

Bewitterung von Kalk- und Zementmörteln mit CO₂, SO₂ und NO_x

DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

vorgelegt von

Dipl.-Chem. Karsten Exner
aus Olpe

eingereicht beim Fachbereich 8
der Universität-Gesamthochschule Siegen
Siegen 2000

Eingereicht:	14. August 2000
Tag der mündlichen Prüfung:	14. November 2000
Gutachter:	Prof. Dr. D. Knöfel Prof. Dr. W. Brameshuber

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Labor für Bau- und Werkstoffchemie der Universität-GH Siegen unter Leitung von Prof. Dr. D. Knöfel. Ihm gebührt mein Dank für die Vergabe des überaus abwechslungsreichen und interessanten Themas und der guten fachlichen sowie persönlichen Betreuung während der Arbeit.

Herrn Prof. Brameshuber und Herrn Prof. Haeuseler danke ich für Ihre Mitwirkung in der Prüfungskommission.

Herrn Born, Herrn Pillep, Herrn Hofheinz, Herrn Walk und Frau Langius danke ich für ihre Mithilfe beim praktischen Teil der Arbeit.

Meinen „Doktorandenzimmerkollegen“ Frau Reinschmidt, Herrn Deckers und Herrn Lenz danke ich für die vielen, ausgiebigen Fachdiskussionen und zahlreichen Tips, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Weiterhin danke ich den Mitgliedern der Arbeitsgruppe, insbesondere Frau Donner, die zahlreiche, „gordische Verwaltungsknoten“ auf wunderbare Weise gelöst hat.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die finanzielle Förderung der Arbeit.

Meiner Familie danke ich für die großartige Unterstützung während meines Studiums und meiner Promotion.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Frau Angelika bedanken, die mir während der Arbeit immer hilfreich und mit großem Verständnis zur Seite gestanden hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Theoretische Grundlagen und Literaturübersicht.....	2
2.1	Bindemittel.....	2
2.1.1	CEM I.....	2
2.1.2	CEM II und CEM III.....	4
2.1.3	HGZ.....	5
2.1.4	Kalke.....	6
2.2	Schadgase.....	6
2.2.1	CO ₂	6
2.2.2	SO ₂	8
2.2.3	NO _x	9
2.2.4	Folgereaktionen.....	11
2.3	Literaturübersicht der bisherigen Untersuchungen.....	11
3	Untersuchungsmethoden.....	16
3.1	Untersuchungen am gesamten Probekörper.....	16
3.1.1	Dynamischer E-Modul.....	16
3.1.2	Biegezugfestigkeit.....	16
3.1.3	Druckfestigkeit.....	16
3.1.4	Wasseraufnahmekoeffizient und offene Porosität.....	17
3.1.5	Frost-Tauwechsel-Widerstand.....	17
3.1.6	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl.....	17
3.1.7	Schwinden.....	18
3.1.8	Neutralisierungstiefe.....	18
3.2	Tiefenprofile.....	18
3.2.1	Ionenchromatographie.....	19
3.2.2	Carbonatbestimmung.....	19
3.2.3	Quecksilberdruckporosimetrie.....	20
3.3	Ergänzende Untersuchungen.....	20
3.3.1	Röntgenbeugungsanalyse.....	20
3.3.2	Rasterelektronenmikroskopie.....	21
3.3.3	Lichtmikroskopie.....	21
4	Ausgangsstoffe und Probenlagerung.....	22

4.1	Bindemittel	22
4.2	Zuschlag.....	23
4.3	Probenherstellung	24
4.4	Probenlagerung	25
4.4.1	Vorlagerung	25
4.4.2	Hauptlagerung	25
4.5	Bewitterungsapparatur.....	27
4.5.1	Übersicht.....	27
4.5.2	Meßgeräte	28
4.5.2.1	NO / NO _x / NO ₂ - Analysator.....	28
4.5.2.2	SO ₂ -Analysator	29
4.5.2.3	CO ₂ -Meßgerät	31
4.5.2.4	Meßgeräteschrank.....	32
4.5.2.5	Meßgeräte für Temperatur und rel. Luftfeuchte	34
4.5.3	Probenbehälter	34
4.5.4	Verschlauchung / Verkabelung	36
4.5.5	Meßwerterfassung und Gassteuerung.....	37
5	Ergebnisse I – Gesamter Probekörper	39
5.1	Dynamischer E-Modul	40
5.2	Biegezugfestigkeit	46
5.3	Druckfestigkeit	52
5.4	Wasseraufnahmekoeffizient	58
5.5	Offene Porosität.....	64
5.6	Frost-Tauwechsel-Widerstand.....	70
5.7	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	76
5.8	Schwinden	82
5.9	Neutralisierungstiefe.....	85
6	Ergebnisse II – Tiefenprofile	95
6.1	Ionenchromatographie	96
6.1.1	Sulfat-Bestimmungen	96
6.1.2	Nitrat/Nitrit-Bestimmung	109
6.2	Carbonatbestimmung.....	111
6.3	Quecksilberdruckporosimetrie.....	123
7	Ergebnisse III – Ergänzende Untersuchungen.....	136

7.1 Röntgenbeugungsanalyse	136
7.2 Rasterelektronenmikroskopie	140
7.3 Lichtmikroskopie.....	147
8 Zusammenfassung	152
9 Literatur	157
10 Anhang.....	164
10.1 Tabellenanhang.....	164
10.2 Abbildungsanhang.....	184

Liste der verwendeten AbkürzungenVerwendete Bindemittel

CEM I	CEM I 42,5 R
CEM I HS	CEM I 42,5 R-HS
CEM I, weiß	CEM I 52,5 R, weiß
CEM II	CEM II/B-S 32,5 R
CEM III	CEM III/B 32,5
HGZ	Hüttensand-Gips-Zement
CL 90	Weißkalkhydrat
N HL 2,0	natürlicher hydraulischer Kalk
N HL 5,0	natürlicher hochhydraulischer Kalk
G1	Bindemittelgruppe 1, Zusammenfassung der Bindemittel CEM I, CEM I HS und CEM I, weiß
G2	Bindemittelgruppe 2, Zusammenfassung der Bindemittel CEM II, CEM III und HGZ
G3	Bindemittelgruppe 3, Zusammenfassung der Bindemittel CL 90, N HL 2,0 und N HL 5,0

Lagerungsarten der Proben

T-Proben	alle trocken gelagerten Proben
T-0	trocken gelagerte Nullproben
T-30	trocken gelagerte Proben mit 30-facher Schadgas-Belastung (s.a. 4.4)
T-100	trocken gelagerte Proben mit 100-facher Schadgas-Belastung
N-Proben	alle wechselfeucht (naß) gelagerten Proben
N-0	wechselfeucht gelagerte Nullproben
N-30	wechselfeucht gelagerte Proben mit 30-facher Schadgas-Belastung
N-100	wechselfeucht gelagerte Proben mit 100-facher Schadgas-Belastung
T/N-0	alle Nullproben (trocken und wechselfeucht gelagert)
T/N-30	alle Proben mit 30-facher Schadgas-Belastung
T/N-100	alle Proben mit 100-facher Schadgas-Belastung

Prüftermine

28d	Prüfung der Proben nach 28 Tagen Vorlagerung
90d	Prüfung der Proben nach 28 Tagen Vorlagerung und 62 Tagen Bewitterung
180d	Prüfung der Proben nach 28 Tagen Vorlagerung und 152 Tagen Bewitterung
360d	Prüfung der Proben nach 28 Tagen Vorlagerung und 332 Tagen Bewitterung
720d	Prüfung der Proben nach 28 Tagen Vorlagerung und 692 Tagen Bewitterung

Quecksilberdruckporosimetrie

GesP	Gesamtporosität in Vol.-%
GP	Gelporen in Vol.-% (Porenradius < 0,03 µm)
KP	Kapillarporen in Vol.-% (Porenradius 10 µm > KP > 0,03 µm)
LP	Luftporen in Vol.-% (Porenradius > 10 µm)

Zementtechnische Abkürzungen

A	Al ₂ O ₃
C	CaO
F	Fe ₂ O ₃
H	H ₂ O
M	MgO
S	SiO ₂
s	SO ₃

Weitere Abkürzungen

Θ	Glanzwinkel bei der Röntgendiffraktometrie
Θ _{Hg}	Randwinkel bei der Hg-Druckporosimetrie
ω	Wasseraufnahmekoeffizient in kg/m ² h ^{0,5}
μ-Wert	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
CAH-Phasen	Calciumaluminathydratphasen
CSH-Phasen	Calciumsilikathydratphasen
EDX	Energiedispersive Röntgenanalytik
E-Modul	Dynamischer Elastizitätsmodul (da in dieser Arbeit nur der dynamische E-Modul verwendet wird, ist der Vorsatz „dyn.“ weggelassen worden)
FTW	Frost-Tauwechsel-Widerstand
HÜS	Hüttensand

M.-%	Massenprozent
NT	Neutralisierungstiefe
O-Methoden	Oberflächenbezogene Untersuchungsmethoden
OP	offene Porosität in Vol.-%
ppb	Parts per billion (Teile pro Milliarden Teile)
ppm	Parts per million (Teile pro Millionen Teile)
REM	Rasterelektronenmikroskopie
β_{BZ}	Biegezugfestigkeit in N/mm ²
β_D	Druckfestigkeit in N/mm ²
ST	Schichttiefe
UBK	untere Bildkante
V-Methoden	Volumenbezogene Untersuchungsmethoden
Vol.-%	Volumenprozent
w_m	Wasseraufnahmegrad in M.-% nach Lagerung unter Wasser im Vakuum bei ca. 30 mbar.

1 EINLEITUNG

Angesichts der in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten immer stärker gewordenen anthropogenen Luftverschmutzung wurde immer häufiger die Frage gestellt, inwieweit diese Luftschadstoffe Mörtel oder Betonbauwerke schädigen. Häufig wurden aufgetretene Schäden wie Ausblühungen, Risse, Abplatzungen und Bewehrungskorrosion mit den Schadgasen CO_2 , SO_2 und NO_x in Verbindung gebracht. Ungeklärt blieb dabei jedoch, welches Gas welche Schäden verursacht bzw. verursachen kann. Daher wurden in der Vergangenheit immer wieder verschiedene Mörtel und Betone den Schadgasen CO_2 , SO_2 und NO_x ausgesetzt. Diese künstlichen Bewitterungen hatten jedoch zwei Nachteile: Zum einen ist meistens nur mit einer Schadgaskomponente, zum anderen, aus Zeitraffungsgründen, mit sehr hohen Konzentrationen bewittert worden. Eine Übertragbarkeit auf die realen Vorgänge war dadurch nur eingeschränkt möglich.

Im Rahmen dieser Arbeit sind daher verschiedene Kalk- und Zementmörtel mit allen drei Gasen, CO_2 , SO_2 und NO_x , gleichzeitig bewittert worden. Die Gaskonzentrationen wurden dabei nur auf das 30- und 100-fache gegenüber einer stark belasteten Industriatmosphäre erhöht. KNÖFEL 1992 fand bei einer 30-fachen CO_2 -Konzentration mit der Praxis vergleichbare Untersuchungsergebnisse. Höhere Konzentrationen waren noch bedingt vergleichbar. Eine 30- und 100-fache Erhöhung der Schadgaskonzentrationen stellt also einen guten Kompromiß zwischen Zeitraffung und auf die Realität übertragbare Ergebnisse dar. Als Bindemittel wurden gängige, häufig eingesetzte Portlandzemente, hüttensandhaltige Zemente und Kalke ausgewählt. Ein Teil der Proben wurde zur Regensimulation regelmäßig kurzzeitig unter Wasser, ein anderer Teil in unbelasteter Laboratmosphäre gelagert. Durch den Vergleich von den Nullproben mit den bewitterten Proben wird der alleinige Einfluß der Schadgase sichtbar. Um den zeitlichen Verlauf der Bewitterung zu erfassen, wurden die Untersuchungen nach verschiedenen Lagerungsdauern durchgeführt. Die längste Lagerung betrug dabei 2 Jahre.

Ziel der Arbeit ist es, möglichst genaue Aussagen über die Vorgänge bei der Bewitterung treffen zu können. Wichtig ist weiterhin zu klären, welche Eigenschaft der Mörtel durch welches Schadgas wie stark beeinträchtigt wird. Vor allem über die Wechselwirkung der Schadgase untereinander bzw. mit den im Mörtel entstehenden Neubildungen ist bislang nur wenig bekannt.

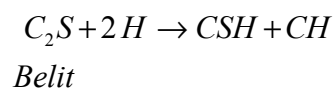
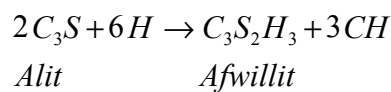
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN UND LITERATURÜBERSICHT

2.1 Bindemittel

Um die bei einer Bewitterung möglichen bzw. tatsächlich ablaufenden Prozesse verstehen zu können, ist es wichtig, die Phasen zu kennen, die bei der Erhärtung der verschiedenen Mörtel entstehen. Dieses Kapitel gibt eine kurze Übersicht über die ablaufenden Prozesse. Einen tieferen Einblick geben HENNING 1997, SCHOLZ 1991 und WESCHE 1993.

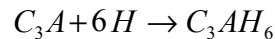
2.1.1 CEM I

Die nach DIN 1164 genormten CEM I-Bindemittel setzen sich hauptsächlich aus den Zementphasen Alit (C_3S), Belit (C_2S), Aluminat (C_3A) und Ferrat (C_4AF) zusammen. Zur Regelung der Erstarrungsgeschwindigkeit wird beim Aufmahlen der Zementklinker ca. 5 bis 8 M.-% Gips und/oder Anhydrit zugemahlen. Alit und Belit überwiegen deutlich, außerdem dürfen noch bis 5 M.-% andere Bestandteile enthalten sein. Über die Mahlfeinheit kann die Festigkeitsentwicklung gesteuert werden. Ein CEM I 52,5 ist z.B. feiner aufgemahlen als ein CEM I 32,5. Wird der Zement mit Wasser versetzt, laufen verschiedene Hydratationsreaktionen ab. Alit und Belit hydratisieren unterschiedlich schnell zu den sogenannten CSH-Phasen, die die Festigkeit bestimmen.

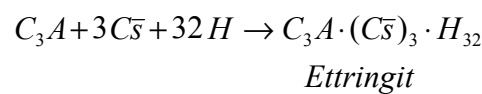


Bei beiden Reaktionen entsteht Calciumhydroxid, $Ca(OH)_2$ (Portlandit). Das Calciumhydroxid hat entscheidende Bedeutung für die Bewehrung. Zusammen mit geringen Mengen an Alkalien erzeugt es im Zementstein einen pH-Wert von 12,5 bis 13 und passiviert damit den Bewehrungsstahl. Das Calciumhydroxid bildet, neben den in geringen Mengen enthaltenen Alkalien (NaOH und KOH), für die Bewitterung die reaktivste Phase, da es leicht mit allen drei Schadgasen reagieren kann.

Das Aluminat hydratisiert ebenfalls, trägt aber nicht zur Festigkeit des Zementsteins bei.

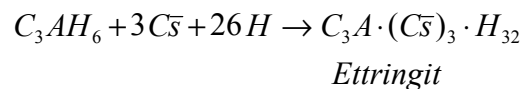


Bei dieser Reaktion entsteht kein Portlandit. Allerdings würde diese Reaktion das Zement/Wasser-Gemisch schon nach Minuten erstarren lassen, da die Aluminathydrate als tafelförmige Kristalle sehr schnell miteinander vernetzen. Zur Steuerung der Erstarrung wird dem Zement daher Sulfat in Form von Gips oder Anhydrit zugegeben. Dieses bildet mit dem C_3A zunächst an der Oberfläche feinkristallinen Ettringit.



Erst nach Stunden bilden sich durch Re- oder Sammelkristallisationsprozesse größere Kristalle, die eine erste Verfestigung hervorrufen. Im weiteren Hydratationsverlauf stellen dann die CSH-Phasen den Träger der Festigkeit dar.

Der Ettringit kann sich auch nachträglich im schon erhärteten Zementstein bilden, sofern Aluminat oder Aluminathydrate mit von außen eingetragendem Sulfat in Kontakt kommt:



Diese sekundäre Ettringitbildung kann im erhärteten Zementstein zu starken Treibschäden führen, da bei der Reaktion das Volumen um das ca. 8-fache vergrößert wird. HS Zemente dürfen daher nicht mehr als 3 M.-% C_3A enthalten, um eine solche Reaktion weitgehend zu unterdrücken.

Das Ferrat bildet bei der Hydratation komplexe Calciumaluminatferratsulfathydrate, die wie das C_3A nicht zur Festigkeit beitragen. Das Ferrat verleiht dem Zement seine graue Farbe und entsteht bei der Zementherstellung aus den, in den Rohstoffen vorhandenen Eisenverbindungen. Weißzement wird daher aus Rohstoffen hergestellt, die keine Eisenverbindungen enthalten.

2.1.2 CEM II und CEM III

Diese ebenfalls in DIN 1164 genormten Bindemittel enthalten neben Portlandzement weitere Bestandteile wie HÜS, Puzzolane etc. Tabelle 2.1 zeigt die Bestandteile der in DIN 1164 genormten Zemente.

Tabelle 2.1: Arten und Zusammensetzung der in DIN 1164 genormten Zemente

Zementart	Benennung	Kurzzeichen	Hauptbestandteile ¹⁾						Nebenbestandteile ²⁾
			Portlandzementklinker (K)	Hüttensand (S)	Natürliches Puzzolan (P)	Kieselsäurereiche Flugasche (V)	Gebrannter Schiefer (T)	Kalkstein (L)	
CEM I	Portlandzement	CEM I	95 – 100	–	–	–	–	–	0 – 5
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	80 – 94	6 – 20	–	–	–	–	0 – 5
		CEM II/B-S	65 – 79	21 – 35	–	–	–	–	0 – 5
	Portlandpuzzolan-zement	CEM II/A-P	80 – 94	–	6 – 20	–	–	–	0 – 5
		CEM II/B-P	65 – 79	–	21 – 35	–	–	–	0 – 5
	Portlandflugasche-zement	CEM II/A-V	80 – 94	–	–	6 – 20	–	–	0 – 5
	Portlandölschiefer-zement	CEM II/A-T	80 – 94	–	–	–	6 – 20	–	0 – 5
		CEM II/B-T	65 – 79	–	–	–	21 – 35	–	0 – 5
	Portlandkalkstein-zement	CEM II/A-L	80 – 94	–	–	–	–	6 – 20	0 – 5
Portlandflugaschehüttenzement	CEM II/B-SV	65 – 79	10 – 20	–	10 – 20	–	–	0 – 5	
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	35 – 64	36 – 65	–	–	–	–	0 – 5
		CEM III/B	20 – 34	66 – 80	–	–	–	–	0 – 5

¹⁾ Die angegebenen Werte in M.-% beziehen sich auf die aufgeführten Haupt- und Nebenbestandteile des Zements ohne Calciumsulfat und Zementzusatzmittel

²⁾ Füller oder ein oder mehrere Hauptbestandteile, soweit sie nicht Hauptbestandteile des Zements sind

In dieser Arbeit sind Zemente mit HÜS als Zumahlstoff untersucht worden. HÜS besteht aus abgeschreckter Hochofenschlacke. Durch das Abschrecken entstehen latent hydraulische Glasphasen mit Zusammensetzungen wie z.B. C_2MS_2 (Åkermanit) oder C_2AS (Gehlenit). Diese Phasen werden u.a. durch Portlandit angeregt und hydratisieren dann zu CSH-Phasen und $Mg(OH)_2$ bzw. $Al(OH)_3$. Trotz der hohen Al_2O_3 -Anteile sind diese Bindemittel nicht durch den Angriff von Sulfat und daraus sich bildendem Ettringit gefährdet. Diese Al_2O_3 enthaltenden Phasen reagieren nicht mit Sulfat.

Während der Hydratation bilden sich also prinzipiell die gleichen Phasen wie bei der Portlandzementhydratation, wenngleich sich die Mengen an CSH-Phasen und Portlandit unterscheiden. Die Festigkeiten liegen in ähnlichen Bereichen, d.h. durch die Hydratation des HÜS bilden sich ähnliche Mengen an CSH-Phasen. Da die latent hydraulischen Glasphasen des HÜS CaO-ärmer sind, bildet sich bei der Hydratation aber deutlich weniger Portlandit,

was sich z.B. in den geringeren Carbonatgehalten nach der Carbonatisierung oder höheren Carbonatisierungsgeschwindigkeiten niederschlägt.

Abschließend sei noch angemerkt, daß die Hydratation sowohl der Zementphasen als auch der HÜS Phasen auch nach Jahren noch nicht abgeschlossen ist. Die Festigkeiten steigen stetig an, wenn auch nach 1 bis 2 Jahren nur noch sehr gering.

