

5 Ergebnisse

5.1. Quantitative Auswertung

5.1.1. Penetrationstiefe

Die mittlere Läsionstiefe nach der ersten Demineralisation betrug $94,3 \pm 19,7 \mu\text{m}$. Die Läsionstiefen der Kontrollgruppen wiesen zwischen den Materialien keine signifikanten Unterschiede auf ($p > 0,05$; ANOVA). Abbildung 10 zeigt die Ergebnisse der Auswertung der Penetrationstiefen. Nach 15 s Penetrationszeit wurde bei Resulcin Monobond ($48,5 \pm 20,3 \mu\text{m}$) die größte Penetrationstiefe festgestellt. Nach 30 s Penetrationszeit erreichte Excite ($105,3 \pm 38,3 \mu\text{m}$) die größte Tiefe und zeigte somit zusammen mit Resulcin Monobond die besten Penetrationseigenschaften. Die geringsten Tiefen erreichte Solobond M (15 s: $1,5 \pm 2,2 \mu\text{m}$; 30 s: $3,6 \pm 2,2 \mu\text{m}$) und penetrierte damit bei einer Applikationszeit von 30 s signifikant schlechter als alle übrigen Materialien ($p < 0,05$; Bonferroni). Heliobond, Heliobond und Adper Prompt L-Pop penetrierten nach 30 s vergleichbar tief in die Läsionen ein ($p > 0,05$).

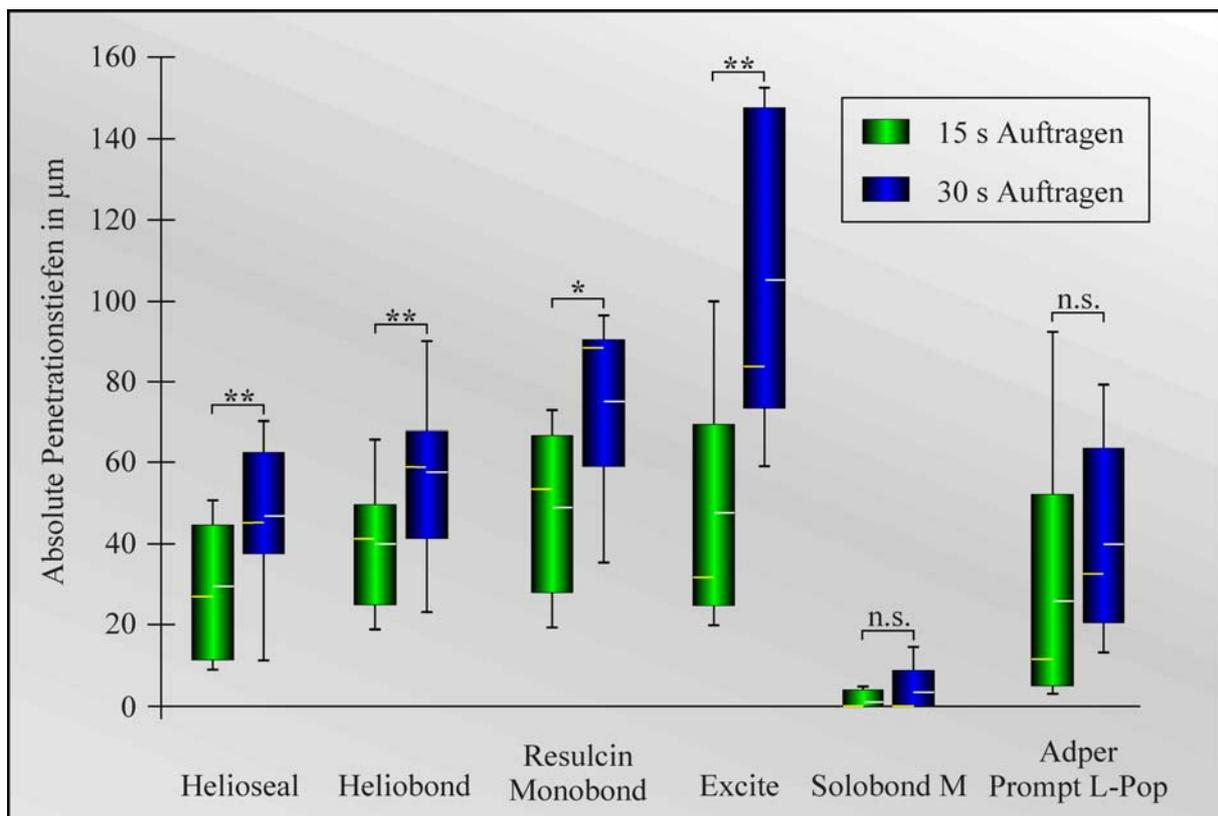


Abb. 10: Absolute Penetrationstiefe (μm) der getesteten Materialien nach 15 s (grün) und 30 s (blau) Penetrationszeit. Dargestellt sind Box-and-whiskers-plots mit den jeweiligen Quartilen sowie Medianen (gelb) und Mittelwerten (weiß). Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen sind mit Sternen gekennzeichnet ($p > 0,05$ n.s.; $p \leq 0,05$ *; $p \leq 0,01$ **; t-Test).

Eine Verlängerung der Penetrationszeit von 15 s auf 30 s führte bei allen Materialien zu einer Erhöhung der Penetrationstiefe. Diese war jedoch bei den Materialien Solobond M und Adper Prompt L-Pop nicht signifikant.

