

5. Ergebnisse

5.1 Ergebnisse der Kalziummessungen

In Abbildung 9 sind die Messergebnisse der Kalziummessung grafisch dargestellt. Die zunächst in den zehnfach verdünnten Lösungen ermittelten Messergebnisse wurden mit dem Faktor zehn multipliziert und logarithmisch aufgetragen. Es ist eine lineare Beziehung zwischen dem

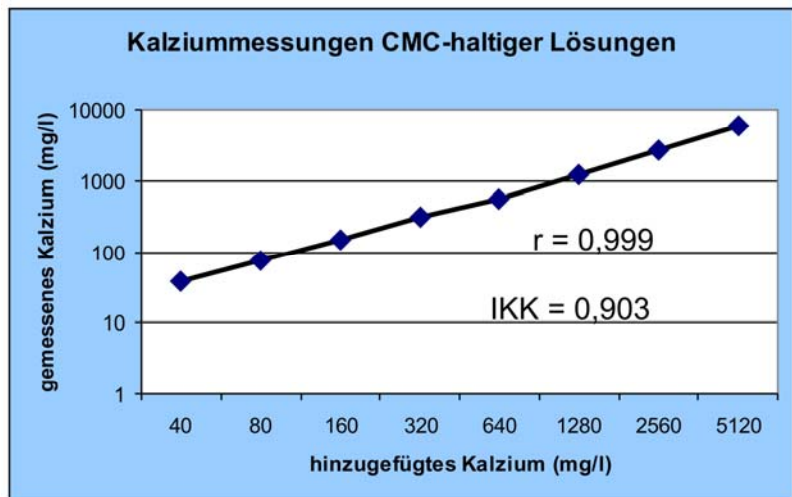


Abb. 9: Grafische Darstellung der Kalziummessungen (x- und y-Achse logarithmisch aufgetragen).

hinzugefügten und dem gemessenen Kalzium erkennbar. Die Messwerte entsprachen zudem annähernd den hinzugefügten Mengen [$r = 0,999$ (Pearson Korrelationskoeffizient); $IKK = 0,903$ (Intraklassenkorrelationskoeffizient)].

5.2 Ergebnisse der pH-Wert-Korrektur während des Versuchsablaufes

In Abbildung 10 ist die während des 14-tägigen Versuches pro Gruppe zugefügte Gesamtmenge an Milchsäure in μl dargestellt. Die Gruppen, deren pH-Wert auf 5,5 eingestellt wurde, benötigten deutlich mehr Milchsäure (gerade Gruppennummern 6-24) im Vergleich zu Lösungen mit einem pH-Wert von 6,5 (ungerade Gruppennummern 5-23) (Abb. 10). Auffällig sind jedoch die Gruppen 23 und 24. Hierbei wurde keine Milchsäure zur Einstellung und Aufrechterhaltung des pH-Wertes zugefügt. Abbildung 11 zeigt die Gesamtmenge an hinzugefügter Kaliumhydroxidlösung während des Versuches. Auffällig ist die mit 20400 und 11200 μl hohe Menge an zugegebener Kaliumhydroxidlösung der Gruppen 23 und 24 verglichen mit den Zugaben aller anderen Gruppen (Abb. 11).

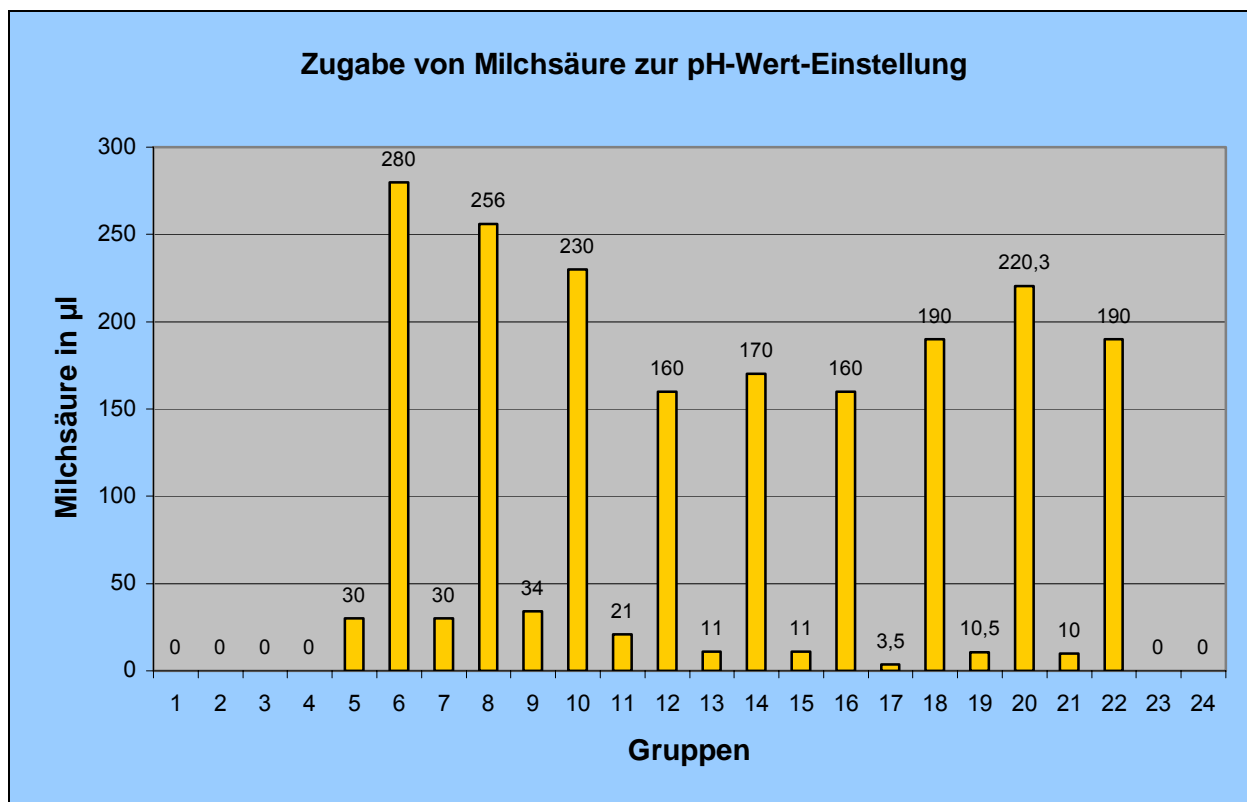


Abb. 10: Die Zugabe von Milchsäure zur pH-Wert-Einstellung der einzelnen Lösungen während des gesamten Versuchszeitraumes in μl .