2.1.3 HGZ

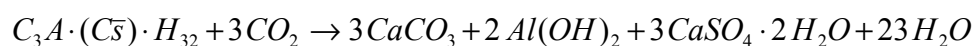
Einen anderen Erhärtungsmechanismus weist der HGZ, ein Gemisch aus HÜS, Gips und Zement (üblicherweise Portlandzement), auf. Dieses Bindemittel wurde von TRAUTMANN 1993 für die Bauwerkssanierung entwickelt. Der früher als Sulfathüttenzement (SHZ) genormte HGZ erhärtet, neben der hydraulischen Erhärtung (CSH-Phasen-Bildung), aufgrund der Bildung von Ettringit nach sulfatischer Anregung des HÜS (Beispielreaktion an der HÜS-Phase C_5S_3A).



Das optimale Mischungsverhältnis (in M.-%) von HÜS:Gips:Zement beträgt 85:10:5. Alternativ kann auch Anhydrit eingesetzt werden. Dieser reagiert nach dem Vermischen mit Wasser zuerst zu Gips und anschließend weiter. Das Mischungsverhältnis (in M.-%) beträgt dann 86,4:8,5:5,1 (HÜS:Anhydrit:Zement).

Ist der Gips verbraucht, so bilden sich kalkarme CSH- und auch CAH-Phasen. Aufgrund des hohen HÜS-Anteils ist der HGZ ein hochsulfatwiderstandsfähiges Bindemittel.

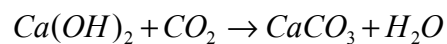
Der gebildete Ettringit führt nicht zu Treiberscheinungen, da zu dem Zeitpunkt, an dem sich der Ettringit bildet, die Bindemittelmatrix noch plastisch ist. Die gebildeten Ettringit-Nadeln bilden neben den CSH-Phasen den Träger der Festigkeit. Ein Nachteil besteht allerdings in der CO_2 -Empfindlichkeit des Ettringits (STARK 1995A). Durch CO_2 wird Ettringit zerstört (STARK 1995B) und die Festigkeiten des HGZ vermindert:



2.1.4 Kalke

Kalke nach DIN 1060-1 sind Bindemittel, die überwiegend aus Ca(OH)_2 bestehen. Luftkalke bestehen hauptsächlich aus Ca(OH)_2 und können noch inerte, nicht hydraulische Nebenbestandteile besitzen. Daneben können noch hydraulische Phasen vorliegen, wobei die Kalke dann als hydraulische Kalke bezeichnet werden. Die hydraulischen Phasen bestehen meist, bedingt durch den Brennprozeß des Kalkes, aus Belit, die, wie bei den Zementen beschrieben, mit Wasser hydratisieren. Durch die hydraulischen Phasen erstarren die Kalke wesentlich schneller, es müssen aber nicht unbedingt höhere Festigkeiten erreicht werden.

Die wichtigste Erhärtungsreaktion besteht aus der Bildung von Calcit aus Portlandit:



Die zu Beginn sehr geringen Festigkeiten werden durch diese Bildung von Calcit erheblich gesteigert. Wird der Kalk sehr hohen CO_2 -Konzentrationen ausgesetzt, so können sich auch Vaterit oder Aragonit als CaCO_3 Modifikationen bilden (KNÖFEL 1992).

2.2 Schadgase

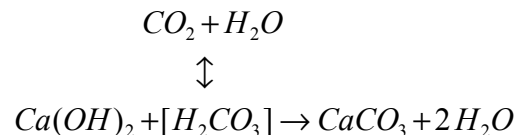
Mit dem Begriff „Schadgase“ werden im Zusammenhang mit den in dieser Arbeit geschilderten Untersuchungen die Gase CO_2 , SO_2 und NO_x bezeichnet. Dieses Kapitel soll kurz die Quellen und die möglichen Reaktionen mit den Mörtelbestandteilen darstellen.

2.2.1 CO_2

CO_2 kommt in natürlicher Atmosphäre in einer Konzentration von ca. 0,03 Vol.-% vor, was ca. $2,3 \cdot 10^{12}$ t entspricht (RÖMPP 1995). Im Wasser der Ozeane ist ca. 50 mal soviel gelöst. Der Mensch erhöht diese gewaltigen Mengen langsam aber stetig durch die Verbrennung fossiler Energieträger wie Öl, Gas und Kohle. So hat sich die CO_2 -Konzentration seit Anfang des 19. Jh. von ca. 0,028 Vol.-% auf heute ca. 0,035 Vol.-% erhöht. Lokal kann es, z.B. in der Nähe von Kohlekraftwerken, zu einer weiteren Erhöhung der Konzentration kommen,

besonders bei ungünstigen Wetterlagen. Über längere Zeiträume (Jahre) gemittelt, liegt die Konzentration jedoch bei den angegebenen 0,03 Vol.-%.

Chemisch ist das CO_2 das reaktionsträgste der drei Schadgase. Es löst sich in Wasser, wobei sich sehr geringe Mengen an Kohlensäure bilden (H_2CO_3), die in konzentrierter Form nicht stabil ist. Diese Kohlensäure kann dann mit den verschiedenen Mörtelphasen reagieren. Die bedeutendste Reaktion ist die mit Portlandit:

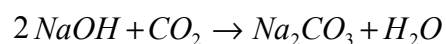


Bei der Reaktion wird der pH-Wert deutlich gesenkt, von ca. 12,6 bis 13 auf 7 - 8. Bei bewehrtem Beton verliert dann die Bewehrung ihren Korrosionsschutz. Die Folge ist ein Rosten der Bewehrung unter starker Volumenzunahme und Absprengungen in der Betonoberfläche. Diesem Schadensbild kann z.B. durch eine ausreichende, normgemäße Betonüberdeckung entgegengewirkt werden.

Weiterhin kann das CO_2 bzw. die Kohlensäure die Ettringitphasen (beim HGZ, s.o.) oder auch die CSH/CAH-Phasen selbst zersetzen. Im letzteren Fall bilden sich dann Calcit und gelartige Silikatphasen bzw. Aluminiumhydroxid.

Während also das CO_2 bei zementgebundenen Mörteln und Betonen bzw. beim HGZ als Schadgas wirkt, so ist die Reaktion bei den Kalken erforderlich, um eine Erhärtung der Mörtel zu erreichen. Die Bezeichnung „Schadgas“ ist also im Zusammenhang mit den Kalken nicht ganz korrekt, wird aber im Zuge einer einheitlichen Terminologie beibehalten.

Weiterhin kann das CO_2 mit den in den Mörteln vorkommenden Alkalien reagieren:



Auch dabei wird der pH-Wert gesenkt. Allerdings zeigt eine wässrige Lösung von Na_2CO_3 oder K_2CO_3 einen pH-Wert von ca. 12,5. Dieser pH-Wert ist ausreichend, um Phenolphthalein zu färben. HENSEL 1985 beschreibt in diesem Zusammenhang eine Fehlinterpretation der Carbonatisierungstiefe. Auch bei den in dieser Arbeit untersuchten Proben wurde dieser „Fehler“ festgestellt (s.a. 5.9).

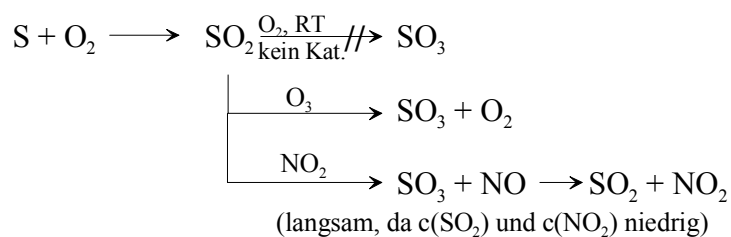
2.2.2 SO₂

Auch SO₂ ist in beträchtlichen Mengen in natürlicher Atmosphäre enthalten (RÖMPP 1995). So werden ca. 650 Mio. t/Jahr an SO₂ durch Vulkanausbrüche und Fumarolen freigesetzt. Nicht unbedeutend mit ca. 100 Mio. t/Jahr sind die antropogenen SO₂-Mengen. Ganz allgemein entsteht SO₂ immer dort, wo schwefelhaltige Brennstoffe verbrannt werden (SCHMIDT-REINHOLZ 1986). Dazu zählen neben Kraftwerken auch Fernheizungen, Müllverbrennungsanlagen, keramische Produktionsstätten, Ziegeleien und Zementöfen. Die Emissionen durch Kfz sind dagegen sehr gering.

In den meisten Fällen entsteht nur SO₂, während SO₃ nur bei höheren Temperaturen z.B. in Ziegelöfen gebildet wird. Da i.a. die Abgase schnell mit Luft verdünnt werden, ist auch eine spätere Oxidation des SO₂ zu SO₃ kaum möglich. Nach HOLLEMANN 1985 findet bei Raumtemperatur an Luft ohne Katalysator keine Umwandlung von SO₂ zu SO₃ statt. Selbst mit Katalysatoren ist die Reaktion sehr langsam. Zur Schwefelsäureherstellung wird z.B. bei 420 - 440 °C, mit einem Katalysator und bei 5 bar Druck gearbeitet, um einen guten Umsatz von SO₂ zu SO₃ zu erreichen.

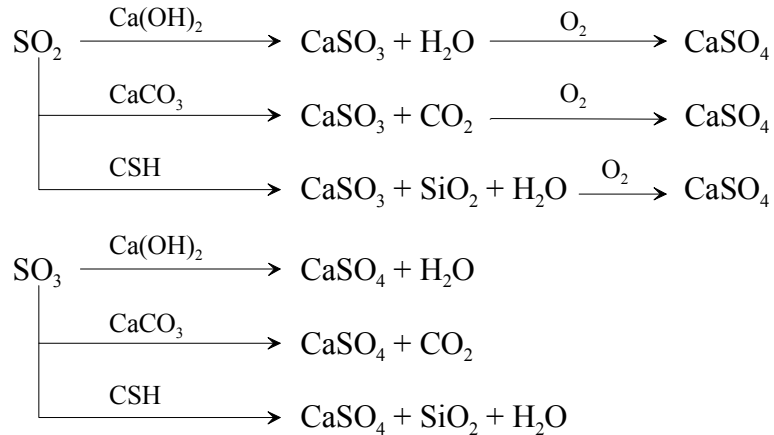
Ozon oder auch NO₂ oxidieren hingegen SO₂ gut zu SO₃. Vor allem im Sommer bei längerer Sonneneinstrahlung entsteht photochemisch in Bodennähe Ozon in höheren Konzentrationen. Die Oxidation mit NO₂ ist meist langsam, da die Konzentrationen an NO₂ zumeist niedrig sind. Gegenüber CO₂ und NO ist SO₂ chemisch inert.

Im folgenden sind die SO₂/SO₃ Bildungsreaktionen aufgeführt:



Mit den verschiedenen Mörtelphasen kann SO₂ und auch SO₃ auf vielfältige Weise reagieren. Feuchtigkeit spielt dabei eine wichtige Rolle, da sich, ähnlich dem CO₂, zunächst die schweflige Säure bzw. Schwefelsäure bildet, die dann weiterreagiert. Aber auch Gas/Feststoff-Reaktionen sind nicht ausgeschlossen. Aufgrund der langsamen Oxidation von SO₂ zu SO₃ kann davon ausgegangen werden, daß hauptsächlich zunächst das SO₂ bzw. die schweflige Säure den Baustoff angreift. Erst danach erfolgt eine Weiteroxidation. Bei allen Reaktionen entsteht zunächst Calciumsulfid (CaSO₃). Dieses wird mit Luftsauerstoff

allmählich zu Gips oxidiert. Im folgenden sind mögliche Reaktionen der Mörtelphasen mit SO_2 dargestellt. Gebildet werden überwiegend die Hydrate, zur besseren Übersicht sind jedoch die wasserfreien Phasen dargestellt.



Das zumeist gebildete Calciumsulfat liegt vorzugsweise als Dihydrat (Gips) vor. Die Reaktionsgleichungen geben jedoch keinen Aufschluß darüber, welche Phase bevorzugt reagiert.

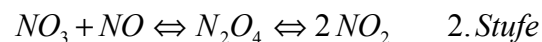
2.2.3 NO_x

Zwar entstehen auch in der natürlichen Atmosphäre Stickoxide durch Bakterien oder elektrische Entladungen, jedoch ist die dabei entstehende Menge sehr gering. Der weitaus größte Teil der Stickoxide in der Luft ist anthropogenen Ursprungs. Die Entstehung ähnelt der des SO_2 , jedoch gibt es nach SCHMIDT-REINHOLZ 1986 insgesamt drei verschiedene Möglichkeiten, bei denen Stickoxide, primär das NO , entstehen.

- Promptes NO : Aus dem Brennstoff und Luftstickstoff entstehen C-N-Radikale, die durch Luftsauerstoff zu NO oxidiert werden.
- Brennstoff NO : Bei der Verbrennung von N-haltigen Verbindungen (z.B. Amine) entsteht NO direkt.
- Thermisches NO : Oberhalb von ca. 1200 - 1300 °C entsteht NO direkt aus N_2 und O_2 .

NO -Quellen sind neben den bei SO_2 aufgeführten Quellen auch der Kfz-Verkehr (SCHURATH 1980), bei dem vor allem thermisches NO entsteht. Durch den verstärkten Einsatz

von Katalysatoren in den letzten Jahren konnten diese Emissionsmengen zurückgedrängt werden. Im Abgas kann NO weiteroxidiert werden. Erfolgt jedoch schnell eine größere Verdünnung des Abgases, wird die Reaktion sehr langsam. Bei 0,1 ppm NO-Gehalt wird nur noch 4,5 %/Tag zu NO₂ durch Luftsauerstoff weiteroxidiert. Der Grund dafür liegt in dem Reaktionsmechanismus:

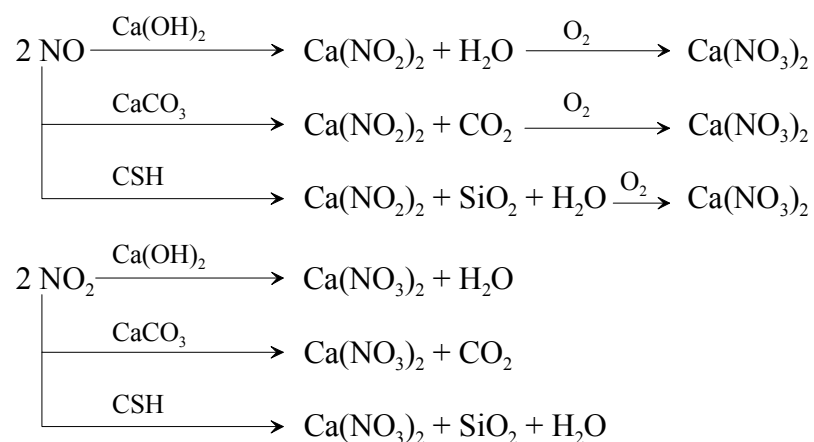


Das Geschwindigkeitsgesetz ergibt sich zu:

$$v = k \cdot c_{\text{NO}}^2 \cdot c_{\text{O}_2}$$

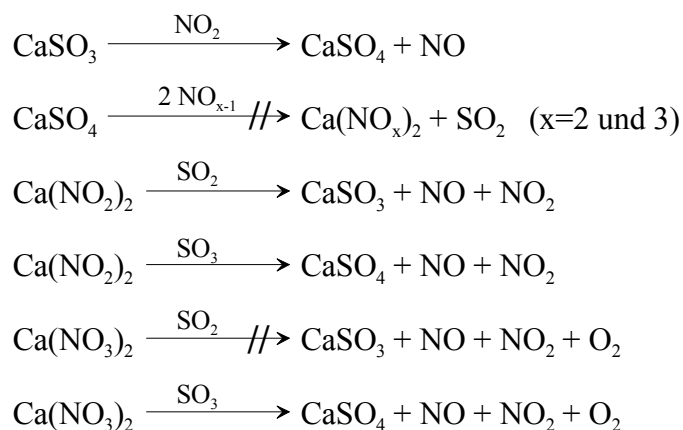
Die Reaktionsgeschwindigkeit ist also quadratisch von der NO-Konzentration abhängig. Mit Ozon oder Peroxidradikalen wird NO sehr schnell zu NO₂ oxidiert.

NO und NO₂ stehen im Gleichgewicht mit ihren Dimeren. Beide Gase sind schlecht wasserlöslich und bilden somit mit Wasser kaum salpetrige Säure bzw. Salpetersäure. Ebenso ist die trockene Deposition von NO sehr langsam; bei NO₂ ist sie aber vergleichbar mit SO₂. Im Folgenden sind die möglichen Reaktionen von NO bzw. NO₂ mit den Mörtelphasen aufgeführt (wiederum wasserfreie Darstellung, s.o.):



2.2.4 Folgereaktionen

Mit den neugebildeten Verbindungen können die Schadgase ebenfalls reagieren. Die folgenden Reaktionen zeigen zum einen die Oxidation von Calciumsulfit, zum anderen den Abbau von gebildetem Calciumnitrit und Calciumnitrat.



Es gibt also drei Abbaureaktionen für Calciumnitrit bzw. -nitrat, während gebildeter Gips stabil ist.

Einen weiterführenden Überblick über die Chemie der Atmosphäre und deren Bestandteile, insbesondere der anthropogenen Luftverunreinigungen, geben FELLEBERG 1992, GRAEDEL 1994 oder KOLAR 1990.

2.3 Literaturübersicht der bisherigen Untersuchungen

Die Untersuchung anthropogener Luftschadstoffe erfolgte als erstes an Natursteinen, da die Natursteinverwitterung in Großstädten ab Mitte des letzten Jahrhunderts immer offensichtlicher wurde. Zahlreiche Untersuchungen, z.B. von BEILKE 1975, BRAUN 1970, SKOULIKIDIS 1981, GAURI 1983, COOPER 1994 oder HANEEF 1993 belegen das. Umfangreiche Übersichten geben NIESEL 1979 oder KNÖFEL 1981. Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß Natursteine mit carbonatischer Matrix durch die Schadgase angegriffen werden. Dabei bilden sich lösliche Sulfate und Nitrate, die ausgewaschen werden können. Neben Gips wurde zumeist kein Nitrat nachgewiesen, meist mit dem Hinweis auf die leichte Löslichkeit der Nitrate. Es findet sich jedoch kein Hinweis auf den „Abbau“ von Nitrat durch SO₂ oder SO₃ (s.a. 2.2.4). Durch die Neubildungen kommt es zum Oberflächenabtrag oder zu

Reaktionskrusten. Durch andere Einflüsse wie z.B. Frost sind dadurch auch Absprengungen möglich. NIESEL 1979 weist jedoch darauf hin, daß die Luftschadstoffbelastung allein nicht überschätzt werden sollte, da noch viele andere Faktoren eine wesentliche Rolle bei der Natursteinverwitterung spielen. Bei allen künstlichen Bewitterungen wurde meist nur mit einer Schadgaskomponente gearbeitet, die zudem, zur Zeitraffung, extrem stark erhöht war. Dadurch ist eine Übertragung dieser Ergebnisse auf die Realität nur sehr eingeschränkt möglich.

Bei der Schädigung von Mörtel und Beton wurden häufig das SO_2 und die Stickoxide als nicht oder wenig schädigend eingestuft, da die Konzentrationen in der Atmosphäre gegenüber CO_2 ca. 5000 bis 15000 mal geringer sind. Viele Untersuchungen belegten jedoch das Gegenteil.

SCHOLL 1991A untersuchte die Beeinflussung durch Schadgase an älteren Gebäuden. Es zeigten sich deutliche Sulfatzunahmen nur in den obersten Schichten, wobei allerdings 10 mm dicke Schichten untersucht wurden. Durch Emittenten in der Umgebung der Gebäude wurden die Meßdaten, in Abhängigkeit von der Himmelsrichtung (Schlagregen) beeinflusst. Als häufigster Schaden wurde ein Oberflächenabtrag von ca. 2–3 mm in 50 Jahren (ca. 0,05 mm/Jahr) beobachtet. Nitrat war nur in Sonderfällen nachweisbar, z.B. bei Gebäuden der chemischen Industrie.

Ähnlich wie bei der Natursteinverwitterung wurden auch Mörtel und Betone häufig künstlich bewittert und dabei zur Zeitraffung erhöhten Schadgaskonzentrationen ausgesetzt. Meist erfolgten die Untersuchungen nur mit einer der drei Schadgase, in Ausnahmefällen auch mit zwei Gasen. Die Konzentrationen wurden dabei extrem stark erhöht und betragen ca. das 1000- bis 50000-fache gegenüber einer stark belasteten Industrielatmosphäre. Bezugspunkt sind die in dieser Arbeit verwendeten Konzentrationen einer stark belasteten Industrielatmosphäre (Zahlenbasis 1996, längerfristige Mittelwerte). Somit ist eine Übertragung auf die Vorgänge in der Realität kaum möglich.

