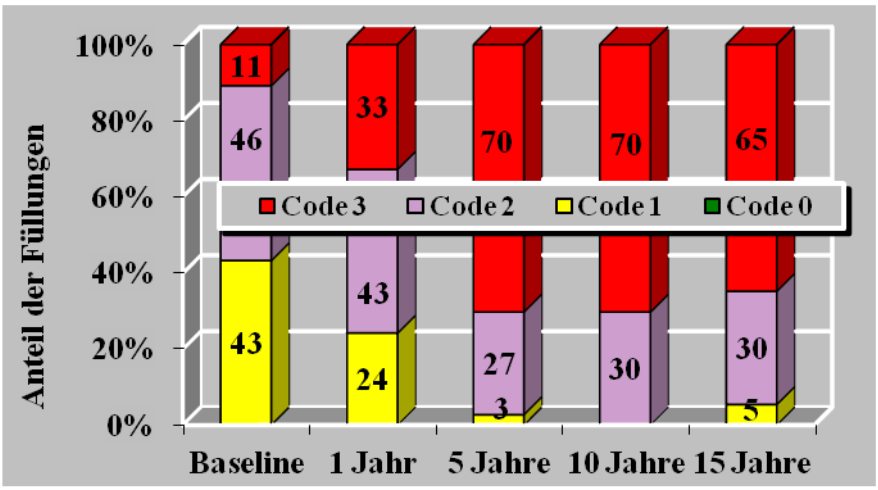


Abb. 15: Mikromorphologisches Kriterium „Randschluss“, Visio-Molar X®-Füllungen (n=37) über 15 Jahre, prozentualer Anteil der Füllungen mit Code 0 bis 3

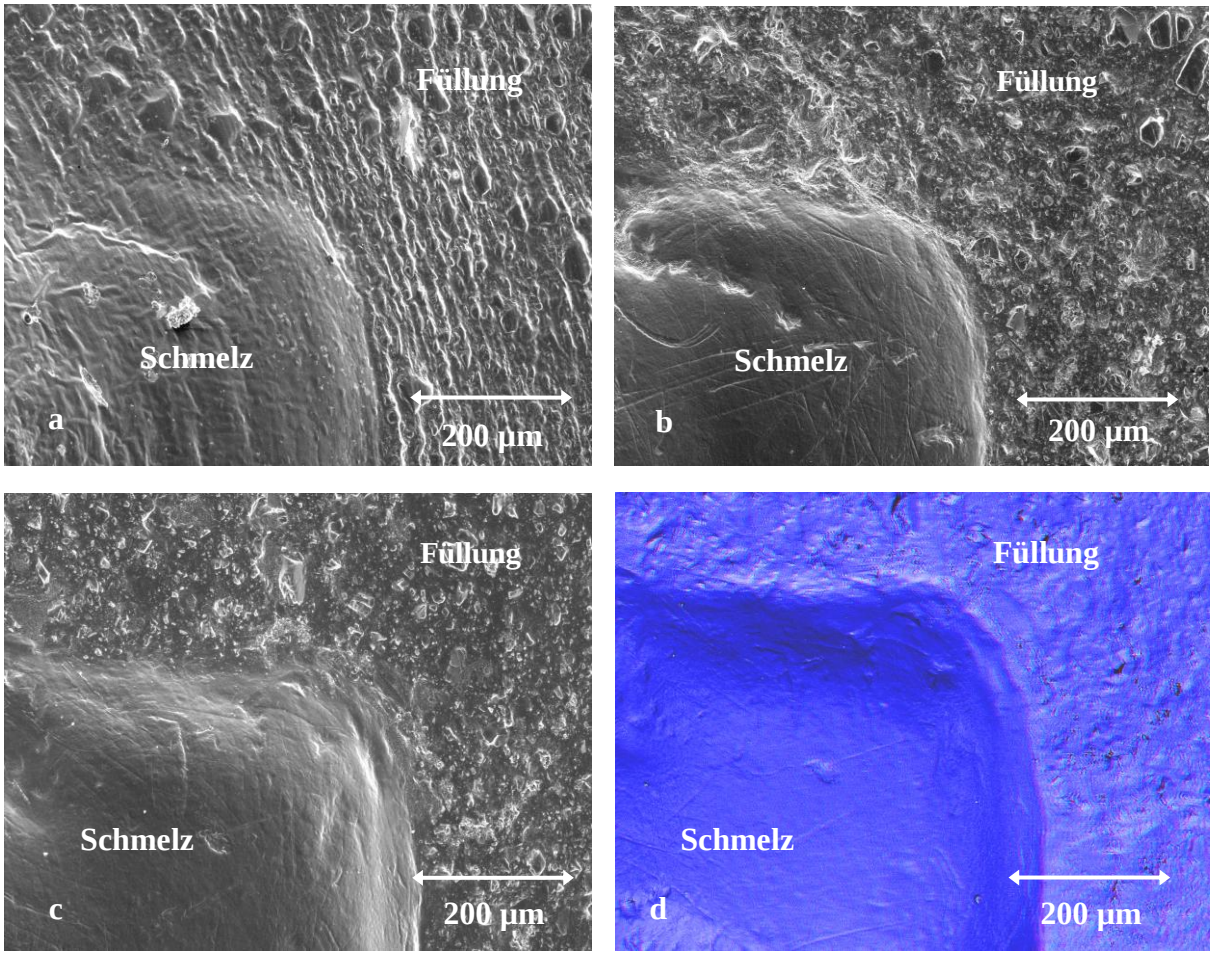


Abb. 16: Beispiel zum Kriterium „Randschluss“, Visio-Molar X®-Füllung, mikr. Vergr. 150:1, longitudinaler Verlauf an einer definierten Füllungsrand-Stelle
a: Baseline, perfekter Rand, unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit markiert die Schmelz-Füllungs-Grenze, 16a-c: REM-Standardbilder
b: nach 1 Jahr, negative Stufe, trotz Füllungsverlustes sehr gute marginale Adaption
c: nach 15 Jahren, trotz größeren Füllungsverlustes sehr gute marginale Adaption
d: wie Bild c (nach 15 Jahren), aus 4Q-RE-Bildkombination errechnetes Stereobild (mit beiliegender Stereobrille zu betrachten)

5.2.1.4 Füllungsüberschüsse

Die erwünschte gute klinische Farbanpassung des Füllungsmaterials führte zu Problemen bei der exakten Konturierung der Füllungen (Übergang Füllung/ Zahnhartsubstanz), so dass unmittelbar nach Applikation (Baseline) bei allen Restaurationen Überschüsse nachgewiesen wurden: bei 54% der Füllungen war das an bis zu 1/3 des Gesamtumfanges (Code 1) der Fall, bei 35% an 1/3 bis 2/3 des Randes (Code 2) und bei 11% an über 2/3 vom Umfang (Code 3). Innerhalb von 5 Jahren wurde der Füllungsüberschuss bei 49% kontinuierlich auf „Null" abgebaut, die restlichen 51% zeigten noch an bis zu 1/3 des Randes einen Überschuss. Fortschreitend bis zum Zeitpunkt 15 Jahre erfolgte weiterer moderater Überschussabbau bis hin zu negativen Stufen: 62% Code 0 und 38% Code 1. (Abb. 17, 18, 19).

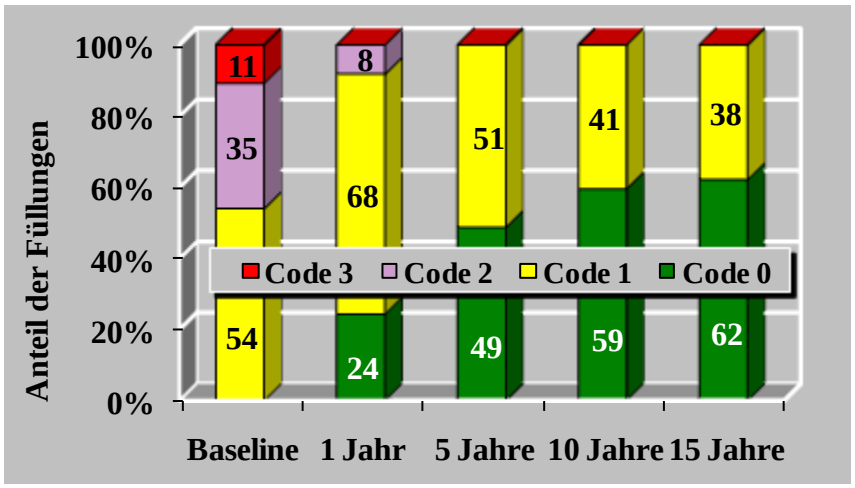


Abb. 17: Mikromorphologisches Kriterium „Füllungsüberschüsse", Visio-Molar X®-Füllungen (n=37) über 15 Jahre, prozentualer Anteil der Füllungen mit Code 0 bis 3

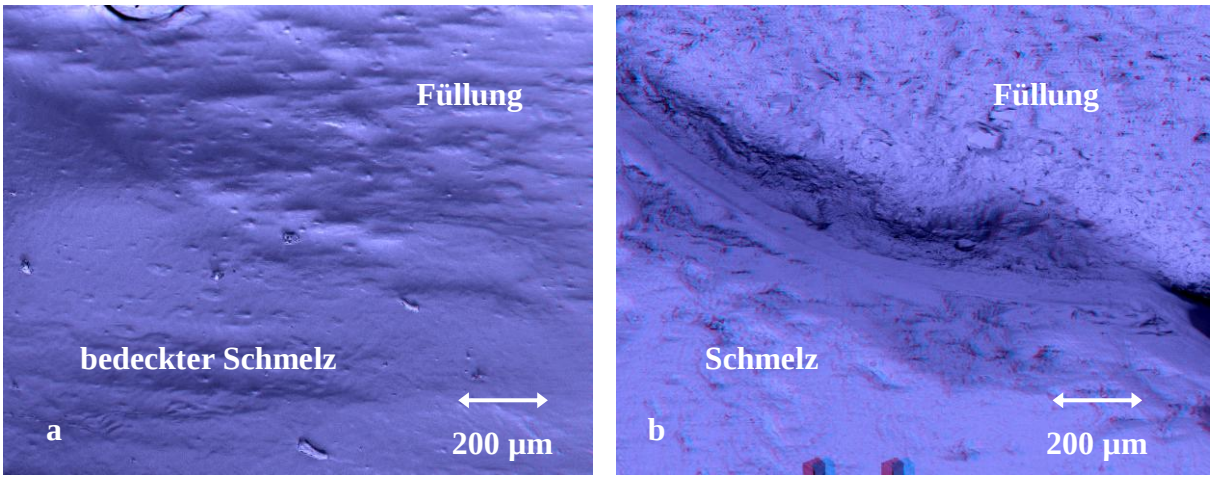


Abb. 18: Beispiel zum Kriterium „Füllungsüberschüsse", Visio-Molar X®-Füllung, mikr. Vergr. 150:1, aus 4Q-RE-Bildkombination errechnete Stereobilder (mit beiliegender Stereobrille zu betrachten)
a: Baseline, Füllungsüberschuss
b: nach 15 Jahren, negative Stufe mit Randvertiefung

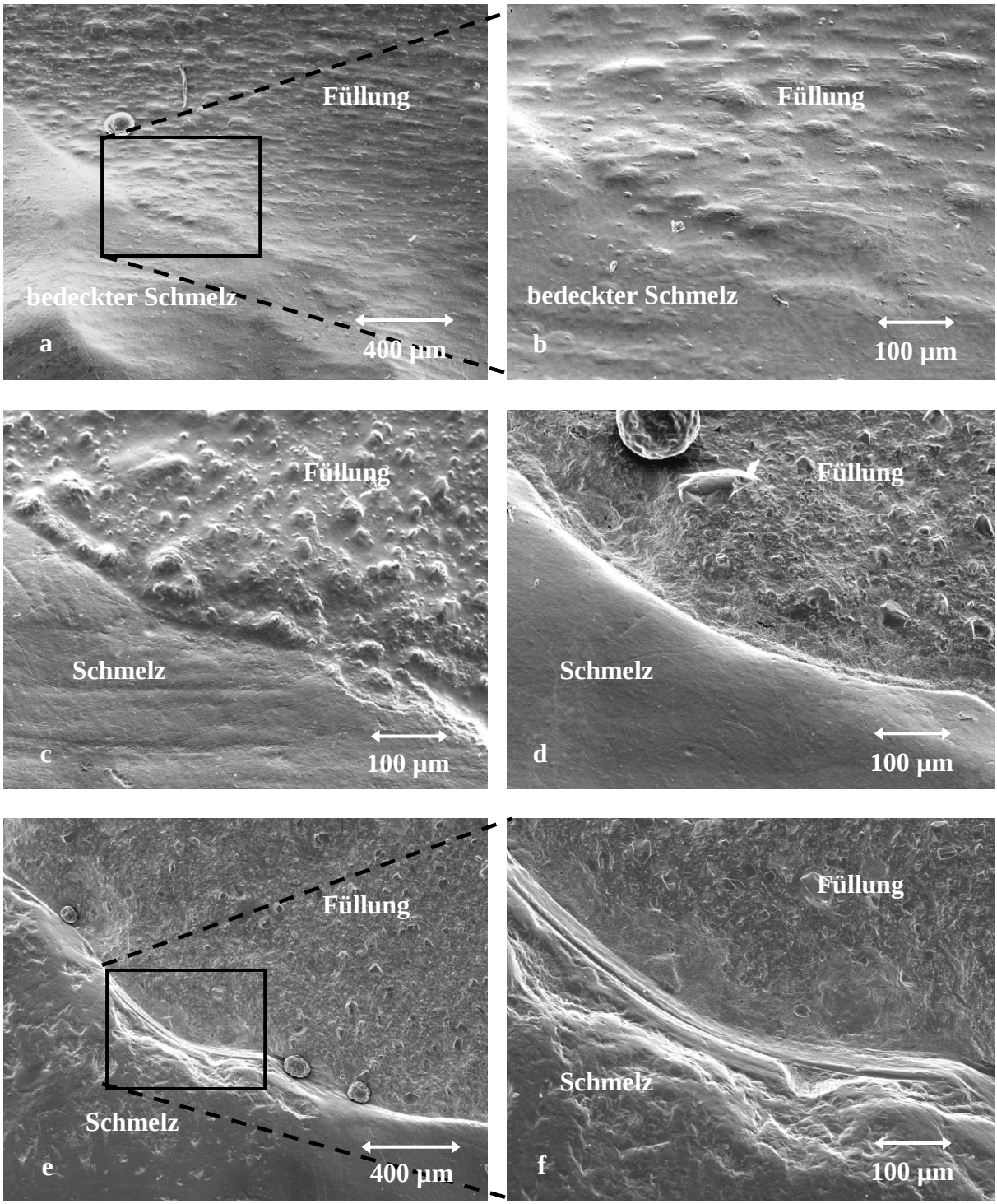


Abb. 19: Beispiel zum Kriterium „Füllungsüberschüsse“, Visio-Molar X®-Füllung, mikr. Vergr. 50:1 (Übersichtsbilder) bzw. 150:1, longitudinaler Verlauf an einer definierten Füllungsrand-Stelle, REM-Standardbilder
a: Baseline, Füllungsüberschuss, Übersichtsbild
b: wie Bild a, mikr. Vergr. 150:1
c: nach 1 Jahr, Überschuss zu nahezu perfektem Rand verändert
d: nach 5 Jahren, deutlich negative Stufenbildung
e: nach 15 Jahren, verstärkte negative Stufenbildung mit Schmelzabbruch, Übersichtsbild
f: wie Bild e, mikr. Vergr. 150:1

5.2.1.5 Randabbrüche

Zur Basisuntersuchung wurden keine Füllungsrandabbrüche ermittelt (100% Code 0). Über den gesamten Untersuchungszeitraum wurde in allen Fällen weniger als 1/3 des gesamten Füllungsumfanges mit Randabbrüchen belastet (Code 0 und 1). Der Anteil von Füllungen ohne Randabbrüche (Code 0) sank im ersten Jahr auf 81%, bis zu 15 Jahren nahezu stetig auf 68%. Entsprechend stieg der mit Code 1 bewertete Anteil im Anfangsjahr von 0% auf 19%, dann bis zu 15 Jahren kontinuierlich auf 32%. (Abb. 20).

Mit Abb. 21 wird der Übergang von einem Füllungsüberschuss zum Randabbruch dokumentiert. Ab 5 Jahren wurden an diesem Beispiel bei höheren Vergrößerungen (Abb. 22) Schmelzdefekte und mikrobieller Belag im Bereich des Füllungsabbruches erkennbar.

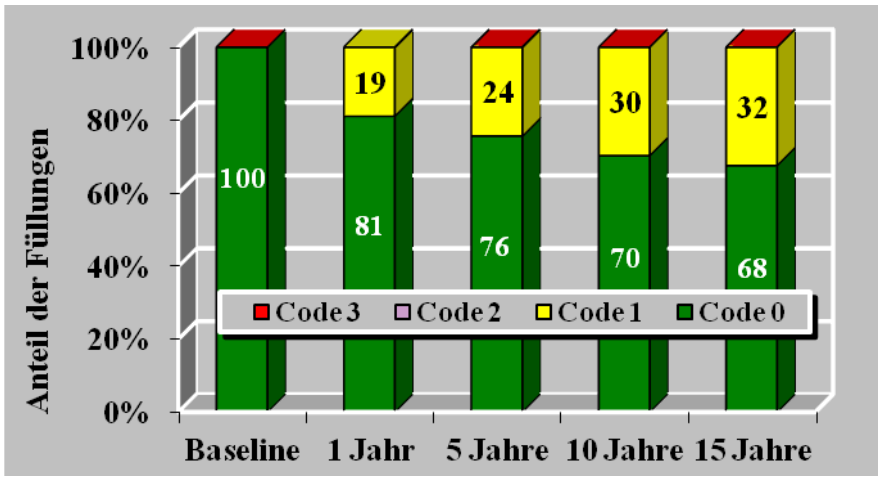


Abb. 20: Mikromorphologisches Kriterium „Randabbrüche“, Visio-Molar X®-Füllungen (n=37) über 15 Jahre, prozentualer Anteil der Füllungen mit Code 0 bis 3

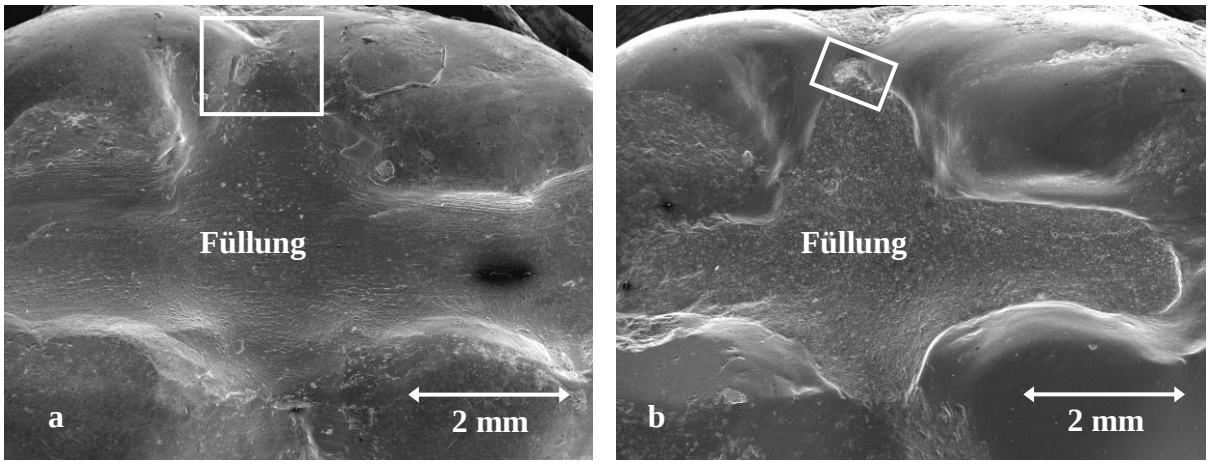


Abb. 21: Beispiel zum Kriterium „Randabbrüche“, Visio-Molar X®-Füllung, mikr. Vergr. 15:1, REM-Standardbilder
a: Baseline, Füllungsüberschuss im gekennzeichneten Bereich
b: nach 15 Jahren, Randabbruch im gekennzeichneten Bereich (Ort des Füllungsüberschusses zu Baseline)

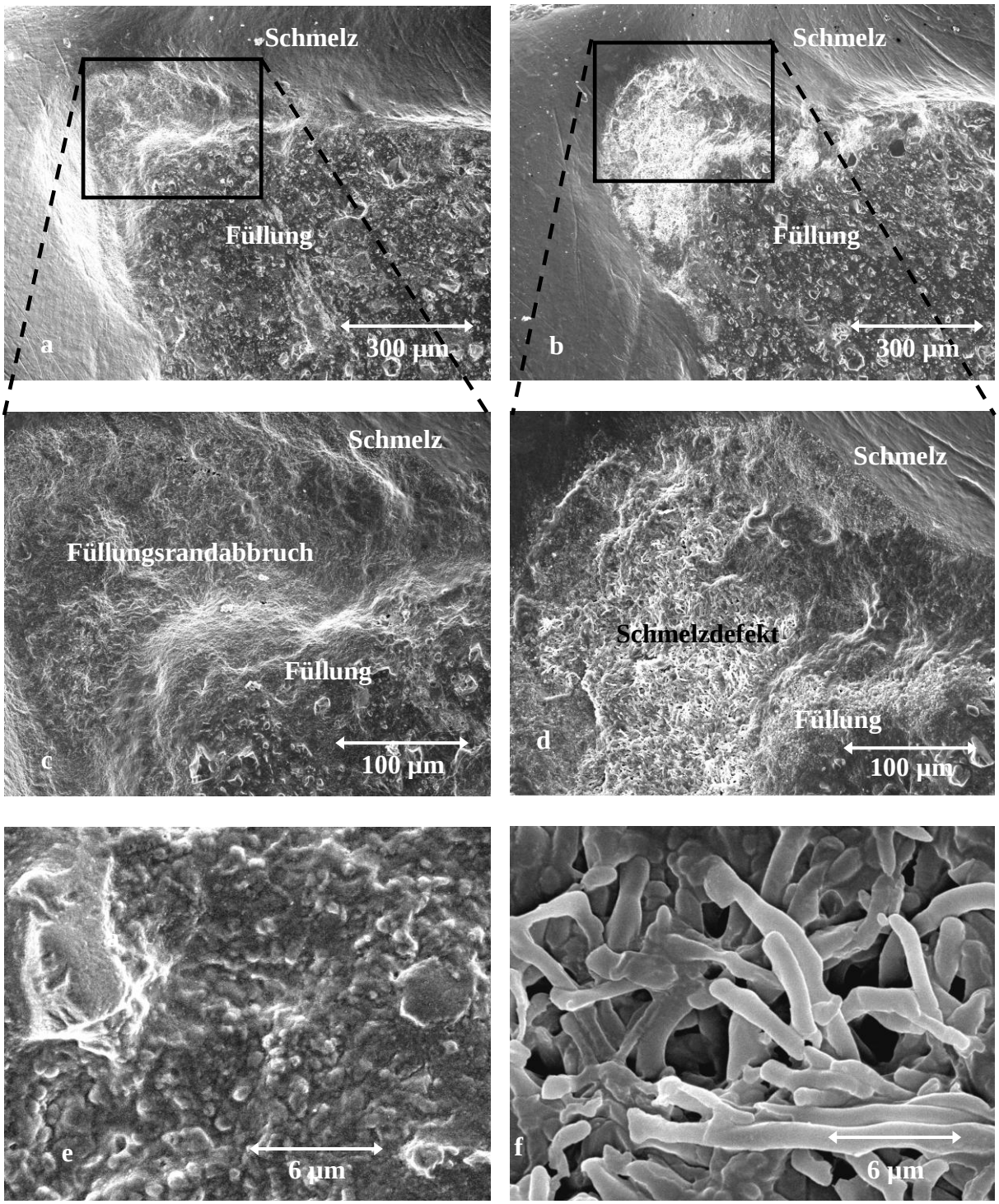


Abb. 22: Kriterium „Randabbrüche“, Ausschnitte aus dem in Abb. 21b gekennzeichneten Bereich nach 5 bzw. 15 Jahren, REM-Standardbilder
a: Bereich des Randabbruches nach 5 Jahren, mikr. Vergr. 100:1
b: Bereich des Randabbruches nach 15 Jahren, mikr. Vergr. 100:1
c: wie Bild a, mikr. Vergr. 300:1
d: wie Bild b, geschädigter Schmelz im Bereich des Randabbruches nach 15 Jahren, mikr.Vergr. 300:1
e, f: Biofilm in Nischen des Schmelzdefektes, die nicht durch den Reinigungsabdruck erreicht wurden nach 5 Jahren (**e**) bzw.nach 15 Jahren (**f**), mikr. Vergr. 5000:1

5.2.1.6 Negative Stufenbildung

Das Kriterium „Negative Stufenbildung“ zeigte beträchtliche Zunahmen des negativen Stufenanteils von Baseline bis zur 1-Jahres-Kontrolle und weiter bis zu 5 Jahren (Abb. 23). Danach wurden nur noch geringe Zuwächse bis zu 10 Jahren und bis zur 15-Jahres-Kontrolle eine schwache rückläufige Entwicklung der negativen Stufenbildung beobachtet.

Zur Basisuntersuchung wurden bei 57% der Füllungen keine negativen Stufen ermittelt (Code 0). Bei 30% belasteten die negativen Stufen weniger als 1/3 des Gesamtumfanges (Code 1) und bei 14% zwischen 1/3 und 2/3 des Füllungsrandes (Code 2). Nach 1 Jahr wurden nur noch 8% der Restaurationen ohne negative Stufen (Code 0) bewertet. Für 22% wurde Code 1 und für 38% Code 2 ermittelt. Bei 32% wurden auf mehr als 2/3 des Randes negative Stufen gesehen (Code 3). Nach 5 Jahren zeigten alle Füllungen negative Stufen (Code 1-3): Nur noch 3% wurden zu diesem Zeitpunkt mit Code 1, jedoch 37% mit Code 2 und 70% mit Code 3 bewertet. Zwischen 5 und 10 Jahren wurden kaum Veränderungen ausgewiesen (0% Code 1, 30% Code 2, wieder 70% Code 3). Nach 15 Jahren hatte sich Code 3 auf 65% zugunsten von 5% bei Code 1 verringert.

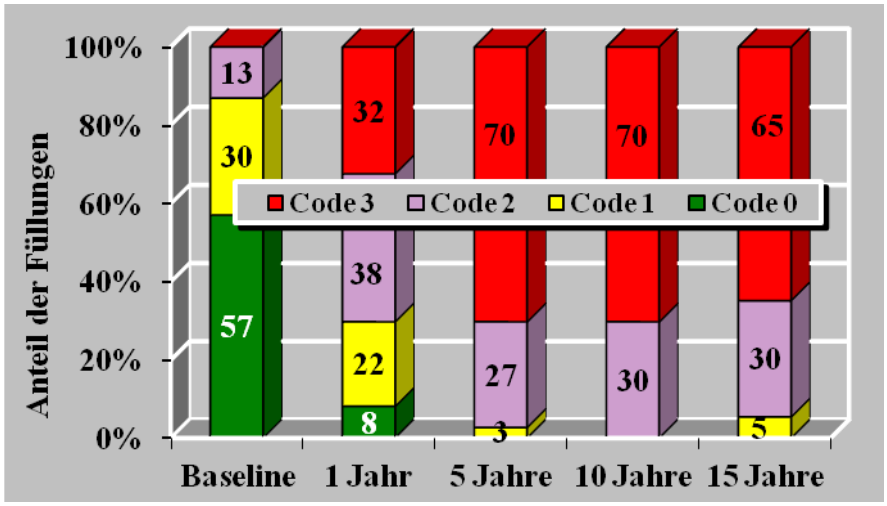


Abb. 23: Mikromorphologisches Kriterium „Negative Stufenbildung“, Visio-Molar X®-Füllungen (n=37) über 15 Jahre, prozentualer Anteil der Füllungen mit Code 0 bis 3

Das in Abb. 24a-d dokumentierte Beispiel zeigt am Übersichtsbild den longitudinalen Verlauf zum Kriterium „negative Stufenbildung“ vom Code 1 zum Code 3. In der Ausschnittvergrößerung der Abb. 24e wird die negative Stufe deutlich sichtbar. In dem ergänzenden 4Q-RE Stereobild (Abb. 24f) wird eine zusätzlich Randvertiefung erkennbar.

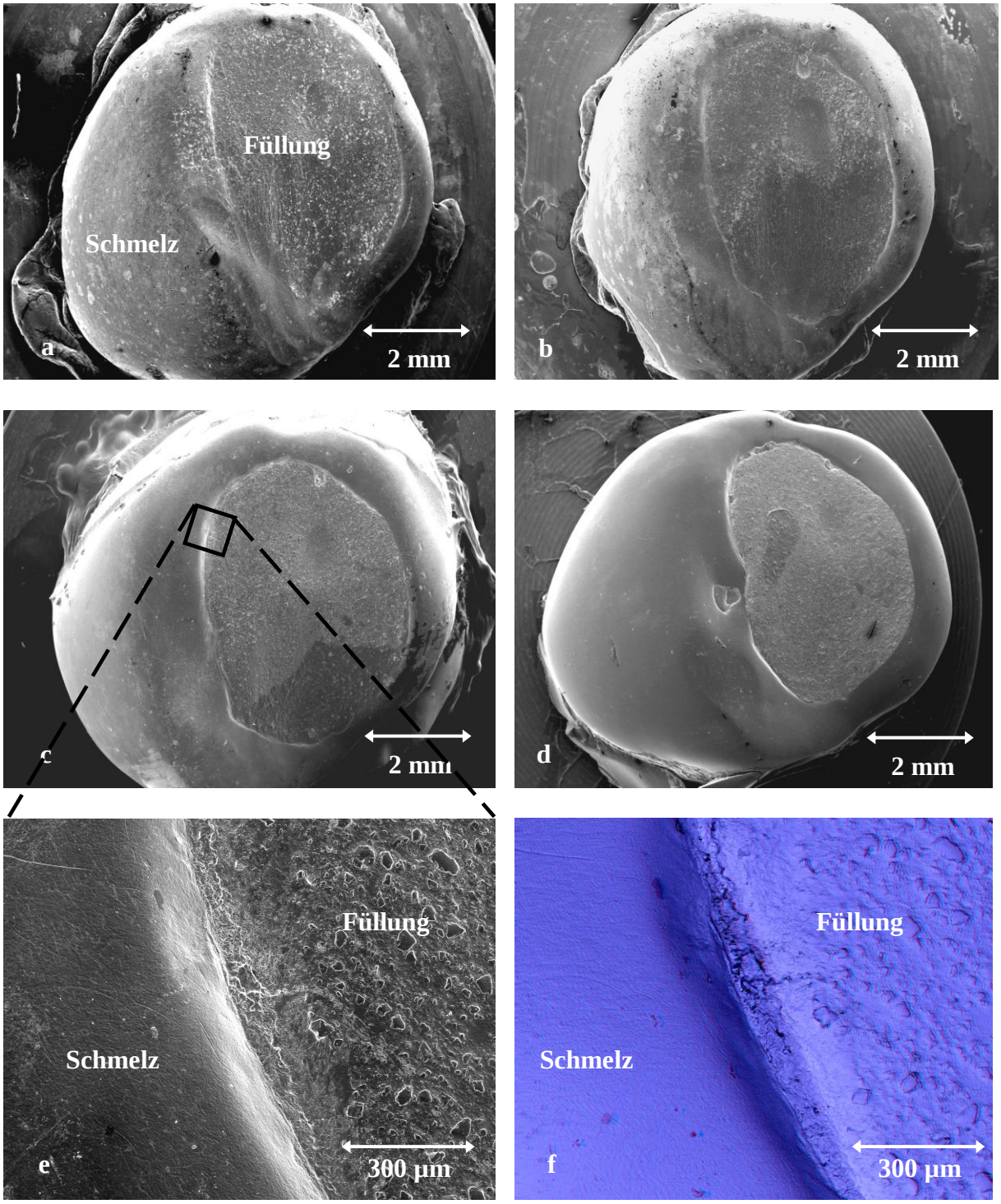


Abb. 24: Beispiel zum Kriterium „Negative Stufenbildung“, Visio-Molar X®-Füllung, mikr. Vergr. 12:1 bzw. 100:1, Bilder a-d: longitudinaler Verlauf am gesamten Füllungsrand, Bilder a-e: REM-Standardbild, Bild f: 4Q-RE Stereobild
a: Baseline, Bewertung: Code 1 (negative Stufen bis zu 1/3 des Gesamtumfanges)
b: nach 1 Jahr, Bewertung: Code 2 (negative Stufen auf 1/3 bis 2/3 des Gesamtumfanges)
c: nach 5 Jahren, Bewertung: Code 3 (negative Stufen auf mehr als 2/3 des Gesamtumfanges)
d: nach 15 Jahren, Bewertung: Code 3, kaum Veränderungen gegenüber der 5-Jahres-Kontrolle
e: gekennzeichneter Bereich aus Bild c (5 Jahre), im REM-Standardbild wird eine negative Stufe deutlich dargestellt und die randnahen Kontrastverhältnisse weisen auf eine zusätzliche Randvertiefung
f: wie Bild e, mit der 4Q-RE Technik erzeugtes Stereobild: erhebliche Randvertiefung bei nur geringer negativer Stufe (mit beiliegender Stereobrille zu betrachten)

5.2.1.7 Mikroleakagen und Randspalten

Mikroleakagen wurden zu Baseline nur geringfügig nachgewiesen (98% Code 0 und nur 2% Code 1). Nach 1 Jahr wurden Mikroleakagen bei 39% der Restaurationen „vereinzelt“ (Code 1) und bei 4% „ausgeprägt“ (Code 2) ermittelt. Bis zu 15 Jahren schwankte der Anteil von Füllungen ohne Mikroleakagen/ Randspalten (Code 0) zwischen 54% und 65%, die Bewertung „vereinzelt Mikroleakagen“ (Code 1) zwischen 33% und 44% und die Bewertung „ausgeprägte Mikroleakagen“ (Code 2) erfolgte für 2% bis 4%. (Abb. 25). Die Längsausdehnung der Mikroleakagen betrug einige 10 µm bis zu gut 100 µm (Abb. 26), in der Tiefe waren sie im allgemeinen bis zum nächsten Kontrollzeitpunkt abgetragen. Zu keinem Zeitpunkt konnten in die Tiefe verlaufende Randspalten nachgewiesen werden (Code 3).

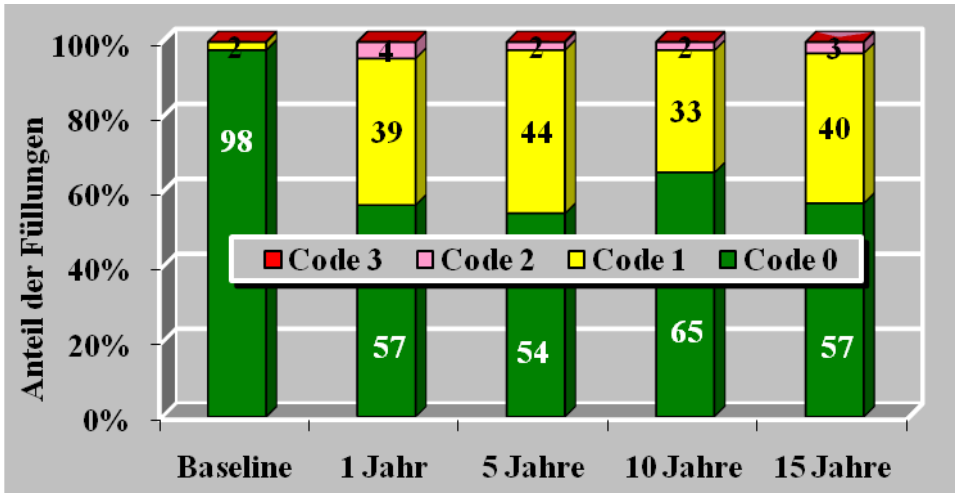


Abb. 25: Mikromorphologisches Kriterium „Mikroleakagen und Randspalten“, Visio-Molar X®-Füllungen (n=37) über 15 Jahre, prozentualer Anteil der Füllungen mit Code 0 bis 3

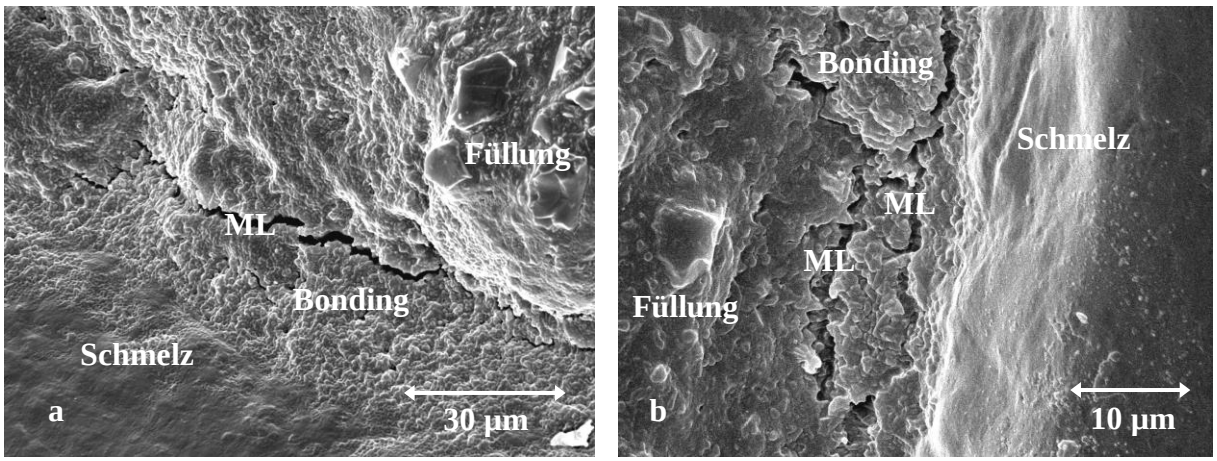


Abb. 26: Mikromorphologisches Kriterium „Mikroleakagen und Randspalten“, Visio-Molar X®- Füllungen (n=37) über 15 Jahre
a: nach 15 Jahren, Mikroleakage (ML) in Randvertiefung an Bonding-Füllung-Grenze, mikr. Vergr. 1000:1
b: nach 15 Jahren, Mikroleakagen (ML) in Randvertiefung an Bonding-Füllung-Grenze, mikr. Vergr. 2000:1

5.2.1.8 Weitere Randimperfektionen

Von Baseline bis zu 5 Jahren wurden in dieser Studie weder randnahe Frakturen des Füllungsmaterials noch Schmelzfrakturen nachgewiesen (100% Code 0). Erst nach 10 Jahren traten einzelne Randimperfektionen (Code 1) auf: zur 10-Jahres-Kontrolle wurde eine randnahe Fraktur des Füllungsmaterials dokumentiert (Abb. 27, 28a) und nach 15 Jahren wurde zusätzlich ein Schmelzabbruch nachgewiesen (Abb. 28b).