Abbildung 11 und Tabelle 5 zeigen die Ergebnisse für die Penetrationstiefe in Relation zur Läsionstiefe. Bei 15 s Penetrationsdauer erreichten Resulcin Monobond ($56,3 \pm 26,1$ %), Excite ($52,8 \pm 26,2$ %) und Heliobond ($49,9 \pm 22,3$ %) statistisch signifikant größere Tiefen als Solobond M ($1,8 \pm 2,7$ %) ($p < 0,01$; Bonferroni). Weitere signifikante Unterschiede zwischen den Materialien hinsichtlich der prozentualen Ausfüllung der Läsion waren nach dieser Zeit nicht nachweisbar ($p > 0,05$). Excite füllte nach 30 s Applikation die Läsion zu durchschnittlich $92,4 \pm 12,2$ % aus und erreichte damit die höchsten Werte. Resulcin Monobond erreichte mit durchschnittlich $80,4 \pm 19,2$ % statistisch vergleichbare Werte ($p > 0,05$). Heliobond und Adper Prompt L-Pop unterschieden sich nach 30 s nicht signifikant hinsichtlich ihrer relativen Penetrationstiefe ($p > 0,05$). Solobond M drang nach 30 s nur durchschnittlich $4,5 \pm 7,1$ % ein und penetrierte damit signifikant schlechter als alle anderen Materialien ($p < 0,001$).

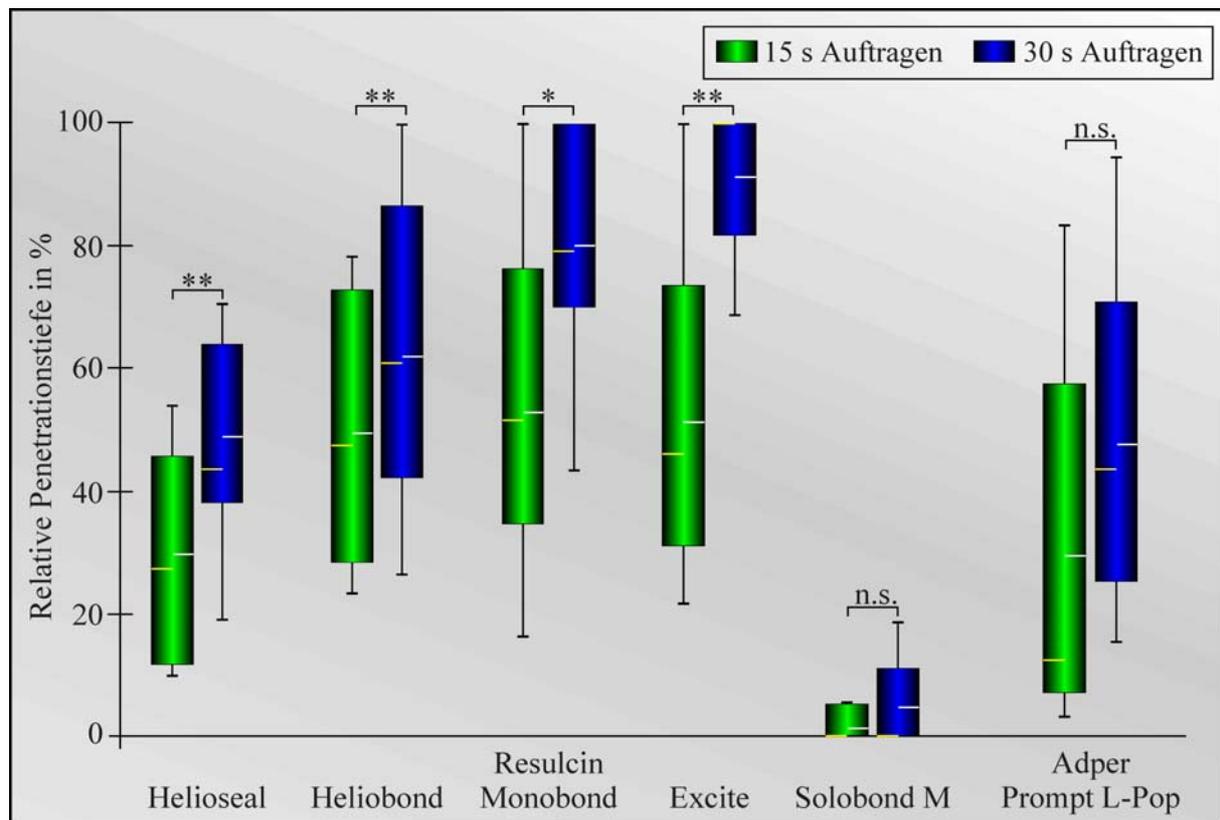


Abb. 11: Penetrationstiefe (%) der getesteten Materialien in Relation zur Läsionstiefe nach 15 s (grün) und 30 s (blau) Penetrationszeit. Die Abbildung zeigt Box-and-whiskers-plots mit den jeweiligen Quartilen sowie Medianen (gelb) und Mittelwerten (weiß). Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen sind mit Sternen gekennzeichnet ($p > 0,05$ n.s.; $p \leq 0,05$ *; $p \leq 0,01$ **; t-Test).