Die weitaus größte Zahl an Untersuchungen beschäftigt sich mit dem Einfluß von CO_2 . KNÖFEL 1992 untersuchte, inwieweit die CO_2 -Konzentration zur Zeitraffung erhöht werden kann, um noch realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten. Es zeigte sich, daß eine 30-fache Erhöhung der CO_2 -Konzentration (1 Vol.-%) eine sehr gute Übereinstimmung der

Carbonatisierung mit der Praxis liefert. Eine Erhöhung um das 100-fache (3 Vol.-%) zeigte noch eine gute Annäherung an die natürliche Carbonatisierung. Daher wurde auch in dieser Arbeit die Schadgaskonzentration aller drei Schadgase um das 30- und 100-fache erhöht.

Eine gute Literaturübersicht zur Schadgaswirkung auf Betonoberflächen bis 1996 liefert SCHERPKE 1996. CO₂ ermöglicht die schon beschriebene Bewehrungskorrosion, SO₂ und NO_x greifen die Betonsubstanz an und verursachen dabei einen Materialabtrag von ca. 0,05 mm/Jahr, zusammen mit Regen und weichem Wasser ca. 0,1 mm/Jahr. Diese Angaben gelten jedoch nur bei guter Betonqualität; schlechte Qualität erhöht den Abtrag deutlich. Weiterhin führt er aus, daß die Bewitterungsversuche im Labor zwar die Zeit raffen, die Ergebnisse aber nicht auf die Realität übertragbar sind. Bis dato sind nur tendenzielle Prognosen möglich, signifikante Schäden durch die Schadgase SO₂ und NO_x sind jedoch nicht zu erwarten.

Eine allgemeine Übersicht über die Korrosion von Beton zeigt KNÖFEL 1978. Dargestellt wird der lösende Angriff (durch Säuren, austauschfähige Salze, weiches Wasser, Fette und Öle) und der treibende Angriff (Kalktreiben, Magnesiatreiben, Sulfatreiben, Alkali-Kieselsäure-Reaktion, Bewehrungstreiben). Ähnliche Übersichten zeigen NICKLITZ 1986 oder STARK 1995B.

SCHOLL 1991C führte zu einer Untersuchung mit ca. 20-facher (0,7 Vol.-%) CO₂- und ca. 36000-facher (600 ppm od. 0,06 Vol.-%) SO₂-Konzentration, zum anderen mit ca. 15000-facher (600 ppm) NO₂-Konzentration durch. Es bildeten sich nach 90-tägiger Bewitterung Gips bzw. Calciumnitratkrusten. Erhöhte Sulfat- bzw. Nitratkonzentrationen wurden jedoch nur in der oberflächennahen Zone (0 - 5 mm) festgestellt. Regelmäßige Wässerungen (zur Regensimulation) führten zu niedrigeren Sulfat- bzw. Nitratkonzentrationen und zu einem Abmehlen der Oberfläche. Selbst die sehr hohen Schadgaskonzentrationen führten nicht zu Ettringit- oder Gipstreiben.

Zahlreiche ähnliche Untersuchungen, die in Tabelle 2.2 aufgeführt sind, kommen zu sehr ähnlichen Ergebnissen.

Tabelle 2.2: Bewitterungsbedingungen verschiedener Autoren (Auswahl)

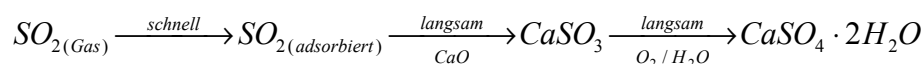
Autor	Bewitterungsbedingungen
KNÖFEL 1985	Betonplatten: einmalig 1,8 g/m ³ SO ₂ pro Tag (ca. 670 ppm unmittelbar nach Einleitung) Mörtelprismen: 2 mal 1.31 g/m ³ SO ₂ pro Tag (ca. 1000 ppm gesamt)
STERNAD 1985	Oberputze: 1000 ppm SO ₂ (ca. 60000-fache Belastung) bei 30°C
KNÖFEL 1991	Mörtelprismen: 600 ppm NO ₂
KNÖFEL 1995	Mörtelprismen: 2 mal 1,3 g/m ³ SO ₂ pro Tag, dabei 8 stündiges Aufheizen auf 40 °C

Allen gemein sind die extremen Bedingungen mit stark erhöhten Schadgaskonzentrationen und z.T. erhöhten Temperaturen. Trotz dieser Bedingungen werden lediglich in den oberen 5 mm der Proben erhöhte Sulfat- bzw. Nitratgehalte gefunden. Meist findet auch ein Abmehlen der Oberfläche statt. Regelmäßige Wässerung verringert durch Auswaschung die Salzkonzentrationen. Die Druckfestigkeiten wurden, bis auf Ausnahmen, kaum beeinträchtigt.

KNÖFEL 1996 bewitterte Mörtelproben mit nur 50 mg/m³ SO₂ (ca. 1100-fache Belastung, ca. 18 ppm). Wiederum wurde nur in der 0 - 5 mm Schicht eine Sulfatzunahme festgestellt. Festigkeiten und Wasseraufnahme wurden nicht wesentlich beeinflusst. Aufgrund der geringen SO₂-Konzentrationen wurde weniger Gips gebildet und somit der Nachweis von Calciumsulfid ermöglicht.

Auch OPPERMANN 1973 fand eine primäre Calciumsulfidhalbhydrat-Bildung. Er bewitterte dabei synthetische CSH-Phasen mit gesättigter SO₂-Atmosphäre und nahezu 100 % rel. Luftfeuchtigkeit. Erst nach längeren Reaktionszeiten bzw. in oxidierender Rauchgasatmosphäre wurde daraus sekundär Halbhydrat oder Gips gebildet. Beide Untersuchungen sprechen also für einen primären SO₂-Angriff und erst danach erfolgreicher Oxidation zum Sulfat.

JOHANSSON 1986 bewitterte Natursteine mit 1,6 ppm SO₂ (100-fache Belastung) und 3,1 ppm NO₂ (80-fache Belastung). Er stellte folgenden SO₂-Angriffsmechanismus auf:



NO₂ beschleunigt die Umwandlung (Schritt 2) und fördert somit die SO₂-Adsorption.

MÜLLER 1993 lagerte Betonwürfel drei Jahre im Freien mit einer durchschnittlichen SO₂-Belastung von 220 µg/m³. Auch diese Bewitterung zeigt nur eine Sulfatisierung der Oberflächenschicht, SO₂ dringt nicht tief in den Baustoff ein. Außerdem ist eine Abhängigkeit von der Betonqualität gegeben.

ZEUS 1995 lagerte bewehrte Betonproben immerhin 50 Jahre lang im Freien. Es zeigten sich lediglich oberflächennahe Abwitterungen und Neutralisierungstiefen von 8 bis 23 mm. 30 mm tief liegende Bewehrung wurde nicht angegriffen.

HOFFMANN 1995 versuchte, den Effekt von Luftverunreinigungen auf Putzmörtel zu quantifizieren. Dazu wurden freigelagerte, regengeschützte Probenplatten und verschiedene Bauwerke untersucht. Aufgrund von sich verändernden Randbedingungen (z.B. Verminderung der Schadstoffbelastung durch geänderte gesetzliche Vorschriften) erwies sich das Aufstellen einer Dosis/Wirkungs-Beziehung beim Angriff von SO₂ bzw. NO_x als sehr schwierig. Eine Erhöhung der Sulfatgehalte war nur in den oberflächennahen Schichten (bis 2 mm) festzustellen, tiefere Zonen wurden nicht beeinträchtigt.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß bisherige Untersuchungen an Mörtel bzw. Beton nicht mit allen drei Schadgasen gleichzeitig durchgeführt wurden und die Schadgaskonzentrationen extrem stark gegenüber „normaler“ Belastung erhöht wurden. Erhöhte CO₂-Konzentrationen beschleunigen die Carbonatisierung und erhöhen z.B. die Festigkeiten geringfügig. Untersuchungen mit erhöhten SO₂- oder NO_x-Konzentrationen stellten eine oberflächennahe Beeinträchtigung fest, wobei in Schichten von 0 – 5 mm Dicke Gips bzw. Calciumnitrat gefunden wurde. Daneben wurde z.T. auch Calciumsulfit nachgewiesen. Die mechanischen Kennwerte blieben dabei weitgehend unbeeinflusst.

3 UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Die Untersuchungen wurden in 2 Bereiche eingeteilt. Zum einen erfolgten Messungen am gesamten Probekörper, zum anderen wurden Messungen in verschiedenen Schichttiefen als Tiefenprofil durchgeführt.

3.1 Untersuchungen am gesamten Probekörper

3.1.1 Dynamischer E-Modul

Die Bestimmung der dynamischen Elastizitätsmoduli (E-Modul) erfolgte mit Hilfe der Resonanzfrequenzmessung nach KOTTAS 1964 und KNÖFEL 1993 (S. 91 ff). Diese zerstörungsfreie Messung wurde mit einem Meßgerät Typ Digi EG c2 (Hersteller: Fa. Labek) durchgeführt.

3.1.2 Biegezugfestigkeit

Die Bestimmung der Biegezugfestigkeit (β_{BZ}) erfolgte in Anlehnung an DIN EN 196. Die Probekörper wurden dabei auf den nicht mit Kunstharz versiegelten Seiten (s.a. 4.3) belastet. Die Festigkeitsprüfung wurde mit einer Prüfpresse Typ Toni Comp III (Hersteller: Fa. Toni Technik) durchgeführt.

3.1.3 Druckfestigkeit

Im Anschluß an 3.1.2 erfolgte die Bestimmung der Druckfestigkeit (β_D) in Anlehnung an DIN EN 196 an fünf der sechs Probenhälften der Biegezugfestigkeitsprüfung. Die sechste Probenhälfte wurde zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechsel-Widerstandes (s. 3.1.5) benutzt. Die Proben wurden auch hier auf den nicht mit Kunstharz verschlossenen Seiten belastet und mit einer Prüfpresse Typ Toni Comp III (Hersteller: Fa. Toni Technik) geprüft.

3.1.4 Wasseraufnahmekoeffizient und offene Porosität

Die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten (ω) erfolgte in Anlehnung an DIN 52617 an Normprismen.

Zur Bestimmung der offenen Porosität (OP) wurde die Festmörtelrohddichte der Probekörper mit dem Wasseraufnahmegrad (w_m) multipliziert. Dazu wurden nach der Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten die Prüfkörper bis zur Massekonstanz im Vakuum (ca. 30 mbar) unter Wasser gelagert. Zur Berechnung wurde eine konstante Dichte des Wassers von 1 g/cm^3 angenommen.

3.1.5 Frost-Tauwechsel-Widerstand

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der eingesetzten Bindemittel, insbesondere der Festigkeiten, erfolgte die Bestimmung des Frost-Tauwechsel-Widerstands (FTW) nach zwei unterschiedlichen Verfahren. Ein Teil der Mörtel (G3 und der HGZ, s.a. 4.1) wurde nach KNÖFEL 1993 (S. 97) geprüft (Verfahren I). Die Beurteilung der Schäden erfolgte dabei nach Augenschein. Die übrigen Mörtel wurden ebenfalls in Anlehnung an KNÖFEL 1993 geprüft, allerdings lagerten die Proben während der Prüfung unter Wasser (Verfahren II). Die Schadensbeurteilung erfolgte anhand der Masse der bei $70 \text{ }^\circ\text{C}$ getrockneten Absplitterungen. Abweichend von der Originalvorschrift wurden bei beiden Verfahren die Temperaturhaltezeiten um 1 Stunde verlängert. Eine Schadensbeurteilung erfolgte nach jeweils 10 FTW-Zyklen; insgesamt wurden 50 FTW-Zyklen durchgeführt.

3.1.6 Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl

Die Bestimmung der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl (μ -Wert) erfolgte nach DIN 52615. Zur Anwendung kam dabei das Trockenbereichsverfahren 23 – 0/50 an Mörtelscheiben mit einem Durchmesser von ca. 14,5 cm und einer Dicke von ca. 1,5 cm. Nach dieser Bestimmung wurden die Mörtelscheiben erneut in die verschiedenen Lagerungsbedingungen (s.a. 4.4) eingelagert.

3.1.7 *Schwinden*

Das Schwindverhalten wurde in Anlehnung an KNÖFEL 1993 (S. 95f) bestimmt. Als Meßgerät diente ein BAM-Setzdehnungsmesser (Hersteller: Fa. Staeger, Bauart Pfender). Um eine Korrosion der Meßzapfen während der Bewitterung zu vermeiden, wurden spezielle Edelstahlmeßzapfen (V₂A-Stahl) eingesetzt.

3.1.8 *Neutralisierungstiefe*

Die Bestimmung der Neutralisierungstiefe (NT) erfolgte in Anlehnung an KRELL 1986. Dabei wurden unmittelbar nach der Biegezugfestigkeitsprüfung (s.a. 3.1.2) die frischen Bruchflächen mit 1 %-iger ethanolischer Phenolphthaleinlösung besprüht, mit Hilfe einer Schieblehre vermessen und fotografiert. Es wird hier bewußt nicht der Begriff der Carbonatisierungstiefe verwendet, da auch SO₂ und NO_x mit Ca(OH)₂ Neutralisierungsreaktionen eingehen (s.a. 2.2).

3.2 **Tiefenprofile**

Um Aussagen über die Eindringtiefe bzw. –geschwindigkeit der Schadgase und deren Reaktionsprodukte machen zu können, wurden einige Untersuchungen in verschiedenen Schichttiefen von 2 bzw. 3 mm Dicke durchgeführt. Die Präparation dieser Schichten erfolgte nach zwei Verfahren:

Für die Quecksilberdruckporosimetrie (s.a. 3.2.3) wurde ein Probekörper (4 x 4 x 16 cm) auf einer Kreissäge in ca. 4 x 4 x 4 cm große Würfel gesägt. Mit Hilfe eines Sägemikrotoms (Diamantinnenlochsäge, Hersteller: Fa. Leitz, Typ 1600) wurden von der nicht mit Kunstharz verschlossenen Seite (s.a. 4.3) des Würfels 2 bzw. 3 mm dicke Schichten abgesägt. Da das Sägeblatt des Sägemikrotoms eine Dicke von nur ca. 150 µm aufweist, konnten die Schichtdicken sehr genau eingehalten werden. Nach dem Sägevorgang wurden die Schichten mit Hilfe einer Kneifzange in ca. 2 bis 4 mm große Bruchstücke zerkleinert und anschließend abgesiebt. Die 2 bis 4 mm große Fraktion wurde vor der Messung min. 1 Woche bei 70 °C getrocknet.

Für die chemisch-analytischen Untersuchungen (s.a. 3.2.1 und 3.2.2) und die Röntgenbeugungsanalyse (s.a. 3.3.1) wurde eine andere Präparationsart entwickelt. Da für diese Untersuchungen nur Pulver benötigt werden, wurden die Probekörper auf der nicht mit Kunstharz beschichteten Seite mit Hilfe einer Drehbank abgedreht. Dabei wurde der ganze Probekörper in ein großes 4-Backen-Futter eingespannt. Bei niedrigen Umdrehungsgeschwindigkeiten schabte ein Meißel die 2 bzw. 3 mm dicken Schichten in mehreren Schritten ab. Das abgedrehte Probenmaterial wurde aufgefangen und zunächst einheitlich auf eine Größe von unter 125 µm zerkleinert.

3.2.1 Ionenchromatographie

Mit Hilfe der Ionenchromatographie wurden die durch die Bewitterung entstandenen Sulfat-, Nitrit- und Nitrat-Konzentrationen in den einzelnen Schichten bestimmt. Dazu wurde 1 g des Pulvers eingewogen und mit ca. 100 ml Wasser (vollentsalzt) versetzt. Um alle Sulfate, Nitrite und Nitrate zu lösen, und um vorhandenes bzw. eventuell entstandenes Ettringit zu zerstören, wurde die Mischung für ca. 15 bis 20 Minuten gekocht. Nach dem Abkühlen wurden die festen Bestandteile abfiltriert und die Lösung in einem Meßkolben auf 100 ml aufgefüllt. Mit dieser Lösung wurden dann die ionenchromatographischen Untersuchungen durchgeführt. Dieses Aufschlußverfahren hat einige Vorteile. Da ohne den Einsatz von Säure gearbeitet wird, können alle Anionen (Sulfat, Nitrit und Nitrat) erfaßt werden. Ein z.B. salzsaurer Aufschluß würde nur die Bestimmung des Sulfats zulassen. Durch das Kochen wird Ettringit zerstört und darin gebundenes Sulfat mit erfaßt. Zur Überprüfung wurden einige Proben auch einem salzsauren Aufschluß unterworfen. Dabei wurden die gleichen Sulfatgehalte bestimmt wie bei dem oben beschriebenen wäßrigen Aufschluß.

Die Untersuchungen erfolgten mit Hilfe eines Ionenchromatographen Typ DX 100 (Hersteller: Fa. Dionex) mit angeschlossenem PC.

3.2.2 Carbonatbestimmung

Die Bestimmung des Carbonatgehaltes erfolgte mit Hilfe einer Apparatur nach SCHEIBLER/FINKENER. Das, wie oben beschrieben, auf < 125 µm zerkleinerte Pulver wurde dazu direkt eingesetzt.

3.2.3 Quecksilberdruckporosimetrie

Für alle Transportvorgänge in einem Mörtel, also auch für den Gastransport, spielt die Porenstruktur eine entscheidende Rolle. Mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie kann diese Porenstruktur (Porenradienverteilungen und Porengehalte) bestimmt werden. Dabei wird die physikalische Eigenschaft ausgenutzt, daß Quecksilber (Hg) eine nicht benetzende Flüssigkeit (Randwinkel $> 90^\circ$) ist. Im Gegensatz z.B. zu Wasser wird Hg nicht von einem porösen Mörtel aufgesaugt. Um die Mörtelporen mit Hg zu füllen, muß vielmehr ein äußerer Druck angewandt werden. Den Zusammenhang zwischen dem äußeren Druck und dem Radius der bei diesem Druck gefüllten Poren gibt nach WASHBURN 1921 folgende Beziehung wieder:

$$r = \frac{-2 \cdot \sigma \cdot \cos \Theta}{p}$$

r = Porenradius [μm]

p = äußerer Druck [MPa]

σ = Oberflächenspannung [N/m]; für Hg 0,485 N/m

Θ = Randwinkel [$^\circ$], für Hg = $141,3^\circ$

Die Messungen wurden mit einem Gerät Typ Autopore 9220 (Hersteller: Fa. micromeritics) durchgeführt. Mit Hilfe der Steuer- und Auswertungssoftware wurden neben der Gesamtporosität, der Porenradienverteilung und den mittleren Porenradien auch die Luft- (Poren $> 10 \mu\text{m}$), Kapillar- (Poren zwischen $10 \mu\text{m}$ und $0,03 \mu\text{m}$) und Gel- (Poren $< 0,03 \mu\text{m}$) Porengehalte bestimmt (Einteilung nach SMOLCZYK 1976).

3.3 Ergänzende Untersuchungen

Exemplarisch ausgesuchte Proben wurden ergänzend zu den oben beschriebenen systematischen Messungen mit folgenden Methoden untersucht.

3.3.1 Röntgenbeugungsanalyse

Mit Hilfe der Röntgenbeugungsanalyse wurden die verschiedenen Schichten qualitativ auf ihre Phasenzusammensetzung untersucht. Dazu wurde das - wie unter 3.2 beschrieben - erhaltene Pulver zunächst auf unter $63 \mu\text{m}$ zerkleinert. Die daraus hergestellten

Pulverstreichpräparate wurden mit einem Pulverdiffraktometer, Typ Kristalloflex D 500 (Hersteller: Fa. Siemens) mit $\text{Cu K}_{\alpha 1,2}$ -Röntgenstrahlung im 2Θ -Winkelbereich von 3° bis 65° gemessen. Die Generatorspannung lag bei 40 kV, der Röhrenstrom bei 30 mA und die Goniometergeschwindigkeit meist bei $1,2^\circ/\text{min}$. Für hochaufgelöste Röntgenbeugungsdiagramme bzw. zur Verbesserung der Nachweisgrenze wurden z.T. aber auch Geschwindigkeiten von $0,06^\circ/\text{min}$ gewählt.