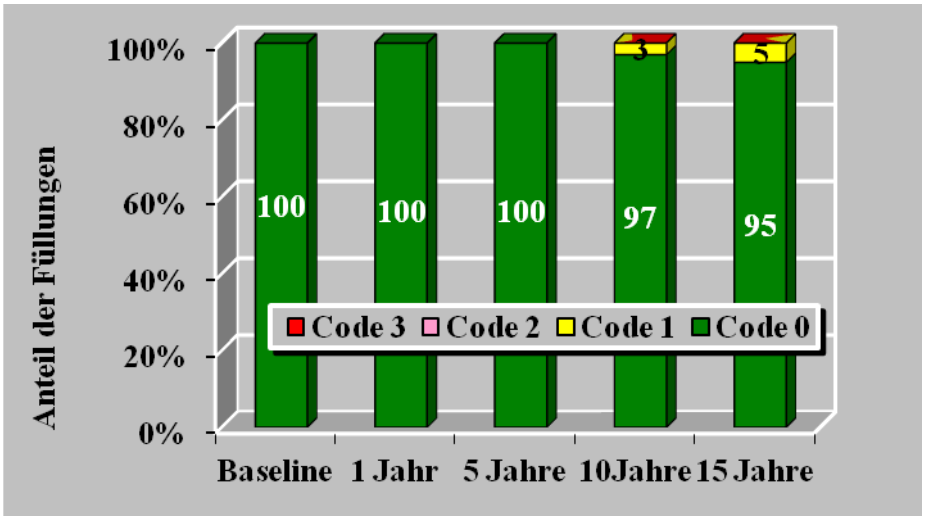


Abb. 27: Mikromorphologisches Kriterium „Weitere Randimperfektionen“, Visio-Molar X®-Füllungen (n=37) über 15 Jahre, prozentualer Anteil der Füllungen mit Code 0 bis 3

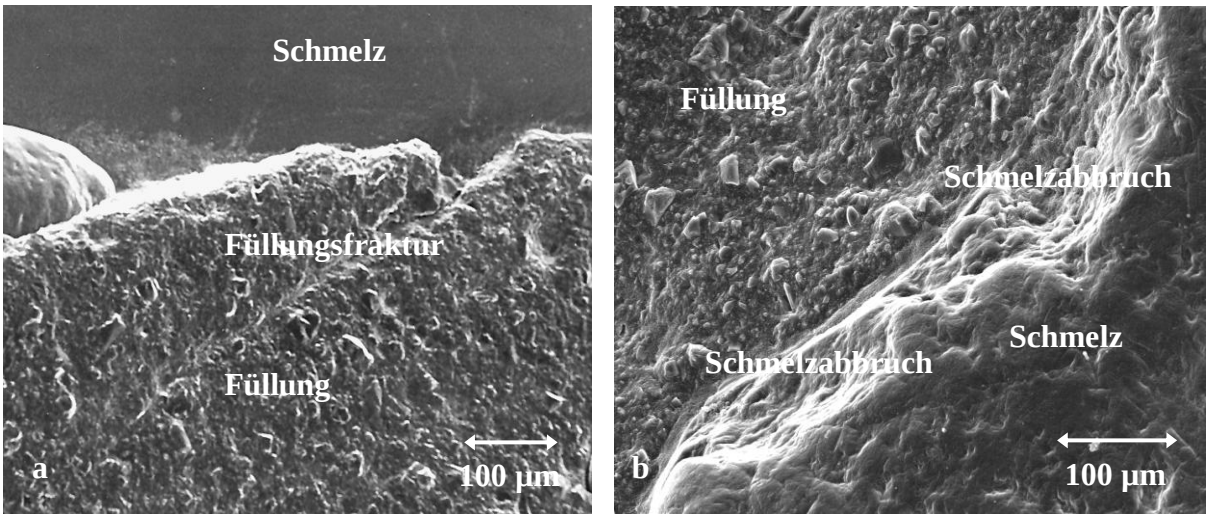


Abb. 28: Beispiele zum Kriterium „Weitere Randimperfektionen“, Visio-Molar X®-Füllungen, REM-Standardbilder
a: nach 10 Jahren, randnahe Fraktur des Füllungsmaterials, mikr. Verg. 150:1
b: nach 15 Jahren, Schmelzabbruch am Kavitätenrand (an negativer Stufe), mikr. Vergr. 200:1

5.2.2 Quantitative Bewertung mit dreidimensionaler Rasterelektronenmikroskopie

Diese Untersuchungen ermöglichten eine weitere Objektivierung der Aussagen zu den longitudinalen Veränderungen der wesentlichen Bewertungskriterien „**Füllungsüberschüsse**“ und „**negative Stufenbildung**“ und damit auch zum randnahen Materialverlust der Visio-Molar X ®-Füllungen. Mit der Vermessung der aus der 3D-REM errechneten Höhenprofile konnten an den jeweiligen Messstellen positive und negative Stufen am Füllungsrand quantifiziert werden.

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse sind eine Präzisierung der zuvor wiedergegebenen semiquantitativen longitudinalen Bewertung zum Kriterium „**negative Stufenbildung**“ entsprechend dem CPM Index und stehen mit dieser in guter Übereinstimmung. Hiernach stieg der Materialverlust am Füllungsrand bis zum 5-Jahres-Kontrollzeitpunkt beträchtlich an. Im Mittelwert erreichten die negativen Stufen nach 10 Jahren ein Maximum von 27,2 µm und verringerten sich - nicht signifikant - bis zu 15 Jahren geringfügig um 5,1 µm.

Darüber hinaus wurden durch die profilometrischen Berechnungen in vielen Fällen „**Randvertiefungen**“ nachgewiesen, die oft deutlich unter das Niveau des Füllungsmaterials hinausgingen und im Bereich der Bondingzone einen zusätzlichen Materialverlust dokumentierten. Diese Randvertiefungen waren im Rahmen der vorangegangenen 5- und 10-Jahres-Studien und dieser 15-jährigen Untersuchung im REM-Standardbild schwer erkennbar und wurden nach den M-Kriterien des üblicherweise genutzten CPM-Index vernachlässigt.
Die Messwerte aus den über die Füllungsränder erstellten Höhenprofilen wurden tabellarisch erfasst. Der longitudinale Verlauf wurde für typische Beispiele und im Mittelwert auf dieser Basis graphisch dargestellt. Bei der Quantifizierung der Randvertiefungen wurde zu deren detaillierter Beschreibung zwischen „Randvertiefung am freiliegenden Schmelz“, „Randvertiefung im Füllungsmaterial“ und der (negativen) Randstufe Schmelz-Füllung unterschieden.

5.2.2.1 Typische Einzelergebnisse zum Füllungsrandverhalten

Mit den nachfolgenden Abbildungen werden die typischen Beispiele zur Dynamik des Randverhaltens über 15 Jahre demonstriert. Dazu wird der longitudinale Verlauf eines jeweils zu Baseline vorliegenden

- perfekten Randes zur negativen Stufe (Abb. 29 – 32),
- eines Füllungsüberschusses zur negativen Stufe(Abb. 33 – 36)
- und einer negativen Stufe (Abb. 37 – 40) dargestellt.
- Analog wird der longitudinale Verlauf einer Randvertiefung gezeigt (Abb. 41 - 44).

Der Zustand wird zu Baseline, nach 1, 5, 10 und 15 Jahren dokumentiert. Zur Charakterisierung des longitudinalen Verlaufes dieser vier Beispiele werden die REM-Standardbilder (SE-Modus) und die aus den 4Q-RE-Bildkombinationen errechneten digitalen Oberflächenmodelle, Stereobilder und die zugehörigen Höhenprofile gegenübergestellt.

5.2.2.1.1 Longitudinaler Verlauf eines perfekten Füllungsrandes (Baseline) zur negativen Stufe

Zu Baseline wiesen alle Abbildungen dieses Messbereiches (REM-Standardbild: Abb. 29a, f, DOM: Abb30a, Stereobild: Abb. 31a) und das zugehörige Höhenprofil (Abb. 32a) einen perfekten Rand aus.

Ab 1 Jahr Funktionszeit wurde vom Schmelz zur Füllung eine negative Stufe ausgebildet (Abb. 29b-e, g-j, 30b-e, 31b-e, 32b-e).

Im Höhenprofil (Abb. 32) wurde entlang der im Texturbild markierten Messlinie (jeweils Abb. 32 links), vom grünen zum roten Punkt gemessen.

Das Maximum der negativen Stufe wurde zum Zeitpunkt 5 Jahre mit -44,1 µm ermittelt (Abb. 32c, rechts).

Nach 15-jähriger Funktionszeit wurden für diese Stufe nur noch –35,4 µm gemessen (Abb. 32e, rechts).

Die dreidimensionalen Darstellungen DOM und Stereobild wiesen in diesem Messbereich ausschließlich zum Kontrollzeitpunkt 1 Jahr eine zusätzliche, unter das Niveau der negativen Stufe abgetragene „Randvertiefung“ aus (Abb. 30b, 31b). In diesem Fall wurde mit dem Höhenprofil eine über die Randstufe hinausgehende zusätzliche Tiefe von 8,4 µm bestimmt (Abb. 32b).

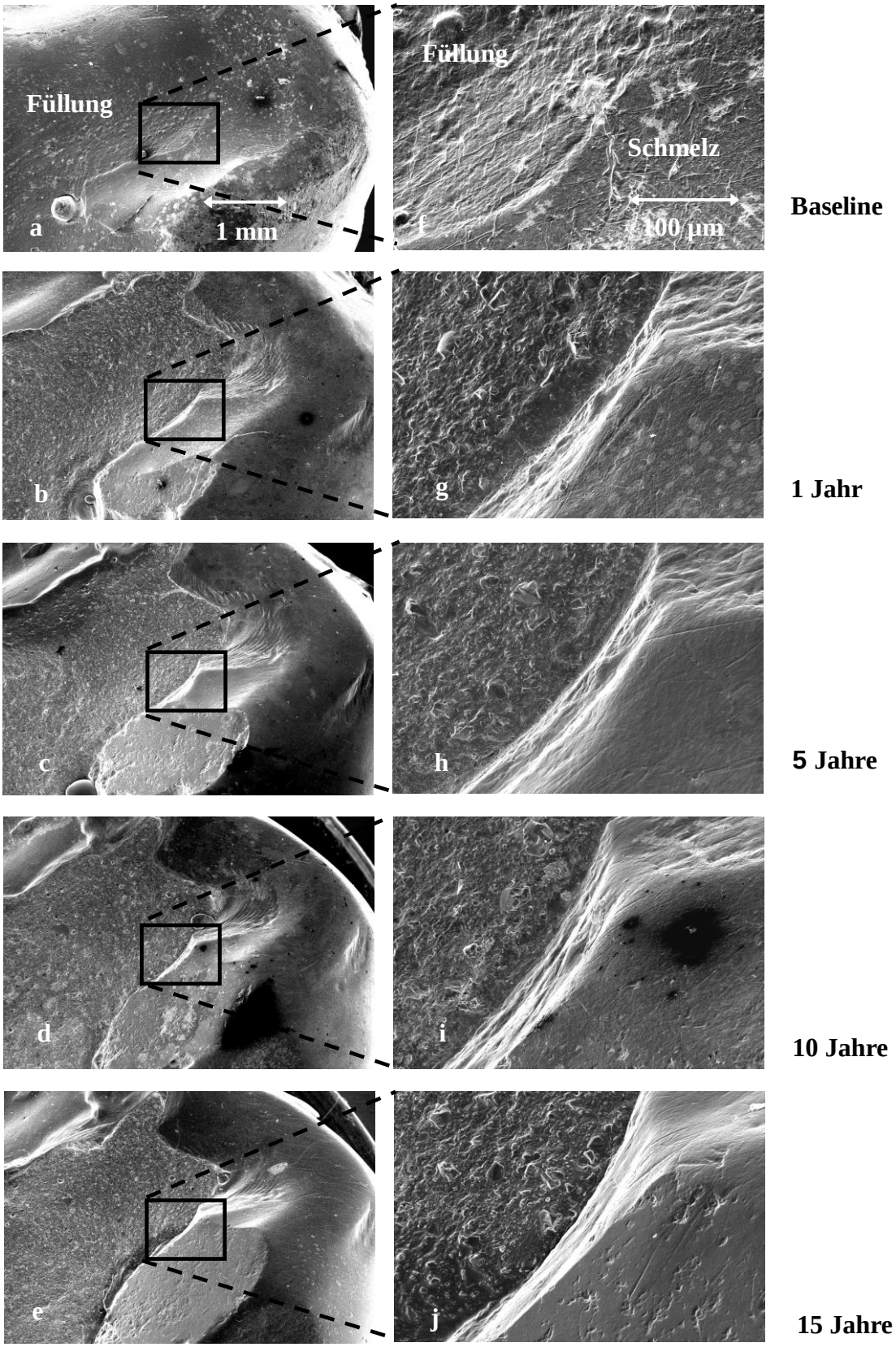


Abb. 29: longitudinaler Verlauf (15 Jahre) eines perfekten Füllungsrandes (Baseline) zur negativen Stufe, Visio-Molar X®- Füllung, REM-Standardbilder
a-e: Übersichtsbilder, mikr. Vergr. 25:1, Markierung: Messbereich für 3D-REM
f-j: ausgewählter Messbereich, mikr. Vergr. 200:1

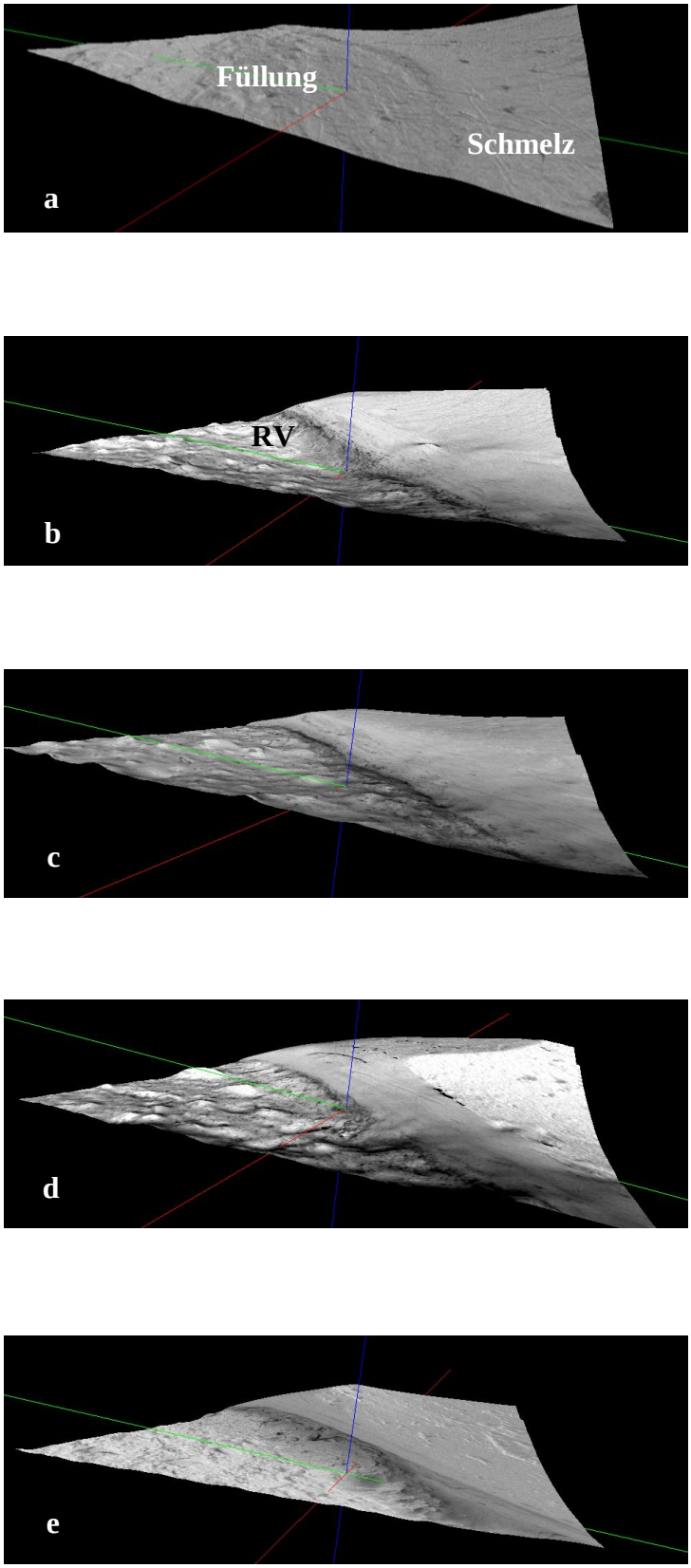


Abb. 30: longitudinaler Verlauf (15 Jahre) eines perfekten Füllungsrandes (Baseline) zur negativen Stufe, Visio-Molar X ®-Füllung, 3D-REM: DOM, Messbereich von Abb. 29, Randvertiefung (RV), Stufenverlauf im Bild gedreht, mikr. Vergr. 200:1
a: perfekter Rand zu Baseline, **b-e:** negative Stufenbildung nach 1–15 Jahren

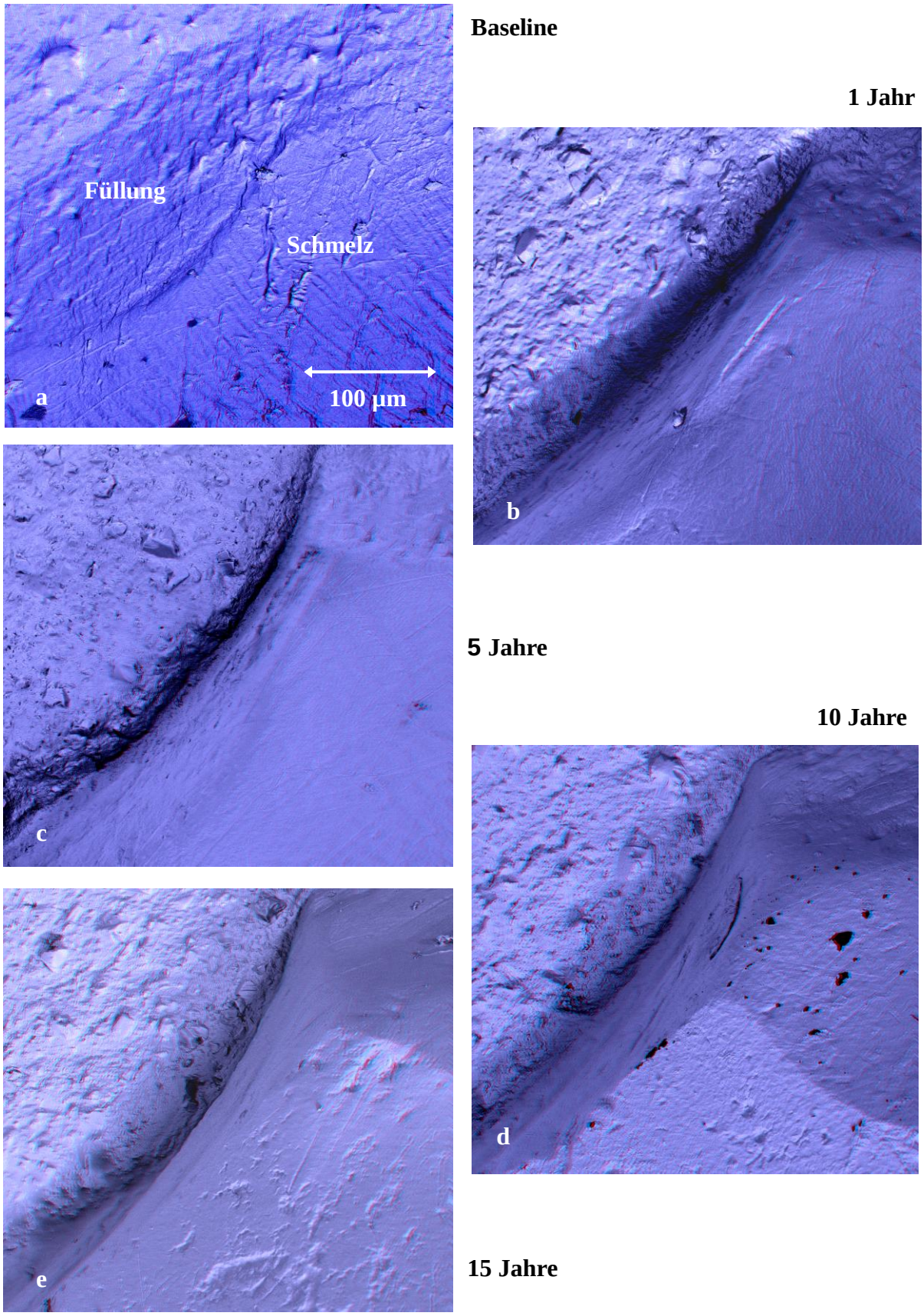


Abb. 31: longitudinaler Verlauf (15 Jahre) eines perfekten Füllungsrandes (Baseline) zur negativen Stufe, Visio-Molar X®-Füllung, 3D-REM: Stereobilder, Messbereich von Abb. 29, Randvertiefung (RV), mikr. Vergr. 200:1, Stereobrille benutzen!
a: perfekter Rand zu Baseline, **b-e:** negative Stufenbildung nach 1–15 Jahren

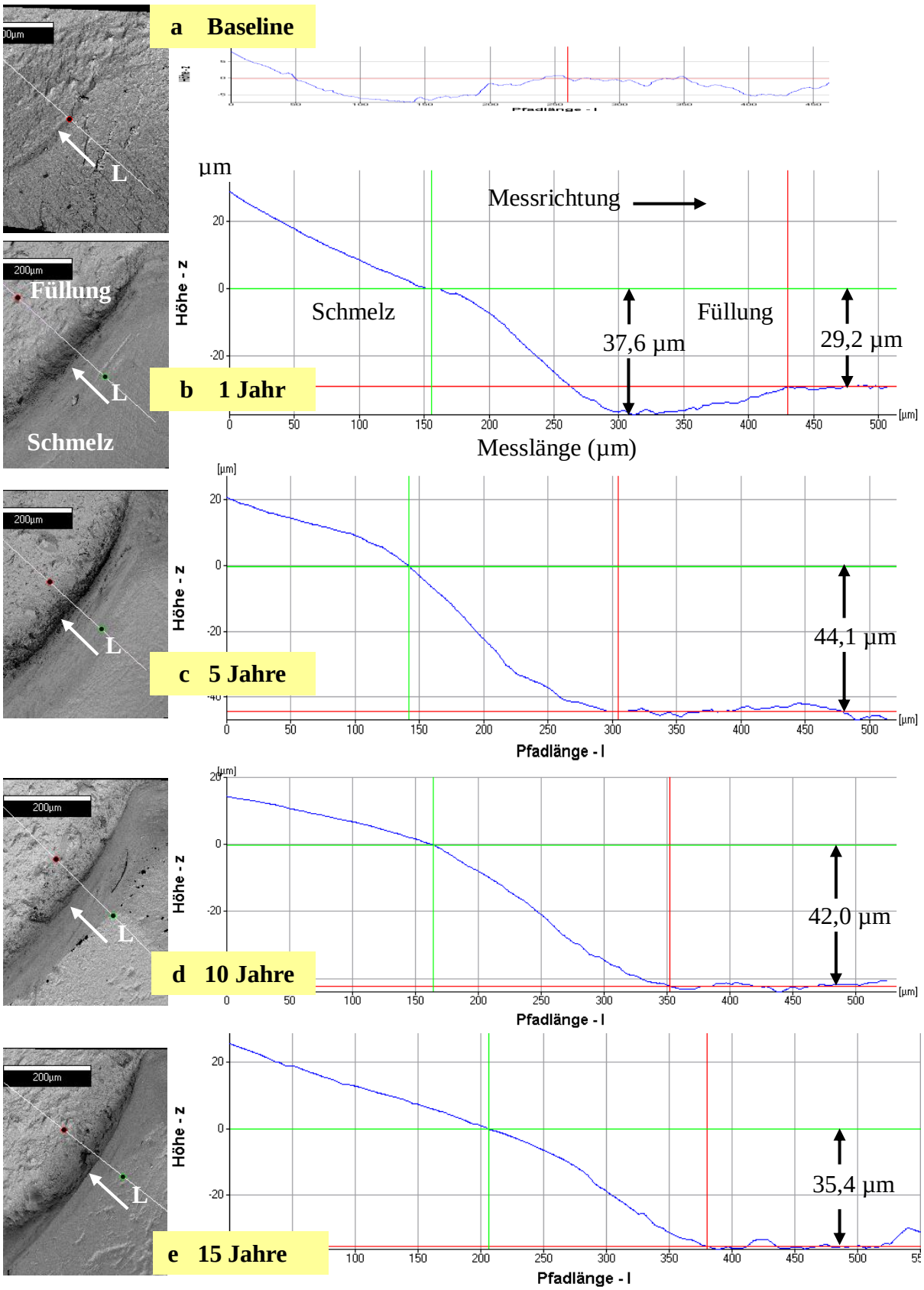


Abb. 32: longitudinaler Verlauf (15 Jahre) eines perfekten Füllungsrandes (Baseline) zur negativen Stufe, Visio-Molar X®-Füllung, 3D-REM: links: Texturbilder mit Messlinie (L), Messrichtung (Pfeil), rechts: Höhenprofile, Messrichtung von grün zu rot (Pfeil), Messbereich von Abb. 29, mikr. Verg. 200:1
a: perfekter Rand zu Baseline, **b-e:** negative Stufenbildung nach 1–15 Jahren

5.2.2.1.2 Longitudinaler Verlauf bei Füllungsüberschuss (Baseline) zur negativen Stufe

Für diesen Messbereich war mit der limitierenden Darstellungsmöglichkeit der REM-Standardbilder (im SE-Modus) die Bewertung für Baseline und 1 Jahr (Abb. 33a, b, f, g) schwer möglich.

Ab 5 Jahre Funktionszeit war im Standardbild eine negative Stufe (mit Schmelzabbruch) erkennbar (Abb. 33c-e, h-j).

DOM, Stereobild und Höhenprofil zeigten zu Baseliene eine stufenlose, von Füllungsmaterial bedeckte Fläche (Abb. 34a, 35a, 36a). Für die tabellarische Erfassung des Füllungsüberschusses wurde in diesem Fall der Wert der positiven Stufenhöhe aus dem nachfolgend beschriebenen 1-Jahres-Höhenprofil übernommen (+17,6 µm).

Nach 1 Jahr war mit der 3D-REM Bewertung mittels DOM und Stereobild ein Füllungsüberschuss nachweisbar (Abb. 34b, 35b), für den im Höhenprofil +17,6 µm ermittelt wurden (Abb. 36b).

Ab 5 Jahre Funktionszeit wies das Höhenprofil am Füllungsrand eine negative Stufe aus, deren Maximum nach 10 Jahren mit -49,1 µm gemessen wurde (Abb. 36c-e). Für die nachfolgenden 5 Jahre wurde eine geringfügige Verringerung der Randstufe auf -46,7 µm registriert.

Darüber hinaus wurde mit den dreidimensionalen Bewertungen (DOM, Stereobild und Höhenprofil) ab dem 5. Jahr eine über 20 µm unter das Niveau der negativen Stufe hinausgehende „Randvertiefung“ ermittelt (Abb. 36c-e).

Die z.B. in mehreren Einzelbildern der Abbildungen 33 wiedergegebenen runden Ablagerungen sind als Artefakte bei der Herstellung der Replikate entstanden.

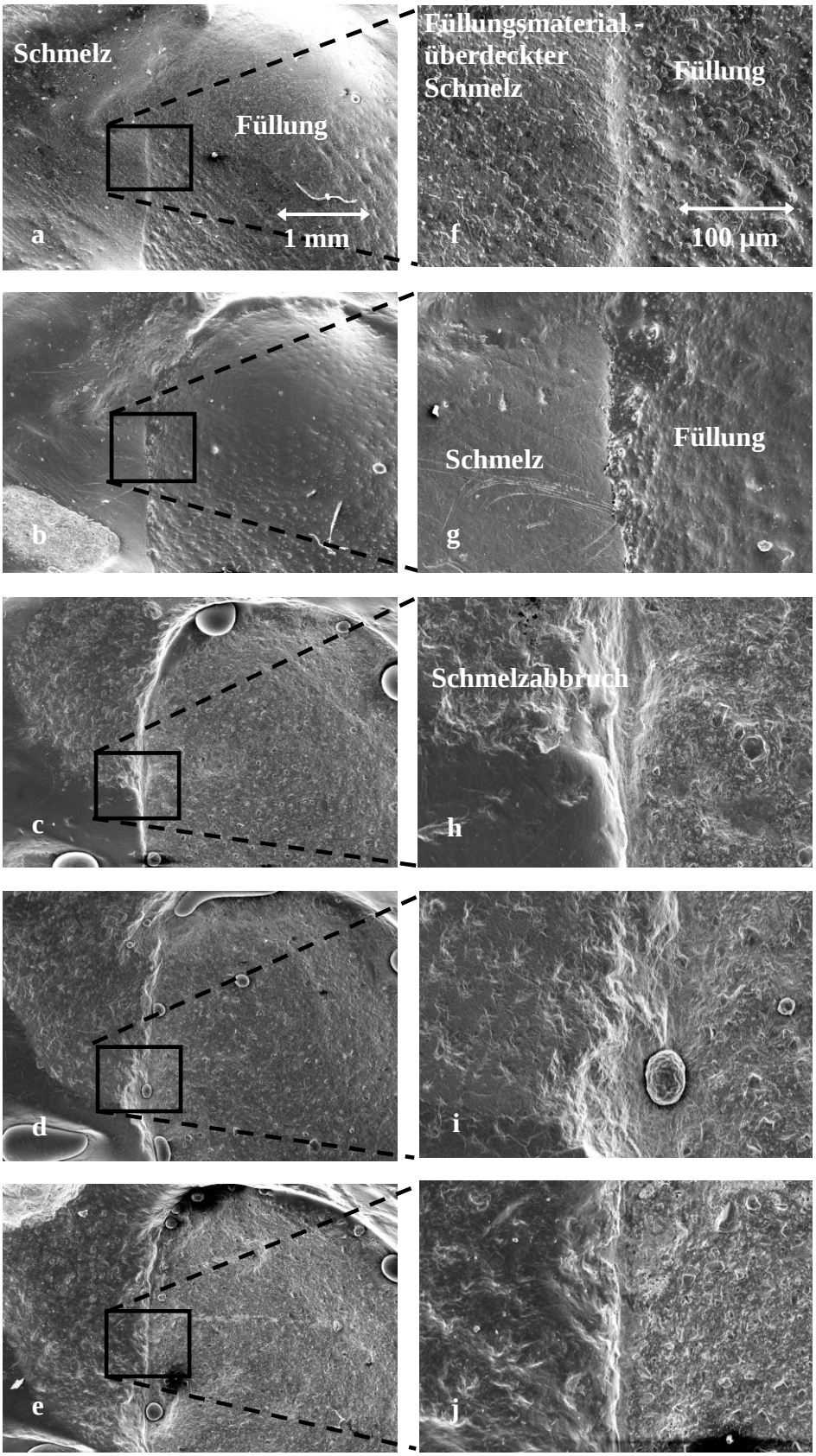
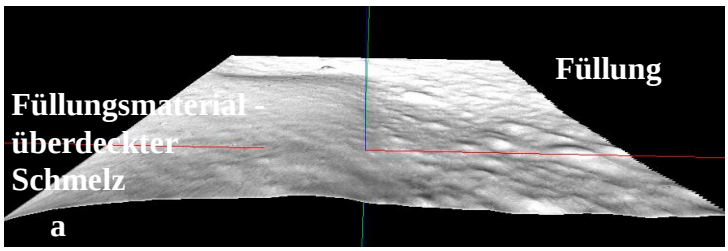
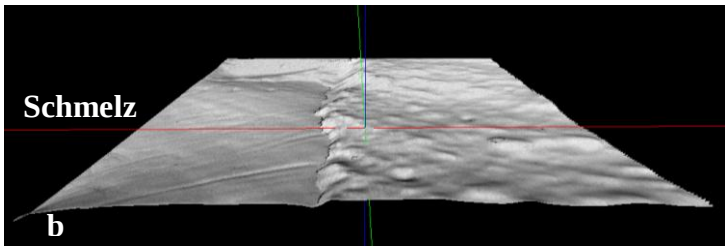


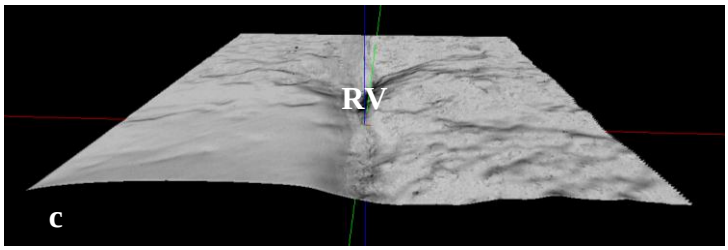
Abb. 33: longitudinaler Verlauf (15 Jahre) eines Füllungsüberschusses (Baseline) zur negativen Stufe, Visio-Molar X ®-Füllung, REM-Standardbilder
a-e: Übersichtsbilder, mikr. Vergr. 25:1, Markierung: Messbereich für 3D-REM
f-j: ausgewählter Messbereich (Baseline und 1 Jahr Füllungsüberschuss, ab 5 Jahre negative Stufe und Schmelzabbruch), mikr. Vergr. 200:1



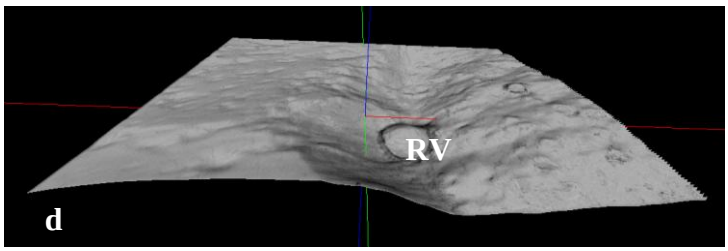
Baseline



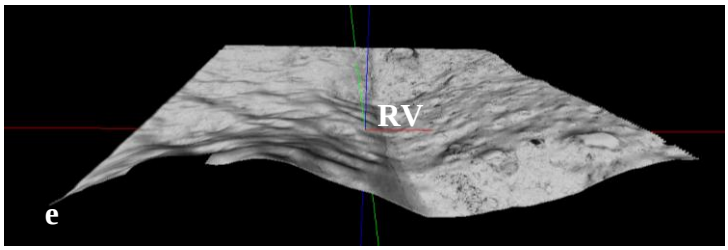
1 Jahr



5 Jahre



10 Jahre



15 Jahre

Abb. 34: longitudinaler Verlauf (15 Jahre) eines Füllungsüberschusses (Baseline) zur negativen Stufe, Visio-Molar X ®-Füllung, 3D-REM: DOM, Messbereich von Abb. 33, mikr. Vergr. 200:1
a: Füllungsüberschuss zu Baseline, verdeckter Füllungsrand,
b: Füllungsüberschuss nach 1 Jahr, Füllungsmaterialverlust über Schmelz,
c-e: negative Stufenbildung nach 5-15 Jahren mit Randvertiefung (RV)

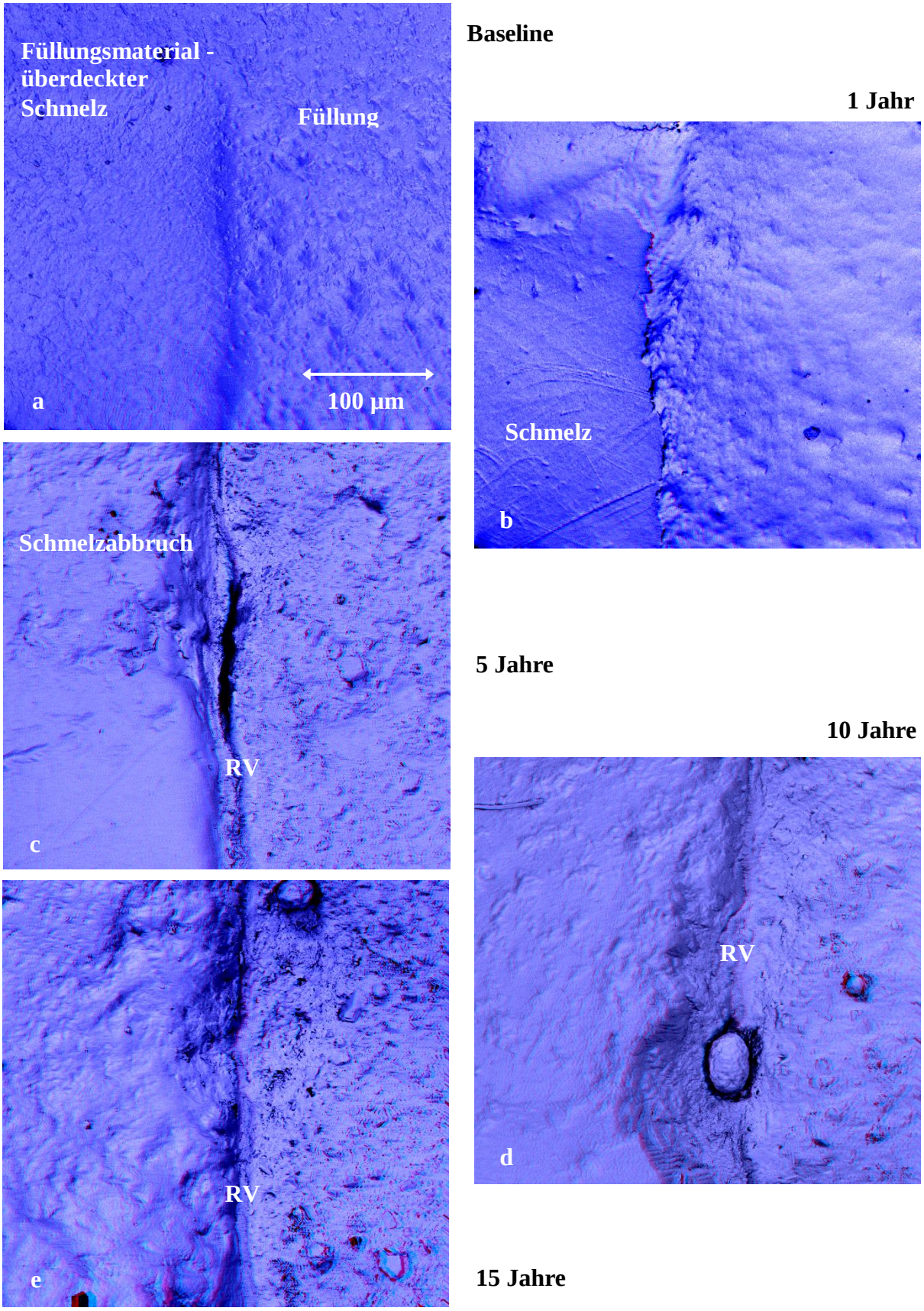


Abb. 35: longitudinaler Verlauf (15 Jahre) eines Füllungsüberschusses (Baseline) zur negativen Stufe, Visio-Molar X ®-Füllung, 3D-REM: Stereobilder, Messbereich von Abb. 33, mikr. Vergr. 200:1
a: Füllungsüberschuss zu Baseline, verdeckter Füllungsrand, **b:** Füllungsüberschuss nach 1 Jahr, Füllungsmaterialverlust über Schmelz, **c-e:** negative Stufenbildung nach 5-15 Jahren, mit Randvertiefung (RV), Stereobrille benutzen!