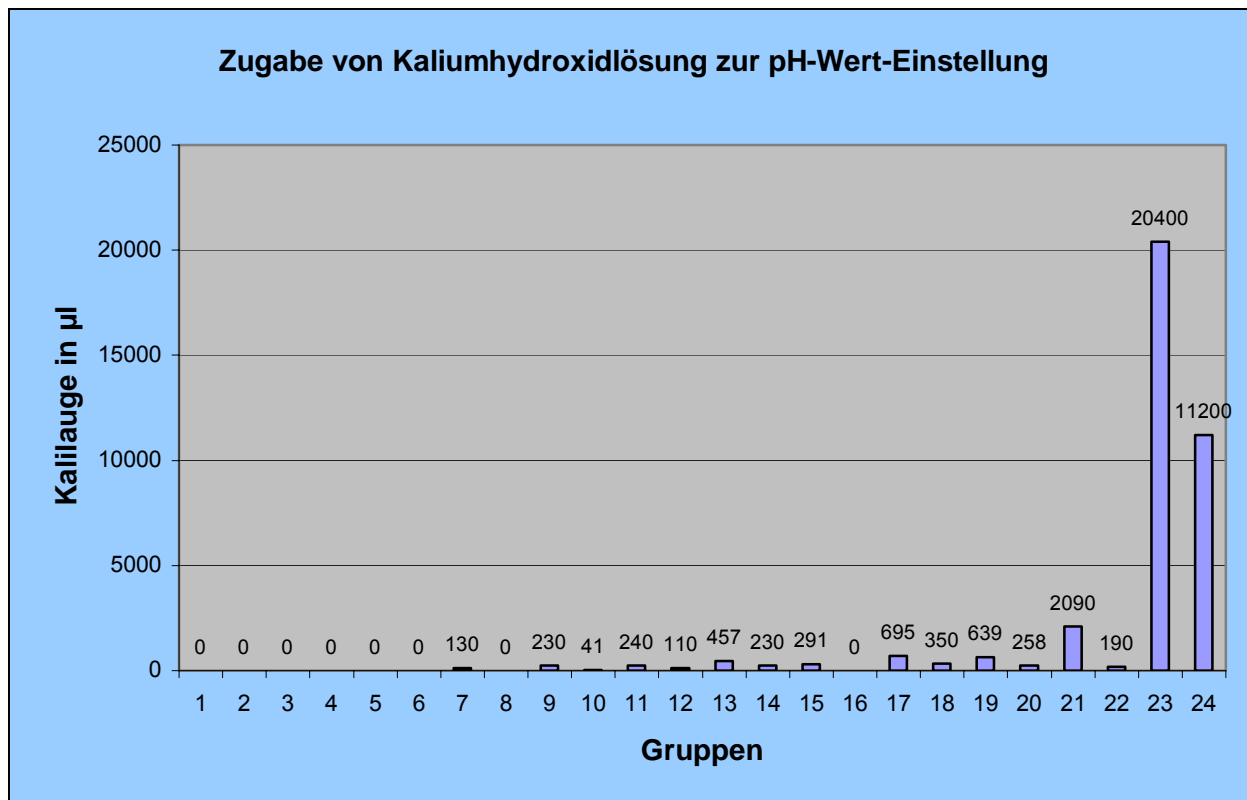


Abb. 11: Die Zugabe von Kaliumhydroxidlösung zur pH-Wert-Einstellung der einzelnen Lösungen während des gesamten Versuchszeitraumes in μl .

5.3 Ergebnisse der Sättigungsberechnungen

In Tabelle 6 sind die mit der Software nach Shellis für wässrige Lösungen berechneten Sättigungen bezüglich verschiedener Ansätze dargestellt. Eine Lösung ist gesättigt, wenn die Konzentration des Stoffes seiner Löslichkeit entspricht (Wert = 1). Bei übersättigten Lösungen ist die Konzentration höher als die Löslichkeit (Werte > 1).

Tab. 6: Ionenkonzentration mit errechneter Sättigung bezüglich Oktakalziumphosphat, Hydroxylapatit und Fluorapatit

Lsg.	Ionenkonzentration (mM)							pH		Errechnete Sättigung		
	Ca ²⁺	PO ₄ ³⁻	F ⁻	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻			OKP	HAP	FAP
5	0	0	0	0,5	16	15	32		6,5	0		
6								5,5				
7								6,5				
8								5,5				
9	0,5	0,8	0,1	0,5	16,8	15,1	33		6,5	0,7	3,1	11
10								5,5				
11								6,5	0,2	0,6	2	
12								5,5	1,1	4,7	16	
13	1	3,2	0,1	0,5	19,2	15,1	34		6,5	0,3	0,9	4
14								5,5				
15								6,5	1,2	5,6	20	
16								5,5	0,3	1,0	5	
17	2	6,4	0,1	0,5	22,4	15,1	36		6,5	1,9	8,1	28
18								5,5				
19								6,5	2,2	9,9	34	
20								5,5	0,6	1,9	9	
21	32	12,8	0,1	0,5	19,2	15,1	36		6,5	3,2	13	47
22								5,5				
23								6,5	1,0	2,9	13	
24								5,5	66	14	224	
24	32	52	0,1	0,5	68	15,1	96		6,5	15,8	4,9	69
24								5,5				

Erläuterung: Lsg (Lösung), OKP (Oktakalziumphosphat), HAP (Hydroxylapatit), FAP (Fluorapatit), übersättigte Lösungen (Werte > 1) sind hellblau unterlegt.

5.4 Quantitative Auswertung des Mineralverlustes

Tabelle 7 zeigt pro Gruppe die Messergebnisse der demineralisierten sowie der lösungsexponierten Probenbereiche nach Abzug der Werte des Kontrollbereiches. Ein

negatives Vorzeichen des effektiven Mineralverlustes deutet auf eine Demineralisation, das Positive auf eine Remineralisation hin. Die Anzahl der Einzelmessungen liegt bei 10. Die Mineralverluste nach Lagerung der Schmelzproben in den Lösungen 1, 3-12, 14, 16, 20, 23 und 24 waren signifikant erhöht im Vergleich zu denen nach Demineralisation (gepaarter t-Test). Dagegen war nur in Gruppe 21 ein signifikanter Mineralgewinn feststellbar.