5.1.2. Sauerstoffinhibitionsschicht

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Auswertung der Sauerstoffinhibitionsschicht aufgeführt. Die stärkste Sauerstoffinhibitionsschicht bildete Adper Prompt L-Pop mit 13,7±19,8 µm nach 15 s aus. Wegen der geringen Penetrationstiefe des Materials Solobond M zeigte dieses die größten Werte der Sauerstoffinhibitionsschicht in Relation zur Penetrationstiefe (53 % nach 15 s Penetrationsdauer). Nach 30 s bildete Adper Prompt L-Pop signifikant dickere Sauerstoffinhibitionsschichten aus als Solobond M und Heliobond (p<0,05; Bonferroni). Alle anderen Materialien wiesen nach 30 s keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Dicke der Sauerstoffinhibitionsschicht auf (p>0,05). Nur bei Excite führte eine Verlängerung der Penetrationsdauer zu einem signifikanten Anstieg der Dicke der Sauerstoffinhibitionsschicht.

Tab. 4: Dicke der Sauerstoffinhibitionsschicht (µm) der getesteten Materialien

15 s Penetrationszeit				
Material	MW in µm	SD in µm	Signifikanz	Anteil an der Penetrationstiefe in %
Helioseal	4,4	1,1	AB	21,0
Heliobond	5,9	4,8	AB	18,0
Resulcin Monobond	5,7	1,6	AB	13,6
Excite	4,2	1,1	AB	12,8
Solobond M	0,8	1,2	B	53,0
Adper Prompt L-Pop	13,7	19,8	A	48,8
30 s Penetrationszeit				
Material	MW in µm	SD in µm	Signifikanz	Anteil an der Penetrationstiefe in %
Helioseal	5,6	2,0	AB	15,3
Heliobond	4,4	1,5	B	9,2
Resulcin Monobond	6,2	3,1	AB	9,5
Excite	6,8	2,1	AB	7,4
Solobond M	1,2	2,0	B	36,0
Adper Prompt L-Pop	12,3	11,3	A	26,4

Mittelwerte (MW), Standardabweichungen (SD) und Signifikanzen, sowie der prozentuale Anteil der sauerstoffinhibierten Schicht an der Penetrationstiefe. Gruppen mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant voneinander (p<0,05; Bonferroni).

5.1.3. Kompaktheit der Versieglerschicht

Der Messwert „Kompaktheit“ wurde für diese Studie entwickelt, um die qualitativen Eigenschaften der Versieglerschicht Homogenität und Vollständigkeit des Ausfließens objektiv bewerten zu können. Kompaktheits-Werte nahe 100 zeigen homogene, kompakte Versieglerschichten mit geringen Anteilen unversiegelten Schmelzes an, während niedrige Werte für inhomogene Versieglerschichten stehen.

Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse für die Kompaktheit der Versieglerschicht. Die Materialien Solobond M (15 s: $3,7 \pm 7,2$; 30 s: $10,8 \pm 21,0$) und Adper Prompt L-Pop (15 s: $11,3 \pm 14,3$; 30 s: $23,3 \pm 15,9$) wiesen sowohl nach 15 s als auch nach 30 s Penetrationszeit signifikant inhomogenere Versieglerschichten auf als die übrigen Materialien ($p < 0,05$; Bonferroni). Die homogensten Kunststoffschichten bildete nach 15 s Helioseal ($39,4 \pm 17,2$) und nach 30 s Resulcin Monobond ($68,3 \pm 8,1$).