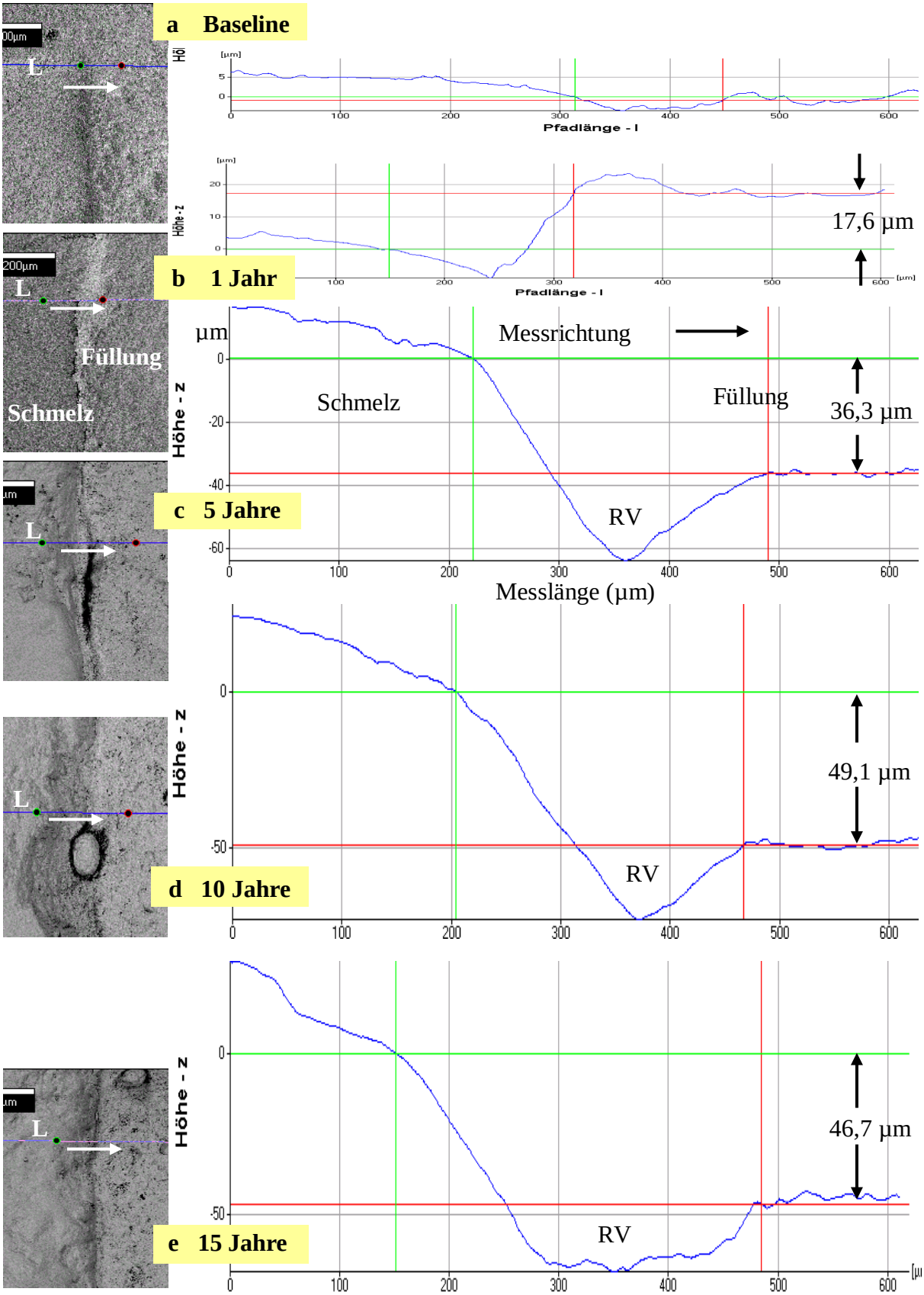


Abb. 36: longitudinaler Verlauf (15 Jahre) eines Füllungsüberschusses (Baseline) zur negativen Stufe, Visio-Molar X ®-Füllung, 3D-REM: links: Texturbilder mit Messlinie (L), Messrichtung (Pfeil), rechts: Höhenprofile, Messrichtung von grün zu rot, Messbereich von Abb. 33, mikr. Vergr. 200:1
a-b: Füllungsüberschuss zu Baseline (überdeckt Schmelz, nicht messbar) und nach 1 Jahr,
c-e: negative Stufenbildung nach 5-15 Jahren mit Randvertiefung (RV)

5.2.2.1.3 Longitudinaler Verlauf einer negativen Stufe (Baseline) über 15 Jahre

Standardbilder, DOM und Stereobild (Abb. 37a, f, 38a, 39a) waren für Baseline schwer zu bewerten. Mit dem zugehörigen Höhenprofil (Abb. 40a) konnte bereits zu diesem Zeitpunkt eine negative Stufe von -14,7 µm ermittelt werden.

Die negative Stufe betrug zum Zeitpunkt 1 Jahr -17,8 µm (Abb. 40b) und war in allen Bilddarstellungen (Abb. 37b, g, 38b, 39b) erkennbar. Nach 5 Jahren wurde diese Stufe mit dem Höchstwert von -49,2 µm gemessen (Abb. 40c).

Zwischen 5 und 15 Jahren reduzierte sich die Stufenhöhe auf -30,7 µm (Abb. 40e).

Eine „Randvertiefung“ konnte in diesem Messbereich zu keinem Zeitpunkt nachgewiesen werden.

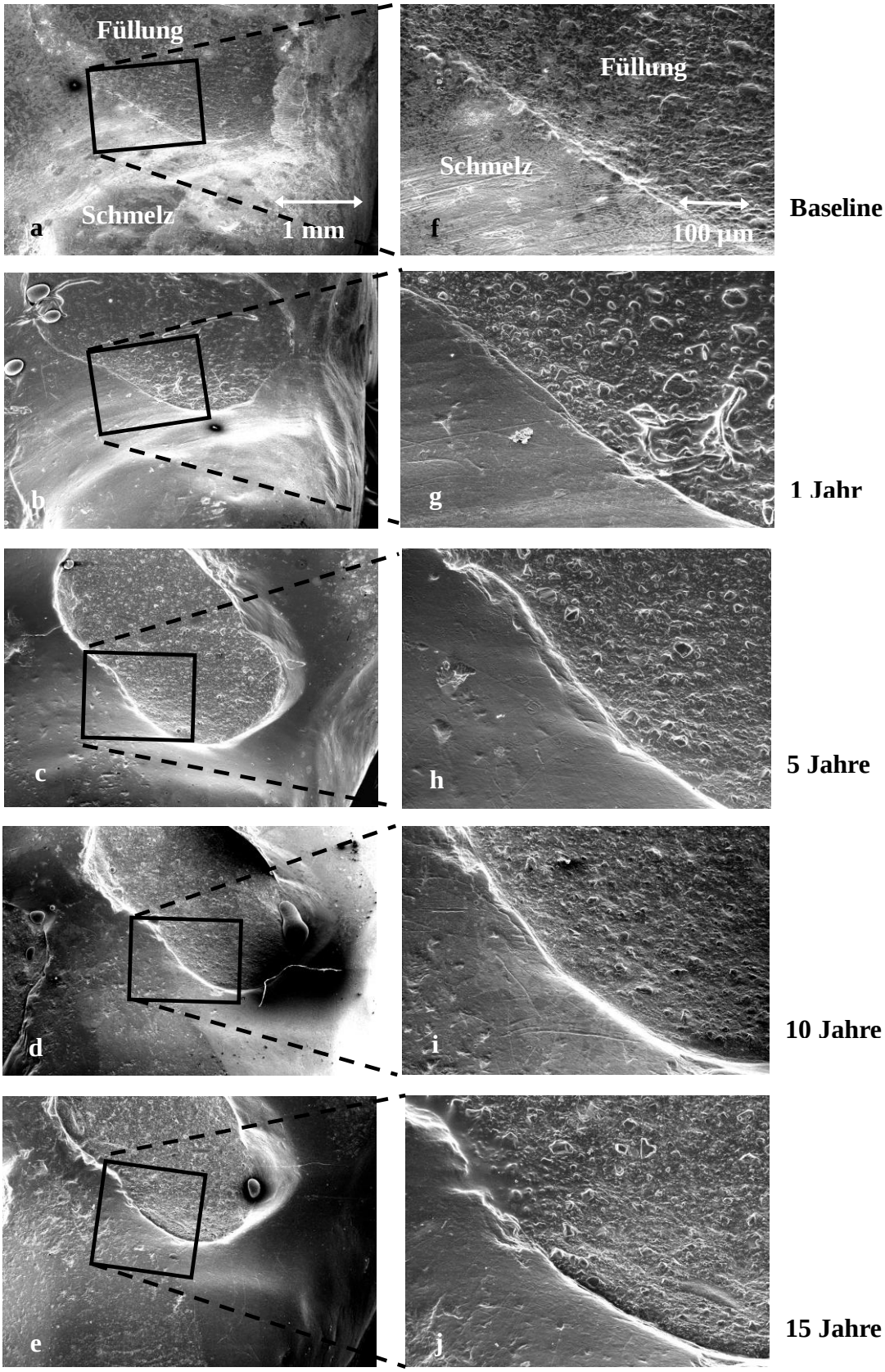
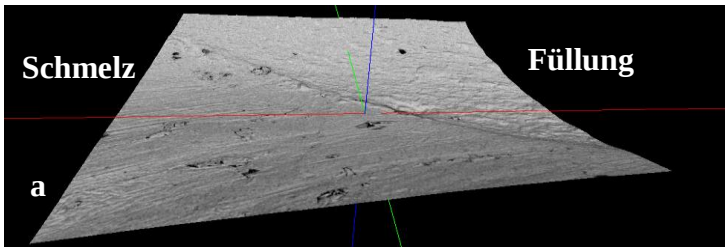
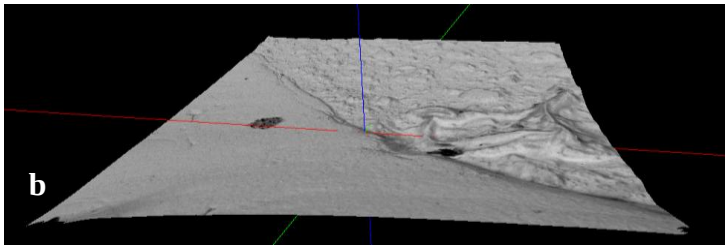


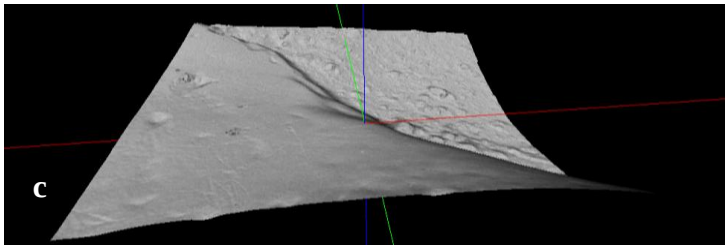
Abb. 37: longitudinaler Verlauf (15 Jahre) einer negativen Stufe bereits zu Baseline, Visio-Molar X ®-Füllung, REM-Standardbilder
a-e: Übersichtsbilder, mikr. Vergr. 25:1, Markierung: Messbereich für 3D-REM
f-j: ausgewählter Messbereich, negative Stufenbildung mit geringfügigen Schmelzabbrüchen, mikr. Vergr. 100:1



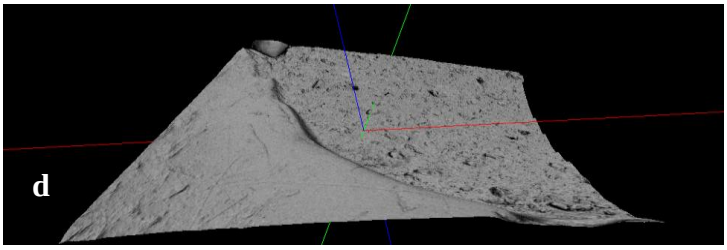
Baseline



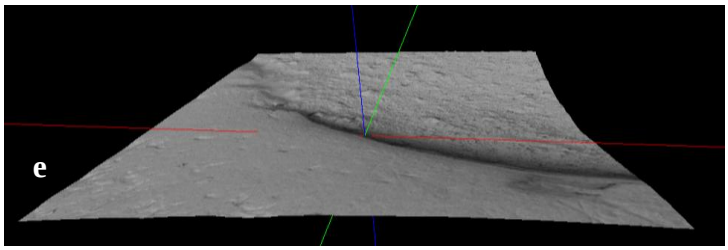
1 Jahr



5 Jahre

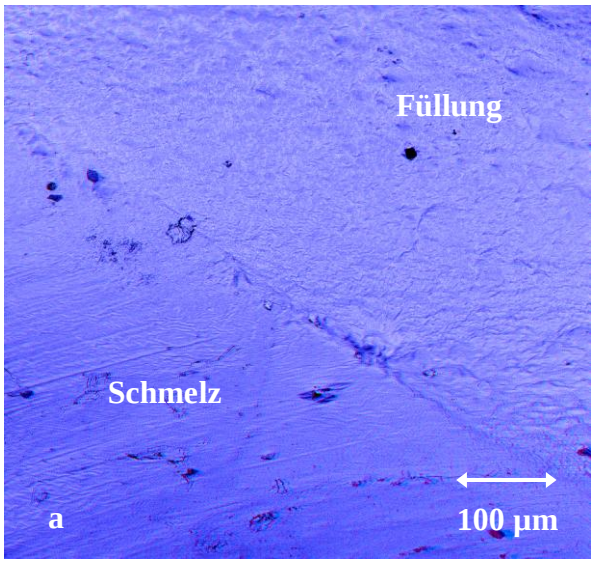


10 Jahre



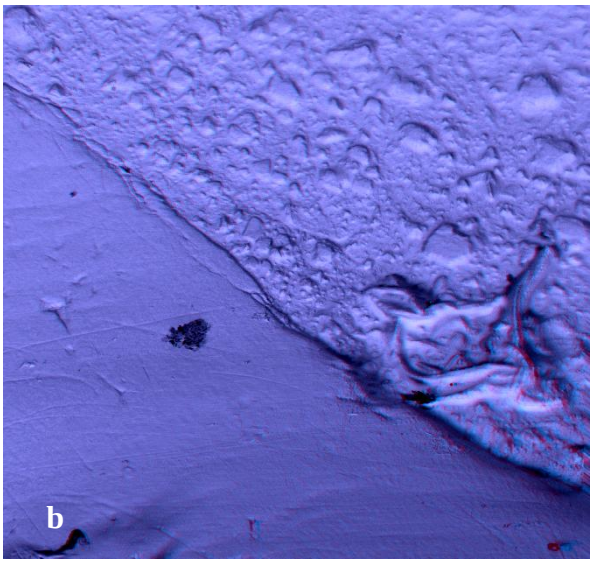
15 Jahre

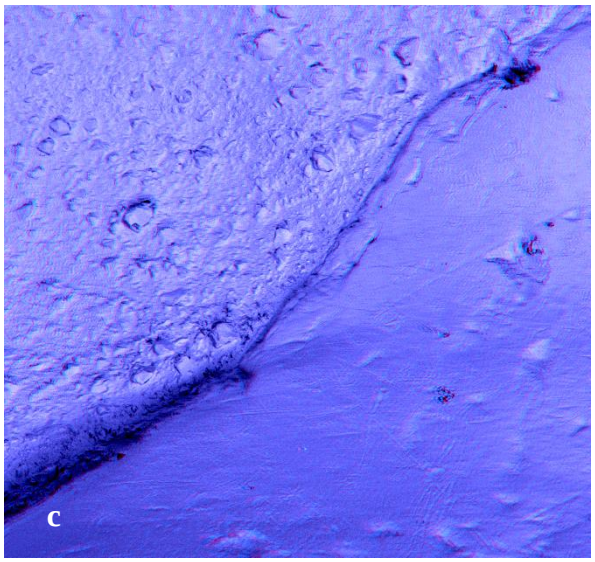
Abb. 38a-e: longitudinaler Verlauf (15 Jahre) einer negativen Stufe bereits zu Baseline, Visio-Molar X ® -Füllung, 3D-REM: DOM, Messbereich von Abb. 37, mikr. Vergr. 100:1



Baseline

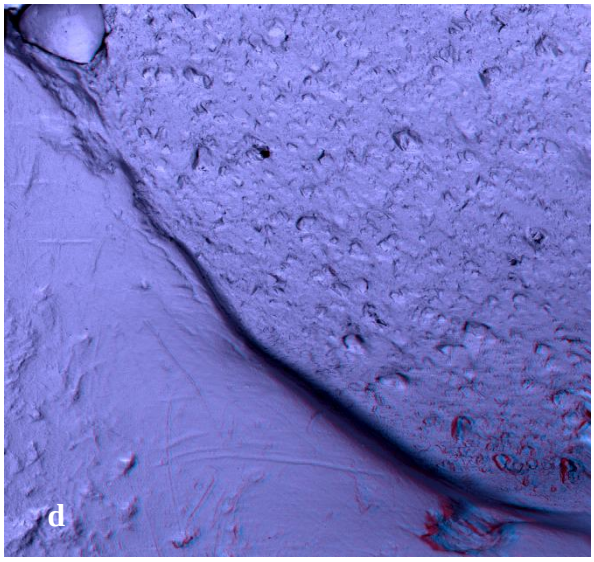
1 Jahr

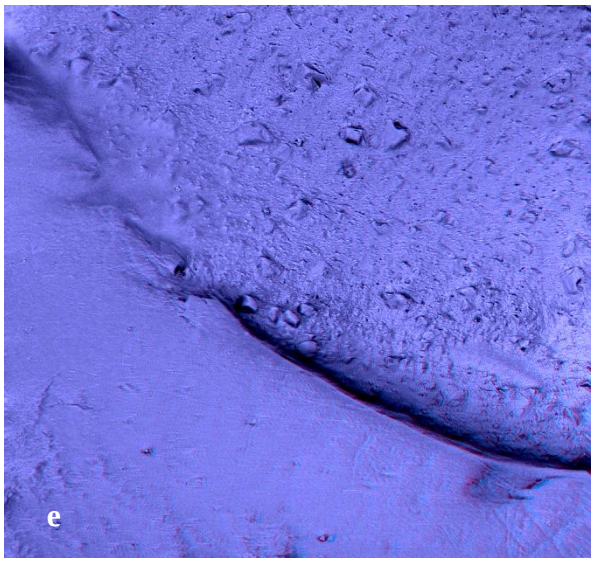




5 Jahre

10 Jahre





15 Jahre

Abb. 39a-e: longitudinaler Verlauf (15 Jahre) einer negativen Stufe bereits zu Baseline, Visio-Molar X ®-Füllung, 3D-REM, Stereobilder, Messbereich von Abb. 37, mik. Vergr. 100:1 (Stereobrille!)

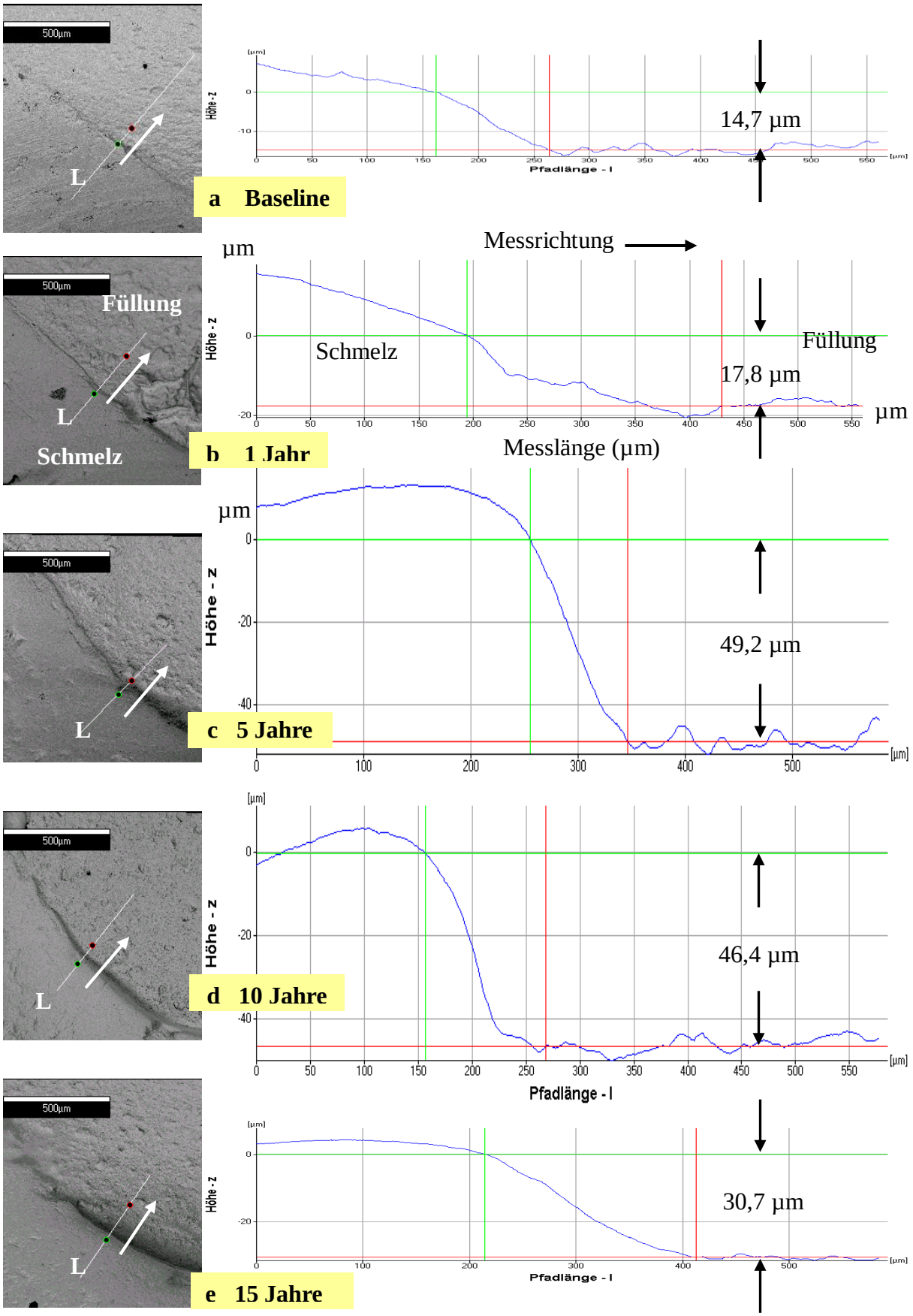


Abb. 40a-e: longitudinaler Verlauf (15 Jahre) einer negativen Stufe bereits zu Baseline, Visio-Molar X ®-Füllung, 3D-REM: links: Texturbilder mit Messlinie (L), Messrichtung (Pfeil), rechts: Höhenprofile, Messrichtung von grün zu rot, Messbereich von Abb. 37, mikr. Vergr. 100:1

5.2.2.1.4 Longitudinaler Verlauf einer Randvertiefung

In diesem Beispiel lag zu Baseline ein perfekter Rand vor (Abb. 41a, f, 42a, 43a, 44a).

Nach 1-jähriger Funktionszeit wurde im Höhenprofil (Abb. 44b) eine negative Stufe von -13,4 µm und darüber hinaus eine Randvertiefung mit insgesamt -16,0 µm ermittelt. Zu diesem Zeitpunkt war im REM-Standardbild, DOM und Stereobild die negative Stufe kaum erkennbar (Abb41b, g, 42b, 43b), die Randvertiefung war aus dem REM-Standardbild (Abb41b, g) nicht realisierbar.

Nach 5 Jahren wurde die in allen zugehörigen Abbildungen (Abb. 41c, h, 42c, 43c) gut sichtbare negative Stufe mit -17,6 µm gemessen (Abb. 44c) und die im DOM (Abb. 42c) und Stereobild (Abb. 43c) gut dargestellte Randvertiefung erreichte -27,1 µm (Abb. 44c).

Nach 15 Jahren wurden für die negative Stufe -62,7 µm ermittelt (Abb. 44e) und die weiterhin mit DOM (Abb. 42d, e) und Stereobild (Abb. 43d, e) darstellbare Randvertiefung lag mit -92,9 µm deutlich unter dem Randstufen-Niveau von -62,7 µm (Abb. 44e).

Zu allen Kontrollzeitpunkten blieb im REM-Standardbild die Randvertiefung schwer erkennbar (Abb. 41b-e, g-j).

Die in den Abbildungen 41i und. 43d markierte kugelförmige Ablagerung, die in diesem Falle Randstufe und Schmelzabbruch „dekorierte“, ist als ein auf die elektronen-mikroskopische Präparation zurückzuführender Artefakt zu bewerten.

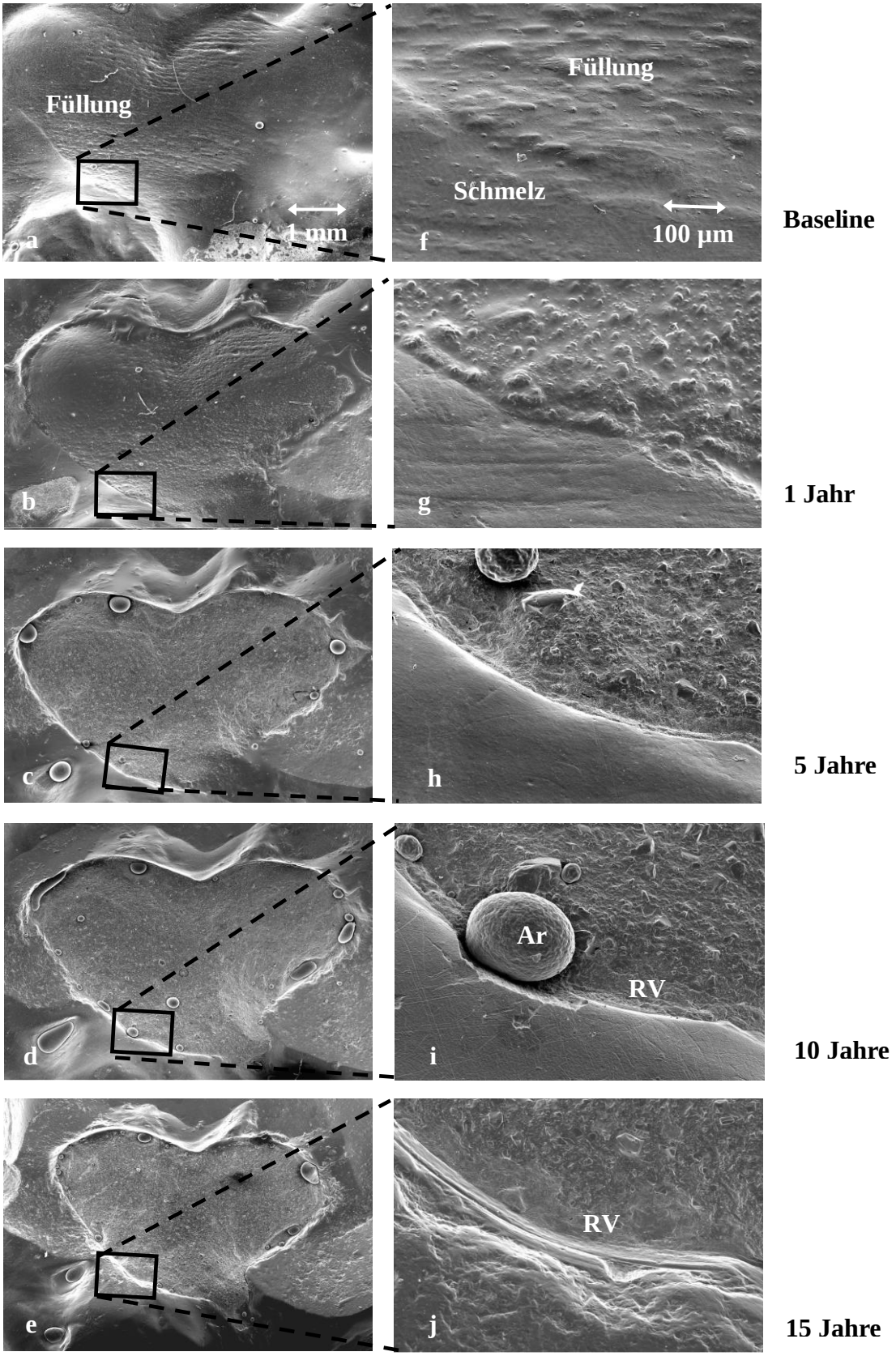
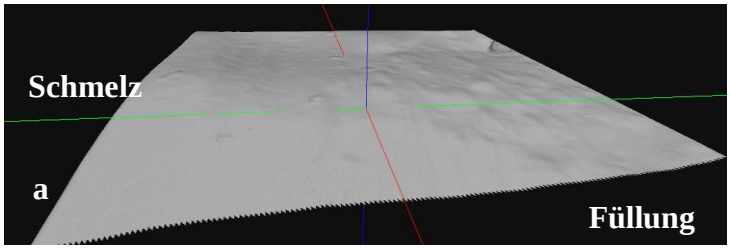
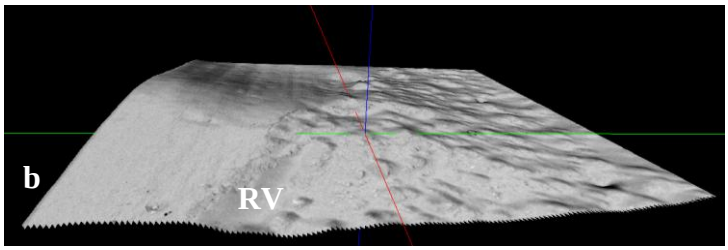


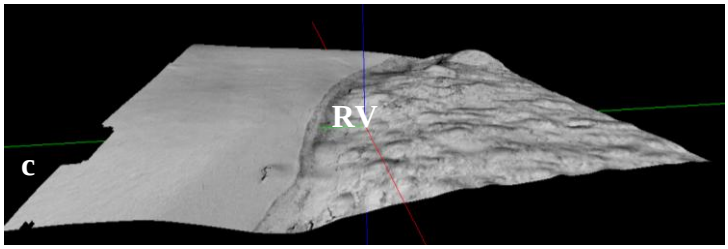
Abb. 41: longitudinaler Verlauf (15 Jahre) einer Randvertiefung (RV) bei perfektem Rand zu Baseline, Visio-Molar X®- Füllung, REM-Standardbilder
a-e: Übersichtsbilder, mikr. Vergr. 16:1, Markierung: Messbereich für 3D-REM,
f-j: ausgewählter Messbereich, ab 1 Jahr negative Stufe, Randvertiefung schwer erkennbar, mikr. Vergr. 150:1, (Bild i: Artefakt (Ar))



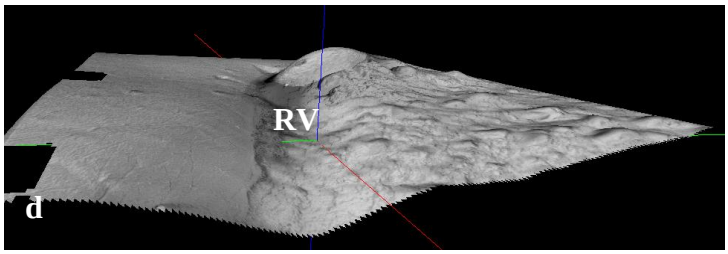
Baseline



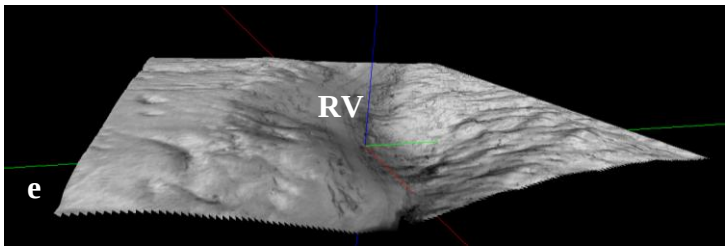
1 Jahr



5 Jahre

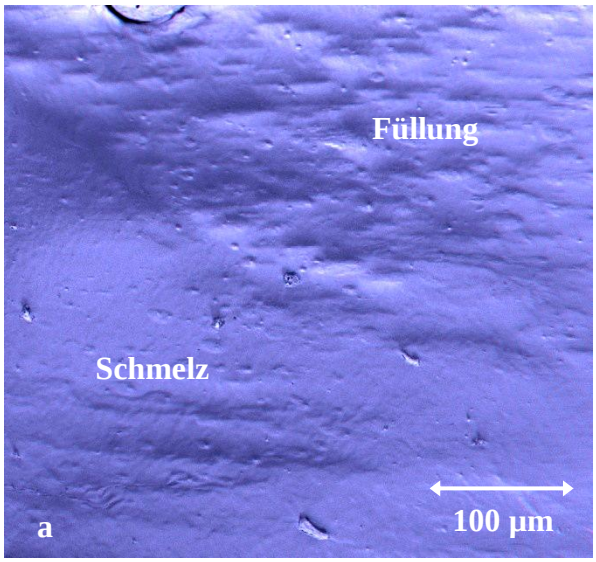


10 Jahre



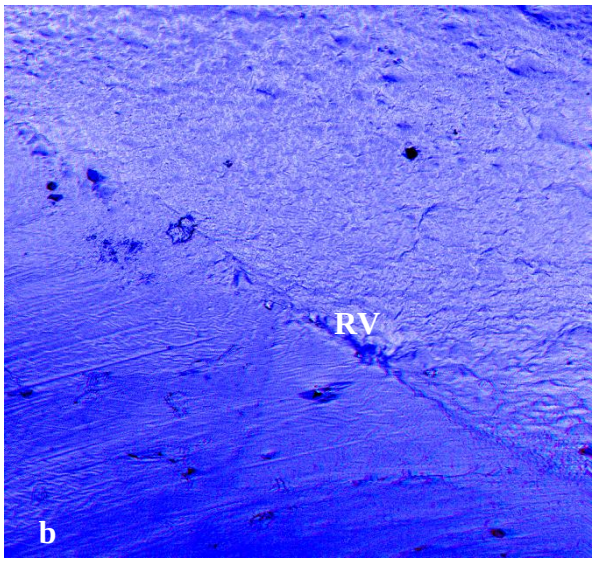
15 Jahre

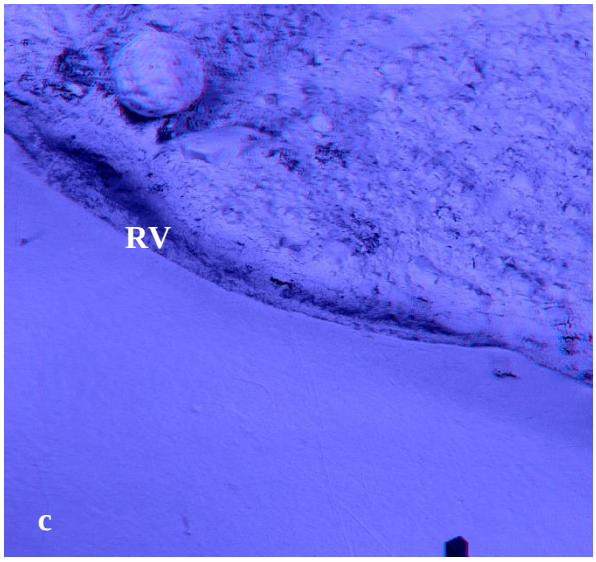
Abb. 42: longitudinaler Verlauf (15 Jahre) einer Randvertiefung (RV) bei perfektem Rand zu Baseline, Visio-Molar X®-Füllung, 3D-REM: DOM, Messbereich von Abb. 41, mikr. Vergr. 150:1
a: perfekter Rand zu Baseline,
b-e: ab 1 Jahr beginnende negative Stufenbildung mit Randvertiefung



Baseline

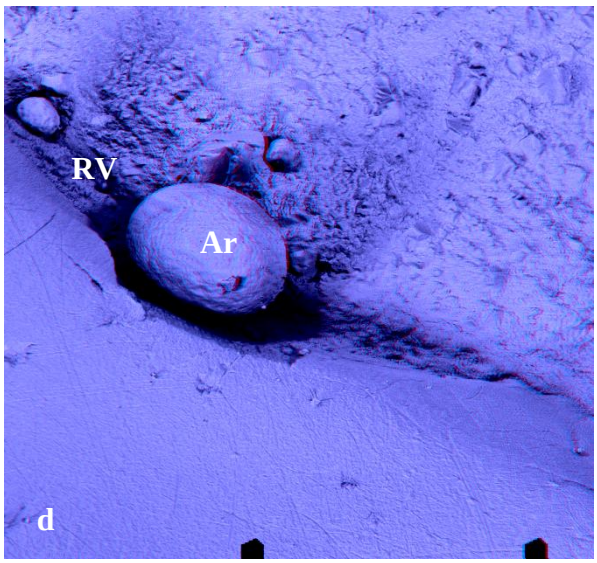
1 Jahr

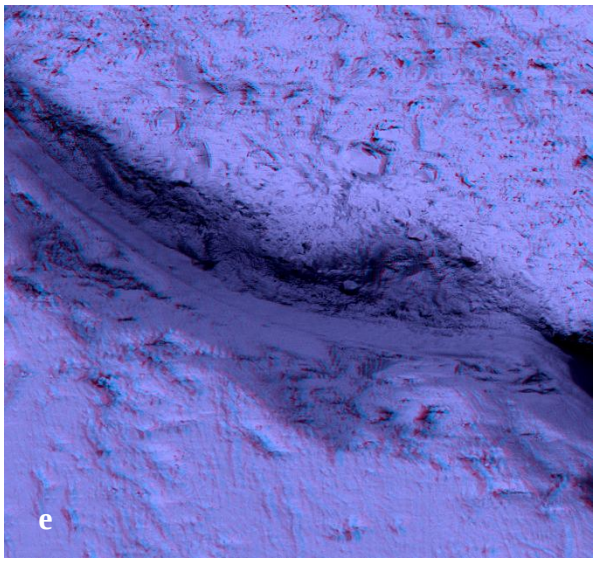




5 Jahre

10 Jahre





15 Jahre

Abb. 43: longitudinaler Verlauf (15 Jahre) einer Randvertiefung (RV) bei perfektem Rand zu Baseline, Visio-Molar X®-Füllung, 3D-REM: Stereobilder, Messbereich von Abb. 41, mikr.Vergr. 150:1 (Stereobrille benutzen!)
a: perfekter Rand zu Baseline, **b-e:** ab 1 Jahr beginnende negative Stufenbildung mit Randvertiefung (Bild d: Artefakt (Ar))

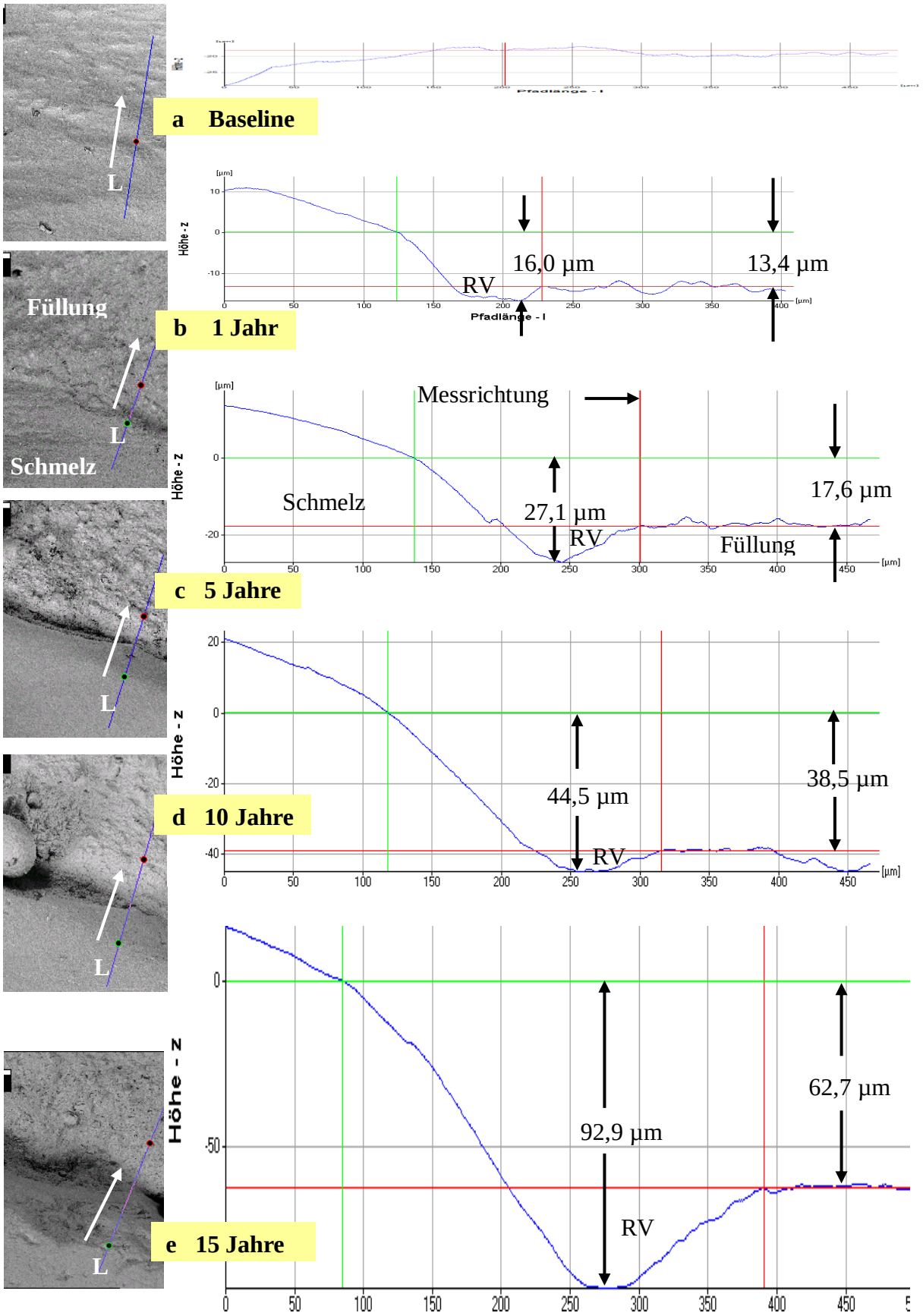


Abb. 44a-e: longitudinaler Verlauf (15 Jahre) einer Randvertiefung (RV) bei perfektem Rand zu Baseline, Visio-Molar X®-Füllung, 3D-REM: links: Texturbild mit Messlinie (L), Messrichtung (Pfeil), rechts: Höhenprofil, Messrichtung von grün zu rot (Pfeil), Messbereich von Abb. 41, mikr. Vergr. 150:1

5.2.2.2 Dynamik des Randverhaltens aller Füllungen

5.2.2.2.1 Verlauf der Stufenbildung

Die zum jeweiligen Kontrollzeitpunkt ausgeführten 90 Einzelmessungen (an insgesamt 10 Füllungen) an den Füllungsrändern wiesen beträchtliche Schwankungen in den Höhenprofilen auf. Für Baseline wurden diese Schwankungen von einem maximalen Füllungsüberschuss von +35,5 µm bis zu einer negativen Stufe mit -58,2 µm ermittelt.