Tab. 7: Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) der Mineralverluste (Vol.% × µm) nach der Demineralisation (d) und Lagerung in den verschiedenen Lösungen (e) sowie deren Differenz (effektiv)

Nr.	Lösung	Mineralverlust d		Mineralverlust e		Mineralverlust effektiv		P-Wert
		MW	SD	MW	SD	MW	SD	
1	bioXtra®	1538	493	3165	1223	-1627	971	0,022
2	Aldiamed® Mundgel	1512	448	2316	863	-804	622	0,072
3	Aldiamed® Mundspüllösung	2133	360	3435	491	-1302	371	0,022
4	Paroex®	1787	487	3804	583	-2017	376	0,022
5	CMC	1814	498	3906	917	-2092	718	0,022
6	CMC	1585	423	4969	566	-3384	435	0,022
7	CMC	1669	641	3141	827	-1472	512	0,022
8	CMC	1761	418	4420	626	-2659	759	0,022
9	CMC	1605	636	2616	1011	-1011	651	0,024
10	CMC	1551	760	3402	1262	-1851	685	0,022
11	CMC	1699	431	2346	707	-648	481	0,048
12	CMC	1844	440	3325	577	-1481	457	0,022
13	CMC	1997	353	2847	686	-851	833	0,24
14	CMC	1930	414	2942	800	-1013	547	0,022
15	CMC	1776	602	2284	656	-509	415	0,096
16	CMC	1896	626	2519	837	-623	444	0,048
17	CMC	2008	472	1678	621	330	361	0,432
18	CMC	1650	465	2160	428	-510	609	0,624
19	CMC	1568	305	1522	274	46	223	12,816
20	CMC	1591	373	2250	405	-660	182	0,022
21	CMC	1695	302	1108	290	587	364	0,024
22	CMC	1963	487	2286	508	-324	387	0,648
23	CMC	1969	346	2941	745	-972	602	0,024
24	CMC	2154	766	3378	794	-1223	233	0,022

Erläuterung: Signifikante Unterschiede zwischen den Mineralverlusten nach Demineralisation und nach Lagerung in den Lösungen sind fett gekennzeichnet ($p < 0,05$; gepaarter t-Test, BONFERRONI-Adjustierung mit Faktor 24).

In Abbildung 12 wird der effektive Mineralverlust (in Vol.% × μm) nach Lagerung von jeweils 10 demineralisierten Schmelzproben in den verschiedenen Lösungen dargestellt. Die gelb dargestellten, kommerziellen Produkte führten alle zu einer Zunahme des Mineralverlustes, dabei demineralisierten die Gruppen 1 (bioXtra®) und 4 (Paroex®) besonders deutlich. Mit steigender Kalzium- und Phosphatzugabe, die sich in der ansteigenden Gruppenzahl widerspiegelt, verringerte sich der Mineralverlust. Die Ergebnisse der Gruppen 17, 19 und 21 wiesen sogar einen Mineralgewinn. Eine Ausnahme bildeten die Gruppen 23 und 24. Die rot dargestellten Lösungen mit einem pH-Wert von 5,5 zeigten jeweils zu der vergleichbaren Gruppe (blaue plots) mit analoger Elektrolytzusammensetzung und einem pH-Wert von 6,5 einen stärkeren Mineralverlust.

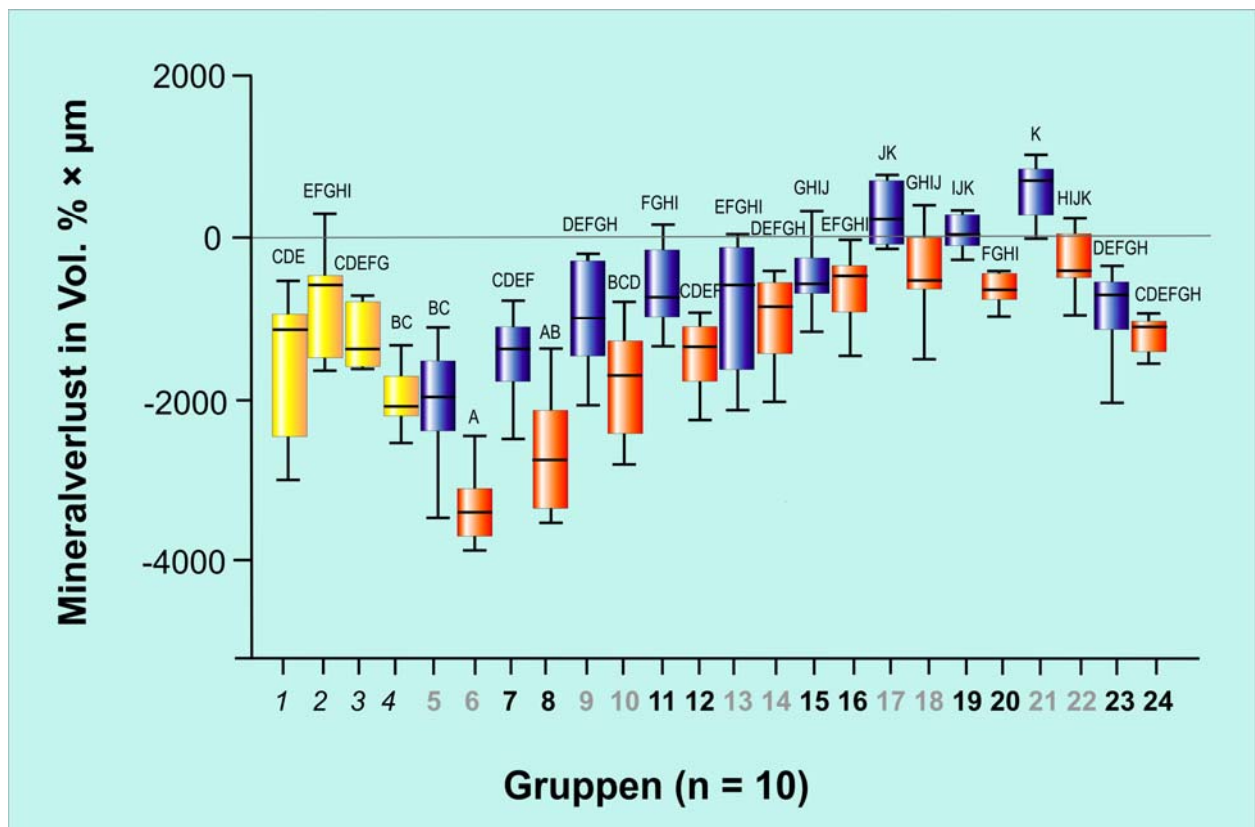


Abb. 12: Mineralverluste (Vol.% × μm) nach der Lagerung der demineralisierten Schmelzproben (n = 10) in den verschiedenen Lösungen (100 % box-and-whisker-plot) mit den jeweiligen Quartilen sowie Medianen. Gruppen mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant voneinander (p < 0,05; ANOVA, BONFERRONI post hoc). Gelb dargestellt und kursiv beziffert sind die kommerziellen Produkte. Blaue plots stehen für Gruppen mit pH-Wert 6,5 und rote für Lösungen mit einem pH-Wert von 5,5. Die aufeinander folgenden grauen oder schwarzen Gruppennummern kennzeichnen paarweise Lösungen mit gleicher Elektrolytzugabe aber unterschiedlichem pH-Wert (5,5 bzw. 6,5).