Da auf den Oberflächen der bewitterten Probekörper z.T. dünne Schichten von Neubildungen beobachtet wurden, sind diese ebenfalls mittels Röntgenbeugungsanalyse untersucht worden. Dazu wurden von diesen Proben mit Hilfe eines Spatels die Neubildungen (ca. 0,1 bis 0,2 mm) abgeschabt und aufgefangen. Aufgrund der geringen Probenmenge konnten davon jedoch keine Pulverstreichpräparate angefertigt werden. Daher wurden die Neubildungen in einem kleinen Mörser zerkleinert und mit Isopropanol aufgeschlämmt. Diese Aufschlämmung wurden dann auf einen Si-Einkristallträger gegeben und bei Raumtemperatur getrocknet. Die anschließende Messung erfolgte wie oben beschrieben.

3.3.2 Rasterelektronenmikroskopie

Für diese Untersuchungen wurde ein Rasterelektronenmikroskop Typ XL 30 (Hersteller: Fa. Philips) eingesetzt. Zur Elementaranalyse diente eine angeschlossene energiedispersive Röntgenanalytik (EDX) Typ PV 9800 (Hersteller: Fa. EDAX).

Die z.T. recht großen Proben (bis zu ca. 2 cm x 2 cm) wurden stets mit Gold besputtert. Obwohl bei der EDX Untersuchung die Gold- und Schwefellinien nahe beieinander liegen, war es durch die hochauflösende EDX trotzdem möglich, das Element Schwefel qualitativ zu identifizieren.

3.3.3 Lichtmikroskopie

Für die Lichtmikroskopie wurden nur von den 720d Proben Querschnitte (4 cm x 4 cm) als Dünnschliffe angefertigt. Dazu wurden die Proben im Vakuum in Harz eingebettet und unter Verwendung eines wenig polaren Lösungsmittels geschnitten und auf ca. 125 μm Dicke geschliffen. Die anschließende lichtmikroskopische Untersuchung erfolgte mit einem Polarisationsdurchlichtmikroskop Typ Ortholux (Hersteller: Fa. Leitz). Dabei waren die Polarisatoren gekreuzt und ein λ -Plättchen (Gips) in den Strahlengang eingebaut. Mit Hilfe eines angeschlossenen Fotoapparates konnten Bilder angefertigt werden.

4 AUSGANGSSTOFFE UND PROBENLAGERUNG

4.1 Bindemittel

Um ein möglichst breites Spektrum an Mörteln untersuchen zu können, kamen insgesamt 9 verschiedene Bindemittel zum Einsatz. Diese wurden in drei Gruppen eingeteilt:

- Gruppe 1 (G1): Portlandzemente
- Gruppe 2 (G2): hüttensandhaltige Bindemittel
- Gruppe 3 (G3): Baukalke

Diese drei Gruppen decken die wichtigsten Einsatzgebiete (z.B. Beton, Mauermörtel, Putze) von anorganisch-nichtmetallischen Bindemitteln ab. Die Tabelle 4.1 zeigt die einzelnen Bindemittel und deren Hersteller.

Tabelle 4.1: Bindemittel und Hersteller

	Bindemittel		Hersteller
	neue Bezeichnung	alte Bezeichnung	
Gruppe 1: Portlandzemente	CEM I 42,5 R	PZ 45 F	Nordzement, Werk Höver
	CEM I 42,5 R – HS	PZ 45 F - HS	Nordzement, Werk Hardeggen
	CEM I 52,5 R,weiß	PZ 55 F, weiß	Dyckerhoff, Werk Amöneburg
Gruppe 2: hüttensandhaltige Bindemittel	CEM II/B-S 32,5 R	EPZ 35 F	Anneliese, Werk I
	CEM III/B 32,5	HOZ 35	Anneliese, Werk I
	HGZ		Laborherstellung
Gruppe 3: Baukalke	CL 90	WKH	Schaefer
	N HL 2,0	WaKH	Otterbein
	N HL 5,0	HHK	Marienstein, Romankalk

Alle normgemäßen Bindemittel wurden als Sackware direkt von den Herstellern bezogen.

Der im Labor hergestellte HGZ¹ wurde aus 86,4 M.-% Hüttensand (HÜS), 8,5 M.-% Anhydrit und 5,1 M.-% CEM I 42,5 R – HS (entspricht 85 M.-% HÜS, 10 M.-% Dihydrat und 5 M.-%

¹ Dieser HGZ kann auch HAZ genannt werden.

CEM I 42,5 R – HS) gemischt. Alle drei Komponenten wurden abgewogen und in einem Mischer Turbula Typ T10B (Hersteller: Firma Willy A. Bachofen AG) 60 Minuten homogenisiert.

Alle Bindemittel wurden röntgenographisch charakterisiert. Die Röntgendiffraktogramme sind in Abbildung A 1 bis Abbildung A 3 dargestellt. Die chemischen Analysen (Herstellerangaben) zeigen Tabelle A 1.

4.2 Zuschlag

Im Vorfeld der Untersuchungen erfolgten Versuche zur Erstellung von Tiefenprofilen. Dafür wurden Prismen (wie unter 4.3 beschrieben) mit Normsand hergestellt. Schnittversuche mit einem Sägemikrotom (s.a. 3.2) zeigten, daß die Proben nur sehr schwer und mit hohem Sägeblattverschleiß zu sägen waren. Dies konnte auf den Normsand mit einem Größtkorn von 2 mm zurückgeführt werden. Daher wurden andere Sande bzw. Sandmischungen getestet. Bei Proben mit einem Zuschlaggrößtkorn von 1 mm war die Bearbeitung erheblich einfacher. Um außerdem eine dem Normsand ähnliche, gleichmäßige Sieblinie zu erreichen, wurde zur Herstellung der Proben ein Zuschlaggemisch, wie in Tabelle 4.2 angegeben, verwendet.

Tabelle 4.2: Verwendetes Zuschlagsgemisch

Bezeichnung	Hersteller	Siebfraktion	verwendeter Massenanteil
F 32	Quarzwerke Frechen	0,063 - 0,5 mm	60 %
WDQ 3	Westdeutsche Quarzwerke	0,2 – 1,0 mm	40 %

Im Anhang (Tabelle A 2 und Abbildung A 4) sind die Sieblinien wiedergegeben. Auch die Sande wurden röntgenographisch charakterisiert. Die Röntgendiffraktogramme und die chemischen Analysen sind in Abbildung A 5 und Tabelle A 3 dargestellt.

4.3 Probenherstellung

Die Probenherstellung erfolgte in Anlehnung an DIN EN 196 Teil 1. Es wurden Mörtelprismen mit den Abmessungen 4 cm x 4 cm x 16 cm hergestellt. Statt der 1350 g Normsand wurden 810 g Sand F32 und 540 g Sand WDQ3 in homogenisierter Form verwendet. Das Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis betrug 1:3. Das Ausbreitmaß der Mörtel wurde einheitlich auf 15 cm \pm 0,5 cm eingestellt. Das Ausbreitmaß wurde nach DIN 18555 Teil 2 mit einem Ausbreittisch nach DIN 1060 Teil 3 bestimmt. Tabelle 4.3 zeigt die Wasser/Bindemittel-Verhältnisse (W/B-Werte) der Mörtelmischungen.

Tabelle 4.3: Wasserbedarf der Mörtelmischungen

Bindemittel	W/B-Wert
CEM I 42,5 R	0,60
CEM I 42,5 R – HS	0,56
CEM I 52,5 R, weiß	0,58
CEM II/B-S 32,5 R	0,59
CEM III/B 32,5	0,58
HGZ	0,58
CL 90	0,88
N HL 2,0	0,73
N HL 5,0	0,60

Zur Bestimmung der μ -Werte wurden Mörtelscheiben mit einem Durchmesser von ca. 14,5 cm und einer Dicke von ca. 1,5 cm analog den Mörtelprismen hergestellt.

4.4 Probenlagerung

4.4.1 Vorlagerung

Die G1- und G2-Mörtel wurden nach 24 h Lagerung (HGZ 48 h) im Klima 20/95 entschalt und bis zum 28. Tag unter Wasser gelagert (Lagerung nach DIN EN 196).

Die CL 90-Mörtel lagerten 72 h im Klima 20/60, wurden entschalt und anschließend bis zum 28. Tag im Klima 23/50 gelagert. Die übrigen G3-Mörtel wurden zunächst 7 d im Klima 20/95 gelagert (Entschalung nach 48 h). Danach wurden die Proben bis zum 28. Tag im Klima 23/50 gelagert.

Nach dieser 28-tägigen Lagerung wurden alle Prismen an der Ober- und Unterseite (Oberseite = abgezogene Seite) und an beiden Stirnflächen mit einem Kunstharzanstrich (Sikagard 680 S) verschlossen. Damit sollte ein gleichmäßiger Schadgasangriff bzw. Ionentransport gewährleistet werden. Ohne diesen Anstrich würden Randeffekte auftreten, d.h. auch über die Ober-/Unterseite dringen die Schadgase in die äußeren Schichten der Seitenflächen ein. Eine Meßwertverfälschung wäre die Folge.

4.4.2 Hauptlagerung

Für die Untersuchungen wurden die 28 Tage alten Proben mit einer Schadgasatmosphäre aus CO₂, SO₂ und NO_x bewittert. Um einen zeittraffenden Effekt zu erreichen, wurden die Schadgaskonzentrationen erhöht. Dabei wurden die Konzentrationen so gewählt, daß noch eine Übertragung auf die Realität möglich war. Untersuchungen von KNÖFEL 1992 zeigten, daß eine CO₂-Konzentration von 1 bzw. 3 Vol.-% (ca. 30- bzw. 100-fache Erhöhung) noch realitätsnahe Ergebnisse lieferten. Daher wurden die CO₂-, SO₂- und NO_x-Konzentrationen um das 30- und 100-fache gegenüber einer stark belasteten Industriatmosphäre erhöht. Zugrunde gelegt wurden längerfristige Mittelwerte des Ruhrgebietes aus den Jahren 1990 bis 1995. Um den alleinigen Einfluß der Bewitterung feststellen zu können, wurden zusätzlich Nullproben hergestellt, die in normaler Laborluft gelagert wurden, in der SO₂ bzw. NO_x nicht nachweisbar waren. Dabei waren die Nullproben jedoch der natürlichen CO₂-Konzentration von 0,03 Vol.-% ausgesetzt.

Neben einer durchgängig trockenen Lagerung sollte auch noch der Einfluß von Regen auf die Mörtel untersucht werden. Dazu wurde ein Teil der Proben alle zwei Wochen für 30 min.

unter Wasser gelagert (Wechselfeuchte Lagerung). Somit ergeben sich insgesamt 6 verschiedene Lagerungen, die in Tabelle 4.4 dargestellt sind.

Tabelle 4.4: Lagerungsbedingungen der Mörtelproben

Bezeichnung der Lagerung	Wechselfeuchte Lagerung	Temperatur [°C]	rel. Luftfeuchte [%]	Schadgaskonzentrationen ²		
				NO _x [ppm]	SO ₂ [ppm]	CO ₂ [Vol.-%] ²
T-0	Nein	23	60	-	-	0,03
T-30	Nein	20	70 – 80	1,20	0,50	1,00
T-100	Nein	20	70 – 80	4,00	1,66	3,00
N-0	Ja	23	60	-	-	0,03
N-30	Ja	20	70 - 80	1,20	0,50	1,00
N-100	Ja	20	70 - 80	4,00	1,66	3,00

Die Untersuchungen wurden an 4 Prüfterminen durchgeführt: 90d, 180d, 360d und 720d. In diesen Zeiträumen ist die Vorlagerung inbegriffen, so wurden z.B. die 360d Proben 332d mit Schadgas bewittert.

Die Prüftermine geben jedoch nicht das Alter der Proben exakt wieder. Das tatsächliche Alter kann von den Zeitangaben abweichen, da aufgrund von z.B. Wartungs- und Reparaturarbeiten an der Bewitterungsapparatur die Bewitterung für eine gewisse Zeit unterbrochen werden mußte.

Einige Untersuchungen (3.1.1 bis 3.1.3) wurden auch nach 28d durchgeführt, d.h. diese Proben wurden überhaupt nicht mit Schadgas bewittert, sondern zeigen den Probenzustand nach der Vorlagerung.

² 1 Vol.-% CO₂ entsprechen 10000 ppm

4.5 Bewitterungsapparatur

Für die Schadgas-Bewitterung der Mörtelproben wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Bewitterungsapparatur entwickelt und aufgebaut. Dieses Kapitel soll deren Aufbau und Funktionsweise skizzieren.

4.5.1 Übersicht

Um die Baustoffe mit den Schadgasen NO_x , SO_2 und CO_2 bewittern zu können, war der Aufbau einer Bewitterungsapparatur notwendig. Die Apparatur mußte dabei verschiedene Anforderungen erfüllen. Verschiedene Schadgaskonzentrationen mußten unabhängig voneinander eingestellt und geregelt werden. Außerdem mußte ausreichend Platz für die Proben geschaffen werden. Darüber hinaus sollte auch ein regelmäßiges Wässern der Proben ermöglicht werden.

Die erstellte Apparatur baut sich modular aus verschiedenen Komponenten auf. Die Schadgase werden in drei verschiedenen Meßgeräten analysiert. Die Meßgeräte sind in einen Meßgeräteschrank eingebaut, der die Umschaltung zwischen zwei Probenkammern ermöglicht. Der Probenbehälter ist aus Plexiglas gefertigt und enthält zwei Probenkammern mit je ca. $1,5 \text{ m}^3$ Volumen. Diese sind gas- und wasserdicht verschraubt. Dadurch ist es möglich, die untere Hälfte der Kammern mit Wasser zu füllen, um die Proben wechselfeucht zu lagern. In die Probenkammern sind korrosionsbeständige Regale aus V4A-Stahl eingebaut, die Platz für ca. 600 Probekörper (je $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$) bieten. Die Steuerung erfolgt mit Hilfe eines selbstentwickelten Programms über einen PC. Dieser erfaßt die Daten der Meßgeräte und steuert über Magnetventile die Schadgaskonzentrationen in den Probekammern. Die Daten werden gespeichert und die Meßgeräte regelmäßig automatisch kalibriert.

Durch den modularen Aufbau ist es sehr einfach, die Apparatur zu modifizieren. So sind z.B. andere Schadgaskonzentrationen bzw. Schadgaskombinationen (z.B. nur SO_2 und CO_2) mit Hilfe der Software einstellbar.

4.5.2 Meßgeräte

4.5.2.1 NO / NO_x / NO₂ - Analysator

Zur Analyse der Stickoxidkonzentrationen wird ein NO-NO_x-NO₂-Analysator der Firma Thermo Instruments (Modell TE42C) verwendet. Dieses Gerät arbeitet nach folgendem Funktionsprinzip:

Stickstoffmonoxid (NO) wird von Ozon (O₃) zu NO₂ oxidiert. Dabei entsteht eine Chemolumineszenz, deren Intensität nahezu direkt proportional zur NO-Konzentration ist.



Um die NO₂-Konzentration zu bestimmen, wird in einem Molybdänkonverter bei ca. 325 °C NO_x in NO umgewandelt. Abbildung 4.1 zeigt das Gasflußdiagramm des Gerätes.

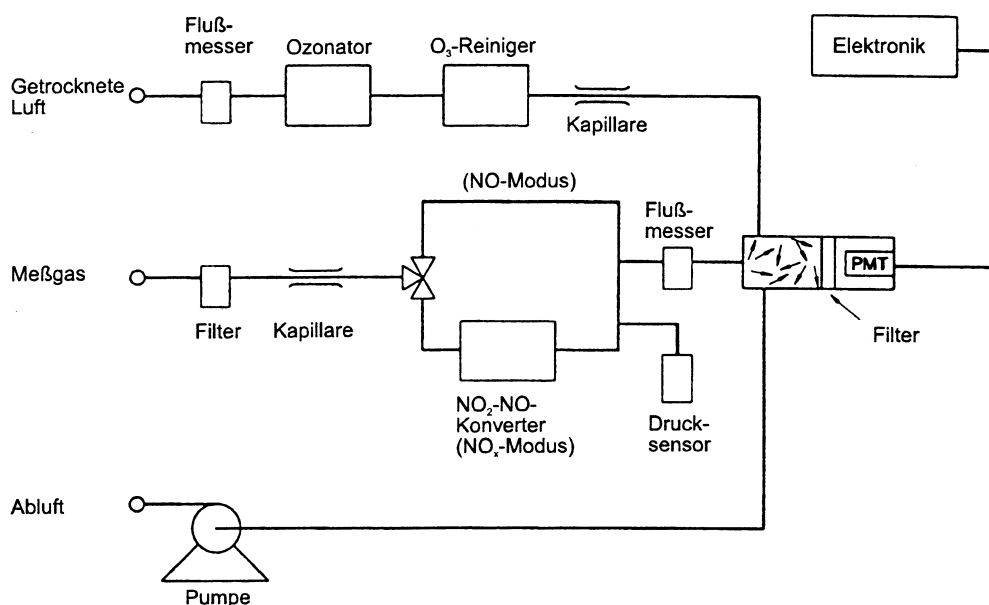


Abbildung 4.1: Gasflußdiagramm des NO_x - Analysators

Das Meßgas wird vom Gerät selbständig angesaugt. Über einen Filter und eine Kapillare gelangt das Gas zu einem 3-Wege-Magnetventil. Im NO-Modus strömt das Gas direkt über einen Flußmesser in die Reaktionskammer, wo es mit dem im Gerät hergestellten Ozon

vermischt wird. Die entstehende Chemolumineszenz wird mit einem gekühlten PMT-Detektor (**Photo Multiplier Tube** = Restlichtverstärkerröhre) gemessen. Mit Hilfe der Elektronik wird so die NO-Konzentration ermittelt. Im NO_x-Modus strömt das Gas erst durch den NO_x-NO Konverter, bevor es in die Reaktionskammer gelangt. Auf diese Weise wird die NO_x-Konzentration gemessen. Die Differenz NO_x - NO ergibt dann die NO₂-Konzentration. Nach der Reaktionskammer wird das Gas dann in die Abluft gegeben.

Der Analysator verfügt über einen Meßbereich von 0,05 ppm bis 100 ppm mit einer Genauigkeit von ± 0,4 ppb. Durch eine optionale vorgeschaltete Gasverdünnung kann der Meßbereich nach oben hin stark erweitert werden.

4.5.2.2 SO₂-Analysator

Zur Analyse der Schwefeldioxidkonzentrationen wird ein SO₂-Analysator der Firma Thermo Instruments (Modell TE43C) verwendet. Dieses Gerät arbeitet nach folgendem Funktionsprinzip:

SO₂-Moleküle werden durch UV-Licht einer bestimmten Wellenlänge in einen elektronisch angeregten Energiezustand gehoben. Beim Zurückfallen senden die Moleküle wiederum UV-Licht aus, welches jedoch eine andere, charakteristische Wellenlänge besitzt (Fluoreszenz). Die Fluoreszenzintensität ist proportional der SO₂-Konzentration.



Abbildung 4.2 zeigt das Gasflußdiagramm des Gerätes.

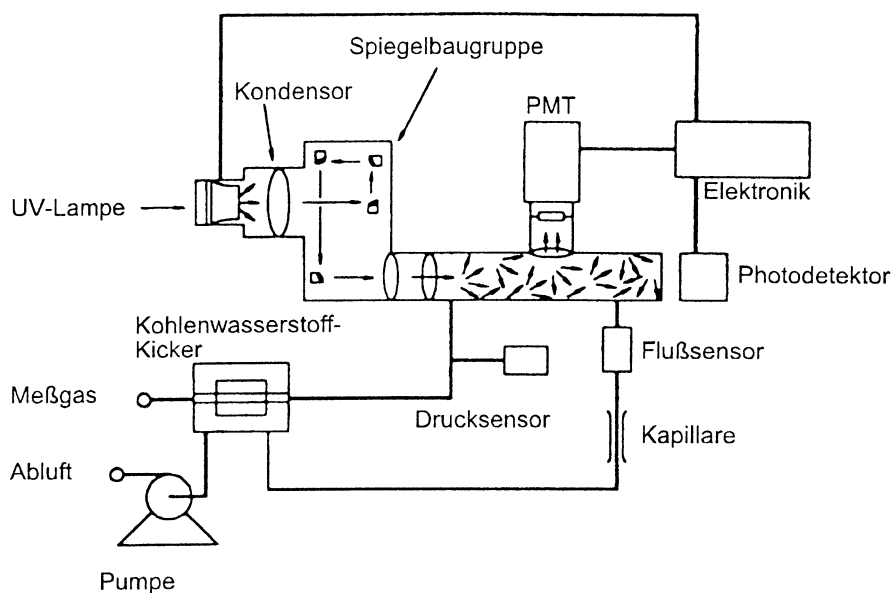


Abbildung 4.2: Gasflußdiagramm des SO₂ - Analysators

Das Meßgas wird vom Gerät selbständig angesaugt. Über einen Kohlenwasserstoffkicker, wo eventuell vorhandene Kohlenwasserstoffe entfernt werden, gelangt das Gas in die Fluoreszenzkammer. Dort wird es durch pulsierendes UV-Licht angeregt. Durch eine Kombination aus einem Kondensator und einem Spiegelsystem wird sichergestellt, daß nur Licht mit der Anregungswellenlänge für SO₂ in die Kammer gelangt. Das Fluoreszenzlicht der SO₂-Moleküle wird über einen Bandpaßfilter von einem PMT-Detektor gemessen. Der zusätzlich angebrachte Photodetektor überwacht die Intensität der UV-Lampe. Die Signale der beiden Detektoren werden in der Elektronik zu einem Meßwert verarbeitet. Nach der Kammer strömt das Gas über einen Flußsensor, eine Kapillare und das Gehäuse des Kohlenwasserstoffkickers in das CO₂-Meßgerät.