Nach einem Jahr reichten die Randstufen von den genannten +35,5 µm Überschuss bis zu -75,0 µm einer negativen Stufe.

Zur 5-Jahres-Kontrolle wurde noch an einem Messpunkt +8,4 µm Füllungsüberschuss und bis zu –89,4 µm für negative Stufen gemessen.

Nach 10 Jahren Funktionszeit wurden negative Stufen zwischen -0,6 µm und einer maximalen Tiefe von -94,5 µm ermittelt.

Die 15-Jahres-Untersuchung ergab in vielen Fällen eine Verringerung der negativen Stufen. Die Stufenhöhe betrug zwischen 0,0µm und -69,6 µm.

Trotz relativ großer Unterschiede zwischen den einzelnen Füllungen bzw. den geprüften Messbereichen einer Füllung zeigten die Veränderungen des jeweiligen longitudinal untersuchten Füllungsrand-Abschnittes einen charakteristischen Verlauf über die 15-jährige Funktionszeit.

Die Dynamik der Stufenbildung wird nachfolgend mit drei Beispielen typischer Messbereiche (Mittelwerte von je drei Einzelmessungen, Tabelle 6, Abb. 45) dokumentiert:

- **Beispiel 1** (Füllung 7/ Messbereich 12; rote Säulen): Ein **Füllungsüberschuss zu Baseline** (+13,4 µm) entwickelte sich bis zum fünften Jahr zu einer negativen Stufe von -35,7 µm, die dann über die folgenden 10 Jahre bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes kontinuierlich bis auf -58,4 µm Tiefe den Kavitätenrand freilegte.
- **Beispiel 2** (Füllung 5/ Messbereich 3; grüne Säulen): Ein **perfekter Rand zu Baseline** wurde innerhalb des ersten Jahres zur deutlichen negativen Stufe von -32,4 µm abradiert. Diese Stufe verstärkte sich noch mäßig bis auf -41,0 µm zur 10-Jahres-Kontrolle und zeigte nach 15 Jahren mit -38,8 µm eine gering rückläufige Tendenz.
- **Beispiel 3** (Füllung 9/ Messbereich 2; blaue Säulen): Eine bereits **zu Baseline** mit -8,6 µm ausgewiesene **negative Stufe** stieg über den 1-Jahreswert (-26,2 µm) bis zu 5 Jahren auf beträchtliche -72,9 µm an, danach bis zu 10 Jahren nur noch gering auf das Maximum von -80,2 µm und verlor in den folgenden 5 Jahren mit -44,0 µm deutlich an Tiefe.

Tab. 6: Longitudinaler Verlauf der Stufenbildung am Füllungsrand über 15 Jahre, Visio-Molar-X ® Füllung, 3D-REM, profilometrische Ergebnisse, Mittelwerte von je 3 Einzelmessungen pro Messbereich an den Füllungen Nr. 7, 5 und 9, Maximum/ Minima **türkis**/ **gelb** unterlegt

Beispiele zur Stufenbildung am Füllungsrand, ausgehend von Baseline mit:			
Beispiel Füllung/ Messbereich Farbe in der Grafik	1) Füllungsüberschuss **7/ 12** rot	2) perfektem Rand **5/ 3** grün	3) negativer Stufe **9/ 2** blau
Kontrollzeitpunkt	Stufenhöhe (µm)	Stufenhöhe (µm)	Stufenhöhe (µm)
Baseline	**+13,4**	0	-8,6
1 Jahr	+13,4	-32,4	-26,2
5 Jahre	-35,7	-37,5	-72,9
10 Jahre	-49,3	**-41,0**	**-80,2**
15 Jahre	**-58,4**	-38,8	-44,0

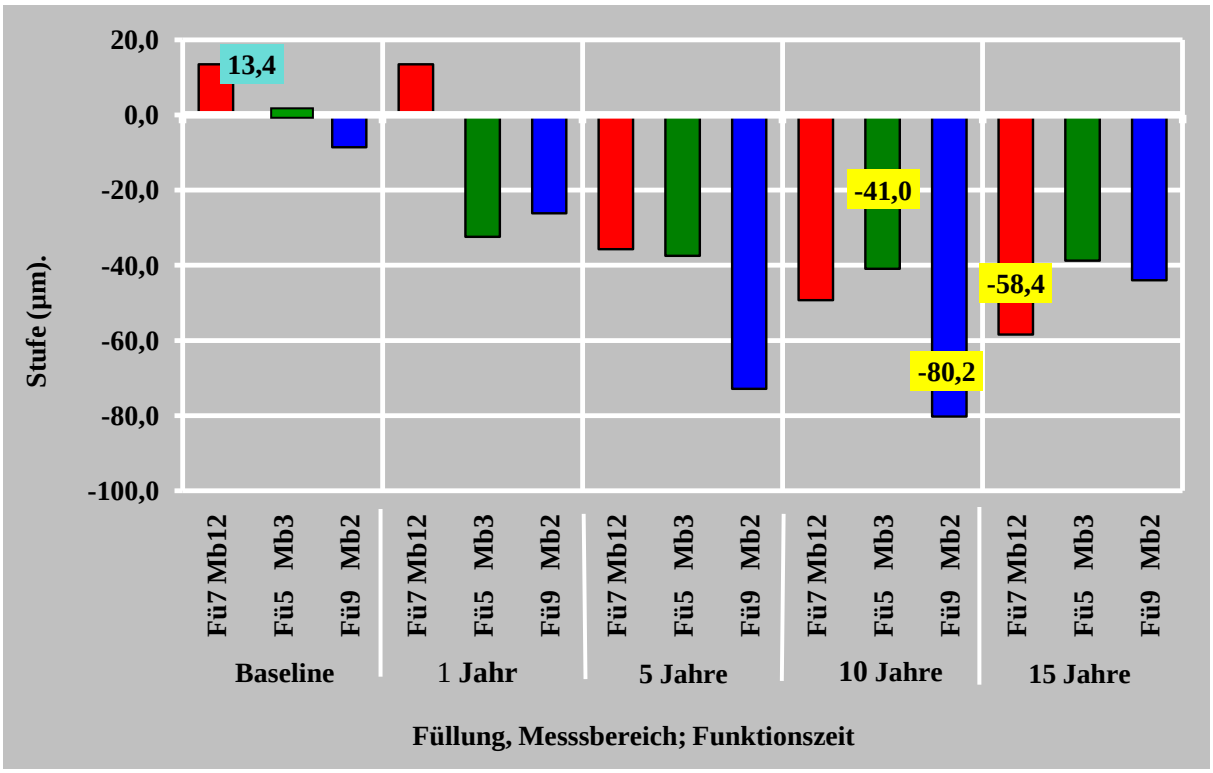


Abb. 45: Longitudinaler Verlauf der Stufenbildung am Füllungsrand über 15 Jahre Funktionszeit, Visio-Molar X ®-Füllung, 3D-REM, profilometrische Ergebnisse von Tab. 6, Mittelwerte von je 3 Einzelmessungen pro Messbereich (Mb) an den Füllungen Nr. Fü7 (rot), Fü5 (grün) und Fü9 (blau)

Die Mittelwerte aller 90 Messungen der bewerteten 10 Füllungen pro Funktionszeit (450 Einzelmessungen über 15 Jahre) sind in Abbildung 46 dargestellt und zeigen deutlich die Dynamik der Randveränderungen:

Zu Baseline lagen Füllungsüberschüsse sowie überwiegend negative Stufen vor, so dass der Mittelwert -2,0 µm betrug. Nach einem Jahr Funktionszeit entsprach der Mittelwert von -12,2 µm bereits 44,9% der späteren mittleren maximalen (negativen) Stufentiefe. Nach insgesamt 5 Jahren hatte sich die mittlere negative Stufe auf -25,5 µm bzw. 93,6% des späteren Maximums vergrößert. Bis zur 10-Jahres-Kontrolle erhöhte sich der Mittelwert nur noch gering auf das nun erreichte Maximum von -27,2 µm (100%) und fiel dann wieder auf -22,1 µm nach 15 Jahren, was nur noch 81,3% der maximalen negativen Stufentiefe entsprach. Die statistische Analyse zeigte signifikante Differenzen zwischen Baseline und 1 Jahr ($p = 0{,}006$) sowie 1 und 5 Jahren ($p < 0{,}001$). Für die leichten Veränderungen der Mittelwerte von 5 bis zu 10 Jahren ($p = 0{,}703$) und 10 bis 15 Jahren ($p = 0{,}188$) konnte keine Signifikanz nachgewiesen werden.

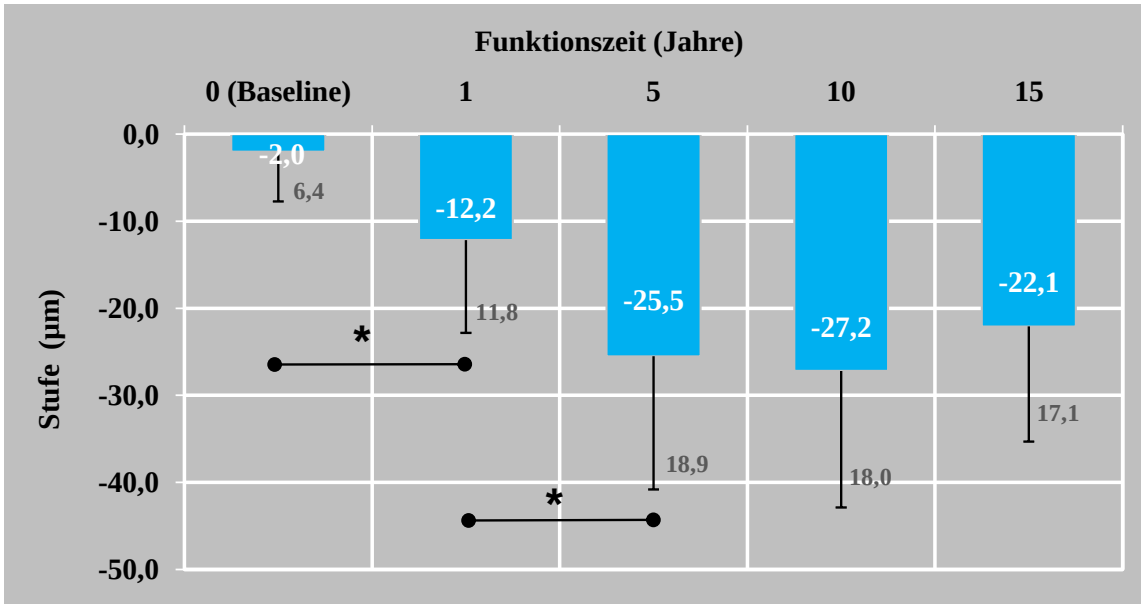


Abb. 46: Longitudinaler Verlauf der Stufenbildung am Füllungsrand über 15 Jahre Funktionszeit, Visio-Molar X®-Füllungen, 3D-REM, profilometrische Ergebnisse, Mittelwerte aller 90 Messungen und zugehörige Standardabweichungen pro Funktionszeit, * signifikante Differenz ($p < 0{,}05$)

5.2.2.2.2 Verlauf der Bildung von Randvertiefungen

Die aus der 3D-REM errechneten Höhenprofile führten zu der Erkenntnis, dass während der 15-jährigen Funktionsperiode an den Füllungsrändern vielfach Randvertiefungen auftraten. Diese waren im Standard-Bildmodus des REM nicht immer so gut darstellbar, wie das Abb. 47a zeigt. Die Randvertiefungen wurden nach dem REM-Standardbild häufig als negative Stufen bewertet (Abb. 47a). Die profilometrischen Messungen zeigten, dass bei dem Vorhandensein von Randvertiefungen nicht zwangsläufig negative Stufen vorlagen. Geringe Randvertiefungen wurden mit der Höhenprofil-Erstellung in Einzelfällen auch vor Füllungsüberschüssen, die nach 1-jähriger Funktionszeit noch nicht ganz abradiert waren, nachgewiesen. Die Randvertiefungen betrafen in ihrer Breite etwa den Bereich der Bondingzone und zeigten sich als die Orte, an denen die vereinzelt nachgewiesenen Mikroleakagen lokalisiert werden konnten (Abb. 47b).

Die Vermessung der Höhenprofile erlaubte eine detaillierte Beschreibung dieser Randvertiefungen. (Abb. 48). Es zeigte sich, dass der Schmelz am Kavitätenrand (Abb. 48b, c, d, grüne Markierung) nicht immer bis zum Boden der Vertiefung freigelegt wurde (vergleiche Abb. 48b, c, rote Markierungen). Die Randvertiefung betraf stets den Bereich der Bondingzone, welche häufig unter das Niveau der eigentlichen Randstufe abgetragen wurde (vergleiche Abb. 48c, d, rote Markierungen). Die Breite dieser Randvertiefungen konnte in ihrem oberen Teil einige 100 µm erreichen (Abb. 48d).

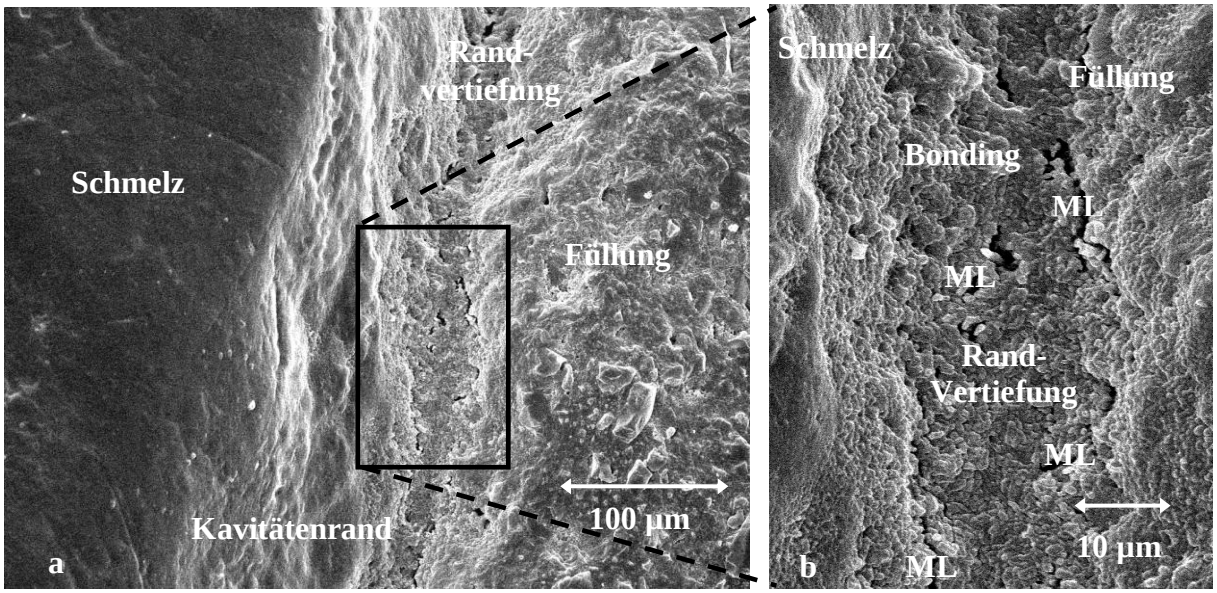


Abb. 47: Randvertiefung in der Bondingzone zum Kontrollzeitpunkt 15 Jahre, Visio-Molar X ®-Füllung, REM-Standardbild
a: negative Stufe mit Freilegung des Schmelzes am Kavitätenrand, zusätzliche Randvertiefung in der Bondingzone, mikr. Vergr. 500:1, **b:** Ausschnittvergrößerung von Bild a, Mikroleakagen (ML) in der Randvertiefung, mikr. Vergr. 1500:1

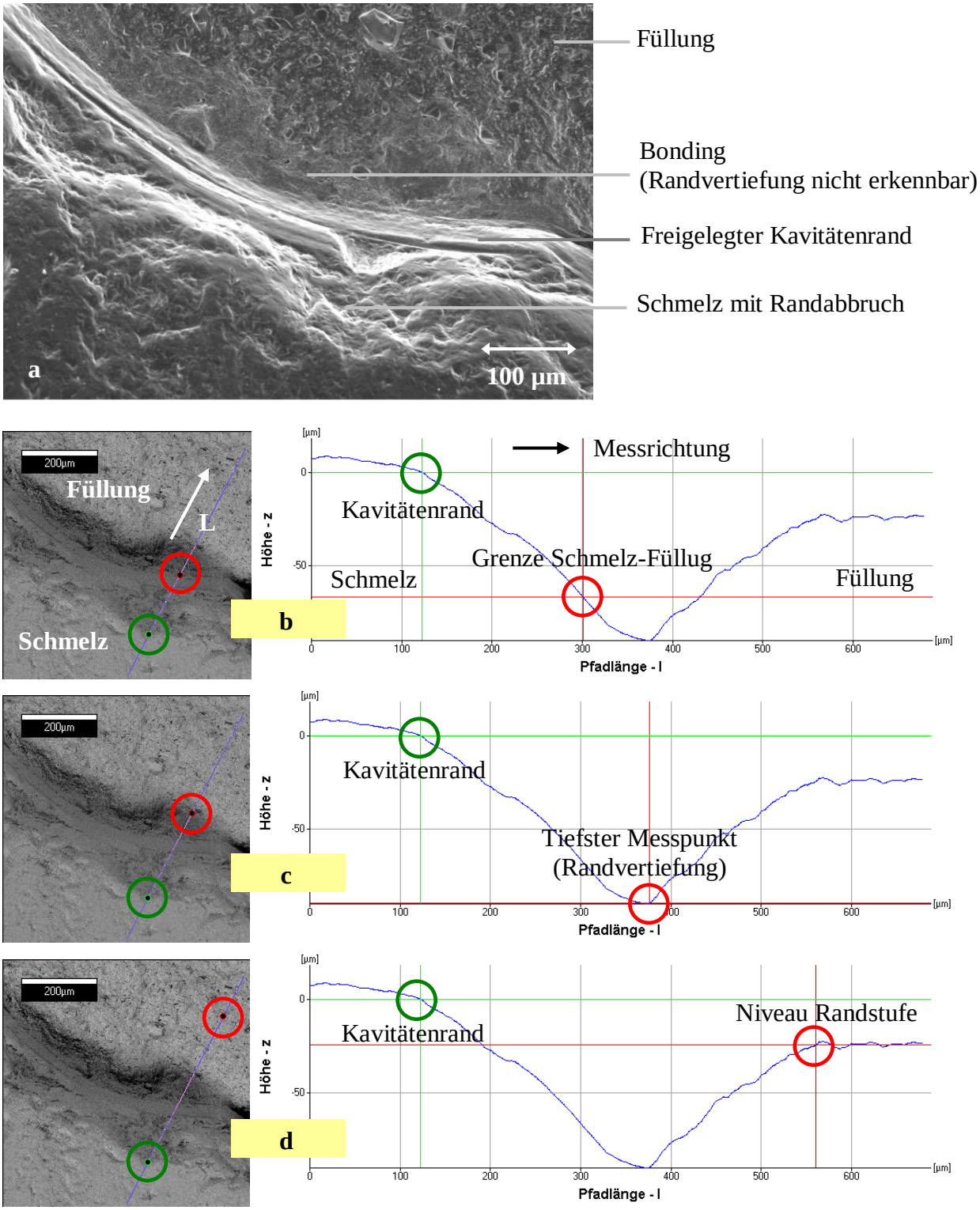


Abb. 48: Detaillierte Quantifizierung einer Randvertiefung, Kontrollzeitpunkt 15 Jahre, Visio-Molar X®-Füllung (Messbereich von Abb. 19e, f), mikr. Vergr. 150:1
a: Füllungsrand mit negativer Stufe, REM-Standardbild
b: 3D-REM: links: Texturbild mit Messlinie (L), Messrichtung (Pfeil), rechts: Höhenprofil, Messrichtung von grün zu rot (Pfeil), grüner Messpunkt: Kavitätenrand, roter Messpunkt: Schmelz-Füllungs-Grenze
c: 3D-REM: Texturbild und Höhenprofil wie Bild **b**, grüner Messpunkt: Kavitätenrand, roter Messpunkt: Füllung/ Bondingzone, tiefster Punkt der Randvertiefung
d: 3D-REM: Texturbild und Höhenprofil wie Bild **b**, grüner Messpunkt: Kavitätenrand, roter Messpunkt: Füllung, Niveau der negativen Randstufe

An 238 von den insgesamt 450 Einzelmessungen (52,9%) wurden an den Stufen des Füllungsrandes zusätzliche Randvertiefungen ermittelt (Abb. 49, dunkle Säule). Zum Kontrollzeitpunkt Baseline lagen bereits bei 24,4% der 90 Messstellen Randvertiefungen vor. Nach 1-jähriger Funktionszeit betrug dieser Anteil 55,6% und variierte in der Folgezeit zwischen diesem Wert und 67,8% (Abb. 49, helle Säulen). Im Einzelfall konnte dieselbe Randvertiefung nicht immer über die Gesamtzeit nachgewiesen werden. Die Randvertiefungen gingen vielfach um ein mehrfaches unter das Niveau der negativen Stufen des Füllungsrandes hinaus (Abb. 48, 51).

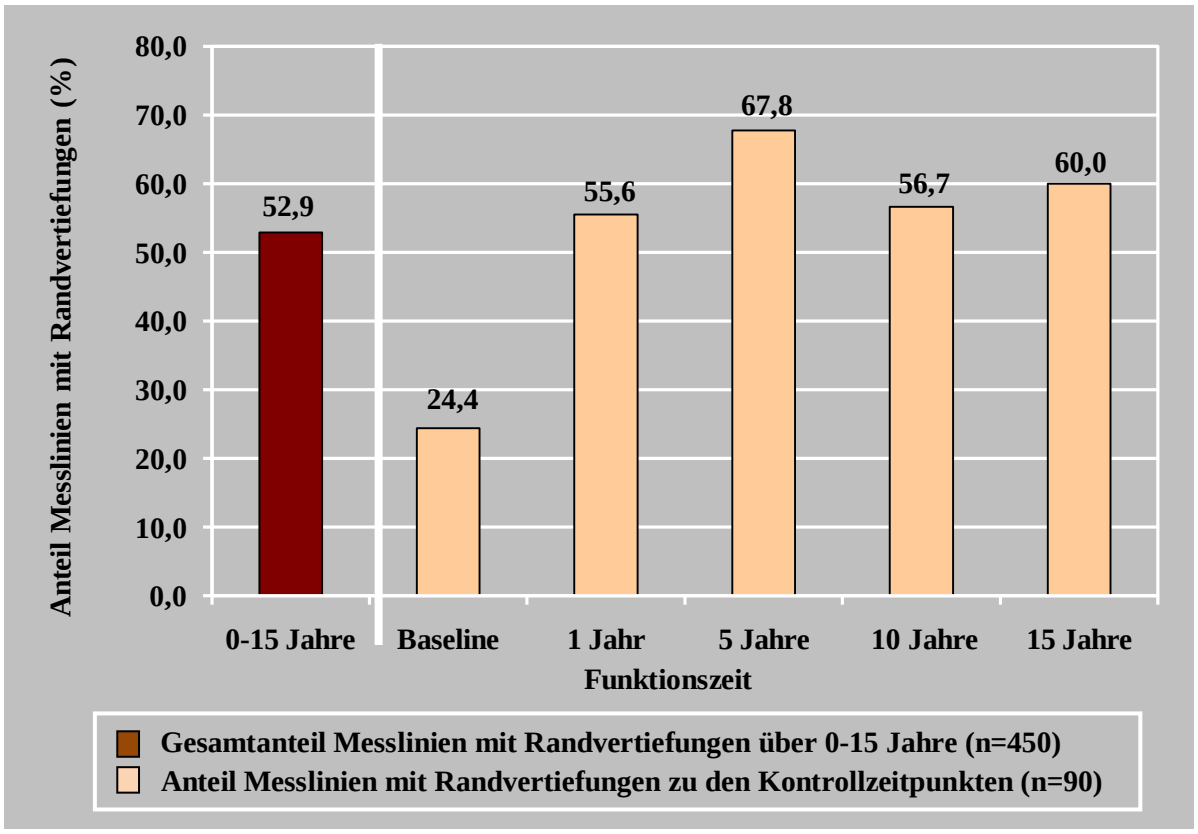


Abb. 49: Füllungsränder mit Randvertiefungen, prozentualer Anteil an allen Messungen (über 0-15 Jahre, dunkle Säule, n=450) bzw. an Messungen der Kontrollzeitpunkte Baseline bis 15 Jahre (helle Säulen, jeweils n=90), profilometrische Ergebnisse der 3D-REM von Visio-Molar X®-Füllung

Zwei Beispiele dokumentieren mit den nachfolgenden Graphiken (Mittelwerte von je drei Einzelmessungen eines Messbereiches) sehr differente Verläufe der Bildung von Randvertiefungen:

– **Beispiel 1** (Abb. 50) charakterisiert einen Randbereich, an dem **nur nach einem Jahr** eine geringe **Randvertiefung** von zusätzlich 3,9 µm (dunkelblaue Säulen, rote Markierung) ermittelt werden konnte. In der nachfolgenden Funktionszeit war nur die longitudinale Entwicklung der negativen Stufe (hellblaue Säulen) ohne zusätzliche Randvertiefung (dunkelblaue Säulen) nachweisbar. Die detaillierte Quantifizierung nach dem mit Abb. 48 demonstrierten Vorgehen zeigte, dass zu keinem Zeitpunkt der Schmelz am Kavitätenrand bis auf das Niveau der Randstufe freigelegt wurde (weiße Säulen).

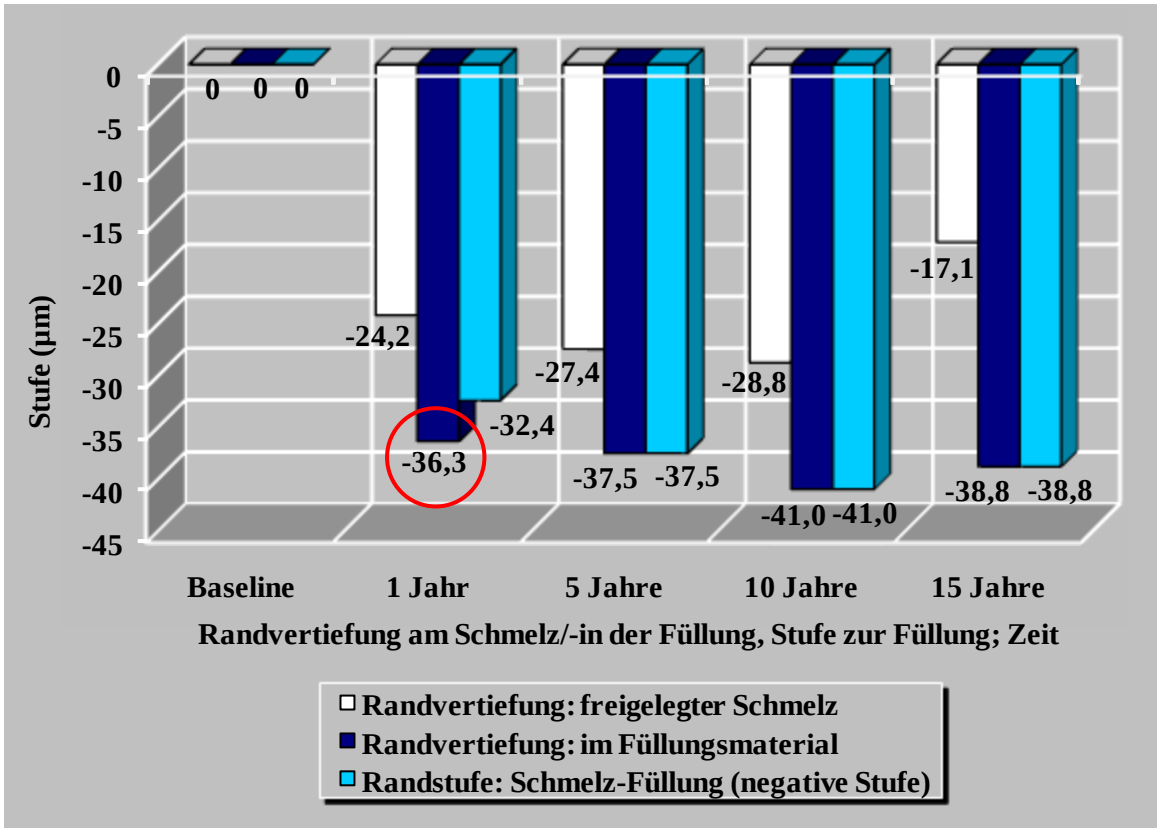


Abb. 50: Longitudinaler Verlauf einer vorübergehend (nach 1 Jahr, rote Markierung) nachweisbaren Randvertiefung, 15 Jahre Funktionszeit, Visio-Molar X ®-Füllung, 3D-REM, profilometrische Ergebnisse, Mittelwerte von je 3 Einzelmessungen eines Messbereichs an einer Füllung

– **Beispiel 2** (Abb. 51) charakterisiert einen Randbereich mit einer **stetig anwachsenden Randvertiefung** (dunkelblaue Säulen), die von einem schwachen Füllungsüberschuss von +2,6 µm zu Baseline ausging. Nach 1-jähriger Funktionszeit wurden bei -2,1 µm negativer Stufe -7,6µm Vertiefung am Füllungsrand ermittelt. Diese Randvertiefung erreichte nach 15 Jahren mit -66,5µm etwa das Dreifache der zugehörigen negativen Stufe (-20,5µm/ hellblaue Säulen). In diesem Fall wurde über die gesamte Funktionszeit der Schmelz am Kavitätenrand (weiße Säulen) nicht bis zum Boden der Randvertiefung, aber deutlich bis unter das Niveau der Randstufe freigelegt.

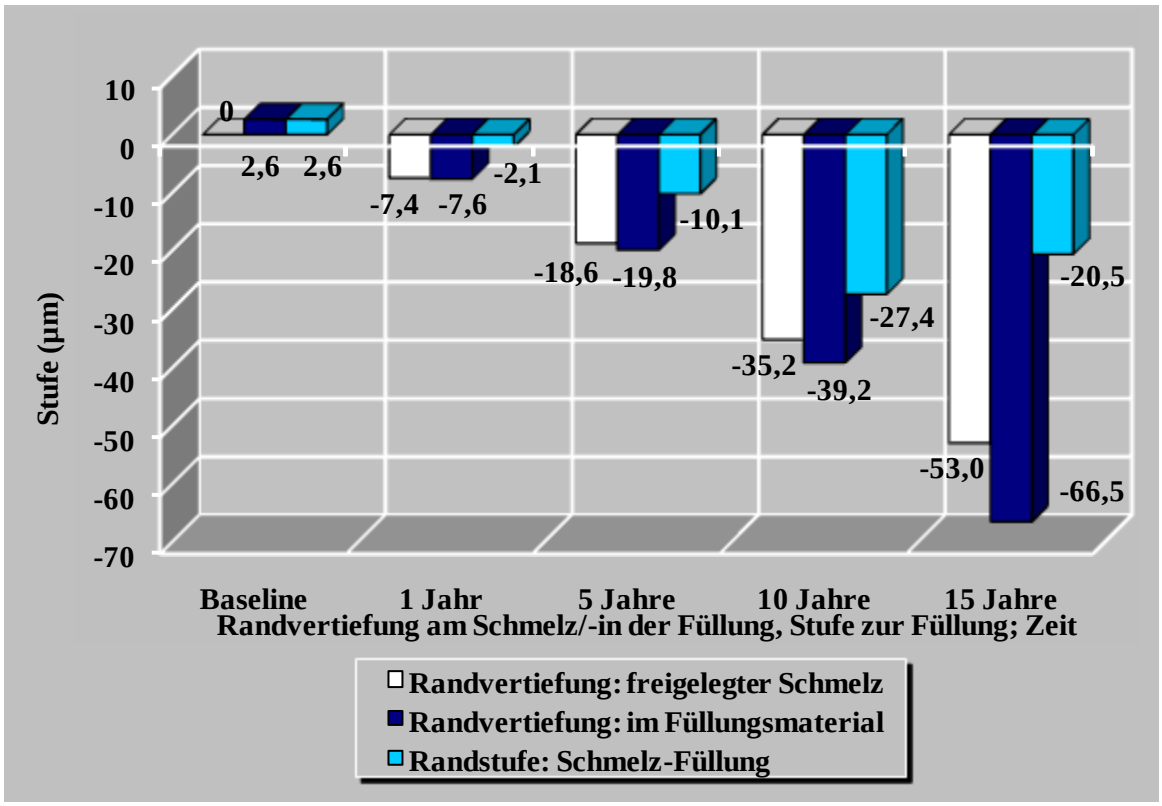


Abb. 51: Longitudinaler Verlauf einer stetig ansteigenden Randvertiefung am Füllungsrand, 15 Jahre Funktionszeit, Visio-Molar X®-Füllung, 3D-REM, profilometrische Ergebnisse, Mittelwerte von je 3 Einzelmessungen eines Messbereichs an einer Füllung

Die Mittelwerte über alle 90 Messstellen pro Kontrollzeit (Abb. 52) zeigten bereits zu Baseline eine geringe Randvertiefung (-5,5 µm/ dunkelblaue Säulen) bei einer mittleren Stufe von -2,0 µm (hellblaue Säulen). Nach 1 Jahr wurden -19,7 µm und zum Zeitpunkt 5 Jahre das Maximum von -34,5 µm als mittlere Randvertiefung errechnet, während sich die mittlere negative Stufe in diesem Zeitraum über -12,2 nur auf -25,2 µm veränderte. Für den Mittelwert der Randvertiefungen wurden bei gering rückläufiger Tendenz bis zu 10 Jahren -33,8 µm und bis zu 15 Jahren -32,2 µm errechnet. Dagegen erreichte die negative Stufe im Mittel nach 10 Jahren mit dem Maximum nur -27,2 µm bzw. -22,1 µm nach 15 Jahren. Der Schmelz (weiße Säulen) wurde, beurteilt nach den Mittelwerten aller Messungen eines Kontrollzeitpunktes, zu keiner Zeit bis auf das Niveau der Randvertiefung freigelegt. Nach einem Jahr betrug der Mittelwert für den freiliegenden Schmelz (Kavitätenrand) -15,8 µm, das Maximum wurde nach 5 Jahren mit -27,4 µm ermittelt und blieb etwa konstant (-27,1 µm) bis zu 10 Jahren. Bis zu 15 Jahren Funktionszeit verringerte sich dieser Wert geringfügig auf -24,7µm. Somit wurde nach den Mittelwerten der Kavitätenrand über die gesamte Funktionszeit nur um wenige Mikrometer unter das Niveau der negativen Stufe freigelegt, während diese Differenz an zahlreichen Einzelmessungen wesentlich größer war (Abb. 51).