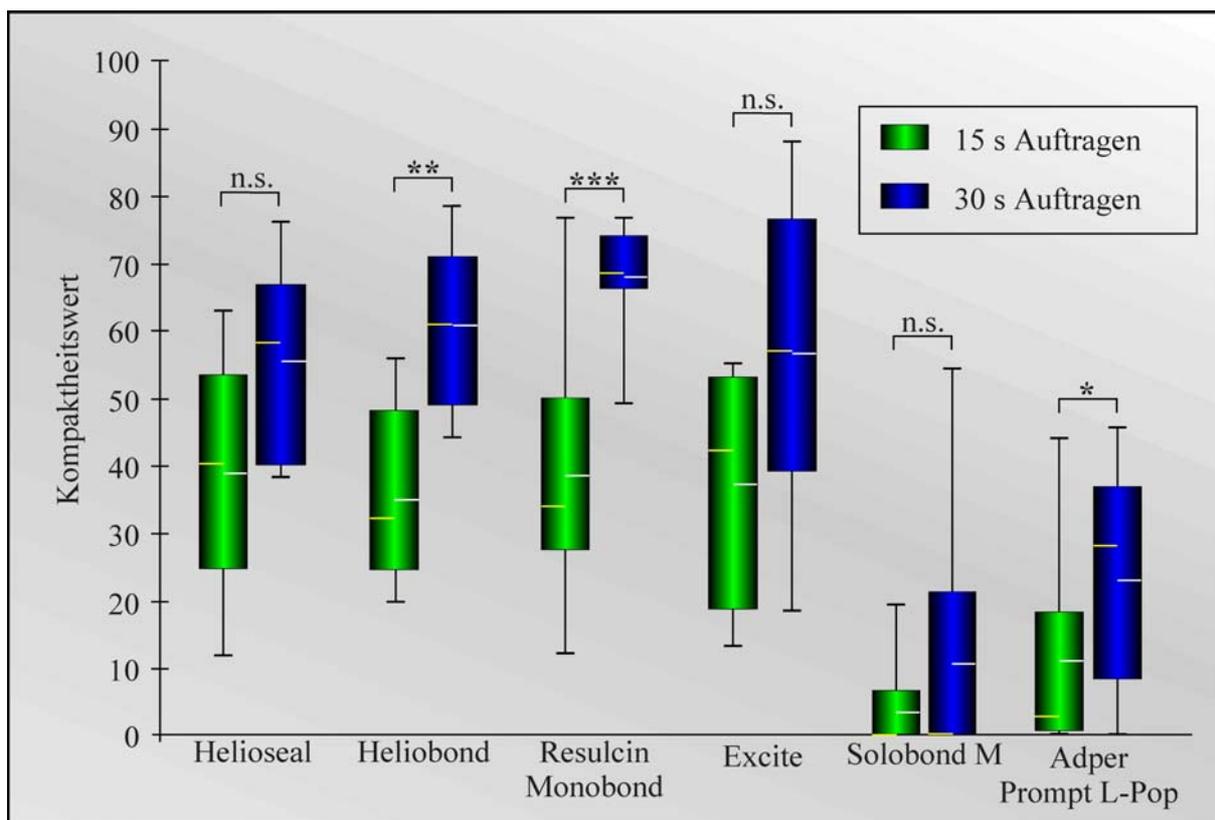


Abb. 12: Kompaktheit der ausgebildeten Versieglerschicht nach 15 s (grün) und 30 s (blau) Penetrationszeit in Box-and-whiskers-plots mit den jeweiligen Quartilen sowie Medianen (gelb). Geringe Werte zeigen eine unvollständige Versiegelung an. Ein Kompaktheitswert von 100% zeigt eine komplette Okklusion der Poren im untersuchten Bereich an. Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen sind mit Sternen gekennzeichnet ($p > 0,05$ n.s.; $p \leq 0,05$ *; $p \leq 0,01$ **; $p \leq 0,001$ ***; t-Test).

Eine Verlängerung der Penetrationszeit von 15 s auf 30 s führte nur bei den Materialien Heliobond, Resulcin Monobond und Adper Prompt L-Pop zu einer signifikanten Verbesserung der Kompaktheit. Bei allen anderen Materialien konnte eine statistisch nicht signifikante Verbesserung beobachtet werden.

5.1.4. Progression der Läsionstiefe

Abbildung 13 zeigt exemplarische, konfokalmikroskopisch aufgenommene Bilder der beiden untersuchten Probenhälften.

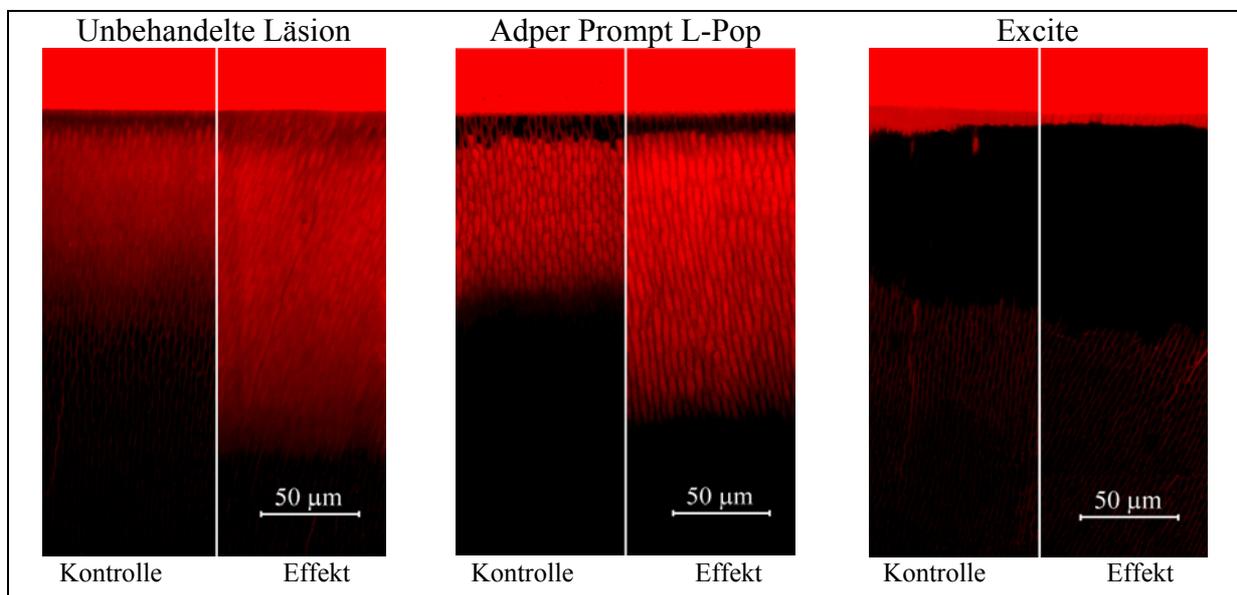


Abb. 13: Bilder der Läsionen der Kontrollhälfte und Effekthälfte je einer Probe.

Links: In der unbehandelten Kontrollgruppe ist eine deutliche Progression der Läsionstiefe festzustellen.

Mitte: Die Versiegelung mit Adper Prompt L-Pop kann aufgrund der schlechten Penetration eine Progression der Läsionstiefe nicht verhindern.

Rechts: Das Material Excite konnte den Läsionskörper vollständig ausfüllen. Eine Progression der Läsionstiefe durch die zweite Demineralisationsperiode fand nicht statt.

Abbildung 14 stellt die Ergebnisse für die Progression der Läsionen dar. Die unbehandelten Läsionen (A) zeigten mit einer durchschnittlichen Läsionstiefe der Effekthälfte von $154,8 \pm 21,8 \mu\text{m}$ eine Progression der Läsion von durchschnittlich $63,7 \pm 35,4 \%$. Unter den Gruppen 1-6 bestanden hinsichtlich der Progression der Kontrollläsion A keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,05$; t-Test).