Der Analysator verfügt über einen Meßbereich von 0,05 ppm bis 100 ppm mit einer Genauigkeit von 1 % des Meßwertes. Auch hier kann durch eine optionale vorgeschaltete Gasverdünnung der Meßbereich nach oben hin stark erweitert werden.

4.5.2.3 CO₂-Meßgerät

Zur Analyse der Kohlendioxidkonzentrationen wird ein Meßgerät der Firma Hartmann & Braun (Modell Uras 10 E) verwendet. Dieses Gerät arbeitet nach folgendem Funktionsprinzip:

CO₂-Moleküle absorbieren IR-Strahlung einer bestimmten Wellenlänge, wodurch bestimmte Schwingungen angeregt werden. Zwischen der gemessenen Absorption und der CO₂-Konzentration besteht ein exponentieller Zusammenhang, der mit dem Lambert-Beerschen-Gesetz beschrieben wird:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\varepsilon \cdot c \cdot d}$$

mit I = gemessene Lichtintensität, I_0 = Lichtintensität vor der Probe
 ε = Extinktionskoeffizient, c = Konzentration, d = Schichtdicke

Abbildung 4.3 zeigt das Gasflußdiagramm des Gerätes.

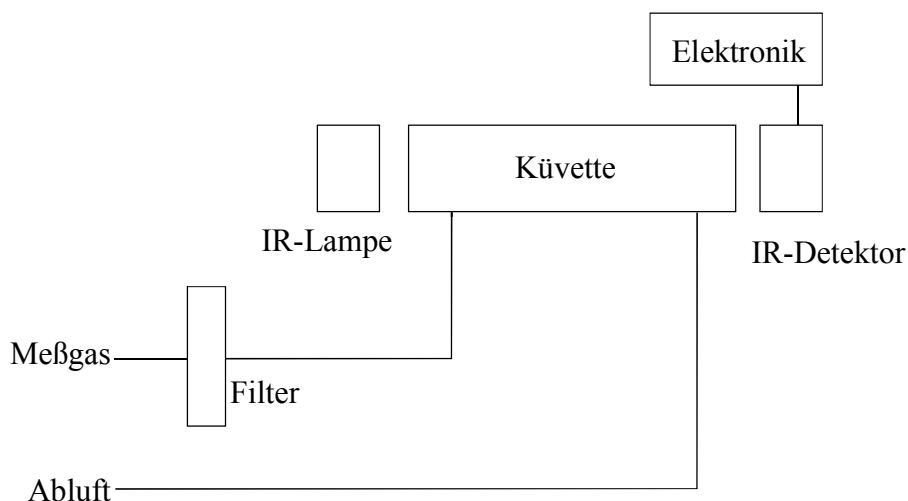


Abbildung 4.3: Gasflußdiagramm des CO₂ - Meßgerätes

Dieses Gerät ist einfacher als die beiden ersten Geräte aufgebaut. Das Meßgas wird von dem SO₂-Analysator durch einen Filter in die Meßküvette des CO₂-Meßgerätes gepumpt. Dort erfolgt die Absorption. Die Elektronik berechnet aus dem Detektorsignal den Meßwert. Nach der Küvette strömt das Gas zurück in den Probenbehälter.

Das Gerät verfügt über einen festen Meßbereich von 0 bis 5 Vol.-% mit einer Genauigkeit von ca. 2 % der Meßspanne.

4.5.2.4 Meßgeräteschrank

Alle unter 4.5.2.1 bis 4.5.2.3 beschriebenen Geräte sind in einen Meßgeräteschrank eingebaut. Zusätzlich enthält der Schrank noch einen Permeationstrockner für das Meßgas, der vor die Meßgeräte geschaltet ist. Das Meßgas strömt dabei in einem auf ca. 40°C geheizten Behälter durch eine semipermeable Kapillare, deren Wände nur für Wassermoleküle durchlässig sind. Die Kapillare befindet sich in einem Schlauch, durch den bei leichtem Unterdruck Umgebungsluft strömt. Auf diese Weise wird Wasser aus dem Meßgas entfernt und somit eine Kondensation in den Meßgeräten vermieden. Abbildung 4.4 zeigt den schematischen Aufbau des Meßgeräteschranks.

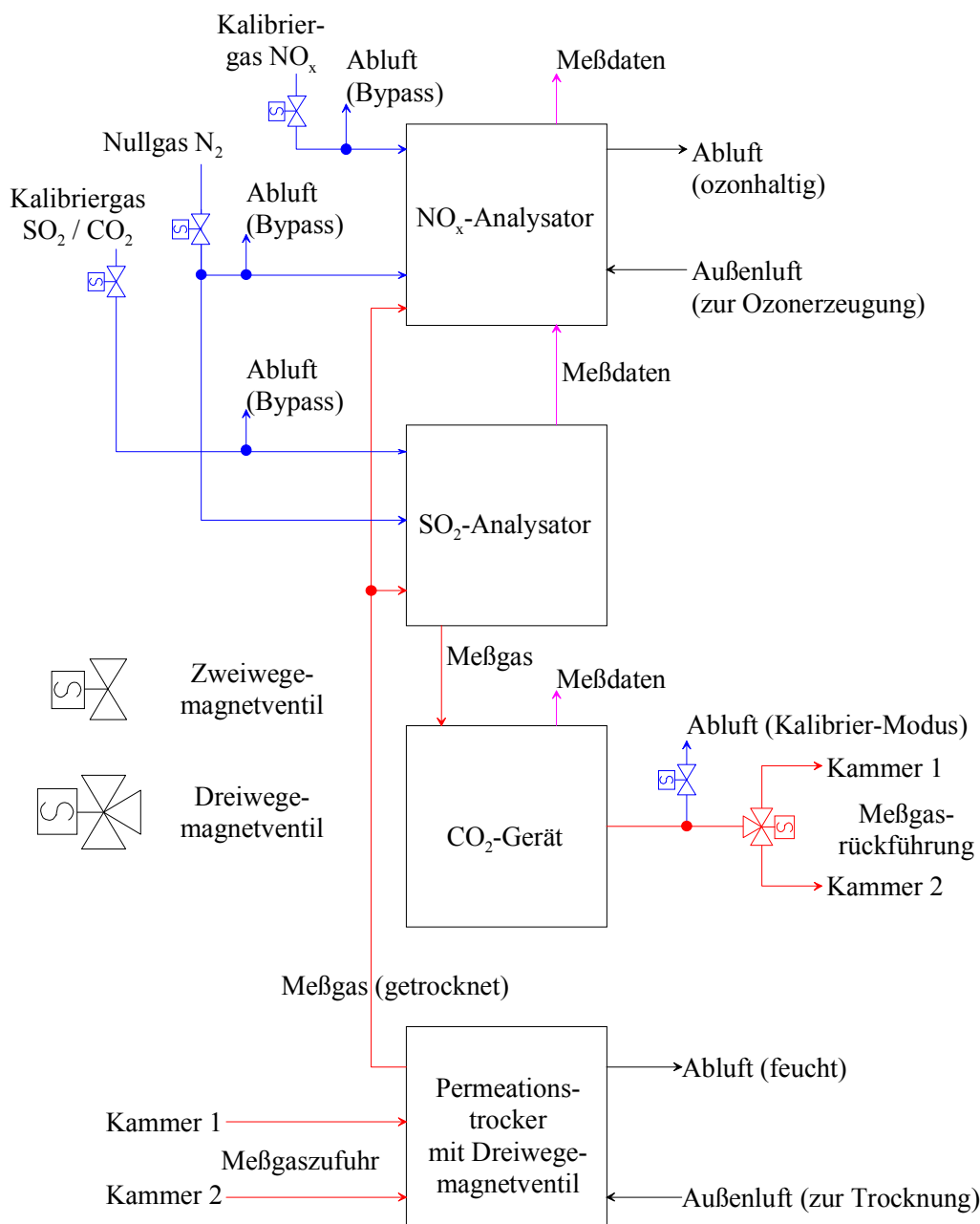


Abbildung 4.4: Aufbau des Meßgeräteschranks

Mit Hilfe der Magnetventile werden alle notwendigen Umschaltungen vorgenommen. Da der Probenbehälter aus zwei Kammern mit unterschiedlichen Schadgaskonzentrationen besteht, wird in bestimmten Zeitintervallen von Kammer 1 auf Kammer 2 umgeschaltet. Diese Umschaltung erfolgt mit einem Dreizeugemagnetventil im Permeationstrockner.

Daneben müssen die Geräte in bestimmten Zeitintervallen kalibriert werden. Dazu steht zum einen ein Nullgas (Stickstoff 5.0), zum anderen zwei verschiedene Endpunktgase (5 ppm NO in Stickstoff; 2 ppm SO₂ + 5 Vol.-% CO₂ in Stickstoff) zur Verfügung. Bypass-Schaltungen stellen sicher, daß die Kalibriergase immer mit Atmosphärendruck den Geräten zugeführt

werden. Alle notwendigen Gasanschlüsse und Steuerkabel der Magnetventile sind nach außen geführt.

Zur Steuerung der Gaskonzentrationen müssen die Meßwerte erfaßt werden können. Diese Datenabfrage erfolgt über serielle Schnittstellen, die in allen Geräten eingebaut sind. Der NO-NO_x-NO₂-Analysator und der SO₂-Analysator sind dabei auf einen Schnittstellenanschluß zusammengeschaltet. Alle Datenanschlüsse sind ebenfalls nach außen geführt.

Zur Abführung der im Meßgeräteschrank entstehenden Wärme sind zwei Ventilatoren eingebaut, welche die Warmluft ständig nach außen abführen.

4.5.2.5 Meßgeräte für Temperatur und rel. Luftfeuchte

Zur Messung der Temperatur und der rel. Luftfeuchtigkeit in den beiden Kammern des Probenbehälters werden zwei Geräte der Firma Vaisala (Modell HMP 230) eingesetzt. Diese besitzen zwei in die Probenkammern eingebaute Kombisensoren, welche die Temperaturen und rel. Luftfeuchten erfassen. Die Temperatur wird über ein Pt 100 - Meßelement ermittelt, die Luftfeuchtigkeit mit einem HUMICAP® H-Sensor. Dessen Meßprinzip beruht auf der Kapazitätsänderung durch Sorption von Wassermolekülen auf einem Polymer-Dünnsfilm. Beide Sensoren sind hochbeständig gegen die eingesetzten Schadgase. Zusätzlich kann der H-Sensor einem sog. Re-gaining Prozeß unterworfen werden. Dazu kann das Gerät selbständig den H-Sensor auf Temperaturen von über 100 °C aufheizen. Auf dem Polymerfilm absorbierte Schadgasmoleküle werden dadurch wieder entfernt. Der Sensor gibt die Signale an eine externe Elektronik weiter, welche die Temperatur und rel. Luftfeuchtwerte anzeigt. Diese beiden Geräte verfügen ebenfalls über serielle Schnittstellen, womit die Daten ausgelesen werden können. Beide Schnittstellen wurden zusammengeschaltet.

4.5.3 Probenbehälter

Zur Lagerung der Probekörper wird ein Probenbehälter aus Plexiglas eingesetzt. Die Abbildung 4.5 zeigt den Behälter von oben und von vorne.

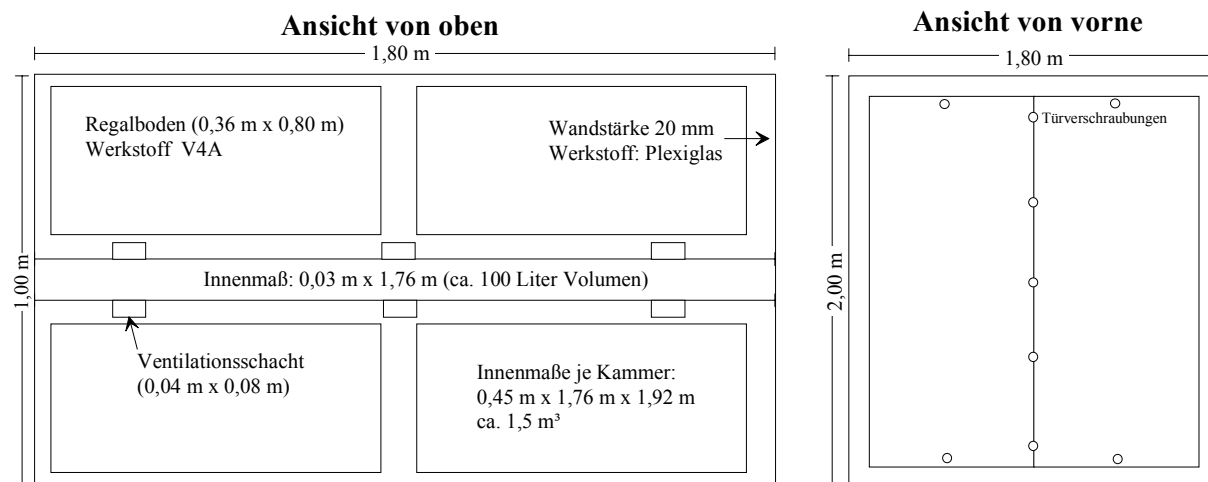


Abbildung 4.5: Aufbau des Probenbehälters

Über die doppelte Mittelwand können die Kammern beheizt oder gekühlt werden. Dazu pumpt ein Kryostat Wasser durch den Hohlraum zwischen den beiden Mittelwänden. Auf diese Weise wird eine Temperaturkonstanz von $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht. Auf den Ventilationsschächten sitzen je zwei Ventilatoren, welche die Luft in den Kammern ständig umwälzen. Pro Minute wird so die gesamte Luft in einer Probenkammer einmal umgewälzt. Unterhalb der Ventilatoren wird je ein Schadgas in je einen Ventilationsschacht eingeleitet. Dadurch und durch die sehr langsame Einleitungsgeschwindigkeit (beim SO_2 z.B. $0,1\text{ ml/s}$) werden die konzentrierten Gase (SO_2 99,8 %-ig, CO_2 99 %-ig, NO 10 %-ig) sofort stark verdünnt und gleichmäßig verteilt.

In jeder Probenkammer stehen zwei Regale mit Rostböden aus korrosionsbeständigem V4A-Stahl. Die Regale bieten Platz für ca. 600 Probekörper.

Die Türen der Kammern sind gas- und wasserdicht verschraubt. Dadurch ist es möglich, in der unteren Hälfte der Kammern Proben einer wechselfeuchten Lagerung zu unterziehen. Über eingebaute Ventile kann, nach Spülung der Kammern mit Druckluft, um die Schadgase zu entfernen, Wasser in die Kammern eingelassen werden. Nach der Wässerungsdauer wird dann das Wasser über die Ventile wieder abgelassen. Dieses Wässern hat den Vorteil, daß viele Proben schnell und ohne umräumen gewässert werden können.

4.5.4 Verschlauchung / Verkabelung

Die Abbildung 4.6 zeigt die Verschlauchung und die Verkabelung von Meßschrank, Probenbehälter, Gasflaschen und Steuerungseinheit.

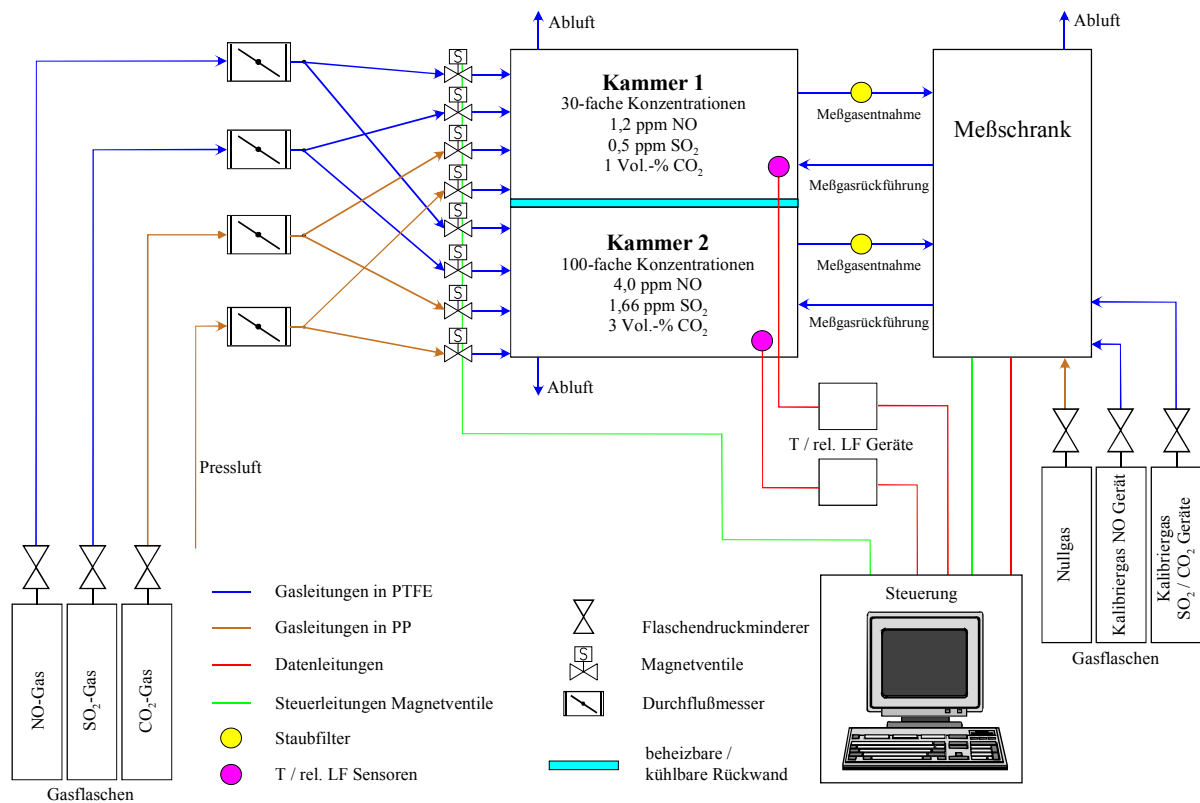


Abbildung 4.6: Schematischer Aufbau der Bewitterungsapparatur

Für alle Gasleitkomponenten wurden Produkte der Firma EM Technik verwendet. Der Werkstoff ist dabei Teflon (PTFE und PVDF), das gegenüber den aggressiven Gasen hochbeständig ist. Die CO₂- und Pressluftaufgabe besteht bis zu den Magnetventilen aus PP, da dabei kein Kontakt mit aggressiven Gasen erfolgt.

4.5.5 Meßwerterfassung und Gassteuerung

Die Meßwerterfassung und Gassteuerung wird von einem PC übernommen. Der PC besitzt eine Relaiskarte, die 24 Lastrelais einzeln schalten kann. Mit den Relais werden folgende Komponenten geschaltet:

- 8 Magnetventile zur Gasaufgabe auf den Probenbehälter
- 4 Magnetventile im Meßschrank
- 2 x 6 Ventilatoren in den beiden Kammern
- 3-fache Umschaltung der seriellen Schnittstellen (1 x NO/SO₂-Geräte, 1 x CO₂-Geräte, 1 x Temperatur/rel. Luftfeuchte Geräte) auf eine serielle Schnittstelle am PC (je Schnittstelle 3 Relais)
- Notabschaltung des Meßschanks

Für die Regel- und Steuerungssoftware wurde ein Programm selbständig unter QuickBasic entwickelt. Mit dieser Software werden alle Steuerungsvorgänge ausgeführt. Diese sind:

- Automatische Steuerung der Gaskonzentrationen in beiden Kammern
- Schnelle Übersicht über alle Meßwerte in beiden Kammern
- Graphische Übersicht über die Meßwerte
- Detaillierte Übersicht aller Parameter der einzelnen Geräte
- Feineinstellung aller Geräteparameter
- Auswertung aller Alarmmeldungen der Geräte
- Manuelle Steuerung aller Relais
- Manuelle Gasaufgabe auf die Kammern
- Protokollierung aller Meßwerte und Gasaufgabezeiten
- Datensicherung aller Meßwerte auf Diskette

Ein automatischer Steuerungszyklus läuft dabei wie folgt ab: Zunächst werden alle Meßwerte der 5 Geräte eingelesen. Dann werden die Differenzen zwischen Soll- und Ist-Werten berechnet. Aufgrund der Differenzen werden nun die Öffnungszeiten der einzelnen Magnetventile ermittelt. Nach dem Einschalten der betroffenen Magnetventile werden die Meßwerte und die Öffnungszeiten auf der Festplatte des PC abgespeichert. Anschließend wird der Meßschrank auf die andere Kammer umgeschaltet. Nach Abwarten der Ansprechzeit des

Systems bzw. nach Stabilisierung der Meßwerte werden diese eingelesen und der Steuerungszyklus für die andere Kammer beginnt. Ein Zyklus dauert ca. 5 min., so daß pro Stunde 6 Regelvorgänge pro Kammer erfolgen können. Durch dieses Verfahren wird eine Schadgaskonzentrationsstabilität von mehr als 95 % erreicht.