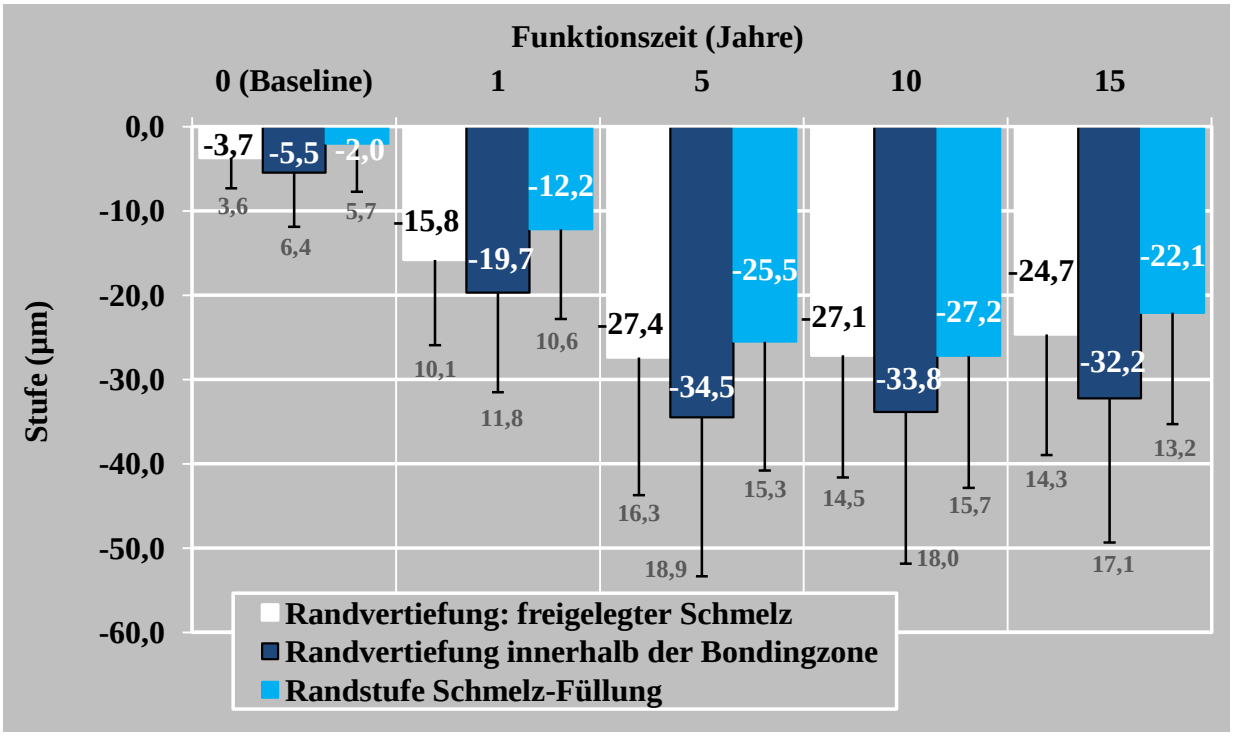


Abb. 52: Longitudinaler Verlauf der Stufenbildung am Füllungsrand über 15 Jahre Funktionszeit unter Berücksichtigung von Randvertiefungen, Visio-Molar X®-Füllung, 3D-REM, profilometrische Ergebnisse, Mittelwerte aller 90 Messungen und zugehörige Standardabweichungen pro Funktionszeit

6 Diskussion

Mit dieser mikromorphologischen Langzeitstudie wurde die Eignung von Glasionomerzement Ketac-Bond/ Hybridkomposit Visio-Molar X ®-Füllungen für den Seitenzahnbereich dokumentiert. In Ergänzung der bereits vorliegenden klinischen (bis zu 15 Jahren: Gaengler et al. 1993, 2001, 2005) und mikromorphologischen (bis zu 10 Jahren: Hoyer et al. 1993, Gaengler et al. 1994, 1995, Gäbler 2002, Gaengler et al. 2004) Untersuchungen belegen die hier vorgestellten Resultate das Erreichen eines Gleichgewichtes der Abrasion von Zahnhartsubstanz und Füllungsmaterial während der longitudinal überprüften 15-jährigen Funktionszeit. Die Verifizierung dieser Aussage wurde möglich durch die Kombination von standardmäßiger semiquantitativer Bewertung nach den mikromorphologischen (**M**-) Kriterien des **CPM**-Index mit der quantitativen Bewertung von marginalen Veränderungen mittels dreidimensionaler Rasterelektronenmikroskopie. Das, abgesehen von der vorangegangenen Pilotstudie (Dietz et al. 2005, Meineber 2008), erstmalig für die quantitative Bewertung marginaler Verhältnisse dentaler Restaurationen genutzte Verfahren erwies sich als präzisierende Ergänzung der nach dem CPM-Index ermittelten semiquantitativen Ergebnisse (Dietz et al. 2008).

6.1 Methoden

6.1.1 Füllungsapplikation

Das klinische Vorgehen zu dieser Langzeitstudie war mit der vorangegangenen 5-Jahres-Studie (Langer 1996) festgelegt. Die Füllungen sind von Zahnärzten der Poliklinik für Konservierende Zahnheilkunde der Sektion Stomatologie an der Medizinischen Hochschule Erfurt gelegt worden. Es wurden Prämolaren und Molaren mit primär kariösen Läsionen kleineren Ausmaßes (Kavitätenklassen I und II) in die Studie einbezogen. Nach retentiv-mikroretentiver Kavitätenpräparation (Krejci et al. 1987), Nutzung von Adhäsivtechnik und unter Anwendung von Kofferdam wurden Unterfüllungen mit Glasionomerzement als biokompatiblen und physikalisch gut geeigneten Dentinersatz gelegt (Hoyer et al.1989, Beer et al. 1990). Daneben konnte durch die Schichttechnik (Gängler et al. 1995) das Volumen des Kompositanteiles und folglich das Problem der Polymerisationsschrumpfung verringert werden (Mc Lean et al.1985, Gaengler et al. 1994, Giachetti et al. 2007). Als Schmelzersatz

wurde das lichthärtende, hochgefüllte Hybridkomposit Visio-Molar X ® angewendet. Dieses Material wies akzeptable Polymerisationsschrumpfung, gute mechanische Eigenschaften und angemessene Radioopazität auf (Watts und Cash 1988, Davidson und de Gee 1996).

Zu Beginn dieser Studie und bis zum heutigen Zeitpunkt wurden bzw. werden die Techniksensitivität und Behandlerabhängigkeit für Kompositfüllungen im Seitenzahnbereich als sehr hoch eingeschätzt (Baumann 1991, Frankenberger 2009, Krug 2011).

6.1.2 Methoden der Füllungsbewertung

Die Prüfung mechanischer oder thermischer Eigenschaften von Kompositfüllungen erfolgt sowohl durch maschinelle Belastung als auch durch in vitro-Studien. Klinisches Verhalten und Langlebigkeit von Materialien und Applikationen wurden und werden aber immer zusätzlich in klinisch kontrollierten Studien bewertet (Collins et al.1998, van Dijken und Pallesen 2011), was seit über 20 Jahren als unverzichtbar gilt (Roulet 1987, Hickel et al 2007). Die klinische Sicherheit wird in longitudinalen (Wilson et al. 1988, Krämer et al. 2011) oder cross-sectionalen Studien (Jokstad et al. 1994, Opdam et al. 2007) geprüft und zusammenfassende Metaanalysen (Manhart et al. 2004, Corbo et al. 2009, Pflaum 2009¸ Soares und Cavalheiro 2010) erlauben übersichtliche Vergleiche unterschiedlicher Materialien und Applikationen.

Darüber hinaus wird die ergänzende semiquantitative rasterelektronenmikroskopische Bewertung als erforderliche Optimierung und Objektivierung der eher subjektiven klinischen Ergebnisse angesehen (Hoyer et al. 1989, Baillod et al. 1994, Gängler et al. 1995).

Im Rahmen dieser Studie konnte die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung mit dem Standardmodus der Sekundärelektronen-Bilderzeugung durch die Bilderzeugung mit einem 4-Quadranten-Rückstreuelektronen-Detektor und nachfolgende topographische Bildverarbeitung ergänzt und optimiert werden (Dietz et al. 2008). Dabei ermöglichen messbare Höhendifferenzen von 0,1 µm eine quantitative Bewertung von Randverhalten und Materialverlust besser als oder ähnlich wie bei mechanischen (Kunzelmann et al. 1993a, Ozel et al. 2008) oder modernen optischen Prüfverfahren (Teufel et al. 1995, Rominu et al. 2009, Rodriguez et al. 2012) und erlauben gleichzeitig deren Zuordnung zu den mikromorphologischen Strukturen.

6.1.2.1 Methoden der klinischen Bewertung

Mit den klinisch orientierten **USPHS** (**U.S. P**ublic **H**ealth **S**ervice, San Francisco) **Kriterien** (Cvar und Ryge 1971) war eine reproduzierbare Basis zur Bewertung von dentalen Füllungen erstellt worden, die bis in die jüngste Zeit genutzt wird (Lindberg et al. 2007). Diese Bewertung berücksichtigt die Kriterien „**Farbanpassung**“, „**Randadaption**“, „**Anatomische Form**“, „**Randverfärbung**“ und „**Sekundärkaries“**, wobei zwischen „sehr gut“ (Alpha), „klinisch akzeptabel“ (Bravo), „präventivem Austausch“ (Charlie) und „sofortiger Interventionsindikation“ (Delta) unterschieden wird. Dieses Verfahren ermöglicht eine Entscheidung über die klinische Akzeptanz einer Füllung, ist aber, auch nach späteren Verbesserungen (Ryge 1980), wegen der undifferenzierten Information zum Ausmaß von Veränderungen nicht gut geeignet für eine exakte langzeitige Kontrolle der Füllungen (Gäbler 2002).

Eine zumindest teilweise quantitative Bewertung und damit bessere longitudinale Beurteilung ermöglicht die Anwendung des **CPM**-Index (**C**linical-**P**hotographical-**M**icromorphological-Coding) (Hoyer et al. 1988, Langer 1996, Gäbler 2001). Dieses hier verwendete Bewertungssystem wurde eingeführt, um Hybridkomposit-Füllungen umfassender und präziser beurteilen zu können und hat sich seit über 20 Jahren ebenso bei der Evaluierung von Amalgamfüllungen (Kosa et al. 1991, Bergmann 2007), wie von Goldhämmerfüllungen (Kamann et al. 1997a, b, Kamann 2000) oder atraumatisch restaurativen Behandlungen (ART) unter „Feldbedingungen“ in Westafrika (Jordan et al 2010, 2011) bewährt. Die klinischen Kriterien ergänzen die ursprünglichen, oben genannten USPHS-Kriterien durch die Bewertung von „**Oberflächenqualität**“, „**Abrasion**“, „**Stufenbildung**“, „**Verfärbung des Füllungsrandes**“ und „**klinischer Akzeptanz**“ der Füllungen, wobei eine teilweise Quantifizierung durch Vergleich von perfekten und veränderten Randanteilen ermöglicht wird. Schließlich werden die klinischen Befunde durch eine photographische Dokumentation mit vergleichbaren Kriterien ergänzt.

Eine jüngere Empfehlung zur Ausführung klinisch kontrollierter Studien an restaurativen Materialien ist ebenfalls als eine umfangreiche Präzisierung der Arbeit mit den USPHS-Kriterien anzusehen (Hickel et al. 2007). Neben der grundsätzlichen Forderung nach Kompatibilität aller derartigen Untersuchungen wurden umfangreiche und detaillierte Richtlinien erstellt und longitudinale Prüfungen über mindestens 3 Jahre oder länger (für direkte Kompositrestaurationen) gefordert. Die Autoren verwiesen ebenfalls auf die Möglichkeit der (quantitativ) ergänzenden Bewertung von marginaler Integrität durch Kombination klinischer und mikromorphologischer Kontrollen (Noack et al. 1995, Gaengler et al 2004).

6.1.2.2 Methode der semiquantitativen mikromorphologischen Bewertung

Gegenüber den rein klinisch-funktional orientierten **USPHS-Kriterien** ist der wesentliche Vorteil des **CPM-Index**, dass die klinische Bewertung durch eine mikroskopische Beurteilung eine wertvolle Ergänzung erfährt (Hoyer et.al. 1989).

Dabei wird zu allen Kriterien zwischen perfektem Zustand oder Veränderungen bzw. Schädigungen auf maximal 1/3, bis zu 2/3 oder über 2/3 der gesamten Oberfläche bzw. Randlänge unterschieden (Codierung „0“ bis „3“). Damit wird eine hinreichend aussagefähige quantitative Bewertung der Füllungen möglich. Darüber hinaus können über lange Zeiträume vergleichbare Daten erhoben werden, die eine longitudinale Beurteilung der Füllungen und ihres Funktionszustandes zulassen. Mit den Kriterien „**Oberflächenrauigkeit**“ und „**Oberflächentextur**“ werden materialbedingte Eigenschaften wie die Polierbarkeit charakterisiert und der herstellungsbedingte Zustand der Oberfläche sowie dessen nutzungsbedingte Veränderungen beurteilt. Der Bedeutung der marginalen Integrität von Füllungen über deren Funktionszeit Rechnung tragend, werden die zugehörigen Parameter mit dem CPM-Index über sechs mikromorphologische Kriterien bewertet: „**Randschluss**“, „**Füllungsüberschüsse**“, „**Randabbrüche**“, „**Negative Stufenbildung**“, „**Mikroleakagen und Randspalten**“ und „**Weitere Randimperfektionen**“ werden nach dem Anteil ihres Auftretens im Verhältnis zum gesamten Füllungsrand nach der oben beschriebenen Drittelung und der zugehörigen Codierung 0 – 3 eingeordnet. Die Zuordnung der Codierung wird vom Untersucher an den Replikaten der restaurierten Zähne durch Begutachtung im Rasterelektronenmikroskop vorgenommen und kann bei longitudinalen Studien mittels wiederholter Anfertigung von Replikaten bei definierten Zeitabständen beliebig oft durchgeführt werden. Diese individuelle mikroskopische Bewertung nach dem Prinzip der Drittelung ermöglicht bei akzeptablem Arbeitsaufwand und im Zusammenwirken mit der klinischen Bewertung eine gute Beurteilung einer großen Zahl von Füllungen über eine langjährige Kontrollzeit (Gäbler 2002). Dieses Bewertungssystem wurde für die vorangegangenen 5- und 10-Jahres-Studien und folglich auch für diese fortführende 15-Jahres-Studie gewählt.

Nach ähnlichen Kriterien wird die Qualität von Füllungen mit dem von Blunck (1988) und Roulet et al. (1989) aufgestellten System bewertet. In neuerer Zeit werden häufig umfangreiche rasterelektronenmikroskopische Bildserien vom gesamten (darstellbaren) Füllungsrand angefertigt und dann einer computergestützten Bewertung nach diesen oder ähnlichen Kriterien und Codierungen zugeführt (Albrecht 2003, Thum 2004, Fasold 2006, Müller 2006, Große 2009, Zentgraf 2009).

Den hier genannten Varianten der mikromorphologischen Bewertung bleibt gemeinsam, dass die Zuordnung von Randabschnitten der Füllungen zu den gewählten Kriterien und Codierungen durch den Untersucher, also individuell, am (gegebenenfalls digitalisierten) mikroskopischen Bild erfolgt und danach eine Quantifizierung mit geeigneten Rechenprogrammen durchgeführt wird. Folglich wird hier von semiquantitativen Verfahren gesprochen (Gäbler 2002).

Die individuellen Arbeitsweisen der Untersucher am Rasterelektronenmikroskop können zu abweichenden Beurteilungen der marginalen Integrität führen (Kostka 1996, Bunte 2001, Stoll et al. 2007, Dietz et al. 2008, 2009). Unterschiedlich gewählte Kontrastverhältnisse im Mikroskop oder unterschiedliche Betrachtungswinkel bei zeitlich aufeinanderfolgenden Replikaten des gleichen Objektes werden z.B. als Ursachen für streuende Bewertung der Randverhältnisse genannt (Steinbrenner et al. 1995, Dietz et al. 2005). Um derartige Abweichungen zu minimieren, erfolgt auch bei jüngeren Studien eine ausführliche Einweisung der Untersucher durch einen erfahrenen Mikroskopiker (Große 2009) und/ oder alle Bewertungen einer Studie werden von nur einem (eingewiesenen) Untersucher durchgeführt (Stoll et al. 2007).

Der individuelle Einfluss auf die Bewertung der Randverhältnisse wurde im Rahmen dieser Arbeit durch den Vergleich der vorangegangenen 5-, 10- und dieser 15-Jahres-Studie an den Visio-Molar X ® -Füllungen überprüft. Die Replikate von Baseline bis zur 5-Jahres-Kontrolle wurden in allen drei Studien separat und damit von drei verschiedenen Untersuchern beurteilt. In dieser Voruntersuchung wurden die Resultate des wesentlichen Kriteriums „Negative Stufenbildung“ verglichen: Nach 5 Jahren Funktionszeit wurde der Anteil von Füllungen mit „negativen Stufen“ an mehr als 2/3 des Füllungsrandes (Code 3) vom ersten Untersucher (5-Jahres-Studie) mit 58% ermittelt, vom zweiten Untersucher (10-Jahres-Studie) mit 85 % und in dieser Arbeit (15-Jahres-Studie, dritter Untersucher) mit 70% bewertet. Als gemeinsames Ergebnis dieser unterschiedlich „strengen Codierungen“ bleibt der Nachweis des stetigen Anstieges der Randanteile mit negativen Stufen über eine Funktionszeit von 5 Jahren und damit auch die Feststellung, dass die M-Kriterien des CPM-Index für die mittelfristige Bewertungen von Kompositfüllungen geeignet sind.

Wie bereits vom Untersucher der vorangegangenen10-Jahres-Studie (Gäbler 2002) gefordert wurde, war für diese Arbeit ein Bewertungsverfahren einzusetzen, dass die bei längerfristigen Untersuchungen schwächer werdende Dynamik der Randveränderungen objektiver beschreiben konnte. Dazu bot die über Jahrzehnte zur Bewertung dentaler

Füllungen genutzte Rasterelektronenmikroskopie in den letzten Jahren das unten diskutierte System mit dreidimensionaler Abbildung und profilometrischer Vermessung an.

6.1.2.3 Quantitative Bewertungsmethoden einschließlich der Bewertung mittels dreidimensionaler Rasterelektronenmikroskopie

Die nachfolgend diskutierten Methoden können - ohne Anspruch auf Vollständigkeit - mit Unterschieden bezüglich Arbeitsaufwand und Aussagefähigkeit zur erweiterten quantitativen Bewertung von Oberflächen- und Randverhältnissen dentaler Restaurationen genutzt werden:

Die **Farbstoffpenetration** wird als gute Ergänzung zur Mikromorphologie angesehen, da sie durch definiertes Abtragen oder an Querschnitten des Zahnes sensibel und in die Tiefe Spalten verfolgen kann und diesbezüglich der Rasterelektronenmikroskopie überlegen ist (Kostka 1996, Thum 2004). Die erforderliche Probenaufbereitung führt jedoch zu einer Zerstörung des Objektes und ist damit für Langzeituntersuchungen an ein und derselben Probe, also auch für longitudinale in vivo-Studien, ungeeignet.

Bei den nachfolgend diskutierten Verfahren erlaubt der Einsatz von Replikaten die zeitlich aufeinander folgende in vivo-Überprüfungen eines Objektes einschließlich einer dreidimensionalen Darstellung und morphometrischer Bewertung:

Die klassische **Lichtmikroskopie** vom Stereomikroskop oder Auflichtmikroskop (Rudolph 2006) bis zur **digitalen Mikroskopie** (Iwami et al. 2005) wird bevorzugt für die Beurteilung von Randspalten an Kronenrändern bei einer Breite von etwa 2 – 100 µm eingesetzt, wird aber auch für die Bewertung von Füllungsrändern genutzt. Geringe Schärfentiefe und daneben das schlechtere Auflösungsvermögen des Lichtmikroskops bleiben Nachteile gegenüber der Arbeit mit dem Rasterelektronenmikroskop. Mikroleakagen oder beginnende Stufen mit Ausdehnungen um 1 µm sind ebenso schwer darstellbar wie sehr große Stufenhöhen.

Profilometrische Verfahren aus der industriellen Praxis haben vielfach Anwendung in der zahnmedizinischen Werkstoffkunde gefunden. Sie ermöglichen bei Füllungen die quantitative Bewertung von Oberflächenparametern, aber auch die des Füllungsrandes oder des funktionsbedingten Materialverlustes.

Das hierbei bis in jüngere Zeit verwendete bewährte Tastschnittverfahren lässt mit den **mechanischen Mikrotastern** (Ozel et 2008) vertikale Auflösungen von wenigen Mikrometern zu (Kunzelmann et al. 1993a, Hornung 2005). Dabei ist die relativ langsame

mechanische Abtastung zeitaufwändiger als die nachfolgend diskutierten optischen Verfahren. Für die Dentaltechnik entwickelte **3D-Lasertaster** ermöglichen eine schnellere und berührungsfreie Vermessung von Kompositoberflächen, bleiben aber mit einer praktikablen Scangenauigkeit von +/-10 µm (Angele 2009) der Rasterelektronenmikroskopie unterlegen.

Die **optische Profilometrie** erreicht unter Anwendung der konfokalen Mikroskopie 0,5 µm vertikale Auflösung (Rominu et al. 2009), mit dem 3D-Laserscanner 5 -10 µm vertikale Auflösung (Teuffel et al. 2005, Sinseder 2009), und damit nicht die Genauigkeit der hier eingesetzten REM mit 4Q-RE-Detektor. Sinseder diskutiert sogar eine intraorale Vermessung von Restaurationen mittels Mundkamera mit einer Messgenauigkeit von 20-30 µm.

Die mögliche bessere vertikale Auflösung (ca. 1 nm) der optischen Profilometrie mittels **interferrometrischer Technik** wäre einerseits gerätetechnisch sehr kostenaufwändig und andererseits an möglicherweise über 100 µm hohen Stufen des Füllungsrandes kaum einsetzbar und letztendlich zur Charakterisierung der marginalen Integrität nicht erforderlich. Mit der **optischen Kohärenztomographie** wird in der Praxis bei der Bewertung des Materialverlustes von Füllungen eine vertikale Auflösung von 1 µm erreicht (Rominu et al. 2009). Auch hier wird eine intraorale Vermessung von Randspalten angestrebt, wobei 10 µm Auflösung erwartet werden (De Melo et al. 2005).

Im Vergleich der genannten Untersuchungs- und Messverfahren bleibt die über Jahrzehnte bewährte **Rasterelektronenmikroskopie** für die Bewertung von Zahnfüllungen, insbesondere ihres marginalen Zustandes, ein praktikables und wertvolles Hilfsmittel. Alleine die Feststellung, dass eine Randspaltbreite erst von über 10-20 µm mit der Sonde diagnostizierbar wird (Rehberg 1971), begründet die Notwendigkeit mikromorphologischer Untersuchungen! Die für die REM ebenfalls etablierte Replikatechnik lässt bei der Arbeit mit dem Sekundärelektronen-Standardmodus im REM und unter Anwendung von Übersichts- bis zu 10.000-fachen Vergrößerungen (Dietz et al. 2004) die Detaildarstellung aller relevanten Rand- und Oberflächenstrukturen zu, wobei für mikromorphologische Studien bei üblicherweise 200-facher Vergrößerung (Blunck 1988, Hoyer et al. 1988, Zentgraf 2009, Spörlein 2010) die gute Schärfentiefe des REM genutzt wird.

Mit dieser Arbeit und der vorbereitenden Pilotstudie (Dietz et al 2005, Meineber 2008) erfolgte erstmalig die quantitative Bewertung von marginaler Integrität und Materialverlust mit Hilfe **dreidimensionaler Rasterelektronenmikroskopie**. Mit einer der Stereomikroskopie vergleichbaren Bilderzeugung mittels eines 4Q-RE-Detektors (Point electronic, Halle/ Deutschland) im REM und nachfolgender topographischer Bildauswertung (Mex 4.1-Software, Alicona Imaging, Grambach/ Österreich) wurden die Berechnung von digitalen

Oberflächenmodellen, Stereobildern und profilometrische Vermessungen möglich. Das seit einigen Jahren für topographische Untersuchungen zur Verfügung stehende Verfahren erlaubte mit der genannten technischen Ausrüstung am Elektronenmikroskop REM 515 (Philips, Eindhoven/ Niederlande) praktikable Vergrößerungen bis zu 6.000-fach und über die Berechnung von Höhenprofilen die reproduzierbare Vermessung von Stufenhöhen bis zu weniger als 0,1 µm. Für die quantitative Bewertung der für Kompositfüllungen typischen Randverhältnisse war erfahrungsgemäß eine 200-fache Vergrößerung ausreichend.

Die Anwendung dieser mikroskopischen Technik wird durch folgende Einschränkungen begrenzt:

- Verfahrensbedingt muss die zu bewertende Objektstelle etwa senkrecht zum mikroskopischen Strahlengang liegen, wodurch trotz räumlicher Beweglichkeit des mikroskopischen Objekttisches nicht alle Bereiche des Füllungsrandes erreichbar sind.
- Daneben bleibt der Nachteil der oberflächenabbildenden Mikroskopie, dass Randspalten nicht beliebig in die Tiefe verfolgt werden können.
- Wie für alle Langzeitstudien unter Verwendung von Replikaten bestehen die Forderungen,
  - dass alle zeitlich aufeinander folgenden Abdrucke einer Füllung unter gleichen geometrischen Bedingungen erstellt werden,
  - dass die zu vermessenden Objektbereiche - auch nach stärkerer Abrasion - auf allen zwischen Baseline und 15 Jahren erstellten Replikaten wiedergefunden werden
  - und letztendlich immer artefaktfrei vorliegen.
- Schließlich begrenzt der erhöhte Arbeitsaufwand für Bilderzeugung und -Auswertung die Anzahl der Messlinien, womit bei größeren Probenzahlen die lückenlose morphometrische Bewertung des gesamten (abbildbaren) Füllungsrandes unrealistisch wird.

Der Vorteil dieses Verfahrens besteht in einer gegenüber der konventionellen REM verbesserten Erkennbarkeit von Strukturen am Füllungsrand und deren quantitativer Bewertung bis in die Größenordnung von weniger als 0,1 µm. Damit kann die oben diskutierte individuelle Bewertungsunsicherheit der semiquantitativen REM zumindest für die wesentlichen Kriterien „Negative Stufenbildung“ und „Füllungsüberschuss“ gemindert werden und es wird eine Quantifizierung des randnahen Materialverlustes möglich.

6.2 Ergebnisse

Die 15-jährige mikromorphologische Langzeitstudie des Hybridkomposites Visio-Molar X ® zeigte im ersten Jahr funktionsbedingte Veränderungen größeren Ausmaßes, die sich bis zu 5 Jahren Funktionszeit weiter verstärkten. Das betraf sowohl das Oberflächen- als auch das Randverhalten der Füllungen. Die abrasionsabhängigen Qualitätsänderungen stabilisierten sich nach etwa 10 jähriger Funktionszeit. Die negative Stufenbildung war zwischen 10 und 15 Jahren in vielen Fällen geringfügig rückläufig. Mit der mikroskopischen Profilometrie konnten Stufenhöhen und Materialverlust am Füllungsrand vermessen werden. Damit wurden auch Randvertiefungen im Bereich der Bondingzone nachgewiesen und quantifiziert. Diese Randvertiefungen unterschritten häufig die Tiefe der negativen Stufen und waren bei aufmerksamer Beobachtung teilweise auch im REM-Standardmodus erkennbar.

6.2.1 Semiquantitative mikromorphologische Ergebnisse

Einfache Kriterien wie z.B. „Perfekter Rand“, „Randspalt“, und „Überschuss“ bei manueller Zuordnung zum mikroskopischen Bild und nachfolgende computergestützte Bewertung genügten, um z.B. nach 1-jähriger Funktionszeit mit einer „Momentaufnahme“ die Randschlussqualität direkter Hybidkomposit- und Ormocerfüllungen zu vergleichen (Müller 2006). Wenige in vivo-Untersuchungen (Roulet et al 1991) und eine Vielzahl materialkundlicher in vitro-Studien (z.B.: Blunck 1988, Airoldi et al.1992, Dietrich et al. 2000, Frankenberger et al. 2003, Haberkorn 2007, Zentgraf 2009) nutzten solche relativ einfachen semiquantitativ mikromorphologischen Bewertungen für die Charakterisierung von dentalen Restaurationen.

Für die Darstellung der Dynamik des longitudinalen Oberflächen- und Randverhaltens über mehrjährige Funktionszeiten ist eine sensiblere Bewertung erforderlich, wie sie mit den acht M- (mikromorphologischen) Kriterien des CPM-Index und der zugehörigen semiquantitativen Codierung zur Verfügung steht (Hoyer et al. 1988). Das System erlaubte mit dieser Arbeit in Fortsetzung der 10-Jahres-Studie (Gäbler 2002) eine klare Differenzierung der zuvor ermittelten klinischen 15-Jahres-Resultate (Gaengler et al. 2005):

Die **Oberflächenrauigkeit** des Hybridkomposites Visio-Molar X ® wurde unmittelbar nach Applikation der Füllungen (Baseline) als hoch eingestuft (59% Code 3), verschlechterte sich weiter bis zu 5 Jahren Funktionszeit (84% Code 3) und blieb dann etwa konstant. Ursache ist der hohe Füllstoffanteil (Gaengler et al. 2004) und insbesondere die

abrasionsbedingte Freilegung von Makrofüllern (gemessen bis 70 µm), die nach 5 Jahren ein Gleichgewicht erreicht. Der bereits raue Anfangszustand bedingt die schlechte Polierbarkeit dieser Füllungen (Setcos et al. 1996).

Der **Oberflächentextur** zugeordnete Inhomogenitäten (Poren, Kratzer, lokale Destruktionen durch Antagonistenkontakt) lagen zur Basisuntersuchung nicht vor (100% Code 0), entwickelten sich aber bis zu 5 Jahren (49% Code 0, 51% Code 1 und 2) und blieben in der Folgezeit ebenfalls etwa konstant. Die Oberflächenbeschaffenheit und ihre longitudinalen Veränderungen beeinflussen nicht die Überlebenserwartung der Restaurationen.

Der **Randschluss** als umfassende Charakterisierung des Füllungsrandes und die nachfolgend diskutierten Kriterien zur marginalen Integrität sind von großer Bedeutung für das Risiko von Sekundärkaries, Pulpairritationen und letztendlich Füllungsverlust (Roulet 1994a, Hickel und Manhart 2001, Gaengler et al. 2004, Thum 2004, Soares und Cavalheiro 2010). Unmittelbar nach Applikation der Füllungen konnte der Randschluss in keinem Fall als vollständig perfekt klassifiziert werden (0% Code 0, bereits 11% Code 3). Eine deutliche Verringerung perfekter Randanteile trat bereits im ersten Jahr ein (Code 3 von 11 auf 33% der Füllungen). Dieser Befund verschlechterte sich bis zu 5 Jahren weiter (70% Code 3) und blieb danach annähernd konstant.

Die **Füllungsüberschüsse** sind wegen der gewünschten Gleichfarbigkeit von Füllungsmaterial und Schmelz eine Folge der erschwerten Applikation zahnfarbener Materialien, so dass zu Baseline alle Restaurationen damit belastet waren (0% Code 0). Da diese Überschüsse funktionsbedingt abradiert werden, verbesserte sich dieser Zustand kontinuierlich bis zu 10 Jahren (59% Code 0) und danach geringfügig weiter bis zum Untersuchungsende. Die unten diskutierte Vermessung der Höhenprofile belegt deutlich die ab 1 Jahr Funktionszeit einsetzende Entwicklung von den relativ unproblematischen Füllungsüberschüssen, gelegentlich über Randabbrüche, zu den die marginale Integrität schwerwiegender belastenden negativen Stufen. Auch Füllungen mit neueren Materialien wie Nanohybridkomposit zeigen über mehrjährige Funktionszeit die gleiche Dynamik von umfangreichem Füllungsüberschuss zu negativer Stufenbildung ab 1 Jahr (Krämer et al. 2011).

Randabbrüche wurden zu Untersuchungsbeginn nicht nachgewiesen (100% Code 0), traten dann nur bei geringem Anteil von der Randlänge (Code 1) bis zu 1 Jahr an 19% und bis zu 15 Jahren an 32% der Füllungen auf. Die hier unauffälligen Randabbrüche werden neben den Füllungsfrakturen gelegentlich bei den Ursachen für Versagen von Kompositfüllungen genannt (Hickel und Manhart 2001, Guelmann et al. 2002).

Die **negative Stufenbildung** ist durch Freilegen der Zahnhartsubstanz, in abgeminderter Form vergleichbar mit dem Randspalt (Roulet und Noak 1991a, Beer 1992), eine mögliche Ursache für Füllungsrandkaries. Bereits nach Applikation wies beinahe die Hälfte aller Restaurationen negative Stufen auf (30% Code 1, 13% Code 2) und nach 1 Jahr waren nahezu alle damit belastet (22% Code 1, 38% Code 2, 32% Code 3). Bis zu 5 Jahren vergrößerten sich die geschädigten Randanteile deutlich (nur noch 3% Code 1, 27% Code 2, aber 70% Code 3). Von 5 bis zu 10 Jahren Funktionszeit blieb dieser Befund nahezu stabil und besserte sich in einigen Fällen geringfügig bis zu 15 Jahren (jetzt 5% Code 1, 30% Code 2, nur 65% Code 3). Die Stabilisierung des Anteils negativer Stufen wird in der nachfolgenden Bewertung der profilometrischen Resultate bestätigt und diskutiert.

In die Tiefe gehende **Randspalten** wurden zu keinem Zeitpunkt dieser Untersuchung gefunden (0% Code 3). Dieser positive Befund ist auch auf die Schichttechnik mittels Polymerisationsschrumpfung mindernder Glasionomerzement-Unterfüllung zurückzuführen (Gängler et al 1995, Giachetti et al. 2007). Wenige relativ unproblematische, nicht in die Tiefe reichende **Mikroleakagen** wurden zu Baseline ermittelt (2% Code 1). Nach 1 Jahr war dieser Anteil deutlich höher (43% Code 1 und 2) und blieb dann bis zu 15 Jahren nahezu konstant. Mit der funktionsbedingten Abrasion und wegen ihrer geringen Tiefe wurden Mikroleakagen fortlaufend eröffnet und dann komplett abgetragen, so dass sich ihr Anteil über die weitere Kontrollzeit praktisch nicht mehr veränderte.

Unter dem Begriff „**Weitere Randimperfektionen**“ zusammengefasste Füllungsrand- und Schmelzabbrüche traten nur an drei der 37 untersuchten Füllungen nach 10- oder 15-jähriger Funktionszeit auf und können vernachlässigt werden.

Der Vergleich der Ergebnisse der semiquantitativen Untersuchungen der vorangegangenen 5- und 10-Jahres-Studien (Hoyer et al.1993, Langer 1996, Dietz et al. 1998, Gäbler 2002, Gaengler et al. 2004) sowie diese 15-Jahres-Untersuchung dokumentierten übereinstimmend die deutliche Zunahme qualitätsmindernder Veränderungen im ersten Jahr und weiter bis zu 5 Jahren. Der Trend der Qualitätsminderungen von 5 bis zu 10 Jahren wurde ebenfalls von den 10- und 15-Jahres-Studien gleich bewertet. Die neuen Resultate zwischen 10 und 15 Jahren Funktionszeit wiesen auf eine Stabilisierung der marginalen Verhältnisse.

Es wurde bestätigt, dass unter Anwendung des CPM-Index trotz der diskutierten Probleme der individuellen Beeinflussung der Ergebnisse die klinische Beurteilung dentaler Füllungen mit der semiquantitativen mikromorphopologischen Bewertung eine zuverlässige und präzisierende Ergänzung erfährt.

6.2.2 Quantitative mikromorphologische Ergebnisse

Die quantitative Bewertung mittels 3D-REM ergänzte die nach dem etablierten CPM-Index erstellten Befunde der 5-, 10- und 15-Jahres-Studien mit der topographischen Vermessung der Füllungsränder. Die Mittelwerte über 3 Messbereiche (9 Messlinien) pro Füllung und alle 10 vermessenen Füllungen bestätigten einerseits sehr gut die Ergebnisse der M-Kriterien des CPM-Index zur Dynamik von Füllungsüberschuss und negativer Stufenbildung und erbrachten darüber hinaus weiterführende quantitative Erkenntnisse zu Stufenhöhen bzw. -tiefen, zum Stufenverlauf und dem randnahen Materialverlust.