5.5 Quantitative Auswertung der Läsionstiefe

Die mittleren Läsionstiefen (Lt) der demineralisierten, den verschiedenen Lösungen ausgesetzten Bereiche sowie die dazugehörigen Standardabweichungen sind in Tabelle 8 zusammengestellt. Die Anzahl der Einzelmessungen liegt ebenfalls bei 10.

Tab. 8: Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) der Lt (μm) nach Demineralisation (d) und Lagerung in den potentiellen Speichlersatzmitteln (e) sowie deren Differenz (effektiv)

Nr.	Lösung	Läsionstiefe d		Läsionstiefe e		Läsionstiefe effektiv		P-Wert
		MW	SD	MW	SD	MW	SD	
1	bioXtra [®]	96	18	136	31	-40	19	0,022
2	Aldiamed [®] Mundgel	86	18	108	26	-22	27	0,696
3	Aldiamed [®] Mundspüllösung	102	18	131	45	-28	33	0,552
4	Paroex [®]	81	18	110	18	-29	14	0,022
5	CMC	100	24	120	22	-20	20	0,264
6	CMC	92	26	113	25	-22	16	0,048
7	CMC	97	18	120	25	-23	16	0,048
8	CMC	83	20	114	30	-31	23	0,048
9	CMC	81	28	97	34	-16	16	0,312
10	CMC	88	37	105	37	-17	11	0,024
11	CMC	96	23	113	26	-17	21	0,744
12	CMC	97	23	146	31	-48	20	0,022
13	CMC	92	22	120	25	-28	31	0,504
14	CMC	88	37	117	31	-29	12	0,022
15	CMC	94	34	112	26	-19	15	0,072
16	CMC	93	36	126	38	-33	31	0,192
17	CMC	103	23	95	28	9	23	6,504
18	CMC	86	22	114	32	-28	33	0,624
19	CMC	91	18	80	12	10	13	0,768
20	CMC	89	24	100	26	-11	18	1,704
21	CMC	85	18	76	18	10	12	0,696
22	CMC	98	24	123	25	-26	18	0,048
23	CMC	95	18	125	24	-30	10	0,022
24	CMC	114	31	175	43	-62	26	0,022

Erläuterung: Signifikante Unterschiede zwischen den Läsionstiefen nach Demineralisation und nach Lagerung in den Lösungen sind fett gekennzeichnet ($p < 0,05$; gepaarter t-Test, BONFERRONI-Adjustierung mit Faktor 24).

Des Weiteren sind in Tabelle 8 die Messergebnisse der demineralisierten Probenbereiche sowie die Messergebnisse der nach Demineralisation den verschiedenen Lösungen ausgesetzten Probenbereiche dargestellt. Das Ausmaß der erhöhten (negatives Vorzeichen) oder verringerten Läsionstiefe (positives Vorzeichen) ist angegeben. Negative Werte deuten auf eine Demineralisation und positive auf eine Remineralisation hin. Die Läsionstiefen der Gruppen 1, 4, 6-8, 10, 12, 14, und 22-24 waren nach Lagerung signifikant erhöht ($p < 0,05$; gepaarter t-Test). Eine nicht signifikante Verringerung der Läsionstiefe wiesen die Lösungen 17, 19 und 21 auf.

Die Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse der Läsionstiefen (μm) nach Lagerung der demineralisierten Schmelzproben in den verschiedenen Lösungen. Die Anzahl der Proben pro Gruppe betrug jeweils 10. Die gelb dargestellten Ergebnisse der kommerziellen Produkte sowie aller anderen Gruppen, mit Ausnahme der Gruppen 17, 19 und 21, zeigten nach Versuchsablauf eine weitere Erhöhung der Läsionstiefe.

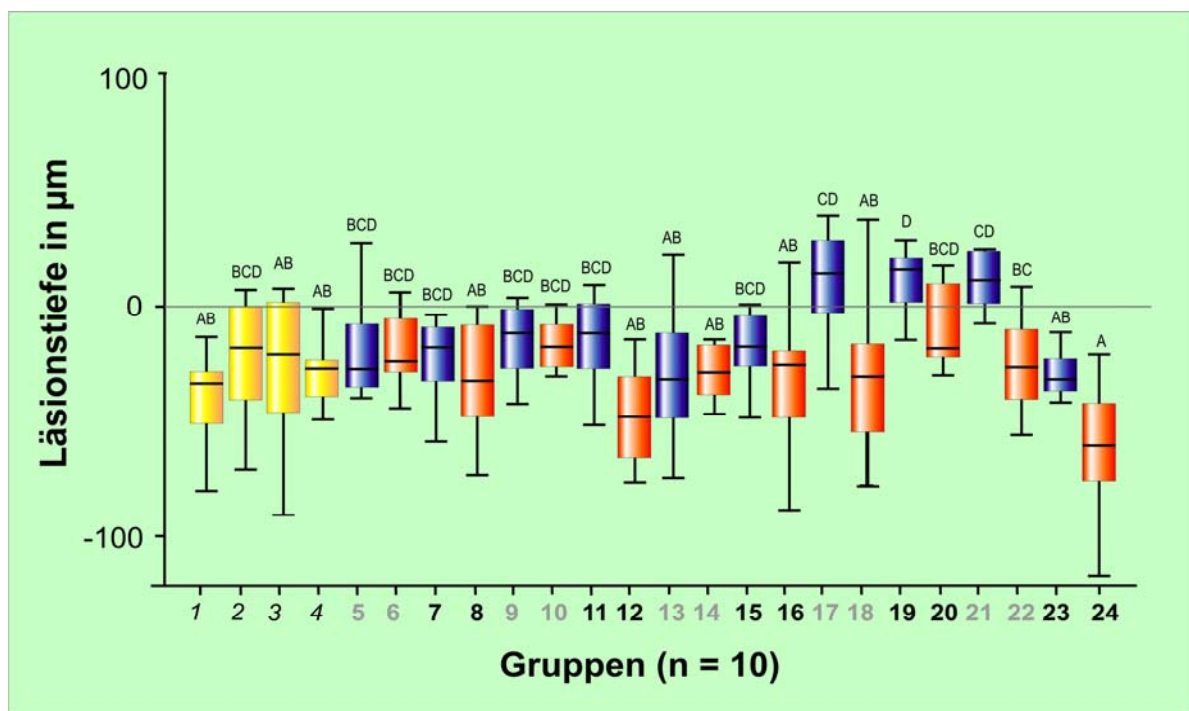


Abb. 13: Läsionstiefen (μm) nach Lagerung der demineralisierten Schmelzproben ($n = 10$) in den verschiedenen Lösungen (100 % box-and-whisker-plot) mit den jeweiligen Quartilen sowie Medianen. Gruppen, beschriftet mit unterschiedlichen Buchstaben, unterscheiden sich signifikant voneinander ($p < 0,05$; ANOVA, BONFERRONI post hoc). Gelb dargestellt und kursiv beziffert sind die kommerziellen Produkte. Blaue plots stehen für Gruppen mit pH-Wert 6,5 und rote für Lösungen mit einem pH-Wert von 5,5. Die grauen oder schwarzen Gruppennummern kennzeichnen paarweise Lösungen mit gleicher Elektrolytzugabe und unterschiedlichem pH-Wert.