Zwischen den Meßzyklen werden regelmäßig die Geräteparameter überwacht. Dies gilt insbesondere für die Innentemperatur im Meßschrank. Bei Temperaturen über 45 °C können Schäden an den Elektronikeinheiten der Geräte eintreten. Im Vorfeld zeigte sich, daß so hohe Temperaturen im Sommer leicht erreicht werden. Wenn die Raumtemperatur 28 - 29 °C erreicht, herrschen im Meßschrank Temperaturen über 45 °C. Der PC schaltet in einem solchen Fall alle im Meßschrank befindlichen Geräte ab, um Schäden zu vermeiden. Bis zum manuellen Wiedereinschalten ist dann allerdings die Steuerung unterbrochen. Daher wurde der Raum, in dem die Bewitterungsapparatur steht, mit einer Klimaanlage ausgestattet. Dadurch wird die Raumtemperatur auch im Sommer auf ca. 20 °C gehalten. Daneben werden noch zahlreiche andere Parameter überwacht, die unter Umständen ebenfalls zu einer Abschaltung des Meßschanks führen können. Zusätzlich vorgesehen ist noch der Anschluß eines Modems an den PC. Mit Hilfe des Modems können dann im Alarmfall Nachrichten z.B. als Fax nach außen gesendet werden. In solchen Notfällen können dann selbst am Wochenende Gegenmaßnahmen eingeleitet werden.

Da das Programm selbst entwickelt worden ist, sind alle Parameter veränderbar. Es können verschiedene Gaskonzentrationen und / oder Gaskombinationen eingestellt werden.

5 ERGEBNISSE I – GESAMTER PROBEKÖRPER

Vorbemerkung:

Mit der Bindemittelbezeichnung werden immer die daraus hergestellten Mörtel gemeint. Ist also z.B. von „...die Druckfestigkeit des CEM II ist...“ die Rede, so ist damit die Druckfestigkeit der Mörtel mit CEM II als Bindemittel gemeint.

Da die Prüfkörper nicht nach Norm hergestellt wurden, ist ein Vergleich von in dieser Arbeit gewonnenen Meßwerten mit anderen Daten nicht zulässig. So soll z.B. nach DIN EN 196 ein CEM I 42,5 R nach 28 d eine Seriedruckfestigkeit von mindestens 42,5 N/mm² haben. Diese Werte können hier nicht erwartet werden, da kein Normsand verwendet worden ist und auch der w/z-Wert von der Normvorgabe abweicht. Daher werden die Meßwerte immer mit den Nullproben verglichen. Nur so kann beurteilt werden, inwieweit die Bewitterung die Mörtelproben beeinflusst. Die Abweichungen zwischen Nullproben und bewitterten Proben sollten dabei qualitativ gewertet werden. Eine Abweichung von z.B. 5 N/mm² bei der Druckfestigkeit kann bei einem Normmörtel (oder anderen Mörteln) bedeutend oder weniger bedeutend sein, z.B. abhängig vom absoluten Wert oder vom Prüftermin. Die qualitative Tendenz jedoch bleibt erhalten.

Die Zeitangaben 28d, 90d, 180d, 360d und 720d beziehen sich immer auf die Lagerungsdauern, die der jeweiligen Prüfung vorangegangen sind. Diese setzt sich zusammen aus Vor- und Hauptlagerung.

Alle Proben wurden bis zu einem Alter von 720d untersucht. Der Begriff „Endwert“ im Zusammenhang mit Meßwerten bezieht sich auf diese Untersuchung nach 720d. Eine weitergehende Veränderung der Meßwerte nach diesem Meßtermin kann nicht ausgeschlossen werden.

Die Ergebnisse der 30-fach belasteten Proben zeigen meist Tendenzen auf, die durch die 100-fache Schadgasbelastung verstärkt werden. Daher zeigen die im folgenden dargestellten Abbildungen die Ergebnisse der un- und 100-fach belasteten Proben. Ausnahmen, die unterschiedliche Tendenzen zwischen 30- und 100-fach belasteten Proben darstellen, sind zusätzlich angegeben.

5.1 Dynamischer E-Modul

G1-Mörtel: Die E-Moduli der T/N-0-Proben zeigen bis zur 180d Messung einen mäßigen Rückgang und bleiben danach relativ konstant (Abbildung 5.1). Die E-Moduli der bewitterten Proben (Abbildung 5.2) liegen über den T/N-0-Proben. Sie zeigen über den gesamten Untersuchungszeitraum einen konstanten Verlauf. Dabei weisen die T/N-100 Proben höhere Werte auf als die T/N-30-Proben. Die Unterschiede zwischen T- und N-Lagerungen sind überall gering. Die Bewitterung bewirkt eine Erhöhung der E-Moduli gegenüber den T/N-0-Proben. Diese Erhöhung ist zunächst gering (ca. 5 – 10 % nach 90d), wird danach aber größer (15-20 % nach 720d).

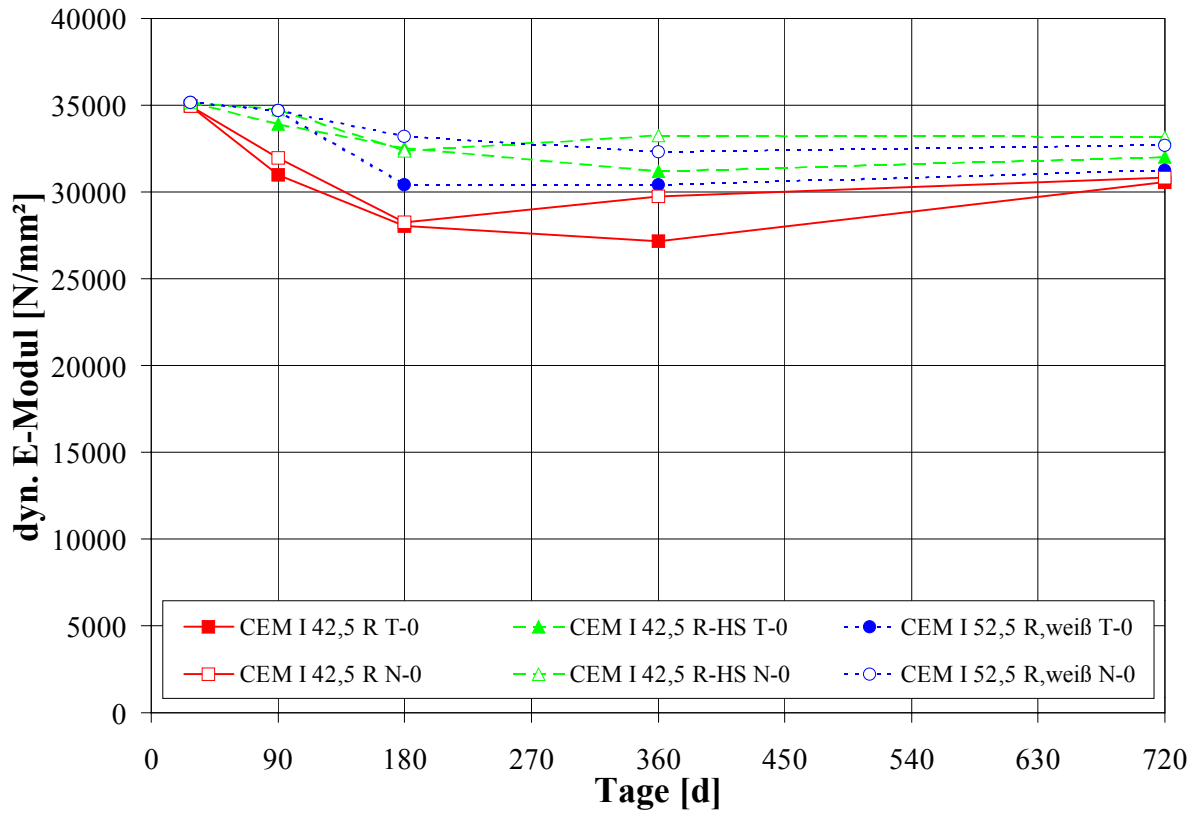


Abbildung 5.1: E-Moduli der T/N-0-Proben der G1-Mörtel

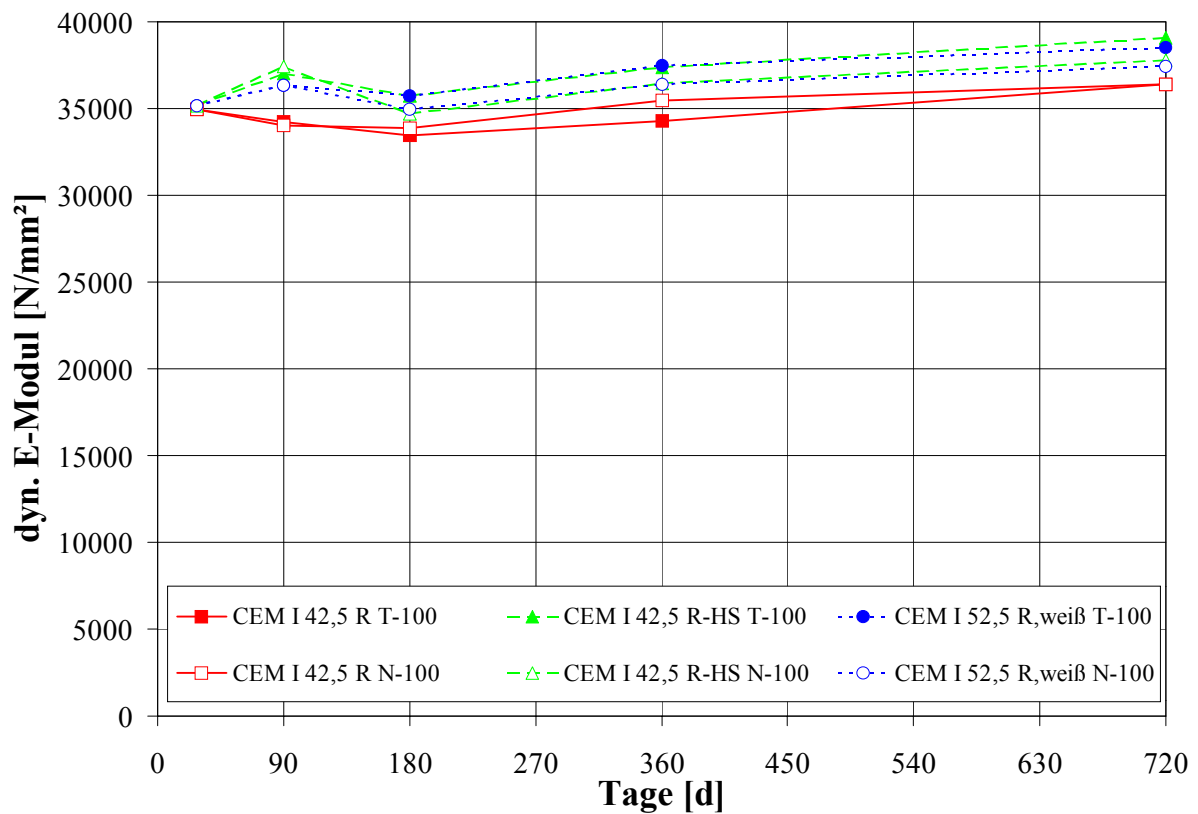


Abbildung 5.2: E-Moduli der T/N-100-Proben der G1-Mörtel

G2-Mörtel: Die E-Moduli der CEM II- und CEM III-T/N-0-Proben fallen bis zur 360d Messung leicht ab und bleiben dann konstant (Abbildung 5.3). Dies zeigt die Verwandtschaft zu den G1-Mörteln. Die bewitterten Proben weisen diese Verwandtschaft nicht mehr auf, sie werden anders beeinflusst. Die E-Moduli der beiden Mörtel (Abbildung 5.4) zeigen bis zur 360d Messung einen deutlichen Rückgang und bleiben danach relativ konstant. Durch den höheren HÜS-Anteil wirkt sich dieser Effekt beim CEM III stärker aus als beim CEM II.

Der HGZ verhält sich aufgrund seines Chemismus anders. Die im Frischmörtel gebildeten Ettringitphasen werden im Festmörtel durch CO_2 angegriffen und zersetzt. Daher ist bei den T/N-0-Proben ein kontinuierlicher Rückgang von ca. 25000 N/mm^2 auf etwa 12000 N/mm^2 zu beobachten (Abbildung 5.3). Die E-Moduli der T-0-Proben fallen dabei schneller als die der N-0-Proben. Durch die Bewitterung wird eine deutliche Zeitraffung erreicht. Der 720d E-Modul-Wert der T/N-0-Proben von ca. 12000 N/mm^2 wird schon nach 180d erreicht (Abbildung 5.4). Diese Zeitraffung wird durch die deutlich erhöhte Neutralisierungsgeschwindigkeit (s. 5.9) erreicht. Die Unterschiede der E-Moduli zwischen T- und N-Proben sind, bis auf die T/N-0-Proben des HGZ, gering.

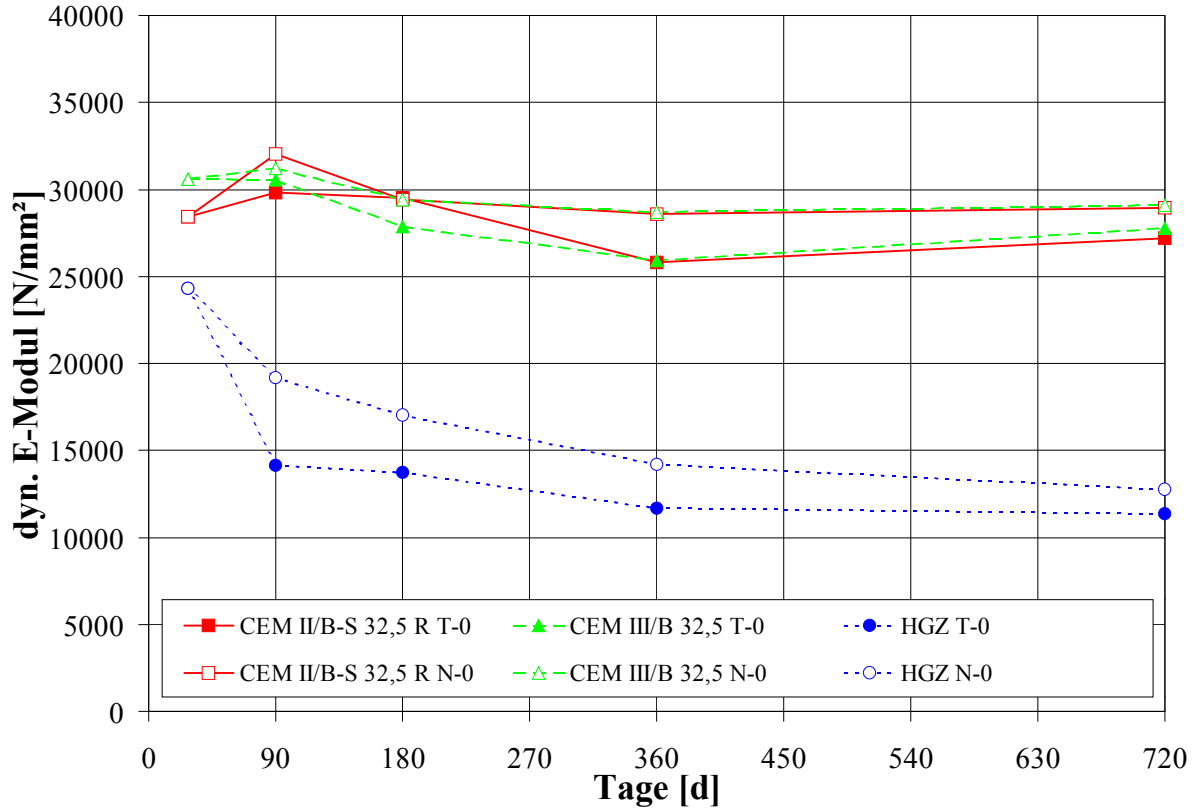


Abbildung 5.3: E-Moduli der T/N-0-Proben der G2-Mörtel

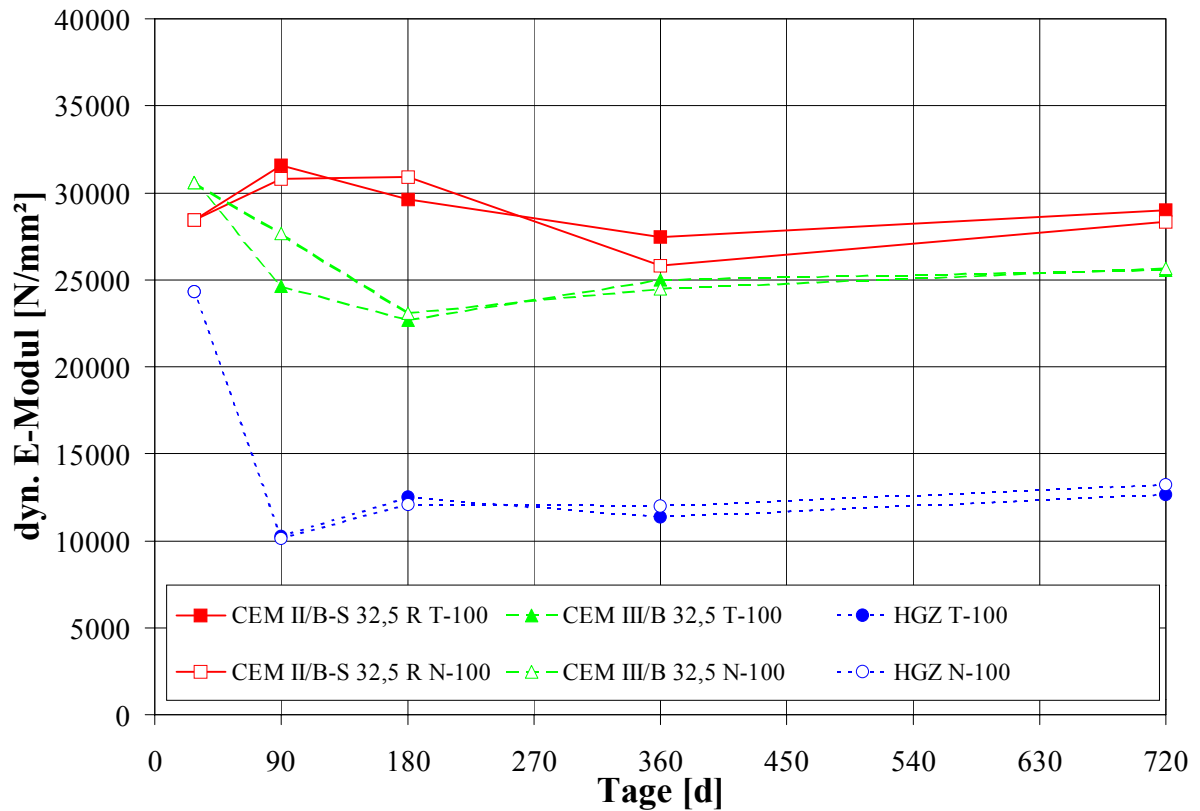


Abbildung 5.4: E-Moduli der T/N-100-Proben der G2-Mörtel

G3-Mörtel: Der N HL 5,0 verhält sich bezüglich der E-Moduli ähnlich dem HGZ. Die Werte der T/N-0-Proben (Abbildung 5.5) fallen langsam bis zur 360d Messung ab und bleiben dann relativ konstant. Die E-Moduli der T-Proben liegen dabei etwas unter denen der N-Proben. Durch die Bewitterung (Abbildung 5.6) wird, wie schon beim HGZ, eine deutliche Zeitraffung erreicht, die 720d T/N-0-Werte liegen schon nach 90d vor. Die Unterschiede der bewitterten T- und N-Lagerungen sind dabei gering.