Zu Baseline wurde im Mittelwert eine negative Stufe mit -2,0 µm errechnet. Nach 1 Jahr war dieser Wert auf -12,2 µm angewachsen und verdoppelte sich bis zu 5 Jahren auf -25,5 µm. Bis zu 10 Jahren wuchsen die negativen Stufen im Mittel nur noch mäßig auf -27,2 µm und verringerten sich bis zu 15 Jahren auf -22,1 µm. Die statistische Analyse wies signifikante Differenzen zwischen Baseline und 1 Jahr ($p=0,006$) sowie 1 und 5 Jahren ($p<0,001$) aus, wogegen die leichten Veränderungen zwischen 5 und 10 bzw. 10 und 15 Jahren nicht signifikant waren. Diese quantitativen Aussagen präzisierten die semiquantitativen Ergebnisse dieser Untersuchung und der vorangegangenen mikromorphologischen 10-Jahres-Studie (Gaengler et al. 2004), wonach in den ersten 5 Jahren der Funktionszeit die schwersten Veränderungen auftraten. Die Stabilisierung bzw. der schwache Rückgang der Stufenhöhen ab 5 bzw. 10 Funktionsjahren stand in sehr guter Übereinstimmung mit den Resultaten zum M-Kriterium „negative Stufenbildung“, wonach der Anteil von Füllungen mit negativen Stufen auf mehr als 2/3 des gesamten Füllungsrandes (Code 3) nach 5 und 10 Jahren konstant 70%, nach 15 Jahren aber nur noch 65% betrug. Diese Dynamik ist mit einem langfristigen Angleichen der Abrasion von Füllungsmaterial und Schmelz, zumindest in Randnähe, zu erklären. Dieser Effekt weist für das Visio-Molar X ® einerseits auf die bereits 1987 diskutierten gut an den Schmelz angepassten mechanischen Eigenschaften von Hybridkompositen (Braem et al. 1987) hin und ist andererseits auf verringerte mechanische Belastung des Füllungsmaterials „im Schatten“ des erhabenen Schmelzes am Kavitätenrand zurückzuführen. Beide Erklärungen stützen die Erkenntnis, dass zumindest für dieses Material die negativen Stufen mit Funktionszeiten über 15 Jahre hinaus nicht beliebig weiter anwachsen und damit die mit Risiko zu Sekundärkaries behaftete Freilegung des Kavitätenrandes begrenzt wird. Dieses Resultat steht in guter Übereinstimmung mit der niedrigen Rate von klinisch diagnostizierter Sekundärkaries bei diesen Klasse I und II-Füllungen mit dem Hybridkomposit Visio-Molar X ® (Gaengler et al. 2001, 2005).

Daneben konnte mit der 3D-REM an den 30 individuellen Messstellen die Dynamik nach unterschiedlichen Ausgangsverhältnissen zu Baseline (Füllungsüberschuss, perfekter Rand oder negative Stufe) über 15 Jahre verfolgt werden. Es konnte beobachtet werden, dass deutliche Füllungsüberschüsse (über 10 µm) zu Baseline, von ihrer funktionellen Belastung abhängig, über die Zeitspanne von 1 bis 5 Jahren abradiert wurden und sich zwischen 5 und 15 Jahren zu einer bis zum Ende der Beobachtungszeit stetig anwachsenden negativen Stufe entwickelten. Lag dagegen zur Anfangsuntersuchung an der Messstelle ein perfekter Rand oder bereits eine negative Stufe vor, wurde vielfach nach spätestens 10 Jahren ein Maximum der negativen Stufe (höchster Einzelwert -94,5 µm) erreicht. Bis zu 15 Jahren wurde die oben beschriebene aber wegen der großen Streubreite aller Messwerte im Mittelwert nicht signifikante Abflachung der Stufe (höchster Einzelwert -69,6 µm) ermittelt.

Als weiteren Befund bestätigte die quantitative Bewertung mittels 3D-REM einen gelegentlich im REM-Standardmodus beobachteten die negativen Stufen unterschreitenden Materialverlust im Bereich der Bondingzone. Dieser Befund wurde an 52,9% aller profilometrischen Messstellen erhoben und von uns als „**Randvertiefung**“ bezeichnet (Dietz et al. 2005, Meineber 2008). Während zu Baseline nur 24,4% der vermessenen Randstufen diese zusätzliche Vertiefung bei geringem Ausmaß aufwiesen (Mittelwert -5,5 µm bei mittlerer Stufenhöhe von -2,0 µm), wuchs mit 5 Jahren deren Anteil auf ein Maximum von 67,8% (Mittelwert -34,5 µm bei mittlerer Stufenhöhe von -25,5 µm). Bis zu 15 Jahren wurden sowohl für den Anteil an Randvertiefungen (60%) als auch für deren mittlere Tiefe (-32,2 µm) etwas geringere Werte bestimmt. In Einzelfällen wurde für Randvertiefungen ein Mehrfaches der Tiefe der zugehörigen negativen Stufe ermittelt.

Eine genauere Analyse der Höhenprofile zeigte, dass der Schmelz während des gesamten Untersuchungszeitraumes - im Mittelwert - um wenige µm tiefer freigelegt wurde als die zugehörige negative Stufe vermuten ließ, z.B. um 3,6 µm nach 1 Jahr. Das Maximum der Randvertiefungen wurde aber - ebenfalls im Mittelwert - erst im randnahen Füllungsmaterial erreicht und lag z.B. nach 15 Jahren 10,1 µm unter dem Niveau der negativen Stufe. Diese Werte streuten erheblich. Im Einzelfall (Abb. 51) betrug z.B. die negative Stufe nach 15 Jahren -20,5 µm, während der Schmelz bis auf -53,0 µm freigelegt war und im Füllungsmaterial eine Tiefe von -66,5 µm erreicht wurde. Derartige Randvertiefungen sind in Bezug auf mögliche Bakterienansiedlungen und Plaquebildung durchaus bemerkenswert, wurden aber bisher nicht diskutiert.

Ein Vergleich zwischen den elektronenmikroskopischen Abbildungen und den zugehörigen Höhenprofilen zeigte, dass die Breite der Randvertiefungen der der Bondingzone

entsprach (Abb. 48). Im Falle des hier überprüften Hybridkomposites Visio-Molar X ® ist folglich festzustellen, dass das weichere und füllkörperfreie Bondingmaterial bereits zu Baseline wegen stärkerer polymerisationsbedingter Schrumpfung und im weiteren Verlauf durch erhöhte Abrasion die Randvertiefungen verursacht. Die gleiche Information war in unserer Pilotstudie (Dietz et al. 2009) gewonnen worden, die Teil einer 2-jährigen Untersuchung zum Randverhalten von Hybridkomposit InTen-S- und Mikrohybridkomposit Hybrisun-Füllungen unter Verwendung mehrerer Bondingmaterialien war (Meineber 2008). Eine Erhöhung der Abrasionsstabilität in der Bondingzone würde folglich die marginale Integrität von Kompositfüllungen verbessern.

6.2.3 Longitudinale klinisch-mikromorphologische Gesamtbewertung der Hybridkomposit Visio-Molar X ®-Füllungen

In den dieser Studie vorangegangenen 5-, 10- und15-jährigen Untersuchungen nach den klinischen Kriterien des CPM-Index wurden sehr gute bis akzeptable Ergebnisse dokumentiert (Gaengler et al. 1993, 2001, 2005):

Nach 15 Jahren konnten 37 von ursprünglich 194 Füllungen lückenlos über den gesamten Zeitraum bewertet werden. Die Drop-out-Rate der Patienten betrug 57,2%. Es fielen 26 Füllungen wegen neuer Karies an anderen Orten oder prothetischer Behandlung aus (drop out von Zähnen). Ursachen für Versagen der Füllungen waren partieller oder totaler Füllungsverlust (9), Füllungsbruch (4) und Sekundärkaries (7). Diese Probleme sowie marginale Defekte werden bis in jüngere Zeit als Hauptursachen für Füllungsversagen von Kompositen, auch Hybridkompositen, verantwortlich gemacht (Manhart et al. 2004, van Dijken und Pallesen 2011b). Da die Sekundärkaries auch aktuell im Vordergrund diskutiert wird (Manhart et al. 2004, Soares und Cavalheiro 2010), ist für das über 15 Jahre Funktionszeit klinisch geprüfte Hybridkomposit Visio-Molar X ® bei Füllungen im Seitenzahnbereich der niedrige Sekundärkaries-Anteil hervorzuheben. Außerdem wird der Erhalt der korrekten anatomischen Form über den gesamten Untersuchungszeitraum (Code 0 für 98,4% der Füllungen nach 1 Jahr und noch für 94,6% nach 15 Jahren) bestätigt. Es musste eine stetige Verschlechterung der marginalen Integrität (optimal: Code 0 von 93,4% zu Baseline auf 28,3% nach 10 Jahren und weiter auf 0% nach 15 Jahren) festgestellt werden. Korrespondierend stieg der klinisch ermittelte Anteil von Füllungen mit negativen Stufen von 1,7% nach 1 Jahr kontinuierlich auf 50,0% nach 10 Jahren und danach moderaterer auf 56,8%

bis zu 15 Jahren. Gleichzeitig sank der Anteil von Füllungen ohne nachweisbaren Verschleiß (Code 0) von 87,0% nach 1 Jahr auf 0% nach 10 Jahren, danach stabilisierte sich der Zustand bei etwa gleichbleibender Bewertung (100% lokaler bis ausgeprägter Materialverlust, bewertet mit Code 1 und 2).

Die mittlere jährliche Verlustrate von bis zum Jahre 1990 publizierten Studien über Kompositfüllungen im Seitenzahnbereich wurde mit 4,2% und mit 2,0% bei zwischen 1990 und 2003 ermittelten Resultaten angegeben (Manhart et al. 2004). Jüngere Metaanalysen, die Untersuchungen von 1991 bis 2007 berücksichtigten (Pflaum 2009, Soares und Cavalheiro 2010), gaben Verlustraten zwischen 0,4% und 5,9% an. Überlebensraten von Komposit-füllungen im Seitenzahnbereich wurden nach 10 Jahren Funktionszeit zwischen 50% (Raskin et al. 1999) und 92,9% (Mair 1998) und mit 65% in eine 17-Jahres-Studie (Da Rosa Rodolpho et al. 2006) angegeben. Im Rahmen dieser Langzeitstudie betrug die jährliche Verlustrate 1,92% und die Kaplan-Meier-Kurve ergab für 6 Jahre eine Überlebensrate von 91,4%, für 9 Jahre 81,3% und nach 13 Jahren bis zum Untersuchungsende 73,6%. Die jährliche Verlustrate dieses 1987 applizierten Hybridkomposites kann folglich mit der von Klasse II Füllungen mit neuerem Ormocer-Nanohybrid Komposit (Ceram X; Dentsply/DeTrey) und aktuellen Adhäsiven verglichen werden, die mit 1,9 - 1,4% angegeben wird (van Dijken und Pallesen 2011b).

Die zitierten klinischen Ergebnisse werden im Rahmen dieser Arbeit durch die mikromorphologischen Resultate wie folgt ergänzt und präzisiert:

Die semiquantitativen mikromorphologischen Ergebnisse nach dem CPM Index zeigten, dass die wesentlichen Qualitätsminderungen der Füllungen innerhalb des ersten Funktionsjares und weiter bis zu 5 Jahren auftraten, während die Veränderungen in den folgenden 10 Jahren gering waren. Das gilt insbesondere für die bezüglich Sekundärkaries und Pulpairritationen wesentlichen Kriterien von „Randschluss“ und „Bildung negativer Randstufen“. Die ebenfalls relevanten Bewertungen von Randabbrüchen, Randspalten und weiteren Randimperfektionen bestätigten die langzeitige Zuverlässigkeit der geprüften Füllungen. Der anfangs hohe Anteil an Bereichen mit Füllungsüberschuss ist dem heutigen Anspruch an zahnfarbenes Füllungsmaterial geschuldet und führt durch Abrasion und gelegentliche Randabbrüche über perfekten Rand zu negativen Stufen. Die Oberflächen-beschaffenheit war geprägt von hohem Füllstoffanteil und relativ großen Füllkörpern und beeinflusste bis auf die mäßige Polierbarkeit nicht die langzeitige Qualität der Füllungen.

Mit den profilometrischen Ergebnissen der 3D-REM wurden die Bewertungen nach dem CPM Index zu den wesentlichen Kriterien Füllungsüberschuss und Bildung negativer

Stufen und darüber hinaus zum randnahen Materialverlust quantifiziert. Die statistische Analyse des Zahlenmaterials bestätigte eine signifikante Vergrößerung der negativen Stufen bis zu einem und weiter bis zu 5 Jahren, während in der Folgezeit nahezu konstante Randverhältnisse auf ein Gleichgewicht der Abrasion von Schmelz und randnahem Füllungsmaterial hinwiesen. Dieses Gleichgewicht verhindert eine Erhöhung des Risikos von Sekundärkaries, was in guter Übereinstimmung mit der klinisch diagnostizierten niedrigen Rate von Sekundärkaries steht. Dagegen führen die mit der 3D-REM nachgewiesenen, die Bondingzone betreffenden und oft die Tiefe der negativen Stufen unterschreitenden Randvertiefungen zu der Feststellung, dass hier der Schmelz am Kavitätenrand zusätzlich freigelegt wird. Folglich ist eine Verbesserung der Verschleissfestigkeit des Bondings empfehlenswert.

6.3 Gesamtbewertung der Methoden und Ergebnisse

Es zeigt sich, dass mit der mikromorphologischen Untersuchung die klinischen Befunde quantitativ untersetzt werden können und die Dynamik des Randverhaltens detailliert beschrieben werden kann. Dabei erhöht der mit der 3D-REM erreichte quantitative Informationsgewinn zum wesentlichen Kriterium „negative Stufenbildung“ und zum randnahen Materialverlust deutlich die Sicherheit der mikromorphologischen Bewertungen. Insgesamt erweisen sich klinische, semiquantitative mikromorphologische Beurteilung und die allerdings arbeitsaufwändige profilometrische Charakterisierung der Dynamik des Füllungsrand als ein sich ergänzender Methodenkomplex zur sicheren longitudinalen Bewertung dentaler Füllungen.

Der Nachweis einer Stabilisierung der marginalen Verhältnisse zwischen 10 und 15 jähriger Funktionszeit belegt zumindest für das Hybridkomposit Visio-Molar X ® die Notwendigkeit von Langzeitstudien mit zeitlicher Ausdehnung zwischen 10 und 20 Jahren und bestätigt die Forderung nach mindestens 10-jährigen Überprüfungen der heute genutzten Füllungsmaterialien (Chadwick et al. 2002).

Derartige Langzeituntersuchungen sind auch aus der Grundforderung nach lebenslanger Haltbarkeit dentaler Füllungen heraus unverzichtbar, selbst wenn wegen der Schnelllebigkeit des Marktes für Füllungsmaterialien die Ergebnisse mehrjähriger Untersuchungen oft nur noch in die Verbesserung von Folgeprodukten eingebracht werden können (Ernst et al.

2003, Meineber 2008). Die Fortführung dieser Studie auch über 20 Jahre hinaus wäre folglich interessant.

Abschließend kann für Glasionomerzement Ketac-Bond/ Hybridkomposit Visio-Molar X ® festgestellt werden, dass nach 15-jähriger Funktionszeit für alle in dieser Studie klinisch und mikromorphologisch über den gesamten Funktionszeitraum bewerteten Füllungen keine Anzeichen für ein Restaurationsversagen gefunden wurden, eine gute klinische Akzeptanz bestand und hiermit bzw. mit seinen Nachfolgeprodukten ein langlebiges Material für direkte Restaurationen im Seitenzahnbereich (Kavitätenklassen I und II) zur Verfügung steht (Gaengler et al. 2005). Damit werden Aussagen bestätigt, wonach die klinische Akzeptanz bzw. Lebenszeit der als stabiler angesehenen Amalgamfüllungen (Bernardo et al. 2007, Soares und Cavalheiro 2010), zumindest für kleinere Kompositfüllungen (Kavitätenklassen I und II), erreichbar ist (Mair 1998, Opdam et al. 2007, Corbo et al. 2009).

Mit Blick auf die zukünftige Entwicklung von Nanofüller- und Mikrohybrid-kompositen (Palaniappan et al. 2011), auf die zunehmende Berücksichtigung biokompatibler Materialien (Beer et al. 1990, Schmalz 2002, Sigusch et al. 2007, 2009, 2012) sowie auf antimikrobielle und selbstreparierende Materialien (Jandt und Sigusch 2009) ist eine weitere Steigerung der Lebensdauer von direkten Kompositrestaurationen in Klasse I und II Kavitäten zu erwarten.

7 Schlussfolgerungen

1. Für direkte Restaurationen mit Glasionomerzement Ketac-Bond/ Hybridkomposit Visio-Molar X ® im Seitenzahnbereich (Kavitätenklassen I und II) wurde nach 15-jähriger Funktionszeit eine gute klinische Akzeptanz und aus mikromorphologischer Sicht hohe Zuverlässigkeit ausgewiesen.

2. Die Langzeitstudie zeigte für das Oberflächen- und Randverhalten im ersten Funktionsjahr und weiter bis zu fünf Jahren die größten Veränderungen auf und bestätigte damit die Ergebnisse der vorausgegangenen 5- und 10-Jahres-Untersuchungen.

3. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass sich spätestens zwischen 10 und 15 Jahren Funktionszeit ein Gleichgewicht bezüglich des randnahen abrasionsbedingten Materialverlustes von Schmelz und Füllungsmaterial einstellte. Dieser Zustand kommt der Idealforderung nach gleicher physiologischer Abrasion (und Attrition) von eingesetztem Biomaterial und Zahnhartsubstanz sehr nahe und ist eine gute Voraussetzung zur Begrenzung des Risikos von Sekundärkaries und für langzeitige klinische Sicherheit.

4. Praktisch nicht nachweisbare Randspaltbildung über den gesamten Untersuchungszeitraum ergänzte die positive Bewertung des geprüften Materials, wobei vorhandene aber niemals in die Tiefe reichende Mikroleakagen diese positive Aussage nicht beeinflussten.

5. Der mit Legen der Füllungen entstandene und nachfolgend funktionsbedingt veränderte Oberflächenzustand entsprach ebenfalls über den gesamten Untersuchungszeitraum den Anforderungen an ein akzeptables Füllungsmaterial, wenn auch der Anteil relativ großer Füllkörper die Polierbarkeit des Materials beeinträchtigte.

6. Die profilometrischen Untersuchungen mittels dreidimensionaler Rasterelektronenmikroskopie (3D-REM) führten zum Nachweis von Randvertiefungen. Diese bei 53% aller Messungen gefundenen Randvertiefungen wurden ausschließlich in der Bondingzone nachgewiesen und erreichten z.T. ein Mehrfaches der negativen Stufentiefe. Eine weitere Verbesserung von polymerisationsbedingtem Schrumpfungsverhalten und/ oder der Abrasionsfestigkeit des Bondings würde diese zusätzliche Freilegung des Kavitätenrandes vermeiden.

7. Die differenzierten Veränderungen im Randverhalten der Kompositfüllungen sind nur mittels longitudinaler mikromorphologischer Untersuchung nachweisbar. Darüber hinaus unterstreichen die Ergebnisse die Zweckmäßigkeit eines Untersuchungszeitraumes von 10-20 Jahren und letztendlich nähern sich solche Langzeituntersuchungen einer Überprüfung der Idealforderung nach lebenslanger Haltbarkeit von Füllungen.

8. Ein als Voruntersuchung ausgeführter Vergleich der von drei verschiedenen Untersuchern an denselben Replikaten ermittelten Ergebnisse weist einerseits graduelle Differenzen bei der Codierung gemäß den mikromorphologischen Kriterien des CPM-Index aus, zeigt aber andererseits Übereinstimmung bei der Gesamtbewertung des Funktionszustandes der Füllungen und bestätigt somit die Eignung des CPM-Index für longitudinale klinisch mikromorphologische kontrollierte Studien an dentalen Restaurationen.

9. Die Anwendung der 3D-REM ist eine objektivierende Ergänzung der M-Kriterien des **CPM** (**C**linical, **P**hotographical and **M**icromorphological Coding) -Index. Die hiermit mögliche profilometrische Vermessung von Füllungsüberschüssen, negativer Stufenbildung und randnahem Materialverlust erlaubt eine quantitative Bewertung der schwächer werdenden Dynamik des Randverhaltens bei über 5 Jahre hinausgehenden Langzeitstudien.

10. Somit ist die Kombination von klinischer sowie semiquantitativer mikromorphologischer Beurteilung nach dem CPM-Index und der arbeitsaufwändigen 3D-REM-Quantifizierung von Randveränderungen ein sich ergänzender Methodenkomplex zur sicheren longitudinalen Bewertung dentaler Füllungen.

8 Literaturverzeichnis

1. Aguiar FH, Santos AJ, Groppo FC and Lovadino JR. Quantitative evaluation of marginal leakage of two resin composite restorations using two filling techniques. Oper Dent, 2002; 27: 475-479.
2. Airoldi RL, Krejci I and Lutz F. Quantitative evaluation of marginal leakage of two resin composite restorations using two filling techniques. Quintessence Int, 1992; 23: 355-363.
3. Akimoto N, Ohmori K, Hanabusa M and Monoi Y. An eighteen-month clinical evaluation of posterior restorations with fluoride releasing adhesive and composite systems. Dent Mat J, 2011; 30: 411–418.
4. Albrecht A. Marginale Adaption von stopfbaren Kompositen und Omoceren in Klasse-II-Kavitäten. Zahnmedizinische Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2003.
5. Alomari Q, Ajlouni R and Omar R. Managing the polymerization shrinkage of resin composite restorations: a review. SADJ, 2007; 62:12, 14, 16 passim, Abstr.
6. Anetsmann K. Oberflächenqualität von vier Nanopartikelkompositen und einem Hybridkomposit nach Anwendung verschiedener Polierverfahren. Zahnmedizinische Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen, VVB Laufersweiler Verlag, Giessen, 2009.
7. Angele RM. Klinische Studie zur Verschleißmessung von zwei Komposit-füllungsmaterialien. Zahnmedizinische Dissertation, Universität Tübingen, 2009.
8. Baillod RB, Krejci I and Lutz F. "Adhäsive Frontzahnrestorationen" unter Dentin-adhäsivanwendung mit und ohne Unterfüllung. Schweiz Monatsschr Zahnmed, 1994; 104: 290-296.
9. Baumann MA. Die Technik posteriorer Füllungen mit plastischem Kompositmaterial. ZWR, 1991; 100: 918-922.
10. Bayne SC and Schmalz G. Reprinting the classic article on USPHS evaluation methods for measuring the clinical research performance of restorative materials. Clin Oral Invest, 2005; 9: 209-214.
11. Beer R, Gängler P, Wutzler P and Krehan F. Vergleichende biologische Prüfung des Glasionomerzementes Ketac-Bond. Dtsch Zahnärztl Z, 1990; 45: 202-208.
12. Beer R. Haftvermittler und Kompositfüllungen. Dental Magazin, 1992; 3: 35-40.

13. Bergmann K. Klinische Bewertung von Komposit- und Amalgamfüllungen der Klasse II - Zweijahresstudie. Zahnmedizinische Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2007.
14. Bernardo M, Luis H, Martin MD, Leroux BG, Rue T, Leitão J and DeRouen TA. Survival and reasons for failure of amalgam versus composite posterior restorations placed in a randomized clinical trial. J Am Dent Assoc, 2007; 138: 775-783.
15. Black GV. A work on operative dentistry. 2. Vol: The technical procedures in filling teeth. Medico-dental publishing company, Chicago, London, 1908.
16. Blößer T. Die unterschiedliche Gestaltung der Präparationsgrenze und deren Einfluß auf die Randschlußgenauigkeit von hochgoldhaltigen Vollgussrestaurationen. Eine in vivo Untersuchung. Zahnmedizinische Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen, 2000.
17. Blunck U. Rasterelektonenmikroskopische Beurteilung von Kompositfüllungsrändern im Dentin in vitro. Dtsch Zahnärztl Z, 1988; 43: 939-943.
18. Bowen RL. Dental filling materials comprising vinyl silane treated fused silica and a binder consisting of the reaction product of bis-phenol and glycidyl acrylate. US Patent 3066: 122, 1962.
19. Braem M, Lambrechts P, Vanherle G and Haspeslagh L. Three-year quantitative in-vivo wear results of four posterior composites. J Dent Res, 1987; 66: 166, Abstr. No 477.
20. Brandt M. Der Einfluss verschiedener Ausarbeitungsmethoden und Poliersysteme auf die Qualität von Feinpartikelhybridkompositoberflächen - eine profilometrische und rasterelektronenmikroskopische in-vitro-Untersuchung. Zahnmedizinische Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen, 2006.
21. Brännström M, Mattsson B and Torstenson B. Materials techniques for lining composite resin restorations: a critical approach. J Dent, 1991; 19: 71-79.
22. Brunthaler A, Knig F, Lucas T, Sperr W and Schedle A. Longevity of direct resin composite restorations in posterior teeth. Clin Oral Invest, 2003; 7: 63–70.
23. Bryant RW and Mahler DB. Volumetric contraction in some tooth-coloured restorative materials. Aust Dent J, 2007; 52: 112-117.
24. Bunte H. Der Einfluss der Ausarbeitung mit verschiedenen rotierenden Instrumenten auf die Randqualität und Oberflächenmorphologie von zahnfarbigen lichthärtenden Restaurationen. Zahnmedizinische Dissertation, Humboldt-Universität Berlin, 2001.
25. Buonocore MG. A simple method of increasing the adhesion of acrylic filling materials of enamel surfaces. J Dent Res, 1955; 34: 849.

26. Carstens N. Möglichkeiten des mikrostrukturellen Nachweises von Füllungs-imperfektionen bei einem Hybridkomposit und deren potentieller Einfluss auf die experimentelle Kariesauslösung. Zahnmedizinische Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2007.
27. Chadwick B, Dummer P, Dunstan F, et al. How long do Filling last? Evidence-Based Dentistry, 2002; 3: 96 – 99.
28. Chiang YC. Polymerization shrinkage with light-initiated dental composites. Zahnmedizinische Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität zu München, 2009.
29. Collins CJ, Bryant RW and Hodge KL. A clinicl evaluation of posterior composite resin restorations: 8-year findings. J Dent, 1998; 26: 311-317.
30. Corbo M, Fahed E, Hershenfield S, Paige L and Panić O. Longevity of composite resin and amalgam restorations in posterior teeth: an evidence-based review of the literature. DEN300Y – Community Dentistry, winter 2009.
31. Cvar JF and Ryge G. Criteria for the clinical evaluation of dental restorative materials. U.S. Public Health Service, San Francisco, 1971; Publication 790–244.
32. Dajka US. Wie sicher sind adhäsiv befestigte keramische Restaurationen im Seiten-zahngebiet? Zahnmedizinische Dissertation, Universität Leipzig, 2005.
33. Da Rosa Rodolpho PA, Cenci MS, DonassolloTA, Loguércio AD and Demarco FF. A clinical evaluation of posterior composite restorations: 17-year findings. Journal of Dentistry, 2006; 34: 427-435.
34. Davidson CL, de Gee AJ and Feilzer A. The competition between the composite-dentin bond strength and the polymerization contraction stress. J Dent Res, 1984; 63: 1396-1399.
35. Davidson CL, and de Gee AJ. Verschleißverhalten dentaler Compopsite-Materialien. Phillips Journal, 1996; 13: 171-176.
36. De Melo LSA, de Araujo RE, Freitas AZ, Zezell D and Vieira ND Jr. Evaluation of enamel dental restoration interface by optical coherence tomography. J. Biomed. Opt, 2005; 10: 064027.
37. Denner ND. Der Einfluss unterschiedlicher Präparationsformen auf die Randspalt-qualität von keramischen Teilkronen. Zahnmedizinische Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2003.
38. DGZ. Amalgamverbot aus zahnmedizinischer Sicht nicht gerechtfertigt. Zm, 2002; 15: 11.

39. Dietrich T, Kraemer M, Losche GM and Roulet J. Marginal integrity of large compomer Class II restorations with cervical margins in dentine. J Dent, 2000; 28: 399-405.
40. Dietschi D, Bindi G, Krejci I and Davidson C. Marginal and internal adaptation of stratified compomer-composite Class II restorations. Oper Dent, 2002; 27: 500-509.
41. Dietz W, Gaebler P, Voigt M, Montag R and Hoyer I. Long-term electronmicroscopical control of composite restorations of human teeth (premolares and molares). Proceedings of the 14th International Congress on Electron Microscopy, Cancun, Mexico, vol 3, 1998; 227-228, (IOP, Bristol, 1998).
42. Dietz W, Kraft U, Glockmann E, Noren JG and Hoyer I. SEM evaluation of bleaching effects on human teeth using a replica technique. Proceedings of the 13th European Microscopy Congress, Antwerp Belgium, Vol III, 2004; 431-432 (Eds: Schryvers D and Timmermans JP).
43. Dietz W, Meineber S, Kraft U, Hoyer I. and Glockmann E. Quantitative evaluation of filling restorations of human teeth using three dimensional scanning electron microscopy. Proceedings of the VIth Dreiländertagung - Microscopy Conference Davos Switzerland (PSI Proceedings 05-01, ISSN1019-6447), 2005; 211.
44. Dietz W, Nietzsche S, Montag R. Gaengler P. and Hoyer, I. Quantitative evaluation of the long-term marginal behaviour of filling restorations of human teeth using three-dimensional scanning electron microscopy. Proceedings of the 14th European Microscopy Congress, Aachen, Vol. 2: Materials Science, 2008; 729–730, Springer Verlag Berlin Heidelberg (Eds.: Richter S and Schwedt A).
45. Dietz W, Meineber S, Kraft U, Montag, R, Glockmann E and Sigusch BW. Quantitative Bewertung von Füllungsrändern mit dreidimensionaler Rasterelektronenmikroskopie. Jahrestagung der AfG (DGZ), Mainz, 2009; Abstr. V29.
46. Dietz W, Montag R, Kraft U, Walther M, Sigusch BW and Gaengler P. Longitudinal micromorphological 15-year results of posterior composite restorations using three-dimensional scanning electron microscopy. Dent Mater, received Jan 2012.
47. Downer MC, Azli NA, Bedi R, Moles DR and Setchel DJ. How long do routine dental restorations last? A sytematic review. Brit Dent J, 1999; 187: 432-439.
48. Drummond JL. Degradation, fatigue, and failure of resin dental composite materials. J Dent Res, 2008; 87: 710-719.
49. Duke ES. Has dentistry moved into the nanotechnology era? Compend Contin Educ Dent, 2003; 24: 380-382.

50. Ellakwa A, Cho N, Lee IB. The effect of resin matrix composition on the polymerization shrinkage and rheological properties of experimental dental composites. Dent Mater, 2007; 23: 229-1235.
51. Ernst CP, Brandenbusch M, Canbek K, Meyer G, Fiedler T, Gottschalk F and Willershausen, B. Nanofüller- und Feinstpartikel-Hybridkomposit im klinischen Vergleich. dental-praxis, 2003; 20: 327-335.
52. Fagundes TC, Barata TJE, Carvalho CAR, Franco EB, van Dijken JWV and Navarro MFL. Clinical evaluation of two packable posterior composites. A five-year follow-up. J Am Dent Assoc, 2009; 140: 447-454.
53. Fasold A. Untersuchung der marginalen Adaptation von Klasse-I Komposit-restaurationen unter Verwendung von unterschiedlichen Unterfüllungsmaterialien. Zahnmedizinische Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität zu München, 2006.
54. Frankenberger R, Roth S, Krämer N, Pelka M. and Petschelt A. Effect of preparetion mode on Class-II-resin composite repair. J Oral Rehabil, 2003; 30: 559-564.
55. Frankenberger R, Strobel WO, Taschner M, Krämer N and Petschelt A. Evaluation klassischer Parameter unterschiedlicher Adhäsivsysteme. ZWR, 2004; 113: 188-196.
56. Frankenberger R. Die adhäsive Seitenzahnversorgung - Komposit oder Keramik? ZWR, 2009; 118: 187-190.
57. Fraunhofer-Institut für Silicatforschung, Würzburg. ORMOCER®e. http://www.ormocer.de/, 2007.
58. Gäbler P, 10-Jahres-Report von Kompositfüllungen im Seitenzahnbereich - eine longitudinale mikromorphologische Studie. Zahnmedizinische Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2002.
59. Gängler P, Hoyer I, Wucherpfennig G, Langer K. and Weinert W. Klinisch kontrollierte 5-Jahres-Studie zur Füllungsbewertung eines Komposit-Materials. ZWR, 1993; 102: 704-709.
60. Gaengler P, Hoyer I, Langer K and Montag R. Surface micromorphology of posterior GIC/composite restorations after six years. J Dent Res, 1994; 73: 630 (Abs. IADR Seattle).
61. Gängler P, Hoyer I, Langer K and Montag R. Glasionomerzement/ Composite-Füllungen an Seitenzähnen. Longitudinale klinisch und mikromorphologisch kontrollierte Bewertung nach sechs Jahren. ZWR, 1995; 104: 836-843.
62. Gaengler P, Hoyer I and Montag R. Clinical evaluation of posterior composite restorations: the 10-year report. J Adhes Dent, 2001; 3: 185-94.

63. Gaengler P, Hoyer I, Montag R and Gaebler P. Micromorphological evaluation of posterior composite restorations – a 10-year report. J Oral Rehabil, 2004; 31: 991-1000.
64. Gaengler P, Montag R and Hoyer I. Longitudinal clinical 15 year results of posterior GIC/ composite restorations. Abstract book, Joint meeting of the Continental European Division and the Scandinavian Division of the International Association for Dental Research (IADR), Amsterdam, 2005: 107Abs-No 335, (Ed. Local Organisation Committee, ACTA, Amsterdam, The Netherlands).
65. Geurtsen W. Biocompatibility of resin-modified filling materials. Crit Rev Oral Biol Med, 2000; 11: 333-355.
66. Giachetti L, Bertini F, Bambi C and Scaminaci Russo D. A rational use of dental materials in posterior direct resin restorations in order to control polymerization shrinkage stress. Minerva Stomatol, 2007; 56: 129-138.
67. Glomb C. Einfluss verschiedener Dentinadhäsive und Fülltechniken auf die Rand-qualität von Klasse-II-Kompositrestarationen. Zahnmedizinische Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität zu München, 2002.
68. Gordan VV, Garvan CW, Blaser PK, Mondragon E. and Mjör IA. A Long-term evaluation of alternative treatments to replacement of resin-based composite restorations. Results of a seven-year study. J Am Dent Assoc, 2009; 40: 1476-1484.
69. Gotthardt E. Zur räumlichen Ausmessung von Objekten mit dem Elektronenmikroskop. Zeitschrift für Physik, 1942;118: 714-717.
70. Große T. Klinische Nachuntersuchung und quantitative Randanalyse von im Studenten-kurs gelegten Kompositfüllungen im Seitenzahnbereich. Eine 6-Jahres-Studie. Zahnmedizinische Dissertation, Humboldt-Universität Berlin, 2009.
71. Gruythusen RJM, Kreulen CM, Tobi H, van Amerongen WE and Akerboom HBM. 15-years evaluation of Class II amalgam restorations. Communn Dent Oral Epidemiol, 1996; 24: 207-210.
72. Gschoßmann K. Laseroptische Untersuchungen zum in-vivo-Kauflächenverschleiß von metallfreien Artglass® – Kronen im Front- und Seitenzahngebiet. Zahnmedizinische Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität zu München 2002.
73. Guelmann M, Bonnin S, Primosch RE and Soderholm KJ. Mikroleakage and wall adaption of conservative restoration. Am J Dent, 2002; 15: 407-411.
74. Haberkorn KE. Randschluss von Fast-Track-Kompositfüllungen im Vergleich zu Amalgam- und Glasionomerzementfüllungen. Zahnmedizinische Dissertation, Uni-versitätsklinikum Ulm, 2007.

75. Heintze SD, Cavalleri A, Peschke A and Schüpbach P. Fluorescence microscopy for the evaluation of the margins of Class V restorations in vitro. J Adhes dent, 2005; 7: 19-28.
76. Hellwig E, Klimek J and Attin T. Einführung in die Zahnerhaltung. 3. Aufl. München, Jena: Urban & Fischer Verlag, 2003: 145-187, 197-216.
77. Hellwig E, Klimek J, Attin T. Einführung in die Zahnerhaltung. 4. Aufl. München, Jena: Urban & Fischer Verlag, 2007: 155-200.
78. Hemmleb M. Photogrammetrische Auswertung elektronenmikroskopischer Bilddaten. Dissertation, Technische Universität Berlin, Fak. VI - Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften, 2002.
79. Heurich E, Beyer M, Jandt KD, Reichert J, Herold V, Schnabelrauch M. and Sigusch BW. Quantification of dental erosion - a comparison of stylus profilometry and confocal laser scanning microscopy (CLSM). Dent Mater, 2010; 26: 326-336.
80. Hickel R, Kunzelmann KH and Obermeier T (a). Die Kompositfüllung im Seitenzahnbereich - Teil I. ZWR, 1994; 103: 610-618.
81. Hickel R, Kunzelmann KH and Schreyger D (b). Die Kompositfüllung im Seitenzahnbereich - Teil II. ZWR, 1994; 103: 690-697.
82. Hickel R. Moderne Füllungswerkstoffe. Dtsch Zahnärtztl Z, 1997; 52: 572-585.
83. Hickel R, Manhart J and García-Godoy F. Clinical results and new developments of direct posterior restorations. Am J Dent, 2000; 13(Spec No):41D-54D.
84. Hickel R and Manhart J. Longevity of restorations in posterior teeth and reasons for failure. J Adhes Dent, 2001; 3: 45-64.
85. Hickel R, Ernst HP, Haller B, Hugo B, Kunzelmann KH, Merte K, Ott K, Schmalz G. and Staehle HJ. Direkte Kompositrestaurationen im Seitenzahnbereich - Indikationen und Lebensdauer. DZZ, 2005; 60 (Wissentschaftliche Stellungnahme der DGZMKH).
86. Hickel R, Roulet JF, Bayne S, Heintze SD, Mjör IA, Peters M, Rousson V, Randall R, Schmalz G, Tyas M and Vanherle G. Recommendations for conducting controlled clinical studies of dental restorative materials. Clin Oral Invest, 2007; 11: 5-33.
87. Hilton TJ (a). Can modern restorative procedures and materials reliably seal cavities? In vitro investigations. Part 1. Am J Dent, 2002; 15: 198-210.
88. Hilton TJ. (b). Can modern restorative procedures and materials reliably seal cavities? In vitro investigations. Part 2. Am J Dent, 2002; 15: 279-289.
89. Hinz S. Vergleich der Randqualitäten von Kompositfüllungen, Inserts und adhäsiven Inlays in ausgedehnten Seitenzahnkavitäten vor und nach Belastungstests. Zahnmedizinische Dissertation, Universitätsmedizin Berlin, 2006.