Die Materialien Helioseal, Heliobond, Resulcin Monobond und Excite zeigten im Vergleich zur Kontrolle sowohl in Gruppe B (15 s Penetrationsdauer) als auch in Gruppe C (30 s

Penetrationsdauer) eine signifikante Verminderung der Progression der Läsion ($p < 0,05$; t-Test). Die vier Materialien weisen hinsichtlich ihrer Fähigkeit eine Progression der Läsionstiefe zu inhibieren keine statistisch signifikanten Unterschiede auf ($p > 0,05$; Bonferroni). In der Gruppe mit 15 s Penetrationszeit erreichte Resulcin Monobond mit $9,1 \pm 9,0$ % die stärkste Verminderung der Progression der Läsionstiefe. In der Gruppe mit 30 s Penetrationszeit konnte bei Excite mit $2,9 \pm 15,5$ % das geringste Voranschreiten der Läsionstiefe verzeichnet werden. Die Behandlung der Läsionen mit den Materialien Solobond M und Adper Prompt L-Pop führte weder bei 15, noch bei 30 s Penetrationszeit zu einer signifikanten Verringerung der Progression der Läsion im Vergleich zur Kontrollgruppe ($p > 0,05$). Die mit Adper Prompt L-Pop behandelten Läsionen schritten schneller voran (15 s: $60,3 \pm 23,3$ %; 30 s: $51,4 \pm 33,6$ %) als die unbehandelte Kontrolle ($50,3 \pm 23,0$ %). Der Unterschied war jedoch statistisch nicht signifikant ($p > 0,05$).

Mit Ausnahme von Resulcin Monobond ging bei allen Materialien eine Verlängerung der Penetrationszeit von 15 s auf 30 s mit einer stärkeren Verminderung der Progression einher. Diese war jedoch nur bei Heliouseal, Heliobond und Excite statistisch signifikant.

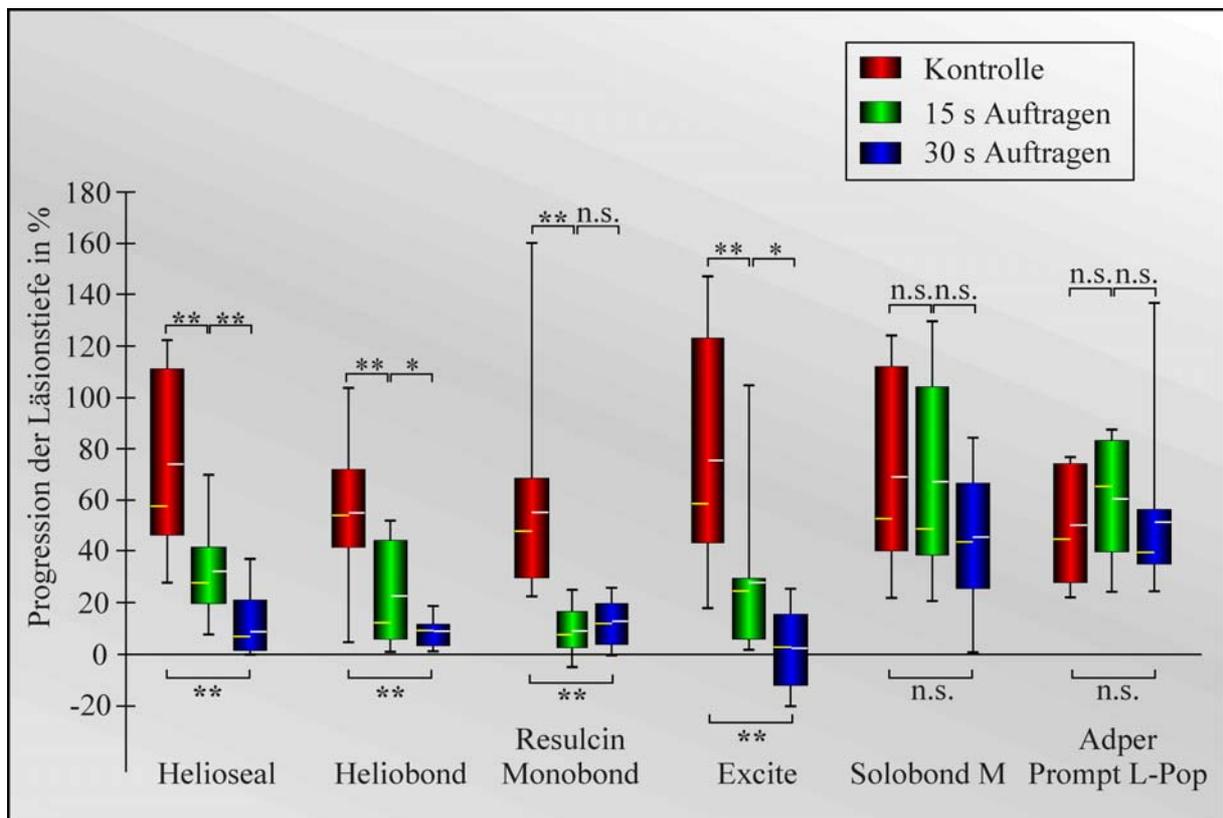


Abb. 14: Progression der Läsionstiefe (%) der unbehandelten Läsionen (rot), sowie der versiegelten Läsionen mit 15 s (grün) und 30 s (blau) Penetrationszeit. Die Box-and-whiskers-plots mit den jeweiligen Quartilen sowie Medianen (gelb) und Mittelwerten (weiß) sind abgebildet. Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen sind mit Sternen gekennzeichnet ($p > 0,05$ n.s.; $p \leq 0,05$ *; $p \leq 0,01$ **; t-Test)