5.6. Ergebnisse zum Einfluss unterschiedlicher Kalzium- und Phosphatkonzentrationen auf den Mineralverlust und die Läsionstiefe

5.6.1 Auswertung der Gruppen mit unterschiedlichem Kalziumgehalt

Das Allgemeine Lineare Modell zeigte einen signifikanten Einfluss der Kalziumkonzentration auf den Mineralverlust (ALM; $p < 0,001$). Tabelle 9 stellt die nach ihrer Kalziumchloridkonzentration eingeteilten Gruppen (Lösungen 7-24) und deren mittleren effektiven Mineralverlust ($\text{Vol.}\% \times \mu\text{m}$) sowie die mittlere effektive Läsionstiefe (μm) dar.

In der Abbildung 14 sind die effektiven Mineralverluste hinsichtlich des Einflusses unterschiedlicher Kalziumkonzentrationen in Form von box-and-whisker-plots dargestellt. Mit steigender Kalziumkonzentration konnte, mit Ausnahme der Gruppe 5, eine Reduktion des effektiven Mineralverlustes festgestellt werden.

Die Abbildung 15 stellt die Ergebnisse der Läsionstiefe (μm) der Schmelzproben für die Kalziumgruppen dar. Auch hier wird aus der Darstellung ersichtlich, dass ein Anstieg der Kalziumkonzentration zu einer Reduktion der effektiven Läsionstiefe führte, wobei Gruppe 5 die Ausnahme bildete. Hierbei kam es bei keiner Gruppe zu einer effektiven Reduktion der Läsionstiefe im Sinne einer Remineralisation.

Tab. 9: Mineralverluste ($\text{Vol.}\% \times \mu\text{m}$) und Läsionstiefen (μm) mit den jeweiligen Standardabweichungen (Std. A.) der einzelnen Kalziumgruppen

CaCl ₂ (mg/l)	Kalziumgruppe	Probenanzahl	Mineralverlust effektiv (Std. A.)	Läsionstiefe effektiv (Std. A.)
-	1	20	-2066 (876)	-27 (20)
55,5	2	60	-1142 (722)	-26 (22)
111	3	40	-328 (593)	-18 (30)
222	4	40	-88 (551)	-4 (21)
3552	5	20	-1098 (463)	-46 (25)

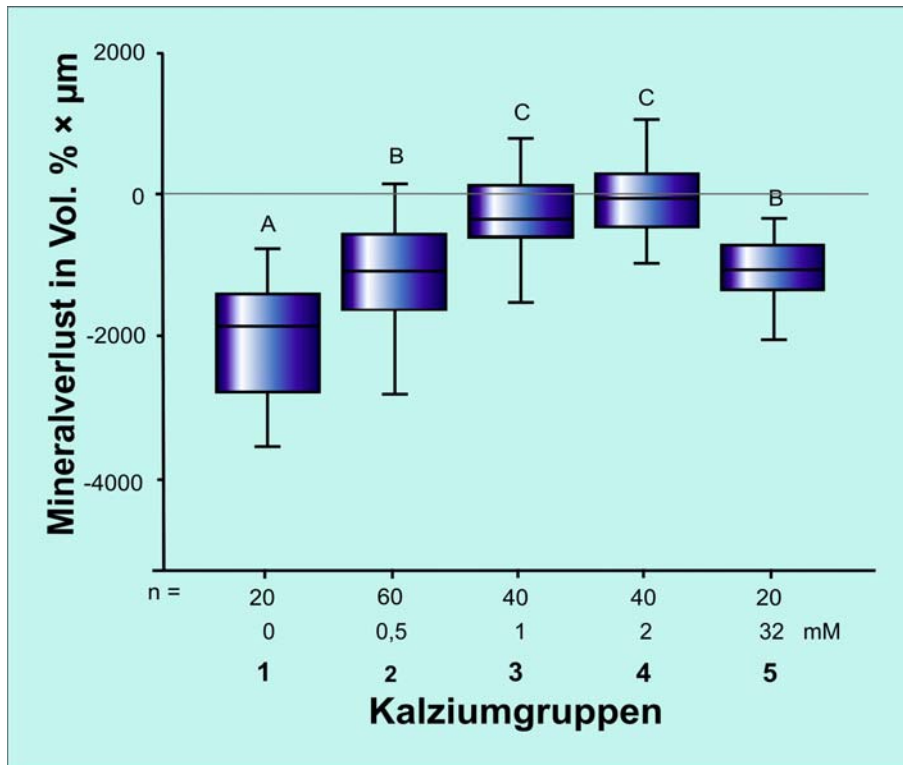


Abb. 14: Mineralverluste (Vol.% x μm) nach der Lagerung der demineralisierten Schmelzproben in Lösungen mit unterschiedlichen Kalziumchloridkonzentrationen (100 % box-and-whisker-plot) mit den jeweiligen Quartilen sowie Medianen. Gruppen mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant voneinander (p < 0,05; ANOVA, BONFERRONI post hoc).