Die Zeitraffung kann auch beim CL 90 beobachtet werden. Die E-Moduli der T/N-0-Proben steigen kontinuierlich an, durch die Bewitterung werden die 720d Werte schon erheblich früher erreicht. Außerdem liegen die E-Moduli deutlich über den T/N-0-Werten. Daneben zeigen sich hier deutliche Unterschiede zwischen T- und N-Lagerung. Während bei den T/N-0-Proben dieser Unterschied im Laufe der Zeit zunimmt, ist er bei den bewitterten Proben konstant.

Ein deutlich abweichendes Bild bezüglich der E-Moduli zeigt der N HL 2,0. Die T-0- und die bewitterten T-Proben haben nahezu den gleichen Verlauf. Die E-Moduli steigen dabei bis zur 180d Messung stark an, um dann bis 720d wieder leicht abzufallen. Die N-0-Proben verhalten sich ähnlich, jedoch liegt der E-Modul hier viel niedriger. Die E-Moduli der bewitterten N-Proben zeigen nur bis 90d einen starken Anstieg, danach einen leichten Rückgang. Nach 720d sind die Unterschiede der T- und N-Lagerungen erheblich geringer als bei den T/N-0-Proben.

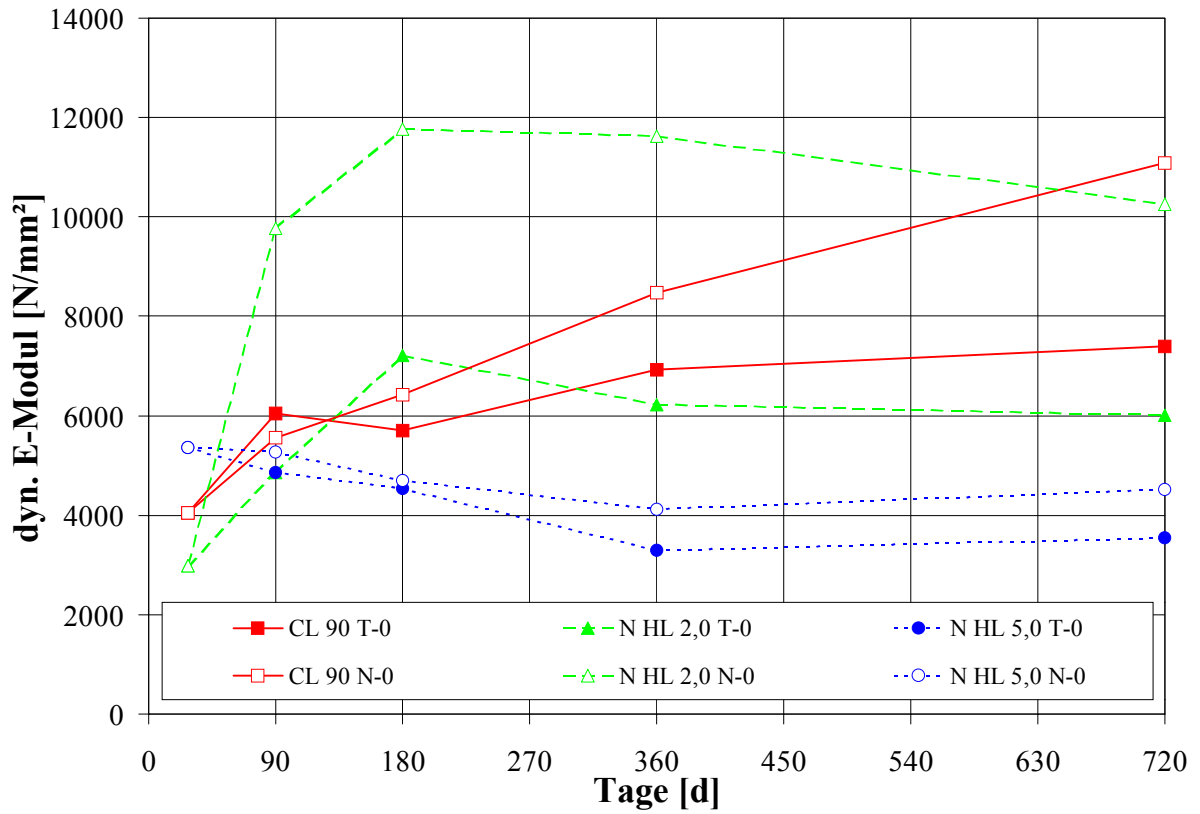


Abbildung 5.5: E-Moduli der T/N-0-Proben der G3-Mörtel

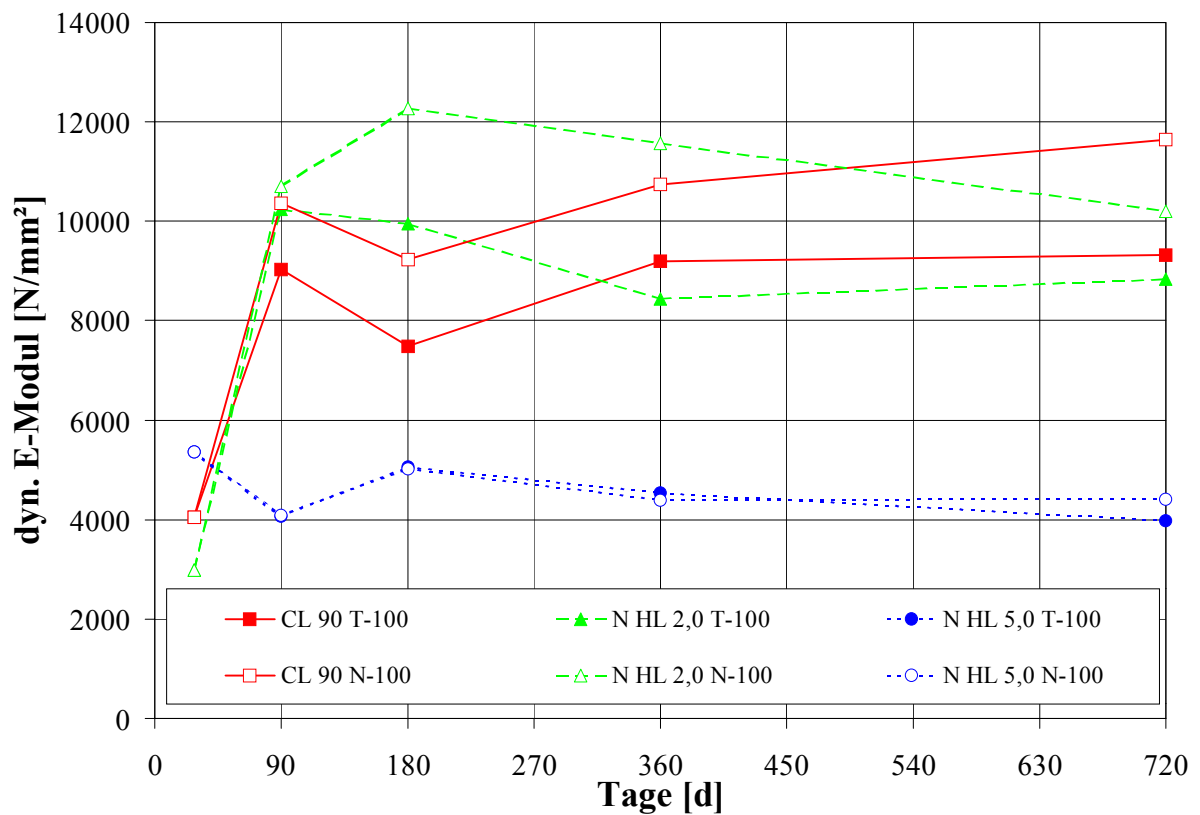


Abbildung 5.6: E-Moduli der T/N-100-Proben der G3-Mörtel

5.2 Biegezugfestigkeit

G1-Mörtel: Die Nullproben steigen von der 28d zur 90d Messung zunächst an und pendeln sich dann bei ca. $6 \pm 1 \text{ N/mm}^2$ ein (Abbildung 5.7). Der 90d Wert des CEM I-T-0 zeigt einen rel. hohen Wert, der wahrscheinlich auf einen Ausreißer zurückzuführen ist. Die Unterschiede zwischen der T- und N-Lagerung sind gering. Die bewitterten Proben zeigen dagegen einen kontinuierlichen Anstieg der β_{BZ} bis zur 720d Messung (Abbildung 5.8). Auffällig ist die Auftrennung zwischen T- und N-Proben zwischen 360d und 720d. Die N-Werte steigen nur noch leicht, die T-Werte deutlich an. Dies ist wahrscheinlich auf die durch die Bewitterung verdichtete Oberfläche der Probekörper zurückzuführen. Zusätzlich behindert das durch die regelmäßigen Wässerungen im Porensystem befindliche Wasser das Eindiffundieren der Schadgase. Dadurch wird ein weiteres Eindringen von CO_2 verlangsamt und die β_{BZ} steigt nur noch langsam an.

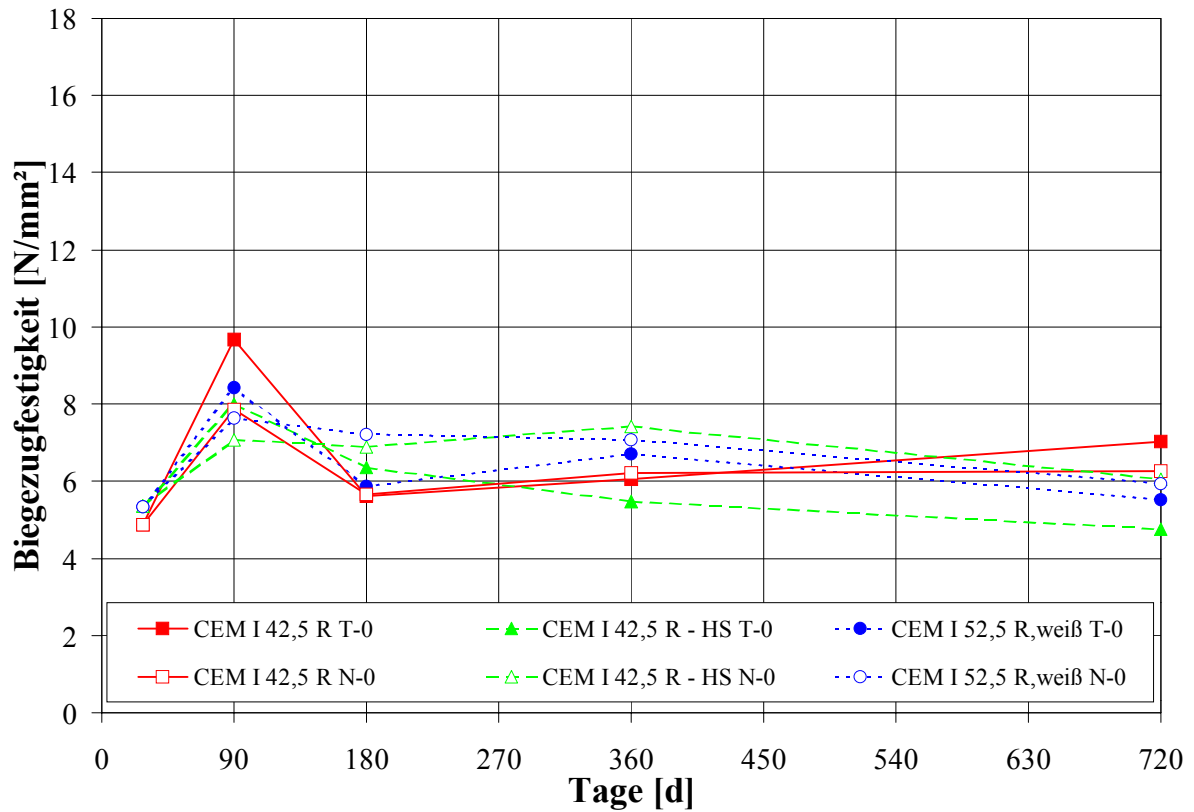


Abbildung 5.7: β_{BZ} der T/N-0-Proben der G1-Mörtel

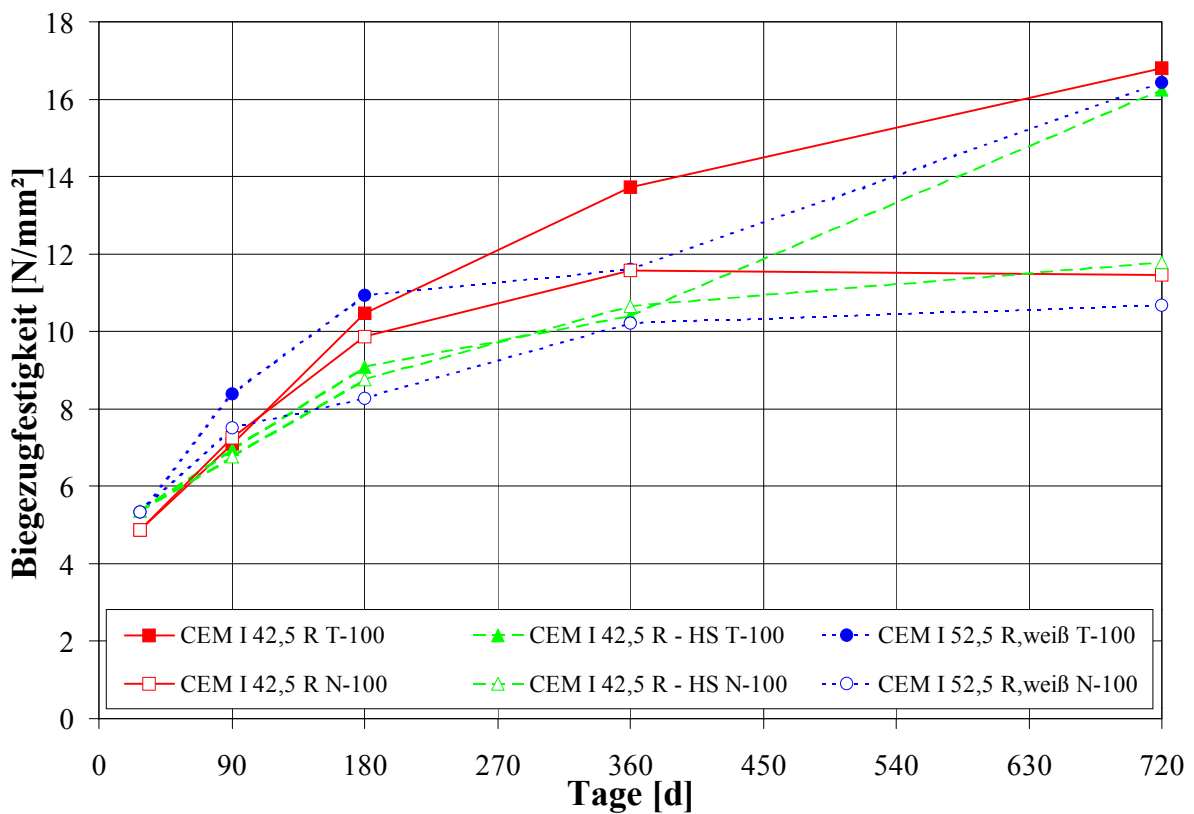


Abbildung 5.8: β_{BZ} der T/N-100-Proben der G1-Mörtel

G2-Mörtel: Während die Nullproben der CEM II- und CEM III-Mörtel ab dem 90d rel. konstant bleiben, zeigen die T/N-30-Proben ein sehr ähnliches Verhalten wie die G1-Mörtel (Abbildung 5.9). Hier zeigt sich wiederum die Verwandtschaft zu den Portlandzementen. Die T/N-100-Proben zeigen dagegen eine negative Wirkung der Schadgase auf die β_{BZ} (Abbildung 5.10). Die Werte liegen niedriger als die Nullproben, die Entwicklung der β_{BZ} ist ungleichmäßiger. Die N-100-Proben der CEM II-Mörtel zeigen ab dem 180d einen Rückgang der β_{BZ} . Im Gegensatz zum CEM III zeigen die CEM II-Proben einen deutlichen Unterschied zwischen T und N.

Der HGZ wird kaum beeinflusst. Alle Proben zeigen von 28d nach 90d einen leichten Rückgang, um dann konstant bei ca. 2 N/mm² zu bleiben. Lediglich bei den T/N-100-Proben nach 720d steigen die β_{BZ} leicht auf 3 N/mm² an. Außerdem zeigen sich nur geringe Unterschiede zwischen T- und N-Lagerungen.

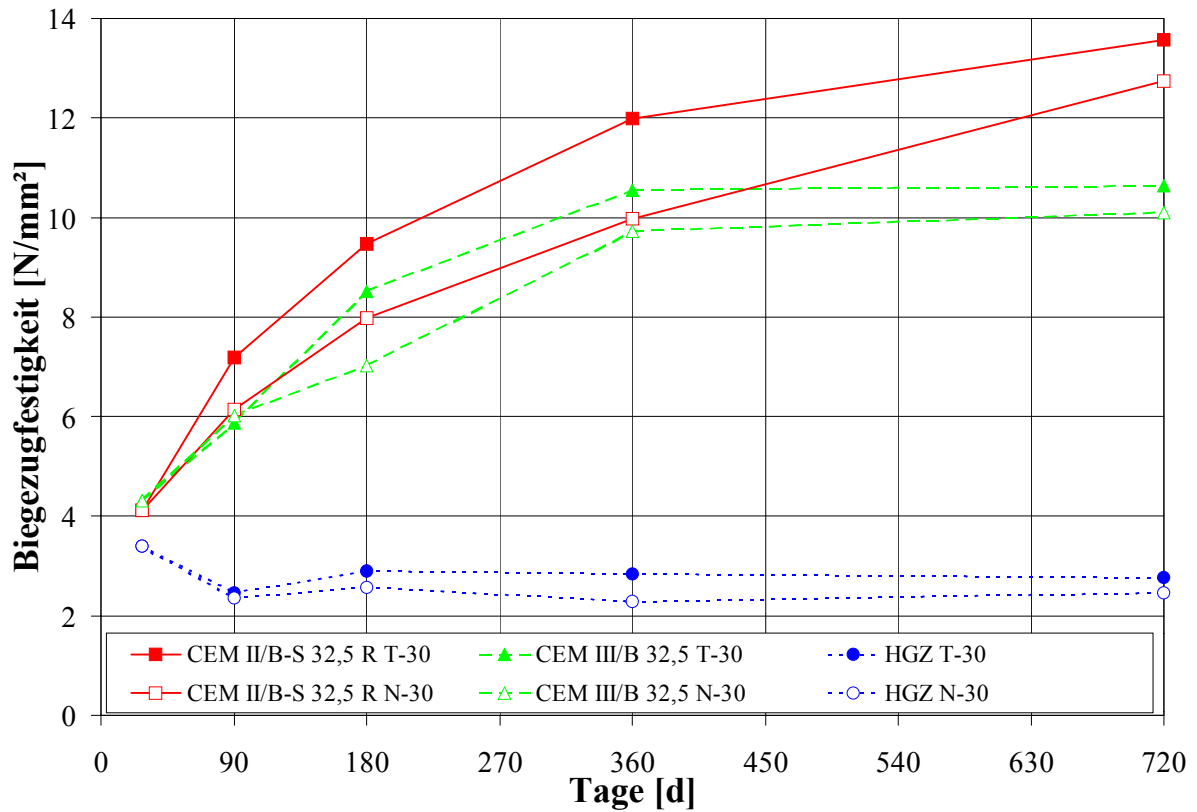


Abbildung 5.9: β_{BZ} der T/N-30-Proben der G2-Mörtel

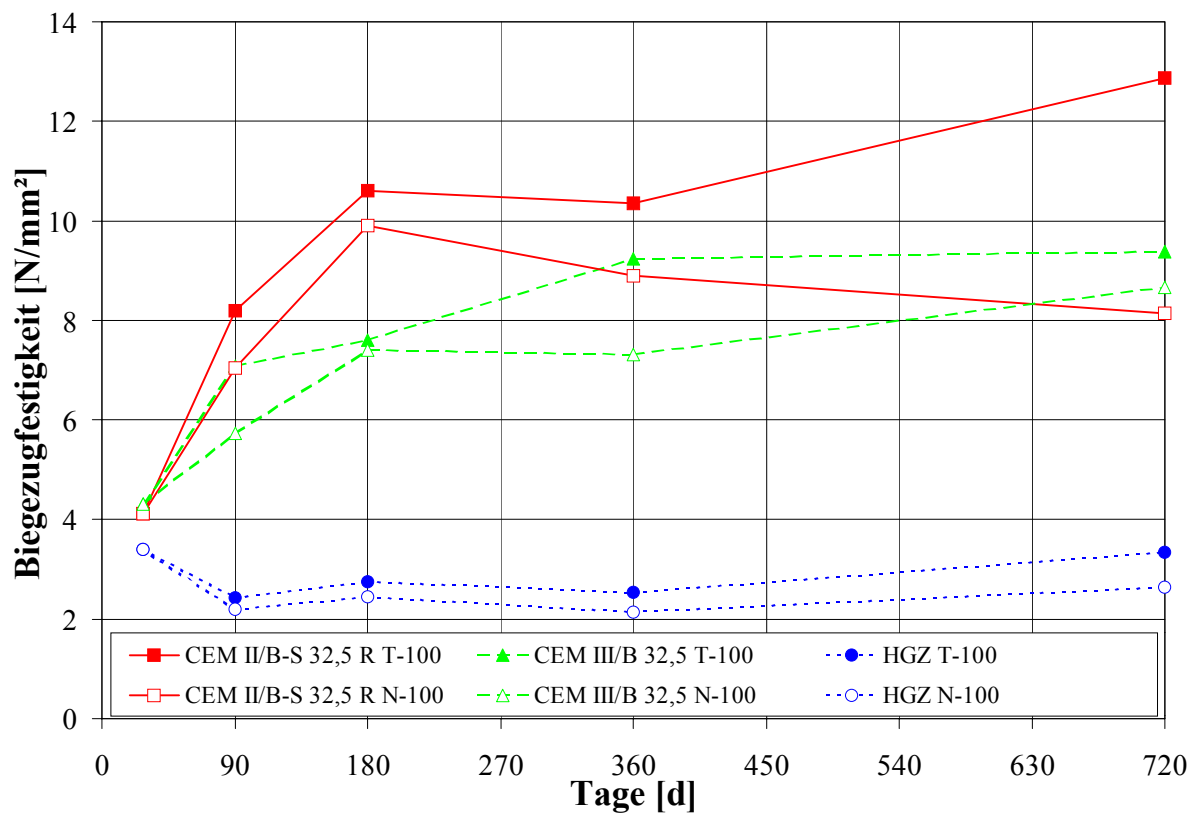


Abbildung 5.10: β_{BZ} der T/N-100-Proben der G2-Mörtel

G3-Mörtel: Bezüglich der β_{BZ} verhalten sich die drei Bindemittel dieser Gruppe recht unterschiedlich. Die β_{BZ} des N HL 5 verhält sich uneinheitlich. Alle Proben liegen zwischen 0,5 und 1,25 N/mm². Diese Schwankungsbreite wird möglicherweise durch den Fehler bei der Messung verursacht. Die Unterschiede zwischen T und N sind gering.