5.2. Qualitative Auswertung

Kontrollläsionen

Die erzeugten initialen Schmelzläsionen zeigen einen typischen pathohistologischen Aufbau (Abb. 7). In den obersten 10-20 μm erkennt man eine Schicht geringerer Fluoreszenz mit leicht fluoreszierenden Prismenscheiden und nicht fluoreszierenden Prismenkernen (pseudo-intakte Oberflächenschicht). Im Läsionskörper befindet sich eine verstärkte Fluoreszenz der Prismenkerne, während die Prismenscheiden ähnlich stark wie in der Oberflächenschicht angefärbt sind oder dunkler erscheinen. In der Zone der beginnenden Demineralisation (fortschreitende Läsionsfront) zeigen die Prismenkerne keine Fluoreszenz, während die Prismenscheiden leicht fluoreszieren. Diese Zone wurde per definitionem bei der Bestimmung der Läsionstiefe nicht mit erfasst.

Versiegelte Läsionen

Die verschiedenen Versiegelungsmaterialien stellten sich in den fluoreszierenden Schmelzläsionen als dunkle, homogene Fläche dar, da sie vorhandene Hohlräume ausfüllten und das gefärbte Kunstharz nicht eindringen konnte.

Die dunkle Fläche der Versieglermaterialien begann bei allen Materialien nicht direkt an der Probenoberfläche, sondern einige Mikrometer darunter. Die Schicht, in der im Bereich der Probenoberfläche kein Versiegler anzutreffen war, wurde als sauerstoffinhibierte Schicht gewertet. Die Breite dieser Schicht wurde ermittelt. Darüber hinaus wiesen alle Materialien, in jedoch unterschiedlichem Umfang, ähnliche Flächen fehlender Versiegelung auch innerhalb der Versiegler-schicht auf.

Charakteristisch für das Penetrationsverhalten aller Materialien war, dass der Kunststoff im Läsionskörper zunächst die Prismenkerne infiltrierte, während in den Prismenscheiden Hohlräume verblieben (Abb. 15). Diese wurden erst später durch den Versiegler aufgefüllt.

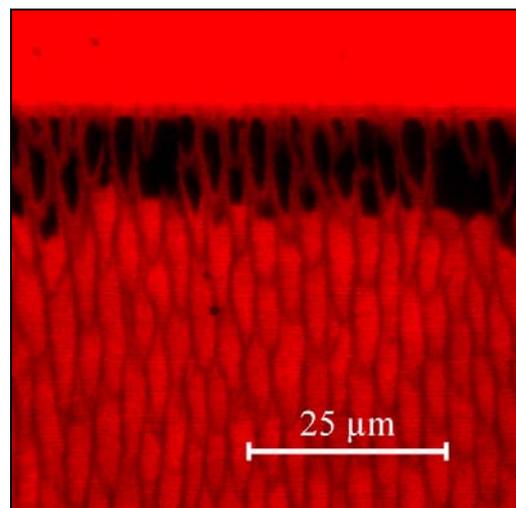


Abb. 15: Versiegler-schicht nach 15 s Penetrationszeit.

Materialien

Abbildung 16 zeigt repräsentative Bilder der mit den getesteten Materialien versiegelten Läsionen nach 15 s und 30 s Penetrationszeit.

Helioseal

Das Material erscheint als relativ homogene Schicht mit wenigen unpolymerisierten Bereichen. Die Sauerstoffinhibitionsschicht ist schmal und konstant.

Heliobond

Heliobond bildet ähnlich dem Helioseal kompakte Schichten mit relativ wenig unpolymerisierten Bereichen. Die oberflächlich inhibierte Schicht ist auch hier dünn und konstant.

Resulcin Monobond

Monobond dringt schnell und tief in die Läsion ein und bildet homogene Schichten mit relativ wenig unausgefüllten Bereichen. Nach 30 s Penetrationsdauer zeigt Monobond die kompaktesten Versiegelschichten mit den geringsten Anteilen an unversiegelter Porenstruktur.

Excite

Das Material dringt tief in die Läsionen ein und zeigt eine dünne Inhibitionsschicht. Der Anteil unausgefüllter Poren bzw. unpolymerisierten Versieglers ist etwas höher als bei Resulcin Monobond.

Solobond M

Solobond M dringt kaum und bei vielen Proben gar nicht in den Läsionskörper ein.

Adper Prompt L-Pop

Das Material zeigt sehr heterogene Versiegelschichten. Es dringt zwar gelegentlich tief in die Läsion ein, zeigt dann aber viele nicht polymerisierte bzw. nicht ausgeflossene Areale.