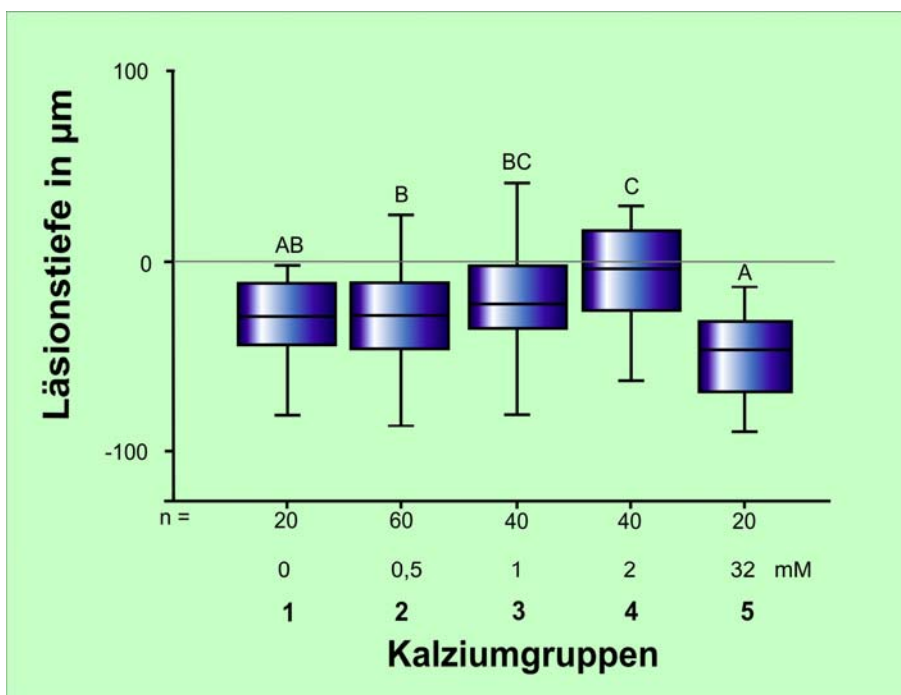


Abb. 15: Läsionstiefen (μm) nach der Lagerung der demineralisierten Schmelzproben in Lösungen mit unterschiedlichen Kalziumchloridkonzentrationen (100 % box-and-whisker-plot) mit den jeweiligen Quartilen sowie Medianen. Gruppen mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant voneinander (p < 0,05; ANOVA, BONFERRONI post hoc).

5.6.2 Auswertung der Gruppen mit unterschiedlichem Phosphatgehalt

Das Allgemeine Lineare Modell zeigte einen signifikanten Einfluss der Phosphatkonzentration auf den Mineralverlust (ALM; $p = 0,023$). Tabelle 10 stellt die nach ihrer Kaliumdihydrogenphosphatkonzentration eingeteilten Gruppen (Lösungen 7-24) und deren mittleren effektiven Mineralverlust ($\text{Vol.}\% \times \mu\text{m}$) sowie die mittlere effektive Läsionstiefe (μm) dar.

In Abbildung 16 sind die effektiven Mineralverluste hinsichtlich des Einflusses unterschiedlicher Phosphatkonzentrationen in Form von box-and-whisker-plots dargestellt. Mit steigender Phosphatkonzentration konnte, mit Ausnahme der Gruppe 7, eine Reduktion des effektiven Mineralverlustes festgestellt werden.

Abbildung 17 stellt box-and-whisker-plots der Läsionstiefe (μm) für die Schmelzproben der einzelnen Phosphatgruppen dar. Die Ergebnisse zeigen, dass keine Phosphatkonzentration zu einer effektiven Reduktion der Läsionstiefe im Sinne einer Remineralisation führte. Die Gruppe 7 mit der höchsten Phosphatkonzentration von 52 mM wies dabei die niedrigste effektive Läsionstiefe auf.

Tab. 10: Mineralverluste ($\text{Vol.}\% \times \mu\text{m}$) und Läsionstiefen (μm) mit den jeweiligen Standardabweichungen (Std. A.) der einzelnen Phosphatgruppen

KH_2PO_4 (mg/l)	Phosphatgruppe	Probenanzahl	Mineralverlust effektiv (Std. A.)	Läsionstiefe effektiv (Std. A.)
-	1	40	-1748 (880)	-22 (18)
111	2	20	-1064 (626)	-33 (26)
222	3	20	-566 (423)	-26 (25)
444	4	40	-619 (645)	-14 (25)
888	5	20	-90 (651)	-10 (33)
1776	6	20	132 (593)	-8 (23)
7104	7	20	-1098 (463)	-46 (25)

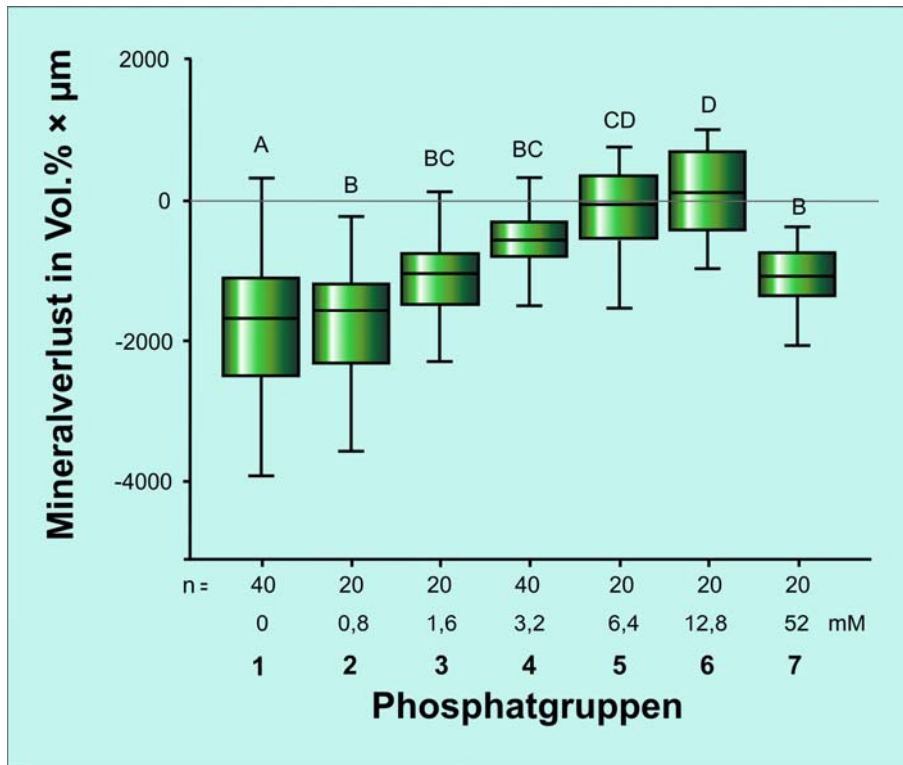


Abb. 16: Mineralverluste (Vol.% x µm) nach Lagerung der demineralisierten Schmelzproben in Lösungen unterschiedlicher Kaliumdihydrogenphosphatkonzentration (100 % box-and-whisker-plot) mit den jeweiligen Quartilen sowie Medianen. Gruppen mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant voneinander (p < 0,05; ANOVA, BONFERRONI post hoc).