90. Hornung K. Ausarbeitung und Politur von okklusalen und approximalen Komposit-oberflächen in vivo. Zahnmedizinische Dissertation, Justus-Liebig-Univerität Gießen, 2005.
91. Hoyer I, Gängler P and Niemela S. Composite- und Amalgamfüllungen im klinischen 4-Jahresvergleich. Zahn Mund Kieferheilk, 1988; 76: 721-726.
92. Hoyer I, Gängler P, Krehan F, Niemela S and Weinert W. Biologische Prüfung und klinische Bewertung von Komposit-Füllungen. Dtsch Zahnärztl Z, 1989; 44: 100-105.
93. Hoyer I, Gaengler P, Montag R, Wucherpfennig G and Langer K. Longitudinal 5-year-study of posterior GIC/composite restaurations using CPM-criteria. J Dent Res, 1993; 72: 259 (Abstr.).
94. Idriss S, Habib C, Abduljabbar T and Omar R. Marginal adaption of Class II resin composite restorations using incremental and bulk placement techniques: an ESEM study. J Oral Rehabil, 2003; 30: 1000-1007.
95. Ilie N, Kunzelmann KH and Hickel R. Werkstoffkundliche Untersuchungen zu Kompositen. Dtsch. Zahnärztl. Z, 2005; 60: 321-334.
96. Iwami Y, Shimizu A, Hayashi M, Takeshige F and Ebisu S. Three-dimensional evaluation of gap formation of cervical restorations. J Dent, 2005; 33: 325-33.
97. Jandt KD and Sigusch BW. Future perspectives of resin-based dental materials. Dent Mater, 2009; 25: 1001-1006.
98. Jokstad A, Mjör IA, Nilner K and Kaping S. Clinical performance of three anterior restorative materials over 10 years. Quintessence Int, 1994; 25: 101-8.
99. Jokstad A. How long do dental restorations last? Evidence-Based Dentistry, 2002; 3: 89 – 90.
100. Kamann WK, Gängler P, Schmitz I and Müller KM. (a). Klinische und mikromorpho-logische Nachuntersuchung von Goldhämmerfüllungen in Kavitäten der Klasse I. Dtsch Zahnärztl Z, 1997; 52: 219–220.
101. Kamann WK, Gängler P, Schmitz I and Müller KM. (b). Klinische und mikromorpho-logische Nachuntersuchung von Goldhämmerfüllungen in Kavitäten der Klasse II. Dtsch Zahnärztl Z, 1997; 52: 813-815
102. Kamann WK. Werkstoffkundliche und klinische Untersuchung der Füllungstherapie der Zähne mit plastischem Gold. Zahnmedizinische Habilitationsschrift, Universität Witten/Herdecke, 2000.
103. Kaplan EL and Meier P. Nonparametric estimation from incomplete observations. J Am Statist Assoc, 1958; 53: 457-481.

104. Kiene J, Gaengler, P, Kamann W, Hoyer I and Montag R. Biomaterial based specifity of CPM-index: impact for CCT. J Dent Res, 2004; 83 B, Abstr. No. 0012.
105. Kosa W, Gängler P and Wucherpfennig G. Klinische Qualität von Amalgamfüllungen nach zehnjähriger Funktionszeit (CPM-Kriterien). Dtsch Stomatol, 1991; 41: 53-56.
106. Kostka CE. Zusammenhang von Farbstoffpenetration und rasterelektronenmikroskopischer Randanalyse adhäsiv befestigter Inlays. Zahnmedizinische Dissertation, Freie Universität Berlin, 1996.
107. Krämer N and Kunzelmann K-H. Meßfehler bei der 3D-Erfassung von Oberflächen durch mechanische Profilometrie. Dtsch Zahnärztl Z, 1995; 50: 725 – 728.
108. Krämer N, Schiller R, Pelka M, Sindel J and Petschelt A. Three-body wear behaviour of different viscous luting komposites. J Dent Res, 1996; 75: 274, Abstr. No. 456.
109. Krämer N, García-Godoy F, Reinelt C, Feilzer AJ and Frankenberger R. Nanohybrid vs. fine hybrid composite in extended Class II cavities after six years. Dent Mater. 2011; 27: 455-64.
110. Krejci I, Sparr D and Lutz F. Dreischichtiges Lichthärteverfahren mit herkömmlichen Komposite-Kunststoffen für Black-Klasse-II-Restaurationen. Quintess, 1987; 7: Ref. Nr. 6991.
111. Krejci I, Krejci D and Lutz F (a). In vivo-Untersuchung eines Seitenzahnkomposits während 2,5 Jahren. Dtsch Zahnärztl Z, 1990; 45: 773-778.
112. Krejci I and Lutz F (b). In-vitro-Testverfahren zur Evaluation dentaler Restaurationssysteme. Schweiz Monatsschr Zahnmed, 1990; 100: 1145-1148.
113. Krejci I and Lutz F. Marginal adaptation of Class V restorations using different restorative techniques. J Dent, 1991;19: 24-32.
114. Krejci I, Lutz F and Mörmann W. Zahnfarbene Restaurationen im Seitenzahnbereich. Eigenverlag PPK Zürich, 1998.
115. Krug KP. Einfluss von Dentintrocknung und Schmelzabschrägung auf die marginale Adaptation adhäsiver Klasse-II-Kompositfüllungen. Zahnmedizinische Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg 2011.
116. Kubo S, Li H, Burrow MF and Tyas MJ. Nanoleakage of dentin adhesive systems bonded to Carisolv-treated dentin. Oper Dent, 2002; 27: 387-395.
117. Kunzelmann KH, Deigner M and Hickel R. (a). Dreimedienabrasion von Befestigungskompositen adhäsiver Inlaysysteme. Dtsch Zahnärztl Z, 1993; 48: 109-111.
118. Kunzelmann KH, Krause F and Hickel R (b). Dentinhaftung von Kompositfüllungen und Keramikinlays in Klasse II Füllungen. Dtsch Zahnärztl Z, 1993; 48: 724-727.

119. Kunzelmann KH and Hickel R. Klinische Aspekte der Adhäsivtechnik mit plastischen Werkstoffen. In: Die Adhäsivtechnologie. Ein Leitfaden für Theorie und Praxis. Dent Net Masters 3M ESPE AG: Kap. 3, 2001.
120. Langer K. Longitudinale klinische und mikromorphologische Kontrolle eines Hybrid-Komposites im Seitenzahnbereich. Zahnmedizinische Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 1996.
121. Leinfelder KF. Using composite resin as a posterior restorative material. J Am Dent Assoc, 1991; 122: 65-70.
122. Lendermann U. Wissenschaftliche Dokumentation - InTen-S®. Ivoclar Vivadent AG, Forschung und Entwicklung, Wissenschaftlicher Dienst, Liechtenstein, 2005.
123. Lima AF, Soares GP, Vasconcellos PH, Ambrosano GM, Marchi GM, Lovadino JR and Aguiar FH. Effect of surface sealants on microleakage of Class II restorations after thermocycling and long-term water storage. J Adhes Dent, 2011; 13: 249-54.
124. Lindberg A, van Dijken J and Lindberg M. Nine-year evaluation of a polyacid-modified resin composite/ resin composite open sandwich technique in Class II cavities. Journal of Dentistry, 2007; 35: 124-129.
125. Lutz F, Phillips RW, Roulet JF and Imfeld, T. Schweiz Monatsschr Zahnmed, 1983; 93: 914-929.
126. Mair LH. Ten-year clinical assessment of three posterior resin composites and two amalgams. Quintessence International, 1998; 29: 483-490.
127. Manhart J. Schmelz- und Dentinadhäsive: Überblick, Einflußfaktoren, Trends. Zahnarzt Wirtschaft Praxis, 2000; 3: 136-141.
128. Manhart, J. Ästhetische Restauration im Seitenzahnbereich mit plastischen Komposit-füllungen. Dental Spiegel, 2003; 23: 22-26.
129. Manhart J, Chen HY, Hamm G and Hickel R. Buonocore Memorial Lecture. Review of the clinical survival of direct and indirect restorations in posterior teeth of the permanent dentition. Oper Dent. 2004; 29: 481-508.
130. Manhart J, Chen HY and Hickel R. Clinical evaluation of the posterior composite Quixfil in Class I and II cavities: 4-year follow-up of a randomized controlled trial. J Adhes Dent, 2010; 12: 237-243.
131. Mc Lean JW, Powis DR, Prosser HJ and Wilson AD. The use of glass-ionomer cements in bonding composite resins to dentine. Br Dent J, 1985; 158:410-414.

132. Meineber S. Rasterelektronenmikroskopische Analyse zur vergleichenden Bewertung von Komposit- und Amalgamfüllungen. Zahnmedizinische Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2008.
133. Michel H. Moderne Menschen zeigen Zähne. DZ, 2004; 5: 016-018.
134. Mitra SB, Wu D and Holmes BN. An application of nanotechnology in advanced dental materials. J Am Dent Assoc, 2003; 134: 1382-1390.
135. Müller W. Klinische Untersuchung und Randspaltanalyse eines Hybridkomposites und eines Ormoceres in Seitenzahnkavitäten. Ergebnisse nach einem Jahr. Zahnmedizinische Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität zu München, 2006.
136. Müller-Schneemeyer I. Die Amalgamkontroverse in den Zwanziger Jahren des 20. Jahrhunderts. Zahnmedizinische Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität zu München, 2004.
137. Nikaido T, Takada T, Kitasako Y, Ogata M, Shimada Y, Yoshikawa T, Nakajima M, Otsuki M, Tagami J and Burrow MF. Retrospective study of five-year clinical performance of direct composite restorations using a self-etching primer adhesive system. Dent Mat J, 2006; 25: 611-615.
138. Noack MJ, Van Meerbeek B, Roulet JF, Lambrechts P. Marginal behavior of 10 different tooth-colored inlay systems in vivo. J Dent Res, 1995; 74 (spec issue): 165 (Abs 1227)
139. Nordbo H, Leirskar J and von der Fehr FR. Saucer-shaped cavity preparations for posterior approximal resin composite restorations: Observations up to 10years. Quintessence Int, 1998; 29: 5-11.
140. Opdam NJM, Bronkhorst EM, Roeters FJ and Loomans BAC. A retrospective clinical study on longevity of posterior composite and amalgam restorations. Dent Mater, 2007; 23: 2-8.
141. Opdam NJM, Bronkhorst EM, Looman, BAC and Huysmans MCDNJM. 12-year survival of composite vs. amalgam restorations. J Dent Res, 2010; 89: 1063-1067.
142. Otto T and De Nisco S. Eine prospektive, klinische 10-Jahresstudie von Cerec CAD-CAM-Inlays und Onlays. Int J Prostodont, 2002; 15: 122-128.
143. Ozel E, Korkmaz Y, Attar N and Karabulut E. Effect of one-step polishing systems on surface roughness of different flowable restorative materials. Dent Mat J, 2008; 27: 755-764.

144. Palaniappan S, Bharadwaj D, Mattar DL, Peumans M, Van Meerbeek B and Lambrechts P. Nanofilled and microhybrid composite restorations: Five-year clinical wear performances. Dent Mater, 2011; 27: 692-700.
145. Palichleb M. Randmorphologie und Dichtheit von Kompositfüllungen bei Verwendung von experimentellen internen Lichtleitern in Klasse-II-Kavitäten. Zahnmedizinische Dissertation, Univiversität Marburg, 2007.
146. Pallesen U and Qvist V. Clinical evaluation of three posterior composite resins: 10-year-report. J Dent Res, 1995; 74: 404, Abstr. 30.
147. Pallesen U and Qvist V. Composite resin fillings and inlays. An 11-year evaluation. Clin Oral Invest, 2003; 7: 71–79.
148. Pflaum T. Moderne Komposite im Seitenzahnbereich - was können sie leisten, wo liegen ihre Grenzen? Endodontie Journal, 2009; 2: 16-22.
149. Phillips RW, Avery DR, Mehra R, Swartz ML and Mc Cune RJ. One year observations on a composite resin for Class II restorations. J. Prost. Dent, 1971; 26: 68-77.
150. Phillips RW. Past, present and future composite resin systems. Dent Clin North Amer, 1981; 25: 209-218.
151. Point electronic GmbH Die Spezialisten für Rasterelektronenmikroskopie und digitale Bildverarbeitung. http://www.pointelectronic.de/index.html, 2010.
152. Raskin A, Michotte-Theall B, Vreven J and Wilson NH. Clinical evaluation of a posterior composite 10-year report. J Dent, 1999; 27: 13-9.
153. Rehberg HJ. Exakter Randschluss- was ist das? Dtsch Zahnärztl Z, 1971; 26: 696-699.
154. Reinhardt KJ. Die Schrumpfrichtung von Photopolymerisaten und ihre Wechselwirkung mit Unterfüllungsmaterialien. Dtsch Zahnärztl Z, 1989; 44: 669-672.
155. Reis AF, Giannini M, Lovadino JR and Ambrosano GM. Effects of various finishing systems on the surface roughness and staining susceptibility of packable composite resins. Dent Mater, 2003; 19: 12-18.
156. Rezwani-Kaminski T, Kamann W, Gaengler P. Secondary caries susceptibility of teeth with long-term performing composite restorations. J Oral Rehabil, 2002; 29: 1131-1138.
157. Riethe P (a). Geschichtliche Entwicklung der Amalgame. Dtsch. Zahnärztl. Zschr, 1988; 35: 443-449.
158. Riethe P (b). Kariesprophylaxe und konservierende Therapie. In: Rateitschak KH, Wolf HF, Riethe P. Farbatlanten der Zahnmedizin, Bd. 6, S. 162, Thieme, Stuttgart, 1988.
159. Ritter RG. Conservative tooth-colored restorations for the 21st century. Dent Today, 1998; 17: 50-52, 54-55.

160. Roberts MW, Folio J, Motta JP and Guckes AD. Clinical evaluation of a composite resin system with a dentin bonding agent for restoration of permanent posterior teeth: A 3-year study. J Prosth Dent, 1992; 67: 301-306.
161. Rodriguez JM, Austin RS and Bartlett DW. A method to evaluate profilometric tooth wear measurements. Dent Mater, 2012; 28: 245-251.
162. Romer LC. Klinisches Verhalten und Randspaltverhalten von Klasse-II-Komposit-füllungen in Abhängigkeit von verschiedenen Dentinadhäsiven nach einer Liegezeit von 24 Monaten. Zahnmedizinische Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2006.
163. Rominu M, Sinescu C and Podoleanu AG. Optical coherence tomography combined with the confocal microscopy method and fluorescence for Class V cavities investi-gations. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2009; 53: 1231-1235.
164. Roulet JF. Degradation of Dental Polymers. Karger, Basel-New York, 1987.
165. Roulet JF, Reich T, Blunck U and Noack M. Quantitative margin analysis in the scanning electron microscope. Scann. Micr, 1989; 3: 147-158, Discussion: 158-159.
166. Roulet JF and Noak MJ. (a). Criteria for substituting amalgam with composite resins. Int Dent J, 1991; 41: 195-205.
167. Roulet JF, Salchow B and Wald W. (b). Margin analysis of posterior composites in vivo. Dent Mater, 1991; 7: 44-49.
168. Roulet JF. (a). Marginal integrity: clinical significance. J Dent, 1994; 22 (Suppl 1): 9-12.
169. Roulet JF. (b). Zahnfarbene Restaurationen als Amalgam-Alternative. Dtsch Zahnärtztl Z, 1994; 49: 859-866.
170. Roulet JF. Benefits and disadvantages of tooth-coloured alternatives to amalgam. J Dent, 1997; 25: 459-473.
171. Rudolph M. Randspaltmessung und Festigkeitsprüfung von Metallkeramikkronen mit lasergeschmolzenem Gerüst. Eine In-vitro-Studie. Zahnmedizinische Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2006.
172. Ryge G. Clinical criteria. Int Dent J, 1980; 30: 347-58.
173. Sauerzweig K. Randspaltuntersuchung an Klasse-II-Kompositfüllungen in Kombination mit niedrigviskösen Kompositen nach artifizieller Alterung. Zahnmedizinische Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2006.
174. Schmalz G. Materials science: biological aspects. JDR, 2002; 81: 660-663.

175. Sehr K. Die rotierende Bearbeitung von vier Kompositen auf Nanotechnologie-Basis und eines Hybridkomposites. Zahnmedizinische Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen, VVB Laufersweiler Verlag Giesen, 2007.
176. Selinka AI. Randschluss von zahnfarbenen Klasse-II-Füllungen bei Anwendung zeitsparender Füllungs- und Bondingtechniken. Zahnmedizinische Dissertation, Universität Ulm, 2006.
177. Setcos JC, Tarim B, Suzuki S and Cox CF. Surface roughness of composite resins polished with new finishing systems. J Dent Res, 1996; 75: 382, Abstr. 2920.
178. Shenoy A. Is it the end of the road for dental amalgam? A critical review. J Conserv Dent, 2008; 11: 99–107.
179. Sigusch BW, Völpel A, Braun I, Uhl A and Jandt KD. Influence of different light curing units on the cytotoxicity of various dental composites. Dent Mater, 2007; 23: 1342-1348.
180. Sigusch BW, Pflaum T, Völpel, A, Schinkel M and Jandt KD. The influence of various light curing units on the cytotoxicity of dental adhesives. Dent Mater, 2009; 25: 1446 – 1452.
181. Sigusch BW, Pflaum T, Völpel A, Gretsch K, Hoy S, Watts D and Jandt KD. Resin-composite cytotoxicity varies with shade and irradiance. Dent Mater, 2012; accepted.
182. Sinseder F. In-vitro-Untersuchung zur Korrelation von Präparationsdesign und klinischer Haltbarkeit CAD/CAM-gefertigter Zirkondioxidkronen nach künstlicher Alterung im Kausimulator. Zahnmedizinische Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität zu München, 2009.
183. Soares AC and Cavalheiro A. A review of amalgam and composite longevity of posterior restorations. Rev Port Estomatol Med Dent Cir Maxilofac, 2010; 51:155-164.
184. Spörlein F. Klinische Untersuchung und Randspaltanalyse eines Hybridkomposites und eines Ormoceres in Seitenzahnkavitäten. Ergebnisse nach zwei Jahren. Zahnmedizinische Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2010.
185. Staehle HJ. Stellungnahmen der DGZMK: Pulpaschutz unter Komposit-Restaurationen. DZZ, 1998; 54 (99)
186. Staehle HJ. Unverträglichkeit gegenüber Dentalmaterialien: Bei Verdacht ist interdisziplinäre Abstimmung erforderlich. Dt Ärztebl, 2000; 97: A3344–3351.
187. Stassinakis A, Siegenthaler D, Lussi A and Hotz P. Clinical long term comparison of amalgam and composite restorations. J. Dent. Res, 1999; 78: 308 (Special Issue IADR, Abstr. 1624.

188. Steinbrenner H, Eickholz P and Staehle HJ. Zur Reproduzierbarkeit der qualitativen und quantitativen Randanalyse. Dtsch Zahnärztl Z, 1995; 50: 920-923.
189. Stoll R, Sieweke M, Pieper K, Stachniss V and Schulte A. Longevity of cast gold inlays and partial crowns - a retrospective study at a dental school clinic. Clin Oral Invest, 1999; 3: 100-104.
190. Stoll R, Gente M, Palichleb M and Stachniss V. On the effect of an internal light conductor on the marginal integritiy of Clas-II composite fillings. Dental Materials, 2007; 23: 145-152.
191. Talma (Dentisten des Konigs der Belger in Brussel). Von den Gefajren der Anwendung des silber-amalgams, genannt Succedaneum minerale, zum Plombieren der Zahne. Der Zahnarzt, 1846; 1: 23-28.
192. Terry DA. Applications of nanotechnology. Pract Proced Aesthet Dent, 2004; 16: 220-222.
193. Teuffel F, Kunzelmann KH, Gloger W, Mehl A and Hickel, R. Verschleißmessung zahnärztlicher Füllungswerkstoffe mit einem 3D-Laser-Meßplatz und einer referenzpunktfreien Auswertroutine. Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering, 1995; 40: 389–390.
194. Teuffe, F. Klinische Verschleißanalyse mittels Lasertriangulation am Beispiel von Visio Gem® Inlays. Zahnmedizinische Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität zu München, 2005.
195. Thum, M. In-vitro-Untersuchung der marginalen Adaption von Klasse-II-Komposit-füllungen. Zahnmedizinische Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität zu München, 2004.
196. Tyas MJ and Wassenaar, P. Clinical evaluation of four composite resins in posterior teeth. Five-year result. Aust Dent J, 1991; 36: 369-373.
197. Uekermann JC. Vergleichsstudie einer laseroptischen Untersuchung zum In -vivo-Kauflächenverschleiß von Adoro®-Kronen und Keramikverblendkronen. Zahn-medizinische Dissertation, Universität Heidelberg, 2007.
198. Van Dijken JW and Pallesen U (a). Four-year clinical evaluation of Class II nano-hybrid resin composite restorations bonded with a one-step self-etch and a two-step etch-and-rinse adhesive. J Dent, 2011; 39:16-25.
199. Van Dijken JW and Pallesen U (b). Clinical performance of a hybrid resin composite with and without an intermediate layer of flowable resin composite: a 7-year evaluation. Dent Mater, 2011; 27: 150-6.

200. Ward DH. Esthetic restoration of tooth structure using a nanofill composite system. Compend Contin Educ Dent, 2005; 26: 252-257.
201. Watts DC and Cash AJ. Kinetics of rigid polymerisation contraction in visible light activated restoratives. IADR Montreal, 1988: 224, Abstr. No. 895.
202. Wilder AD, May KN, Bayne SC, Taylor DF and Leinfelder KF. Seventeen-year clinical study of ultraviolet-cured posterior composite Class I and II restorations. J Esthet Restorat Dent, 1999; 11: 135-142.
203. Willems G, Lambrechts P, Braem M and Vanherle G. Composite resins in the 21st century. Quintessence Int, 1993; 24: 641-658.
204. Wilson NH, Wilson MA, Wastell DG and Smith GA. A clinical trial of a visible light cured posterior composite resin restorative material: five-year results. Quintessence Int, 1988; 19: 675-81.
205. Witzel A. Das Füllen der Zähne mit Amalgam. Nebst einem Anhange über die moderne Behandlung pulpakranker Zähne. Berlinische Verlagsanstalt, Berlin, 1899.
206. Zentgraf C. Der Einfluss von Kavitätenvolumen, Polymerisationsschrumpfung und Schichttechnik auf die Randschlussqualität von Klasse-II-Kompositfüllungen. Zahnmedizinische Dissertation, Julius-Maximilians-Universität zu Würzburg, 2009.

9 Anhang

9.1 Abkürzungsverzeichnis

3D-REM	dreidimensionale Rasterelektronenmikroskopie
4Q-RE	Vier Quadranten Rückstreuelektronen
4Q-RE Detektor	Vier Quadranten Rückstreuelektronen Detektor
CAD/CAM-Technologie	Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing-Technologie
C-Kriterien	klinische Kriterien
CPM-Index	Clinical, Photographical and Micromorphological Coding - Index
DOM	Digitales Oberflächenmodell
M-Kriterien	mikromorphologische Kriterien
P-Kriterien	photographische Kriterien
RE	Rückstreuelektronen
REM	Rasterelektronenmikroskop
REM-Standardbild	Sekundärelektronen-Bild im Rasterelektronenmikroskop
SE	Sekundärelektronen
SE-Detektor	Sekundärelektronen Detektor
USPHS-Kriterien	United States Public Health Service-Kriterien (San Francisco)

9.2 Hersteller der im Text genannten Geräte und Materialien

Hersteller	**Gerät/ Material**
3M ESPE AG, Seefeld, Deutschland	Hybridkomposit Visio-Molar X Ketac Bond Glasionomer-Unterfüllungsmaterial Putty und Permagum Vinylpolysiloxan Permagum Visio-Bond Bonding Material
Alicona Imaging GmbH, Grambach/ Österreich	Software Mex 4.1
BAL-TEC, Liechtenstein	Sputter-Coater SCD 005
Hochvakuumtechnik Dresden, Dresden, Deutschland	Hochvakuumbedampfungsanlage B 30
IBM Deutschland, Ehningen, Deutschland	PASW Statistics for Windows, Version 18.0.3
Laborchemie Apolda, Apolda, Deutschland	F12-Spray
MLW, Berlin, Deutschland	Sensitest
Philips, Eindhoven, Niederlande, jetzt: FEI, Hillsboro, Oregon, USA	Rastertelektronenmikroskop Philips SEM 515
Point electronic GmbH, Halle, Deutschland	4Q-RE-Detektor
Serva, Heidelberg, Deutschland	Epon
VOCO GmbH, Cuxhaven, Deutshland	Coolan

9.3 Daten der semiquantitativen REM Bewertung

Bewertung von 37 Füllungen, Anzahl/ prozentualer Anteil für Code 0-3 nach den M-Kriterien des CPM-Index

M-Kriterium	Kontroll-zeit	Anzahl Füllungen mit Code 0-3					Prozentualer Anteil Füllungen mit Code 0-3				
		Code 0	Code 1	Code 2	Code 3	Summe Füllungen	Code 0	Code 1	Code 2	Code 3	Summe %
Oberflächenrauigkeit	**Basis**	0	0	15	22	37	0	0	41	59	100
	1 Jahr	0	0	14	23	37	0	0	38	62	100
	5 Jahre	0	0	6	31	37	0	0	16	84	100
	10 Jahre	0	0	7	30	37	0	0	18	82	100
	15 Jahre	0	0	6	31	37	0	0	16	84	100
Oberflächentextur	**Basis**	37	0	0	0	37	100	0	0	0	100
	1 Jahr	27	9	1	0	37	73	24	3	0	100
	5 Jahre	18	15	4	0	37	49	41	11	0	100
	10 Jahre	18	14	5	0	37	49	38	14	0	100
	15 Jahre	18	12	7	0	37	49	32	19	0	100
Randschluß	**Basis**	0	16	17	4	37	0	43	46	11	100
	1 Jahr	0	9	16	12	37	0	24	43	32	100
	5 Jahre	0	1	10	26	37	0	3	27	70	100
	10 Jahre	0	0	11	26	37	0	0	30	70	100
	15 Jahre	0	2	11	24	37	0	5	30	65	100
Füllungsüberschuß	**Basis**	0	20	13	4	37	0	54	35	11	100
	1 Jahr	9	25	3	0	37	24	68	8	0	100
	5 Jahre	18	19	0	0	37	49	51	0	0	100
	10 Jahre	22	15	0	0	37	59	41	0	0	100
	15 Jahre	23	14	0	0	37	62	38	0	0	100
Randabbruch	**Basis**	37	0	0	0	37	100	0	0	0	100
	1 Jahr	30	7	0	0	37	81	19	0	0	100
	5 Jahre	28	9	0	0	37	76	24	0	0	100
	10 Jahre	26	11	0	0	37	70	30	0	0	100
	15 Jahre	25	12	0	0	37	68	32	0	0	100
Negative Stufe	**Basis**	21	11	5	0	37	57	30	14	0	100
	1 Jahr	3	8	14	12	37	8	22	38	32	100
	5 Jahre	0	1	10	26	37	0	3	27	70	100
	10 Jahre	0	0	11	26	37	0	0	30	70	100
	15 Jahre	0	2	11	24	37	0	5	30	65	100
Mikroleakage und Randspalten	**Basis**	37	0	0	0	37	100	0	0	0	100
	1 Jahr	36	1	0	0	37	97	3	0	0	100
	5 Jahre	31	6	0	0	37	84	16	0	0	100
	10 Jahre	26	11	0	0	37	70	30	0	0	100
	15 Jahre	21	15	1	0	37	57	41	3	0	100
weitere Randimperfektionen	**Basis**	37	0	0	0	37	100	0	0	0	100
	1 Jahr	37	0	0	0	37	100	0	0	0	100
	5 Jahre	37	0	0	0	37	100	0	0	0	100
	10 Jahre	36	1	0	0	37	97	3	0	0	100
	15 Jahre	35	2	0	0	37	95	5	0	0	100

9.4 Messwerte der quantitativen 3D-REM-Bewertung

(Profilometrie über den Füllungsrand)

Füllung 01

Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung	Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung
1-1	B	-49,8	-69,0	-58,2	3-1	B	0,0	0,0	0,0
1-2	B	-44,6	-69,6	-47,5	3-2	B	0,0	0,0	0,0
1-3	B	-25,5	-45,5	-45,5	3-3	B	0,0	0,0	0,0
Mittelwert 1	**Baseline**	**-40,0**	**-61,4**	**-50,4**	**Mittelwert 3**	**Baseline**	**0,0**	**0,0**	**0,3**
1-1	1J	-55,1	-75,0	-67,8	3-1	1J	-8,7	-8,7	-1,9
1-2	1J	-46,0	-61,6	-52,6	3-2	1J	-4,6	-4,6	5,0
1-3	1J	-48,7	-50,4	-36,8	3-3	1J	-9,9	-9,9	-2,2
Mittelwert 1	**1 Jahr**	**-49,9**	**-62,3**	**-52,4**	**Mittelwert 3**	**1 Jahr**	**-7,7**	**-7,7**	**0,3**
1-1	5J	-83,7	-87,5	-40,0	3-1	5J	-9,9	-9,9	0,0
1-2	5J	-65,5	-78,6	-34,6	3-2	5J	-26,9	-26,9	-0,7
1-3	5J	-67,2	-88,5	-65,4	3-3	5J	-31,5	-31,5	0,0
Mittelwert 1	**5 Jahre**	**-72,1**	**-84,9**	**-46,7**	**Mittelwert 3**	**5 Jahre**	**-22,8**	**-22,8**	**-0,2**
1-1	10J	-43,6	-43,6	-29,2	3-1	10J	-17,3	-17,3	-9,4
1-2	10J	-25,6	-25,6	-8,1	3-2	10J	-11,6	-11,6	-2,1
1-3	10J	-22,7	-22,7	-5,5	3-3	10J	-12,7	-12,7	-4,6
Mittelwert 1	**10 Jahre**	**-30,6**	**-30,6**	**-14,3**	**Mittelwert 3**	**10 Jahre**	**-13,9**	**-13,9**	**-5,4**
1-1	15J	-63,2	-63,2	-14,0	3-1	15J	-26,9	-26,9	-5,1
1-2	15J	-53,6	-53,6	-27,0	3-2	15J	-29,5	-29,5	-4,5
1-3	15J	-39,3	-39,3	-8,1	3-3	15J	-22,3	-22,3	0,0
Mittelwert 1	**15 Jahre**	**-52,0**	**-52,0**	**-16,4**	**Mittelwert 3**	**15 Jahre**	**-26,2**	**-26,2**	**-3,2**
2-1	B	0,0	-15,0	0,0					
2-2	B	0,0	-20,1	-9,7					
2-3	B	0,0	-24,8	-22,6					
Mittelwert 2	**Baseline**	**0,0**	**-20,0**	**-10,8**					
2-1	1J	-14,8	-26,1	-16,8					
2-2	1J	-14,3	-24,5	-11,7					
2-3	1J	-11,0	-20,9	-14,0					
Mittelwert 2	**1 Jahr**	**-13,4**	**-23,8**	**-14,2**					
2-1	5J	-23,9	-25,2	-16,2					
2-2	5J	-25,5	-26,6	-24,2					
2-3	5J	-23,6	-31,7	-27,5					
Mittelwert 2	**5 Jahre**	**-24,3**	**-27,8**	**-22,6**					
2-1	10J	-7,2	-7,2	-0,6					
2-2	10J	-8,6	-8,6	-2,4					
2-3	10J	-8,1	-8,1	-2,9					
Mittelwert 2	**10 Jahre**	**-8,0**	**-8,0**	**-2,0**	**Mittelwert 1-3**	**Baseline**	**-13,3**	**-27,1**	**-20,3**
2-1	15	-21,9	-22,5	-2,9	**Mittelwert 1-3**	**1 Jahr**	**-23,7**	**-31,3**	**-22,1**
2-2	15	-19,1	-19,1	-4,0	**Mittelwert 1-3**	**5 Jahre**	**-39,7**	**-45,2**	**-23,2**
2-3	15	-24,8	-24,8	-15,2	**Mittelwert 1-3**	**10 Jahre**	**-17,5**	**-17,5**	**-7,2**
Mittelwert 2	**15 Jahre**	**-21,9**	**-22,1**	**-7,4**	**Mittelwert 1-3**	**15 Jahre**	**-33,4**	**-33,5**	**-9,0**

Grau unterlegter Wert: nicht messbarer Füllungsüberschuss, 1-Jahreswert übernommen (nach Randabbruch messbar)

Füllung 02

Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung	Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung
1-1	B	-6,7	-7,3	0,0	3-1	B	0,0	0,0	0,0
1-2	B	0,0	0,0	0,0	3-2	B	0,0	0,0	0,0
1-3	B	0,0	0,0	0,0	3-3	B	0,0	0,0	0,0
Mittelwert 1	**Baseline**	**-2,2**	**-2,4**	**0,0**	**Mittelwert 3**	**Baseline**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
1-1	1J	-19,6	-21,6	-8,1	3-1	1J	-14,7	-14,7	-14,7
1-2	1J	-24,2	-24,2	-22,4	3-2	1J	-11,1	-11,1	-11,1
1-3	1J	-26,5	-28,5	-25,6	3-3	1J	-13,2	-13,2	-13,2
Mittelwert 1	**1 Jahr**	**-23,4**	**-24,8**	**-18,7**	**Mittelwert 3**	**1 Jahr**	**-13,0**	**-13,0**	**-13,0**
1-1	5J	-21,3	-21,3	-16,0	3-1	5J	-40,1	-44,0	-41,2
1-2	5J	-30,4	-31,0	-21,8	3-2	5J	-44,5	-44,5	-37,7
1-3	5J	-31,1	-31,1	-29,2	3-3	5J	-36,8	-43,9	-30,1
Mittelwert 1	**5 Jahre**	**-27,6**	**-27,8**	**-22,3**	**Mittelwert 3**	**5 Jahre**	**-40,5**	**-44,1**	**-36,3**
1-1	10J	-11,3	-13,2	-10,6	3-1	10J	-8,2	-8,2	-8,2
1-2	10J	-16,4	-16,4	-15,1	3-2	10J	-9,9	-9,9	-9,9
1-3	10J	-19,7	-19,7	-17,5	3-3	10J	-7,8	-7,8	-7,8
Mittelwert 1	**10 Jahre**	**-15,8**	**-16,4**	**-14,4**	**Mittelwert 3**	**10 Jahre**	**-8,6**	**-8,6**	**-8,6**
1-1	15J	-28,4	-28,4	-27,7	3-1	15J	-25,6	-49,0	-49,0
1-2	15J	-36,0	-36,0	-35,1	3-2	15J	-19,9	-47,5	-47,5
1-3	15J	-48,3	-48,3	-44,4	3-3	15J	-26,1	-54,5	-40,0
Mittelwert 1	**15 Jahre**	**-37,6**	**-37,6**	**-35,7**	**Mittelwert 3**	**15 Jahre**	**-23,9**	**-50,3**	**-45,5**
2-1	B	0,0	0,0	0,0					
2-2	B	0,0	0,0	0,0					
2-3	B	0,0	0,0	0,0					
Mittelwert 2	**Baseline**	**0,0**	**0,0**	**0,0**					
2-1	1J	-75,0	-75,0	-75,0					
2-2	1J	-57,3	-57,3	-57,3					
2-3	1J	-37,1	-37,1	-37,1					
Mittelwert 2	**1 Jahr**	**-56,5**	**-56,5**	**-56,5**					
2-1	5J	-92,0	-95,6	-89,4					
2-2	5J	-81,4	-84,7	-78,4					
2-3	5J	-74,0	-77,8	-77,3					
Mittelwert 2	**5 Jahre**	**-82,5**	**-86,0**	**-81,7**					
2-1	10J	-71,0	-71,0	-71,0					
2-2	10J	-54,1	-54,1	-54,1					
2-3	10J	-45,4	-45,4	-45,4					
Mittelwert 2	**10 Jahre**	**-56,8**	**-56,8**	**-56,8**	**Mittelwert 1-3**	**Baseline**	**-0,7**	**-0,8**	**0,0**
2-1	15J	-69,6	-69,6	-69,6	**Mittelwert 1-3**	**1 Jahr**	**-31,0**	**-31,4**	**-29,4**
2-2	15J	-50,1	-50,1	-50,1	**Mittelwert 1-3**	**5 Jahre**	**-50,2**	**-52,7**	**-46,8**
2-3	15J	-58,1	-58,1	-58,1	**Mittelwert 1-3**	**10 Jahre**	**-27,1**	**-27,3**	**-26,6**
Mittelwert 2	**15 Jahre**	**-59,3**	**-59,3**	**-59,3**	**Mittelwert 1-3**	**15 Jahre**	**-40,2**	**-49,1**	**-46,8**

Füllung 03

Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung	Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung
1-1	B	0,0	0,0	0,0	3-1	B	0,0	0,0	0,0
1-2	B	0,0	0,0	0,0	3-2	B	0,0	0,0	0,0
1-3	B	0,0	0,0	0,0	3-3	B	0,0	0,0	0,0
Mittelwert 1	**Baseline**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**Mittelwert 3**	**Baseline**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
1-1	1J	-15,3	-16,2	-16,3	3-1	1J	-26,2	-37,3	-37,3
1-2	1J	-16,7	-28,7	-24,7	3-2	1J	-24,1	-37,6	-29,2
1-3	1J	-21,8	-27,2	0,0	3-3	1J	-22,2	-34,1	-30,7
Mittelwert 1	**1 Jahr**	**-17,9**	**-24,0**	**-13,7**	**Mittelwert 3**	**1 Jahr**	**-24,2**	**-36,3**	**-32,4**
1-1	5J	-22,3	-52,7	-47,5	3-1	5J	-31,0	-40,1	-40,1
1-2	5J	-21,2	-49,6	-49,6	3-2	5J	-33,0	-44,1	-44,1
1-3	5J	-26,1	-34,1	-34,1	3-3	5J	-18,3	-28,3	-28,3
Mittelwert 1	**5 Jahre**	**-23,2**	**-45,5**	**-43,7**	**Mittelwert 3**	**5 Jahre**	**-27,4**	**-37,5**	**-37,5**
1-1	10J	-2,6	-15,0	-15,0	3-1	10J	-34,9	-50,0	-50,0
1-2	10J	-3,4	-25,5	-25,5	3-2	10J	-29,6	-42,0	-42,0
1-3	10J	-6,2	-13,0	-13,0	3-3	10J	-21,8	-30,9	-30,9
Mittelwert 1	**10 Jahre**	**-4,1**	**-17,8**	**-17,8**	**Mittelwert 3**	**10 Jahre**	**-28,8**	**-41,0**	**-41,0**
1-1	15J	-3,3	-3,3	-3,3	3-1	15J	-30,3	-54,0	-54,0
1-2	15J	-1,9	-1,9	-1,9	3-2	15J	-13,2	-35,4	-35,4
1-3	15J	-11,0	-11,0	-11,0	3-3	15J	-7,9	-26,9	-26,9
Mittelwert 1	**15 Jahre**	**-5,4**	**-5,4**	**-5,4**	**Mittelwert 3**	**15 Jahre**	**-17,1**	**-38,8**	**-38,8**
2-1	B	-8,7	-9,4	-8,5					
2-2	B	-9,2	-9,2	-9,2					
2-3	B	-6,8	-6,8	0,0					
Mittelwert 2	**Baseline**	**-8,2**	**-8,5**	**-5,9**					
2-1	1J	-16,7	-16,7	-5,5					
2-2	1J	-28,0	-28,0	-4,1					
2-3	1J	-13,7	-13,7	0,0					
Mittelwert 2	**1 Jahr**	**-19,5**	**-19,5**	**-3,2**					
2-1	5J	-12,3	-13,3	-1,4					
2-2	5J	-18,7	-20,5	-4,2					
2-3	5J	-19,1	-19,1	-4,2					
Mittelwert 2	**5 Jahre**	**-16,7**	**-17,6**	**-3,3**					
2-1	10J	-10,4	-25,0	-19,1					
2-2	10J	-16,9	-22,4	-22,4					
2-3	10J	-22,1	-22,1	-13,9					
Mittelwert 2	**10 Jahre**	**-16,5**	**-23,2**	**-18,5**	**Mittelwert 1-3**	**Baseline**	**-2,7**	**-2,8**	**-2,0**
2-1	15J	-12,1	-12,1	-8,3	**Mittelwert 1-3**	**1 Jahr**	**-20,5**	**-26,6**	**-16,4**
2-2	15J	-16,2	-16,2	-10,2	**Mittelwert 1-3**	**5 Jahre**	**-22,4**	**-33,5**	**-28,2**
2-3	15J	-16,4	-24,5	-17,5	**Mittelwert 1-3**	**10 Jahre**	**-16,4**	**-27,3**	**-25,8**
Mittelwert 2	**15 Jahre**	**-14,9**	**-17,6**	**-12,0**	**Mittelwert 1-3**	**15 Jahre**	**-12,5**	**-20,6**	**-18,7**