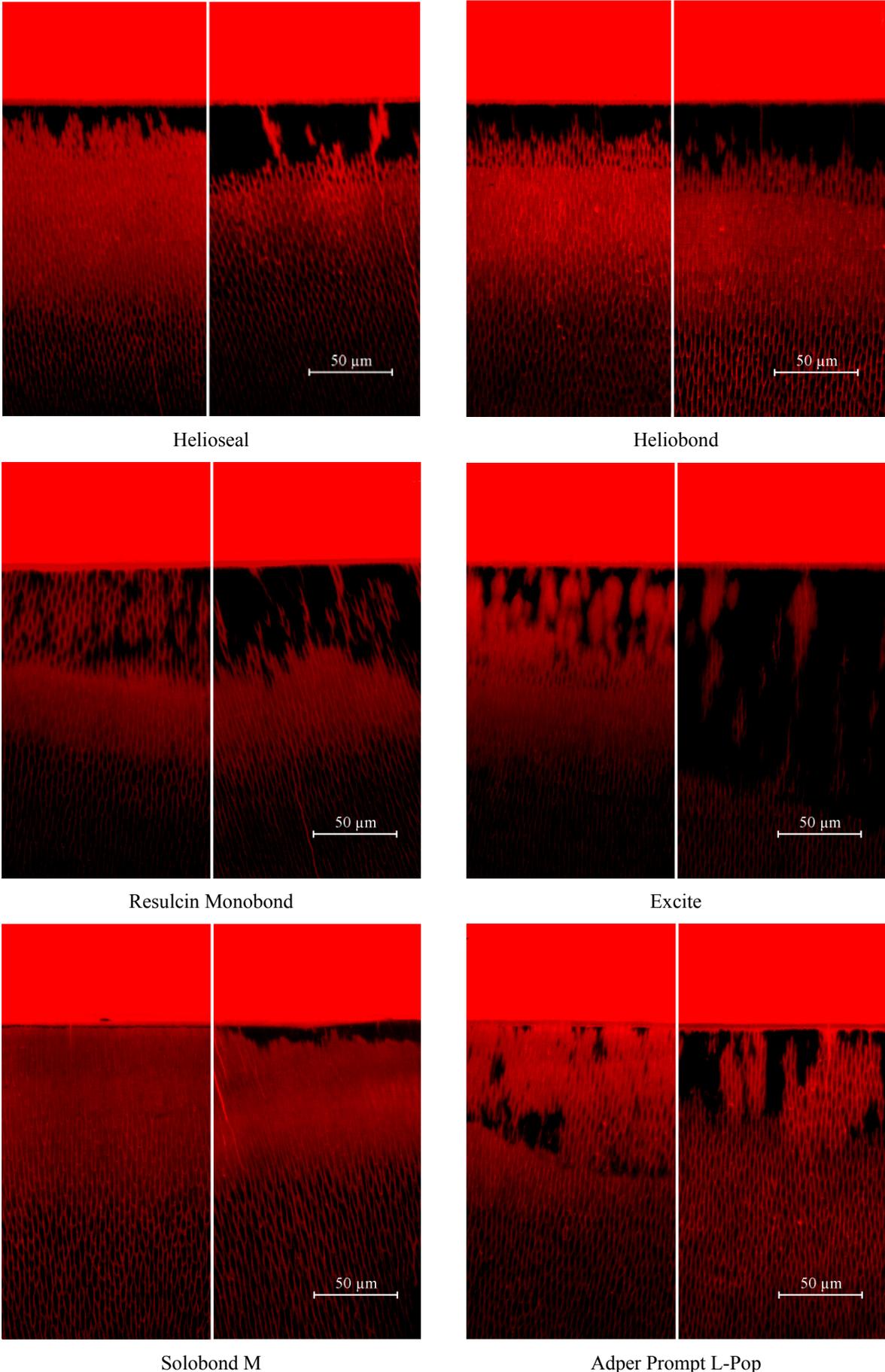


Abb. 16: CLSM-Bilder der versiegelten Läsionen nach 15 s (links) und 30 s (rechts) auftragen.

5.3. Vergleich von konfokalmikroskopischer und mikroradiografischer Auswertung

Die mit dem CLSM gemessenen Läsionstiefen der 90 untersuchten demineralisierten Schmelzproben betragen durchschnittlich $95,4 \pm 20,4 \mu\text{m}$, während die transversal-mikroradiografische Auswertung eine mittlere Läsionstiefe von $108,3 \pm 22,1 \mu\text{m}$ ergab. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson zwischen den beiden Auswertungsmethoden betrug $r=0,844$ ($p<0,01$). Somit war eine hohe Korrelation gegeben (Abb. 18).

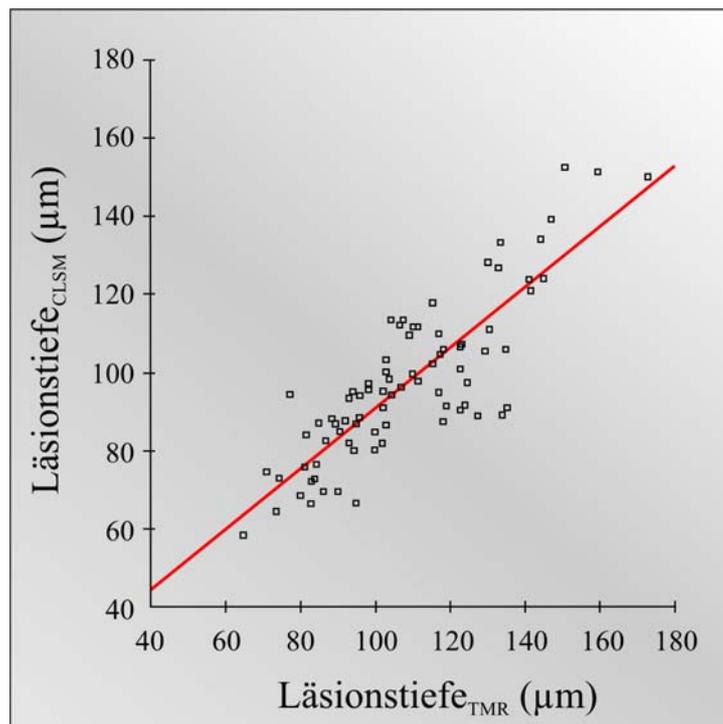


Abb. 18: Streudiagramm der mit der TMR und mit dem CLSM gemessenen Werte für die Läsionstiefe.