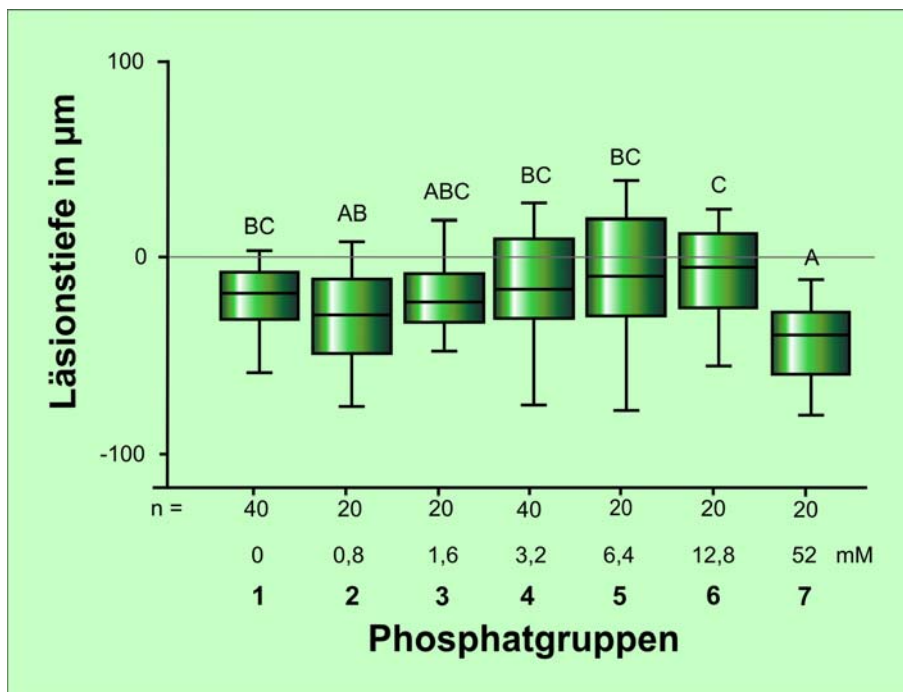


Abb. 17: Läsionstiefen (µm) nach der Lagerung der demineralisierten Schmelzproben in Lösungen unterschiedlicher Kaliumdihydrogenphosphatkonzentration (100 % box-and-whisker-plot) mit den jeweiligen Quartilen sowie Medianen. Gruppen mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant voneinander (p < 0,05; ANOVA, BONFERRONI post hoc).

5.7 Mikroradiografische Auswertung des Mineralverlustes

Nach der Demineralisation der Proben und ihrer Lagerung in den verschiedenen Lösungen wurde das Ausmaß des Mineralverlustes bzw. der Läsionstiefe mit Hilfe der TMR-Software (TMR für Windows, Version 2.0.27.2, Inspektor Research System BV, Amsterdam, Niederlande) dargestellt und berechnet.

Abbildung 18 zeigt zwei typische Messkurven eines Mikroradiogramms einer Schmelzprobe. Die Schmelzprobe wurde 14 Tage demineralisiert (A) und danach für 14 Tage in Lösung 4 (Paroex[®]) gelagert (B). In Abbildung 18A beträgt der Mineralverlust nach abgeschlossener Demineralisation 2396 Vol.% × μm und die Läsionstiefe 114 μm. Nach der Lagerung in Paroex[®] wurde ein Mineralverlust von 3839 Vol.% × μm und eine Läsionstiefe von 167 μm ermittelt. Der Vergleich des Mineralverlustes zwischen Abbildung 18A und 18B zeigt deutlich eine Vergrößerung und somit eine fortgeschrittene Demineralisation der Schmelzprobe.

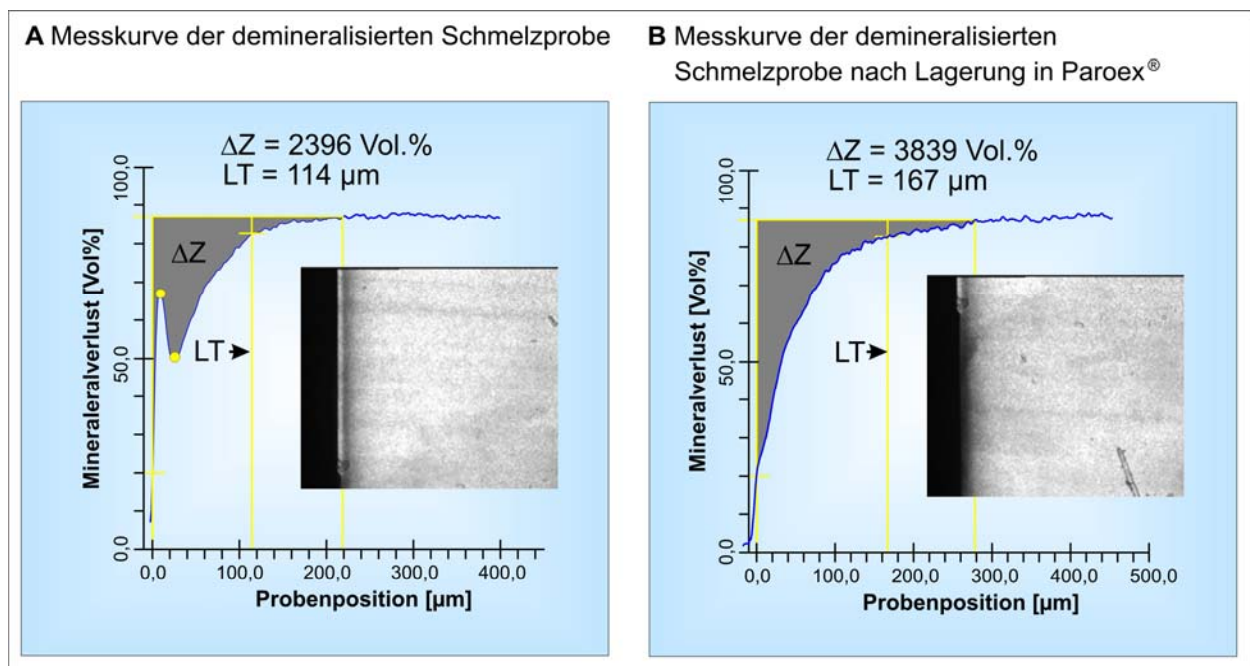


Abb. 18: Berechnung des Mineralverlustes (ΔZ) und der Läsionstiefe (LT) mit dem TMR-Programm bei einer repräsentativen Schmelzprobe nach 14-tägiger Lagerung in Paroex[®].

Abbildung 19 zeigt zwei weitere Messkurven eines Mikroradiogramms einer zuvor demineralisierten Schmelzprobe, die für zwei Wochen in Lösung 5 (Basislösung) gelagert wurde. Deutlich erkennbar ist der durch die Lösung verursachte Mineralverlust

(B) von 3106 Vol.% × μm und eine Läsionstiefe von 109 μm. Abbildung A zeigt einen Mineralverlust von 2120 Vol.% × μm und eine Läsionstiefe von 101 μm nach Abschluss der Demineralisationsphase. Der Vergleich des Mineralverlustes und der Läsionstiefe zwischen Abbildung 19A und 19B offenbart die demineralisierende Wirkung der in diesem Versuch verwendeten CMC-Basislösung (Lösung 5).