Füllung 04

Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung	Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung
2-1	B	0,0	0,0	1,6	4-1	B	0,0	0,0	0,0
2-2	B	0,0	0,0	0,5	4-2	B	0,0	0,0	0,0
2-3	B	0,0	0,0	0,0	4-3	B	0,0	0,0	0,0
Mittelwert 2	**Baseline**	**0,0**	**0,0**	**13,5**	**Mittelwert 4**	**Baseline**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
2-1	1J	0,0	-1,4	11,6	4-1	1J	-23,4	-23,4	-23,4
2-2	1J	0,0	-1,6	17,5	4-2	1J	-13,8	-13,0	-13,0
2-3	1J	0,0	-1,6	11,4	4-3	1J	-6,0	-0,8	-0,8
Mittelwert 2	**1 Jahr**	**0,0**	**-1,5**	**13,5**	**Mittelwert 4**	**1 Jahr**	**-14,4**	**-12,4**	**-12,4**
2-1	5J	0,0	-9,4	0,0	4-1	5J	-13,5	-13,5	-13,5
2-2	5J	0,0	-6,7	0,0	4-2	5J	-8,9	-5,1	-5,1
2-3	5J	0,0	-6,0	8,4	4-3	5J	-6,6	-6,6	-3,0
Mittelwert 2	**5 Jahre**	**0,0**	**-7,4**	**2,8**	**Mittelwert 4**	**5 Jahre**	**-9,7**	**-8,4**	**-7,2**
2-1	10J	0,0	-11,8	-8,7	4-1	10J	-35,3	-35,3	-35,3
2-2	10J	0,0	-17,1	-13,6	4-2	10J	-22,8	-22,8	-16,2
2-3	10J	0,0	-16,2	-11,9	4-3	10J	-33,6	-33,6	-7,2
Mittelwert 2	**10 Jahre**	**0,0**	**-15,0**	**-11,4**	**Mittelwert 4**	**10 Jahre**	**-30,6**	**-30,6**	**-19,6**
2-1	15J	-9,2	-16,1	-12,5	4-1	15J	-15,9	-15,9	-6,7
2-2	15J	-6,2	-26,5	-19,7	4-2	15J	-28,4	-28,4	-8,9
2-3	15J	-9,3	-27,1	-18,6	4-3	15J	-26,7	-40,4	-12,8
Mittelwert 2	**15 Jahre**	**-8,2**	**-23,2**	**-16,9**	**Mittelwert 4**	**15 Jahre**	**-23,7**	**-28,2**	**-9,5**
3-1	B	-4,0	-4,0	3,6					
3-2	B	-1,3	-1,3	0,9					
3-3	B	-4,2	-4,2	1,4					
Mittelwert 3	**Baseline**	**-3,2**	**-3,2**	**9,5**					
3-1	1J	-21,3	-21,3	10,7					
3-2	1J	-34,3	-34,3	9,5					
3-3	1J	-36,2	-36,2	8,2					
Mittelwert 3	**1 Jahr**	**-30,6**	**-30,6**	**9,5**					
3-1	5J	-22,2	-38,5	-11,3					
3-2	5J	-19,2	-34,1	-14,5					
3-3	5J	-27,4	-39,6	-26,5					
Mittelwert 3	**5 Jahre**	**-22,9**	**-37,4**	**-17,4**					
3-1	10J	-38,4	-43,5	-20,2					
3-2	10J	-46,9	-54,1	-29,7					
3-3	10J	-49,4	-54,7	-44,5					
Mittelwert 3	**10 Jahre**	**-44,9**	**-50,8**	**-31,5**	**Mittelwert 2-4**	**Baseline**	**-1,1**	**-1,1**	**7,7**
3-1	15J	-40,5	-43,4	-14,9	**Mittelwert 2-4**	**1 Jahr**	**-15,0**	**-14,8**	**3,5**
3-2	15J	-38,6	-41,5	-6,7	**Mittelwert 2-4**	**5 Jahre**	**-10,9**	**-17,7**	**-7,3**
3-3	15J	-54,0	-54,0	-18,5	**Mittelwert 2-4**	**10 Jahre**	**-25,2**	**-32,1**	**-20,8**
Mittelwert 3	**15 Jahre**	**-44,4**	**-46,3**	**-13,4**	**Mittelwert 2-4**	**15 Jahre**	**-25,4**	**-32,6**	**-13,3**

Grau unterlegter Wert: nicht messbarer Füllungsüberschuss, 1-Jahreswert übernommen (nach Randabbruch messbar)

Füllung 05

Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung	Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung
10-1	B	0,0	0,0	0,0	12-1	B	0,0	0,0	0,0
10-2	B	0,0	0,0	-1,4	12-2	B	0,0	0,0	0,0
10-3	B	0,0	-3,1	0,0	12-3	B	0,0	0,0	0,0
Mittelwert 10	**Baseline**	**0,0**	**-1,0**	**-0,5**	**Mittelwert 12**	**Baseline**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
10-1	1J	-8,4	-8,4	4,3	12-1	1J	0,0	-5,8	0,0
10-2	1J	-9,8	-12,0	0,9	12-2	1J	0,0	0,0	0,0
10-3	1J	-11,8	-12,9	-0,2	12-3	1J	0,0	0,0	0,0
Mittelwert 10	**1 Jahr**	**-10,0**	**-11,1**	**1,7**	**Mittelwert 12**	**1 Jahr**	**0,0**	**-1,9**	**0,0**
10-1	5J	-13,6	-23,8	-7,2	12-1	5J	-2,8	-4,5	-0,9
10-2	5J	-12,9	-18,5	-3,1	12-2	5J	-15,2	-15,2	-10,1
10-3	5J	-19,4	-30,0	-27,8	12-3	5J	-12,0	-31,9	-25,4
Mittelwert 10	**5 Jahre**	**-15,3**	**-24,1**	**-12,7**	**Mittelwert 12**	**5 Jahre**	**-10,0**	**-17,2**	**-12,1**
10-1	10J	-35,0	-37,8	-15,7	12-1	10J	-14,0	-23,2	-23,2
10-2	10J	-23,2	-26,9	-8,7	12-2	10J	-15,1	-29,7	-27,2
10-3	10J	-20,8	-40,2	-20,7	12-3	10J	-29,8	-36,6	-36,6
Mittelwert 10	**10 Jahre**	**-26,3**	**-35,0**	**-15,0**	**Mittelwert 12**	**10 Jahre**	**-19,6**	**-29,8**	**-29,0**
10-1	15J	-44,3	-47,2	-4,3	12-1	15J	-24,4	-32,1	-29,1
10-2	15J	-30,0	-30,0	-7,7	12-2	15J	-27,5	-37,2	-22,2
10-3	15J	-36,5	-36,5	-9,8	12-3	15J	-52,8	-52,8	-41,0
Mittelwert 10	**15 Jahre**	**-36,9**	**-37,9**	**-7,3**	**Mittelwert 12**	**15 Jahre**	**-34,9**	**-40,7**	**-30,8**
11-1	B	0,0	0,0	0,0					
11-2	B	0,0	0,0	0,0					
11-3	B	0,0	0,0	0,0					
Mittelwert 11	**Baseline**	**0,0**	**0,0**	**9,2**					
11-1	1J	0,0	0,0	9,2					
11-2	1J	0,0	0,0	11,8					
11-3	1J	0,0	0,0	6,5					
Mittelwert 11	**1 Jahr**	**0,0**	**0,0**	**9,2**					
11-1	5J	-22,5	-22,5	-17,6					
11-2	5J	-25,0	-25,0	-8,8					
11-3	5J	-52,6	-52,6	-20,7					
Mittelwert 11	**5 Jahre**	**-33,4**	**-33,4**	**-15,7**					
11-1	10J	-34,3	-39,7	-26,9					
11-2	10J	-41,7	-49,2	-35,5					
11-3	10J	-73,7	-73,7	-57,6					
Mittelwert 11	**10 Jahre**	**-49,9**	**-54,2**	**-40,0**	**Mittelwert 10-12**	**Baseline**	**0,0**	**-0,3**	**2,9**
11-1	15J	-13	-13,8	-11,4	**Mittelwert 10-12**	**1 Jahr**	**-3,3**	**-4,3**	**3,6**
11-2	15J	-26,5	-32,4	-30,6	**Mittelwert 10-12**	**5 Jahre**	**-19,6**	**-24,9**	**-13,5**
11-3	15J	-31,2	-31,2	-18,7	**Mittelwert 10-12**	**10 Jahre**	**-32,0**	**-39,7**	**-28,0**
Mittelwert 11	**15 Jahre**	**-23,6**	**-25,8**	**-20,2**	**Mittelwert 10-12**	**15 Jahre**	**-31,8**	**-34,8**	**-19,4**

Grau unterlegter Wert: nicht messbarer Füllungsüberschuss, 1-Jahreswert übernommen (nach Randabbruch messbar)

Füllung 06

Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung	Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung
10-1	B	0,0	0,0	0,0	12-1	B	0,0	0,0	0,0
10-2	B	0,0	0,0	0,0	12-2	B	0,0	0,0	0,0
10-3	B	0,0	0,0	0,0	12-3	B	0,0	0,0	0,0
Mittelwert 10	**Baseline**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**Mittelwert 12**	**Baseline**	**0,0**	**0,0**	**18,2**
10-1	1J	0,0	6,5	6,5	12-1	1J	-1,7	-1,7	35,5
10-2	1J	-3,1	-3,1	3,4	12-2	1J	-6,2	-6,2	14,3
10-3	1J	-13,2	-15,2	-11,7	12-3	1J	-3,5	-3,5	4,8
Mittelwert 10	**1 Jahr**	**-5,4**	**-3,9**	**-0,6**	**Mittelwert 12**	**1 Jahr**	**-3,8**	**-3,8**	**18,2**
10-1	5J	-15,0	-15,0	-12,1	12-1	5J	-31,7	-38,7	-10,6
10-2	5J	-17,7	-17,7	-14,0	12-2	5J	-53,0	-58,0	-11,4
10-3	5J	-17,3	-18,0	-14,0	12-3	5J	-28,2	-32,2	-20,8
Mittelwert 10	**5 Jahre**	**-16,7**	**-16,9**	**-13,4**	**Mittelwert 12**	**5 Jahre**	**-37,6**	**-43,0**	**-14,3**
10-1	10J	-34,3	-34,3	-18,0	12-1	10J	-43,7	-43,7	-11,2
10-2	10J	-37,8	-43,8	-31,1	12-2	10J	-52,9	-52,9	-15,9
10-3	10J	-44,4	-49,7	-39,0	12-3	10J	-45,9	-45,9	-39,5
Mittelwert 10	**10 Jahre**	**-38,8**	**-42,6**	**-29,4**	**Mittelwert 12**	**10 Jahre**	**-47,5**	**-47,5**	**-22,2**
10-1	15J	-48,7	-69,1	-19,7	12-1	15J	-37,6	-41,8	-14,1
10-2	15J	-66,8	-92,1	-18,4	12-2	15J	-30,7	-30,7	0,0
10-3	15J	-89,9	-89,9	-59,2	12-3	15J	-59,9	-59,9	-26,7
Mittelwert 10	**15 Jahre**	**-68,5**	**-83,7**	**-32,4**	**Mittelwert 12**	**15 Jahre**	**-42,7**	**-44,1**	**-13,6**
11-1	B	0,0	0,0	0,0					
11-2	B	0,0	0,0	0,0					
11-3	B	0,0	0,0	0,0					
Mittelwert 11	**Baseline**	**0,0**	**0,0**	**0,0**					
11-1	1J	-2,4	-7,2	-1,2					
11-2	1J	-3,5	-10,5	-3,5					
11-3	1J	-5,4	-15,2	-5,4					
Mittelwert 11	**1 Jahr**	**-3,8**	**-11,0**	**-3,4**					
11-1	5J	-2,7	-2,7	-2,1					
11-2	5J	-13,7	-13,7	-13,7					
11-3	5J	-10,5	-10,5	-10,5					
Mittelwert 11	**5 Jahre**	**-9,0**	**-9,0**	**-8,8**					
11-1	10J	-4,2	-5,0	-3,3					
11-2	10J	-8,2	-8,2	-8,2					
11-3	10J	-4,4	-4,4	-4,4					
Mittelwert 11	**10 Jahre**	**-5,6**	**-5,9**	**-5,3**	**Mittelwert 10-12**	**Baseline**	**0,0**	**0,0**	**6,1**
11-1	15J	-1,7	-1,7	-0,7	**Mittelwert 10-12**	**1 Jahr**	**-4,3**	**-6,2**	**4,7**
11-2	15J	0,0	0,0	0,0	**Mittelwert 10-12**	**5 Jahre**	**-21,1**	**-23,0**	**-12,1**
11-3	15J	-2,1	-2,1	-0,3	**Mittelwert 10-12**	**10 Jahre**	**-30,6**	**-32,0**	**-19,0**
Mittelwert 11	**15 Jahre**	**-1,3**	**-1,3**	**-0,3**	**Mittelwert 10-12**	**15 Jahre**	**-37,5**	**-43,0**	**-15,5**

Grau unterlegter Wert: nicht messbarer Füllungsüberschuss, 1-Jahreswert übernommen (nach Randabbruch messbar)

Füllung 07

Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung	Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung
11-1	B	-1,2	-1,2	10,9	13-1	B	-11,5	-11,5	-11,5
11-2	B	-2,0	-2,0	4,4	13-2	B	-10,8	-14,7	-2,3
11-3	B	-0,8	-0,8	4,1	13-3	B	-21,8	-21,8	-10,0
Mittelwert 11	**Baseline**	**-1,3**	**-1,3**	**6,5**	**Mittelwert 13**	**Baseline**	**-14,7**	**-16,0**	**-7,9**
11-1	1J	-2,5	-2,5	3,1	13-1	1J	-39,0	-39,0	-30,0
11-2	1J	5,2	5,2	5,2	13-2	1J	-29,4	-35,2	-28,1
11-3	1J	-5,2	-5,2	-3,9	13-3	1J	-42,4	-47,3	-31,2
Mittelwert 11	**1 Jahr**	**-0,8**	**-0,8**	**1,5**	**Mittelwert 13**	**1 Jahr**	**-36,9**	**-40,5**	**-29,8**
11-1	5J	-5,7	-5,7	-3,9	13-1	5J	-85,0	-100,2	-76,5
11-2	5J	-33,8	-38,0	-34,0	13-2	5J	-56,3	-71,9	-48,6
11-3	5J	-33,6	-37,3	-37,3	13-3	5J	-93,6	-93,5	-81,6
Mittelwert 11	**5 Jahre**	**-24,4**	**-27,0**	**-25,1**	**Mittelwert 13**	**5 Jahre**	**-78,3**	**-88,5**	**-68,9**
11-1	10J	-5,6	-5,6	-5,6	13-1	10J	-26,2	-44,6	-44,6
11-2	10J	-22,6	-22,6	-22,6	13-2	10J	-26,9	-38,7	-38,7
11-3	10J	-32,7	-32,7	-32,7	13-3	10J	-43,4	-61,3	-61,3
Mittelwert 11	**10 Jahre**	**-20,3**	**-20,3**	**-20,3**	**Mittelwert 13**	**10 Jahre**	**-32,2**	**-48,2**	**-48,2**
11-1	15J	-2,9	-2,9	-2,9	13-1	15J	-19,8	-37,8	-37,8
11-2	15J	-11,8	-11,8	-11,8	13-2	15J	-32,2	-42,6	-39,3
11-3	15J	-16,9	-16,8	-16,8	13-3	15J	-57,9	-64,5	-64,5
Mittelwert 11	**15 Jahre**	**-10,5**	**-10,5**	**-10,5**	**Mittelwert 13**	**15 Jahre**	**-36,6**	**-48,3**	**-47,2**
12-1	B	3,2	3,2	3,2					
12-2	B	-7,1	-7,1	0,0					
12-3	B	-13,3	-13,3	-13,3					
Mittelwert 12	**Baseline**	**-5,7**	**-5,7**	**-3,4**					
12-1	1J	-20,5	-20,5	-13,4					
12-2	1J	-23,6	-23,6	-9,0					
12-3	1J	-17,4	-17,4	-6,1					
Mittelwert 12	**1 Jahr**	**-20,5**	**-20,5**	**-9,5**					
12-1	5J	-10,1	-27,7	-24,6					
12-2	5J	-8,1	-12,3	-8,8					
12-3	5J	-10,7	-17,8	-8,0					
Mittelwert 12	**5 Jahre**	**-9,6**	**-19,3**	**-13,8**					
12-1	10J	-11,2	-21,9	-20,3					
12-2	10J	-2,0	-17,4	-12,3					
12-3	10J	-12,7	-22,2	-17,7					
Mittelwert 12	**10 Jahre**	**-8,6**	**-20,5**	**-16,8**	**Mittelwert 11-13**	**Baseline**	**-7,3**	**-7,7**	**-1,6**
12-1	15J	-1,5	-1,5	-1,5	**Mittelwert 11-13**	**1 Jahr**	**-19,4**	**-20,6**	**-12,6**
12-2	15J	-6,6	-15,5	-15,5	**Mittelwert 11-13**	**5 Jahre**	**-37,4**	**-44,9**	**-35,9**
12-3	15J	-12,4	-14,8	-14,8	**Mittelwert 11-13**	**10 Jahre**	**-20,4**	**-29,7**	**-28,4**
Mittelwert 12	**15 Jahre**	**-6,8**	**-10,6**	**-10,6**	**Mittelwert 11-13**	**15 Jahre**	**-18,0**	**-23,1**	**-22,8**

Füllung 08

Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung	Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung
2-1	B	-3,0	-3,8	-3,8	4-1	B	-4,7	-4,7	-3,5
2-2	B	-9,2	-12,0	-11,4	4-2	B	-1,4	-1,4	-1,4
2-3	B	-9,5	-10,5	-10,5	4-3	B	0,0	0,0	0,0
Mittelwert 2	**Baseline**	**-7,2**	**-8,8**	**-8,6**	**Mittelwert 4**	**Baseline**	**-2,0**	**-2,0**	**-1,6**
2-1	1J	-21,4	-30,1	-26,2	4-1	1J	-16,2	-17,6	-13,7
2-2	1J	-20,1	-28,1	-23,1	4-2	1J	-27,8	-28,1	0,0
2-3	1J	-26,9	-37,7	-29,3	4-3	1J	-6,3	-6,3	0,0
Mittelwert 2	**1 Jahr**	**-22,8**	**-32,0**	**-26,2**	**Mittelwert 4**	**1 Jahr**	**-16,8**	**-17,3**	**-4,6**
2-1	5J	-61,7	-70,6	-70,6	4-1	5J	-21,0	-22,1	0,0
2-2	5J	-62,5	-75,1	-75,1	4-2	5J	-15,7	-17,1	0,0
2-3	5J	-57,0	-73,0	-73,0	4-3	5J	-40,9	-50,6	-50,1
Mittelwert 2	**5 Jahre**	**-60,4**	**-72,9**	**-72,9**	**Mittelwert 4**	**5 Jahre**	**-25,9**	**-29,9**	**-16,7**
2-1	10J	-48,7	-73,5	-73,5	4-1	10J	-30,8	-35,7	-32,5
2-2	10J	-47,2	-83,4	-83,4	4-2	10J	-28,6	-32,0	-23,4
2-3	10J	-38,0	-83,8	-83,8	4-3	10J	-47,9	-47,9	-44,8
Mittelwert 2	**10 Jahre**	**-44,6**	**-80,2**	**-80,2**	**Mittelwert 4**	**10 Jahre**	**-35,8**	**-38,5**	**-33,6**
2-1	15J	-16,7	-47,7	-43,1	4-1	15J	-23,1	-28,9	-27,9
2-2	15J	-17,0	-48,1	-43,0	4-2	15J	-25,8	-27,5	-16,3
2-3	15J	-15,0	-50,5	-45,9	4-3	15J	-56,7	-59,2	-51,1
Mittelwert 2	**15 Jahre**	**-16,2**	**-48,8**	**-44,0**	**Mittelwert 4**	**15 Jahre**	**-35,2**	**-38,5**	**-31,8**
3-1	B	0	0,0	0,0					
3-2	B	0	0,0	0,0					
3-3	B	0	0,0	0,0					
Mittelwert 3	**Baseline**	**0,0**	**0,0**	**0,0**					
3-1	1J	-14,2	-14,4	-14,2					
3-2	1J	-10,5	-10,5	-10,5					
3-3	1J	-4,6	-4,6	-4,6					
Mittelwert 3	**1 Jahr**	**-9,8**	**-9,8**	**-9,8**					
3-1	5J	-7,2	-7,2	-7,2					
3-2	5J	-10,6	-10,6	-10,6					
3-3	5J	-15,1	-15,1	-15,1					
Mittelwert 3	**5 Jahre**	**-11,0**	**-11,0**	**-11,0**					
3-1	10J	-5,4	-6,2	-5,4					
3-2	10J	-8,9	-11,5	-8,9					
3-3	10J	-6,5	-6,8	-6,5					
Mittelwert 3	**10 Jahre**	**-6,9**	**-8,2**	**-6,9**	**Mittelwert 2-4**	**Baseline**	**-3,1**	**-3,6**	**-3,4**
3-1	15J	-5,1	-12,0	-5,1	**Mittelwert 2-4**	**1 Jahr**	**-16,4**	**-19,7**	**-13,5**
3-2	15J	-8,9	-15,2	-8,9	**Mittelwert 2-4**	**5 Jahre**	**-32,4**	**-37,9**	**-33,5**
3-3	15J	-7,9	-10,6	-7,9	**Mittelwert 2-4**	**10 Jahre**	**-29,1**	**-42,3**	**-40,2**
Mittelwert 3	**15 Jahre**	**-7,3**	**-12,6**	**-7,3**	**Mittelwert 2-4**	**15 Jahre**	**-19,6**	**-33,3**	**-27,7**

Füllung 09

Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung	Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung
1-1	B	-3,1	-4,9	-4,9	3-1	B	-7,8	-7,8	-7,8
1-2	B	0,0	0,0	0,0	3-2	B	-2,9	-2,9	-2,9
1-3	B	0,0	0,0	0,0	3-3	B	-3,5	-5,3	-2,5
Mittelwert 1	**Baseline**	**-1,0**	**-1,6**	**-1,6**	**Mittelwert 3**	**Baseline**	**-4,7**	**-5,3**	**-4,4**
1-1	1J	0,0	-62,8	-62,8	3-1	1J	-14,4	-20,8	-18,2
1-2	1J	0,0	-22,3	-22,3	3-2	1J	-13,2	-22,0	-7,9
1-3	1J	0,0	-34,2	-34,2	3-3	1J	-9,7	-13,9	-12,0
Mittelwert 1	**1 Jahr**	**0,0**	**-39,8**	**-39,8**	**Mittelwert 3**	**1 Jahr**	**-12,4**	**-18,9**	**-12,7**
1-1	5J	-36,0	-74,1	-64,2	3-1	5J	-55,5	-55,5	-48,3
1-2	5J	-37,3	-38,8	-33,3	3-2	5J	-15,8	-15,8	-7,8
1-3	5J	-35,8	-45,8	-40,8	3-3	5J	-32,3	-34,0	-16,9
Mittelwert 1	**5 Jahre**	**-36,4**	**-52,9**	**-46,1**	**Mittelwert 3**	**5 Jahre**	**-34,5**	**-35,1**	**-24,3**
1-1	10J	-86,6	-95,8	-91,2	3-1	10J	-28,5	-39,0	-35,0
1-2	10J	-39,4	-63,6	-43,6	3-2	10J	-6,5	-10,1	-10,1
1-3	10J	-37,8	-40,2	-7,6	3-3	10J	-35,8	-35,8	-12,8
Mittelwert 1	**10 Jahre**	**-54,6**	**-66,5**	**-47,5**	**Mittelwert 3**	**10 Jahre**	**-23,6**	**-28,3**	**-19,3**
1-1	15J	-19,9	-30,9	-30,9	3-1	15J	-7,2	-17,7	-13,0
1-2	15J	-15,6	-46,5	-46,5	3-2	15J	-27,2	-36,6	-18,7
1-3	15J	-9,6	-44,7	-44,7	3-3	15J	-12,9	-19,3	-19,3
Mittelwert 1	**15 Jahre**	**-15,0**	**-40,7**	**-40,7**	**Mittelwert 3**	**15 Jahre**	**-15,8**	**-24,5**	**-17,0**
2-1	B	0,0	-8,0	-2,0					
2-2	B	0,0	-14,7	-10,5					
2-3	B	0,0	-4,8	-4,8					
Mittelwert 2	**Baseline**	**0,0**	**-9,2**	**-5,8**					
2-1	1J	-3,0	-6,8	-6,8					
2-2	1J	-8,5	-13,3	-13,3					
2-3	1J	-4,5	-6,7	-6,7					
Mittelwert 2	**1 Jahr**	**-5,3**	**-8,9**	**-8,9**					
2-1	5J	-19,8	-40,3	-9,3					
2-2	5J	-13,9	-16,4	-14,4					
2-3	5J	-12,7	-23,9	-14,6					
Mittelwert 2	**5 Jahre**	**-15,5**	**-26,9**	**-12,8**					
2-1	10J	-29,8	-45,2	-31,1					
2-2	10J	-8,4	-16,3	-9,5					
2-3	10J	-7,4	-10,5	-5,8					
Mittelwert 2	**10 Jahre**	**-15,2**	**-24,0**	**-15,5**	**Mittelwert 1-3**	**Baseline**	**-1,9**	**-5,4**	**-3,9**
2-1	15J	-17,0	-21,8	-18,2	**Mittelwert 1-3**	**1 Jahr**	**-5,9**	**-22,5**	**-20,5**
2-2	15J	-17,9	-21,2	-17,3	**Mittelwert 1-3**	**5 Jahre**	**-28,8**	**-38,3**	**-27,7**
2-3	15J	-8,9	-8,9	-6,7	**Mittelwert 1-3**	**10 Jahre**	**-31,1**	**-39,6**	**-27,4**
Mittelwert 2	**15 Jahre**	**-14,6**	**-17,3**	**-14,1**	**Mittelwert 1-3**	**15 Jahre**	**-15,1**	**-27,5**	**-23,9**

Füllung 10

Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung	Messstelle - Messlinie	Kontroll-zeit	Randvertiefung (µm) im Schmelz	Randvertiefung (µm) in der Füllung	Stufe (µm) Schmelz - Füllung
10-1	B	0,0	10,3	10,3	13-1	B	0	0	0
10-2	B	0,0	7,9	7,9	13-2	B	0	0	0
10-3	B	0,0	5,5	5,5	13-3	B	0	-8,6	-8,6
Mittelwert 10	**Baseline**	**0,0**	**7,9**	**7,9**	**Mittelwert 13**	**Baseline**	**0,0**	**-2,9**	**-2,9**
10-1	1J	0,0	3,5	3,5	13-1	1J	-59,7	-59,7	-59,7
10-2	1J	0,0	3,6	3,6	13-2	1J	-35,1	-35,1	-35,1
10-3	1J	0,0	7,0	7,0	13-3	1J	-14,7	-14,7	-14,7
Mittelwert 10	**1 Jahr**	**0,0**	**4,7**	**4,7**	**Mittelwert 13**	**1 Jahr**	**-36,5**	**-36,5**	**-36,5**
10-1	5J	-10,7	-21,9	-21,9	13-1	5J	-5,3	-28,6	-28,6
10-2	5J	-5,5	-16,6	-16,6	13-2	5J	-10	-54,2	-54,2
10-3	5J	-5,2	-9,8	-9,8	13-3	5J	-16,3	-41,4	-41,4
Mittelwert 10	**5 Jahre**	**-7,1**	**-16,1**	**-16,1**	**Mittelwert 13**	**5 Jahre**	**-10,5**	**-41,4**	**-41,4**
10-1	10J	0,0	-26,9	-26,9	13-1	10J	-94,5	-94,5	-94,5
10-2	10J	0,0	-7,2	-7,2	13-2	10J	-73,4	-78,9	-78,9
10-3	10J	-3,0	-12,2	-12,2	13-3	10J	-35,1	-39,3	-39,3
Mittelwert 10	**10 Jahre**	**-1,0**	**-15,4**	**-15,4**	**Mittelwert 13**	**10 Jahre**	**-67,7**	**-70,9**	**-70,9**
10-1	15J	0,0	-8,2	-8,2	13-1	15J	-2,0	-11,2	-7,1
10-2	15J	-1,0	-13,8	-13,8	13-2	15J	-8,0	-18,2	-18,2
10-3	15J	-5,0	-16,3	-16,3	13-3	15J	-15,0	-26,8	-26,8
Mittelwert 10	**15 Jahre**	**-2,0**	**-12,8**	**-12,8**	**Mittelwert 13**	**15 Jahre**	**-8,3**	**-18,7**	**-17,4**
11-1	B	-26,1	-26,1	-23,0					
11-2	B	-25,5	-28,7	-28,7					
11-3	B	-12,4	-12,4	-12,4					
Mittelwert 11	**Baseline**	**-21,3**	**-22,4**	**-21,4**					
11-1	1J	-13,5	-16,4	-13,1					
11-2	1J	-28,3	-34,0	-34,0					
11-3	1J	-14,2	-29,4	-29,4					
Mittelwert 11	**1 Jahr**	**-18,7**	**-26,6**	**-25,5**					
11-1	5J	-14,1	-26,7	-26,7					
11-2	5J	-18,4	-23,6	-23,6					
11-3	5J	-17,2	-19,8	-19,8					
Mittelwert 11	**5 Jahre**	**-16,6**	**-23,4**	**-23,4**					
11-1	10J	-81,1	-81,1	-58,3					
11-2	10J	-62,6	-71,7	-71,7					
11-3	10J	-29,0	-47,0	-47,0					
Mittelwert 11	**10 Jahre**	**-57,6**	**-66,6**	**-59,0**	**Mittelwert 10-13**	**Baseline**	**-7,1**	**-5,8**	**-5,4**
11-1	15J	-41,8	-41,8	-33,6	**Mittelwert 10-13**	**1 Jahr**	**-18,4**	**-19,5**	**-19,1**
11-2	15J	-32,2	-47,4	-47,4	**Mittelwert 10-13**	**5 Jahre**	**-11,4**	**-27,0**	**-27,0**
11-3	15J	-13,8	-42,5	-42,5	**Mittelwert 10-13**	**10 Jahre**	**-42,1**	**-51,0**	**-48,4**
Mittelwert 11	**15 Jahre**	**-29,3**	**-43,9**	**-41,2**	**Mittelwert 10-13**	**15 Jahre**	**-13,2**	**-25,1**	**-23,8**

Lebenslauf

Name, Vorname	Dietz, Wolfram
Geburtsdatum	08.01.1941
Geburtsort	Lützen
Familienstand	verheiratet

Schulbildung

1947 – 1955	Grundschule: Jonhannesschule I, Halle/ Saale
1955 – 1959	Oberschule: Adolf-Reichwein-Schule, Halle/ Saale
Abschluss	Reifezeugnis

Studium

1959-1965	Martin Luther-Universität Halle-Wittenberg und Diplomarbeit am Institut für Festkörperphysik und Elektronenmikroskopie Halle der Akademie der Wissenschaften der DDR
Abschluss 10.9.1965	Diplom-Physiker

Qualifizierung

1979-1990	Teilnahme an den Schulen für Elektronenmikroskopie am Internationalen Zentrum für Elektronenmikroskopie der COMECON-Länder in Halle
1982	Abschluss als Fach-Physiker der Medizin (Zytologie/ Histologie), Postgraduales Studium an der Akademie für Ärztliche Fortbildung der DDR, Berlin

Berufliche Eckdaten

4.1.1965-1981	Medizinische Akademie Erfurt, Institut für Pathologische Anatomie, Labor Elektronenmikroskopie: wissenschaftlicher Mitarbeiter
1981-1989	Zentrale Elektronenmikroskopische Abteilung der Medizinischen Akademie Erfurt (MAE): stellvertretender Abteilungsleiter
1989-1994	Leiter der Zentralen Elektronenmikroskopischen Abteilung der MAE, später Medizinischen Hochschule Erfurt (MHE)
1994-2000	Leiter des Labors Elektronenmikroskopie in der Arbeitsgruppe Elektronenmikroskopie und Histochemie im Forschungszentrum der Friedrich-Schiller-Universität Jena in Erfurt
2000-2006	Mit Umsetzung des Erfurter Labors Elektronenmikroskopie an das Institut für Ultrastrukturforschung (später Elektronenmikroskopisches Zentrum) am Klinikum der Friedrich-Schiller-Universität Jena: wissenschaftlicher Mitarbeiter bis zum 65. Lebensjahr
2006-2008	wissenschaftlicher Mitarbeiter (über Drittmittel) bis zum 67. Lebensjahr

Wissenschaftliche Arbeit

1967-2012	52 Publikationen: elektronenmikroskopische Arbeiten für die Medizin und Zahnmedizin, Erst- oder Zweitautor
1969-2009	49 Vorträge/ Poster (Abstracts): elektronenmikroskopische Arbeiten für die Medizin und Zahnmedizin, Erst- oder Zweitautor

Erfurt, den 05.03.2012

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt, dass

ich die zur Erlangung des Grades eines Doctor rerum medicinalium vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema „Longitudinale mikromorphologische 15-Jahres-Bewertung von Kompositfüllungen im Seitenzahnbereich unter Anwendung dreidimensionaler Rasterelektronenmikroskopie“ selbst und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt habe,

ich alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und die Literatur, deren Ergebnisse in die Arbeit eingeflossen sind, angegeben habe,

mich nachfolgend genannte Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Erstellung des Manuskriptes unterstützt haben: Herr Prof. Dr. Dr.h.c. P. Gängler [1], Frau Oberärztin Dr. R. Montag [2], Herr Dr. M. Walther [3] und Frau Dr. U. Kraft [2],

ich diese Dissertation in dieser oder ähnlicher Form bei keiner anderen Hochschule im Rahmen eines Promotionsgesuchs eingereicht habe.

Erfurt, den 05.03.2012

[1] Abteilung für Zahnerhaltung und Präventive Zahnmedizin, Universität Witten/Herdecke
[2] Klinik für Konservierende Zahnheilkunde am Universitätsklinikum der Friedrich-Schiller-Universität Jena
[3] Institut für Medizinische Statistik, Informatik und Dokumentation am Universitätsklinikum der Friedrich-Schiller-Universität Jena

Danksagung

Für die Vergabe des interessanten Promotionsthemas und die umfangreiche Unterstützung während der damit verbundenen langjährigen wissenschaftlichen Zusammenarbeit in Erfurt, Jena und Witten, und letztendlich für den vielfachen Rat bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich ganz besonders bei Herrn Professor Dr. Dr. h.c. P. Gängler bedanken. Ich durfte zu Beginn dieses Projektes an der Medizinischen Akademie/Hochschule Erfurt die zugehörigen elektronenmikroskopischen Arbeiten betreuen, am Universitätsklinikum Jena fortsetzen und in Kooperation mit der Universität Witten/Herdecke zu dem jetzigen Abschluss bringen.

Ebenso gilt mein Dank Frau Oberärztin Dr. R. Montag, Universitätsklinikum Jena, für die vielen konstruktiven Diskussionen bei mehr als 15-jähriger Arbeit am Elektronenmikroskop und Ratschläge bei der Bearbeitung dieses Themas, insbesondere für die Unterstützung bei der Interpretation der von Ihr erhobenen klinischen Befunde.

Mein Dank gilt Frau Dr. U. Kraft, Universitätsklinikum Jena, bei der Erarbeitung und Anwendung der Replikatechnik und Frau S. Schön für die Mühen im Zusammenhang mit der präzisen Erstellung der Replikate über den gesamten Untersuchungszeitraum.

Bei Herrn Dr. M. Walther, Universitätsklinikum Jena, möchte ich mich für die fachliche Hilfe bei der Erstellung der statistischen Analysen bedanken.

Frau Margot Voigt, Frau Gabriele Weber, Frau Renate Kaiser, Frau Inge-Marie Herrmann und Frau Christine Kämnitz , Medizinische Hochschule Erfurt bzw. Universitätsklinikum Jena, danke ich für die Ausführung der elektronenmikroskopischen Präparationsarbeiten.

Bei meinen Jenaer Kollegen Dr. W. Richter , PD Dr. M. Westermann und Dipl.-Ing. Frank Steiniger möchte ich mich für manchen fachlichen Rat und technische Unterstützung bedanken.

Last, not least gilt mein ganz besonderer Dank Frau Professor Dr. I. Hoyer für langjährigen Rat und viele Diskussionen, die, beginnend bei der Arbeit am Elektronenmikroskop bis hin zur Erstellung von Publikationen, Vorträgen und letztendlich dieser Arbeit, außerordentlich hilfreich waren.