Die Abtragung der Grauwerte (welche in den abgebildeten Falschfarbenbildern rot erscheinen) von CLSM-Bildern initialer Schmelzdemineralisationen gegen die Läsionstiefe führt zu Kurven, welche den Mineraleichtkurven, die mit der TMR erzeugt werden können, sehr ähnlich sehen (Abb. 19). Ein Unterschied besteht darin, dass große Porenvolumina mit dem CLSM hohe Grauwerte (hellgrau/rot) erzeugen, wogegen sie im TMR-Bild aufgrund des niedrigen Mineralgehaltes und der resultierenden Filmschwärzung niedrige Grauwerte (dunkelgrau) ergeben. Bei Spiegelung der CLSM-Kurve über die x-Achse wird die Ähnlichkeit beider Kurven deutlich.

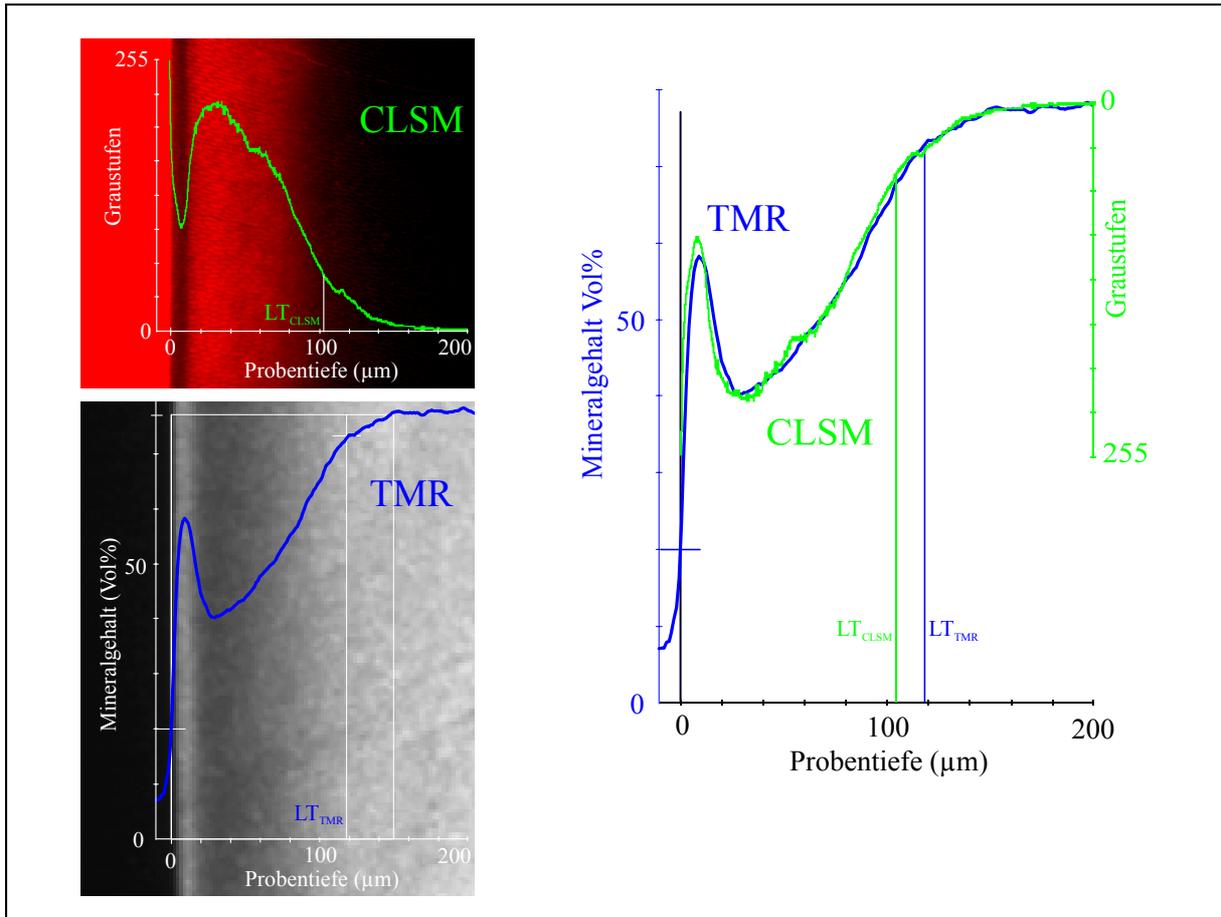


Abb. 19: Abtragung der Graustufen (im Falschfarbenbild rot) der mit dem CLSM gewonnenen Bilder (grün) sowie der mit der TMR erzeugten Bilder (blau) gegen die Probtiefe. Bei Spiegelung der vom CLSM-Bild gewonnenen Kurve über die x-Achse wird die Ähnlichkeit der beiden Graphen deutlich (rechts). Die Läsionstiefe wurde bei der Bestimmung mit Hilfe der TMR als der Abstand zwischen der Probenoberfläche und der Tiefe mit einem Mineralgehalt von 95 % des gesunden Schmelzes festgelegt (LT_{TMR}). Im CLSM-Bild wurde die Läsionstiefe als die Strecke von der Probenoberfläche bis zu dem Punkt, an dem keine Fluoreszenz der Prismenkerne mehr auftrat, definiert (LT_{CLSM}). Die ermittelten Läsionstiefen unterschieden sich geringfügig, wobei mit dem CLSM niedrigere Läsionstiefen gemessen wurden.