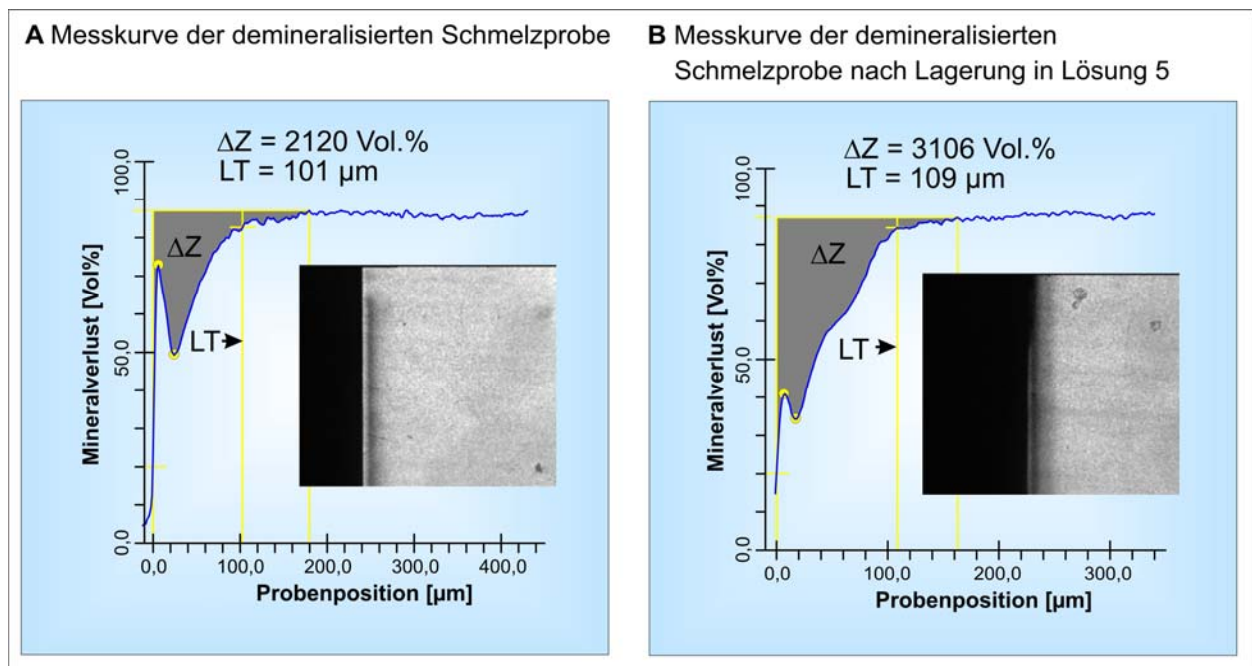


Abb. 19: Berechnung des Mineralverlustes (ΔZ) und der Läsionstiefe (LT) mit dem TMR-Programm bei einer repräsentativen Schmelzprobe nach 14-tägiger Lagerung in Lösung 5 (Basislösung).

Abbildung 20 zeigt die zwei mikroradiografischen Messkurven einer Schmelzprobe. Die Schmelzprobe wurde 14 Tage lang demineralisiert (A) und anschließend für 14 Tage in Lösung 21 gelagert (B). In Abbildung 20A beträgt der Mineralverlust 2122 Vol.% × μm bei einer Läsionstiefe von 121 μm. Nach Ablauf der Versuchsdauer (Abbildung B) konnte ein Mineralgehalt von 1455 Vol.% × μm und eine Läsionstiefe von 82 μm ermittelt werden. Der Vergleich des Mineralverlustes und der Läsionstiefe zwischen Abbildung 20A und 20B zeigt einen remineralisierenden Effekt der Lösung 21.

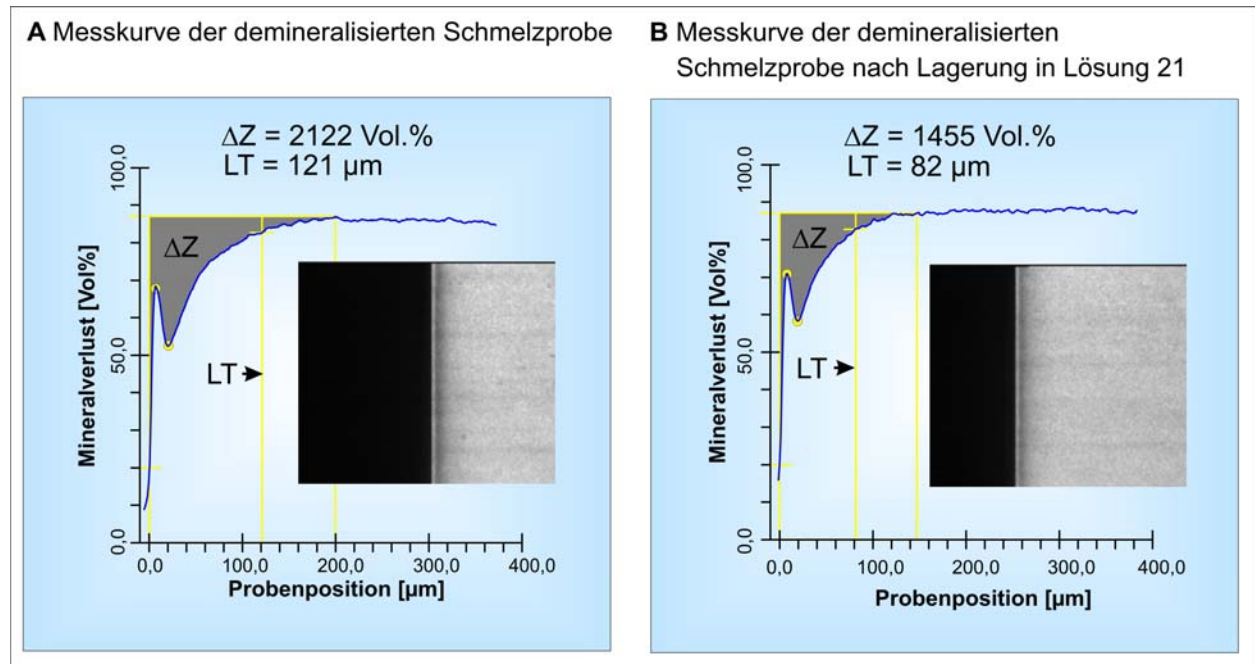


Abb. 20: Berechnung des Mineralverlustes (ΔZ) und der Läsionstiefe (LT) mit dem TMR-Programm bei einer repräsentativen Schmelzprobe nach 14-tägiger Lagerung in Lösung 21.

5.8 Ergebnisse der Viskositätsmessung

Die Messergebnisse der CMC-haltigen Basislösung ergaben einen Mittelwert von $58,4 \text{ mm}^2/\text{s}$ (Standardabweichung: $0,051 \text{ s}$). Eine Lösung mit nur 10 g/l CMC hatte dagegen eine deutlich geringere Viskosität von $22 \text{ mm}^2/\text{s}$ (Standardabweichung: $0,010 \text{ s}$).