Der CL 90 zeigt ein uneinheitliches Verhalten. Die Nullproben steigen bis 360d bis auf ca. 1,5 N/mm² an und bleiben dann konstant (Abbildung 5.11). Die Unterschiede zwischen T und N sind gering. Die N-30-Proben schwanken um $2 \pm 0,5$ N/mm². Die T-30-Proben liegen stets ca. 0,7 N/mm² tiefer. Die T/N-100-Proben verhalten sich ähnlich (Abbildung 5.12), liegen aber ab 360d mit ca. 2,7 N/mm² höher als die T/N-30-Proben. Nach 720d liegen die T-Proben um mehr als 1 N/mm² tiefer als die N-Proben. Diese Schwankungen der bewitterten Proben sind auf die gegenläufige Wirkung von CO₂ und SO₂/NO_x auf den CL 90 zurückzuführen. Während CO₂ durch die Carbonatisierung die Festigkeit erhöht, greifen SO₂/NO_x die Calcit-Phasen an, wenn auch nur in Oberflächennähe (s.a. 6.1)

Beim N HL 2,0 entwickeln sich die T- und N-Proben sehr unterschiedlich. Die β_{BZ} der N-Proben steigen von 28d nach 90d stark an, bleiben bis 360d rel. konstant und fallen dann wieder ab. Dabei liegen die bewitterten Proben um ca. 0,5 N/mm² höher als die Nullproben. Die β_{BZ} der T-0-Proben liegen im Bereich von ca. $1 \pm 0,5$ N/mm². Die bewitterten Proben steigen zunächst stark an und gehen dann kontinuierlich zurück. Hier wird wiederum der negative Einfluß der Schadgase deutlich. Das Mörtelgefüge wird durch SO₂/NO_x an der Oberfläche geschädigt. Diese Schädigung wirkt sich durch eine Erniedrigung der β_{BZ} aus.

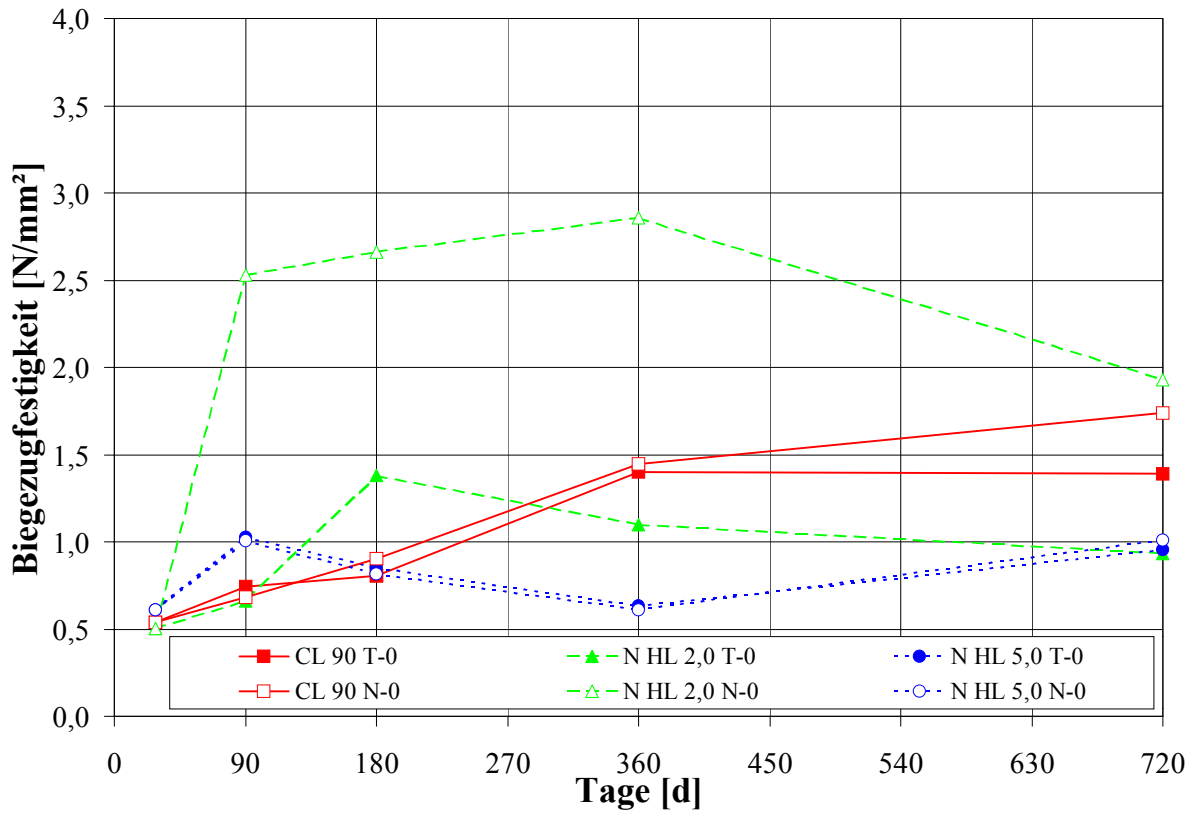


Abbildung 5.11: β_{BZ} der T/N-0-Proben der G3-Mörtel

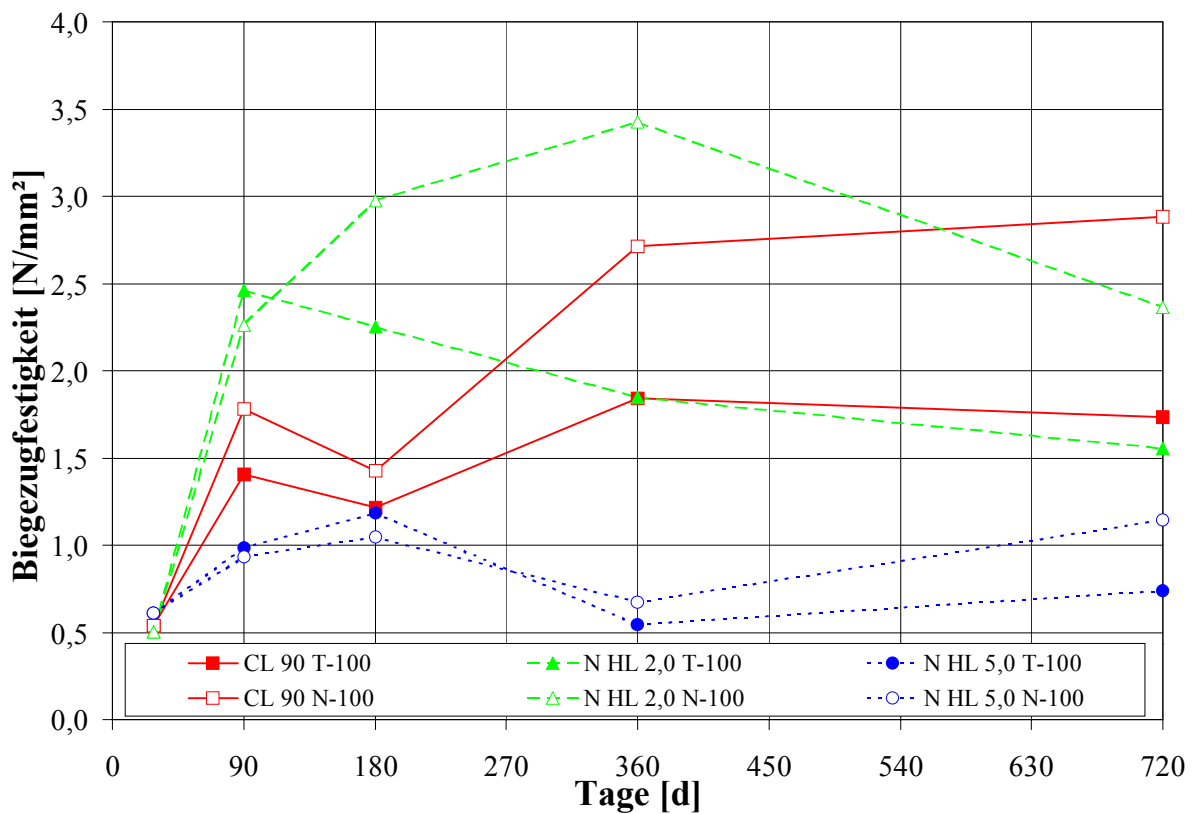


Abbildung 5.12: β_{BZ} der T/N-100-Proben der G3-Mörtel

5.3 Druckfestigkeit

G1-Mörtel: Die β_D der Nullproben haben nach 90d ihre Endfestigkeit (zum Begriff Endfestigkeit s.a. Vorbemerkung Seite 39) erreicht (Abbildung 5.13). Die Werte steigen von 28d nach 90d leicht an. Der CEM I, weiß-T-0 zeigt nach 90d einen „Ausreißer“. Erwartungsgemäß liegen die N-Lagerungen etwas höher als die T-Lagerungen. Durch die regelmäßige Wässerung hydratisieren die Mörtel besser. Die bewitterten Mörtel entwickeln sich vollkommen anders (Abbildung 5.14). Deren β_D liegen generell deutlich höher als die der Nullproben. Von 28d nach 90d steigen die β_D des CEM I HS und CEM I, weiß stark an. Die β_D des CEM I hingegen bleibt zunächst konstant und steigt dann von 90d nach 180d in den Bereich der übrigen G1-Mörtel an. Bei allen G1-Mörteln erfolgt danach ein weiterer Anstieg der Werte. Die bei den Nullproben beobachteten Unterschiede zwischen T und N sind nach 360d und 720d genau umgekehrt. Die β_D der T-Proben nach 720d liegen um ca. 10 N/mm² höher als die β_D der N-Proben. Dieser scheinbare Widerspruch liegt in der Neutralisierungstiefe (s. 5.9) begründet. Die T-Proben sind deutlich weiter neutralisiert. In tieferen Schichten kann die Neutralisierung mit der Carbonatisierung gleichgesetzt werden. Durch die Bewitterung mit SO₂/NO_x wird die Oberfläche durch Neubildungen abgedichtet. Die regelmäßige Wässerung löst diese Neubildungen z.T. auf, die dann wiederum oberflächennah in den Poren rekristallisieren können. Dadurch wird sowohl das Eindringen von Wasser (zur Hydratation) als auch das Eindringen von CO₂ (zur Carbonatisierung) in tiefere Bereiche verlangsamt. Die Folge ist eine geringere Festigkeit. Bei den T-Proben finden die Rekristallisationsprozesse nicht statt.

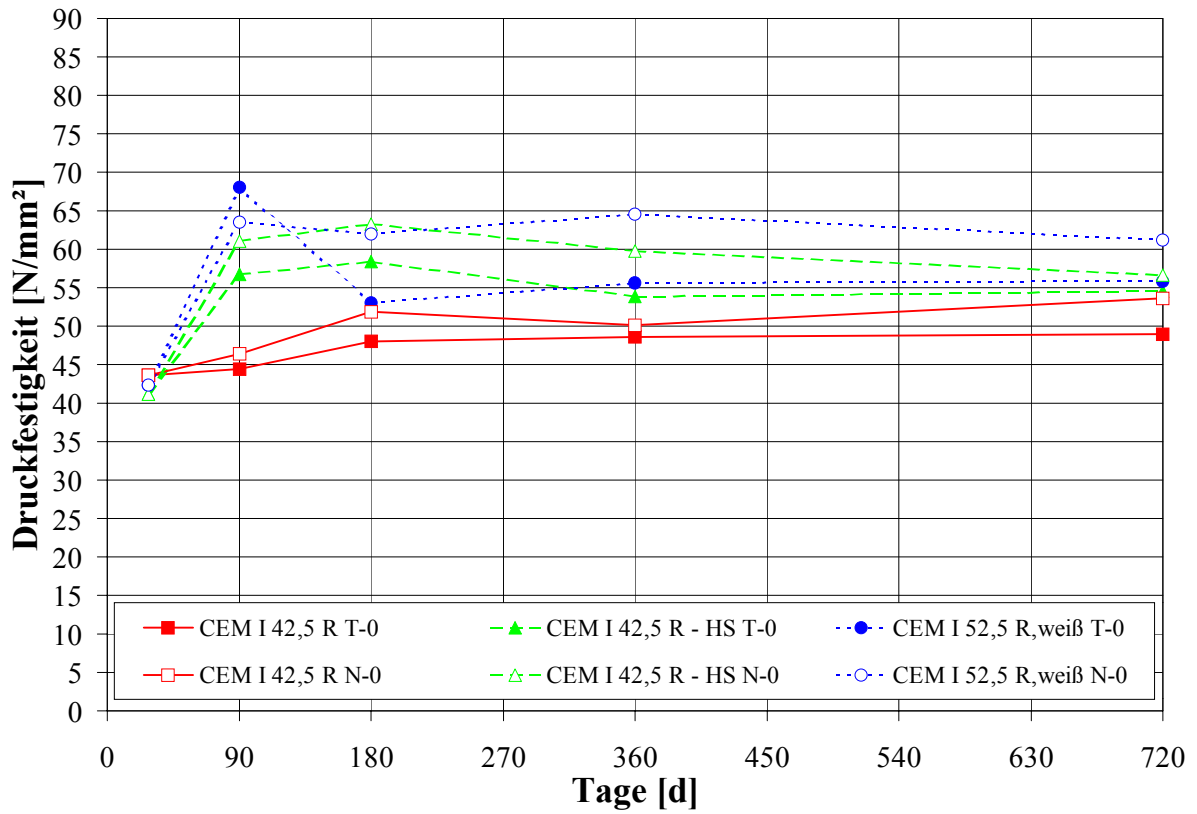


Abbildung 5.13: β_D der T/N-0-Proben der G1-Mörtel

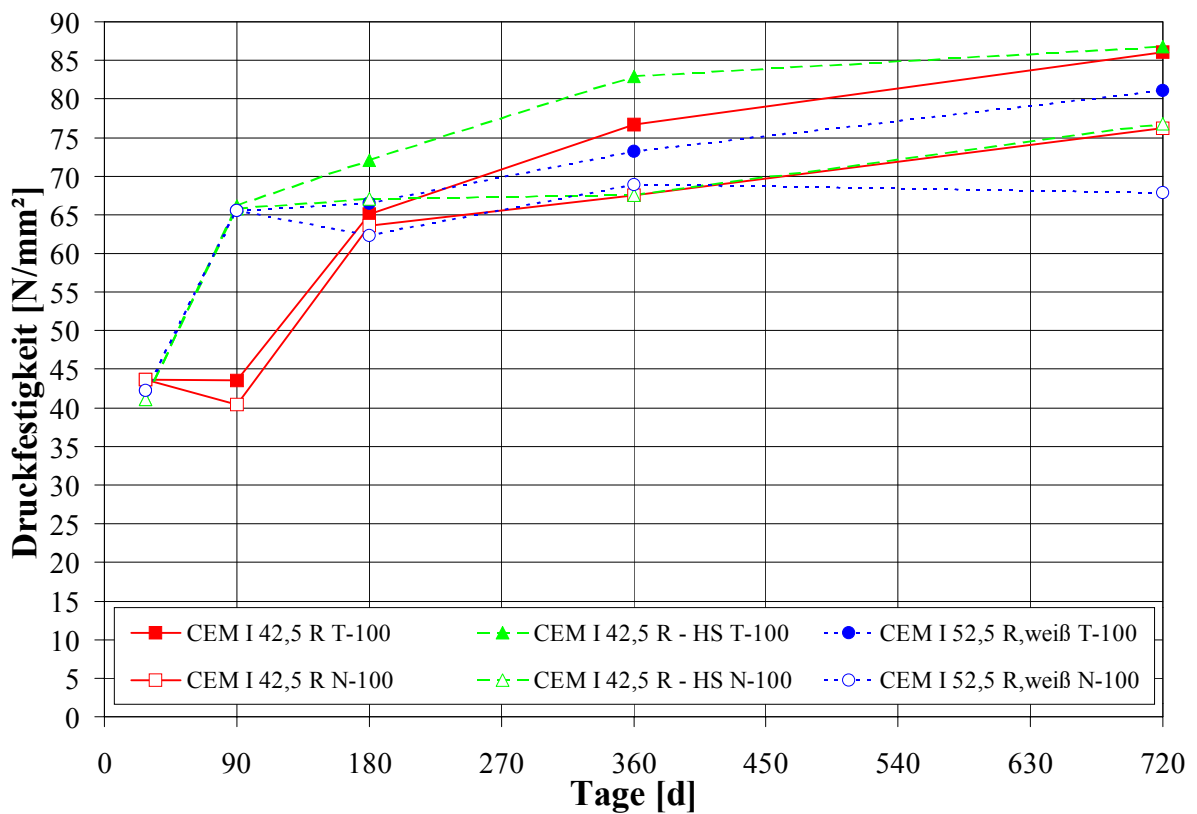


Abbildung 5.14: β_D der T/N-100-Proben der G1-Mörtel

G2-Mörtel: Die Nullproben des CEM II und des CEM III verhalten sich ähnlich wie die G1-Mörtel. Die β_D steigen von 28d nach 90d deutlich an und bleiben danach weitgehend konstant (Abbildung 5.15). Beim HGZ zeigt sich zunächst bis 180d ein Anstieg der β_D , danach ein stetiger Abfall auf ca. 15 N/mm². Wie schon bei den G1-Mörteln zeigt sich auch hier, daß die N-Proben leicht höhere β_D als die T-Proben aufweisen. Grund ist wiederum die bessere Hydratisierung der Mörtel. Die bewitterten CEM II- und CEM III-Proben (Abbildung 5.16) zeigen, wie schon die G1-Mörtel, zunächst einen gleichmäßigen Anstieg der β_D -Werte bis 180d (CEM II) bzw. 360d (CEM III). Danach bleiben die β_D konstant. Der HGZ wird durch die Bewitterung nur wenig beeinflusst. Der Endwert der Nullproben ist hier schon nach 180d erreicht. Die Schadgase bewirken also eine Zeitraffung gegenüber den Nullproben. Die Unterschiede zwischen T- und N-Proben sind, im Gegensatz zu den G1-Mörteln, gering. Die dort beschriebenen Effekte wirken sich bei den G2-Mörteln erheblich geringer aus.

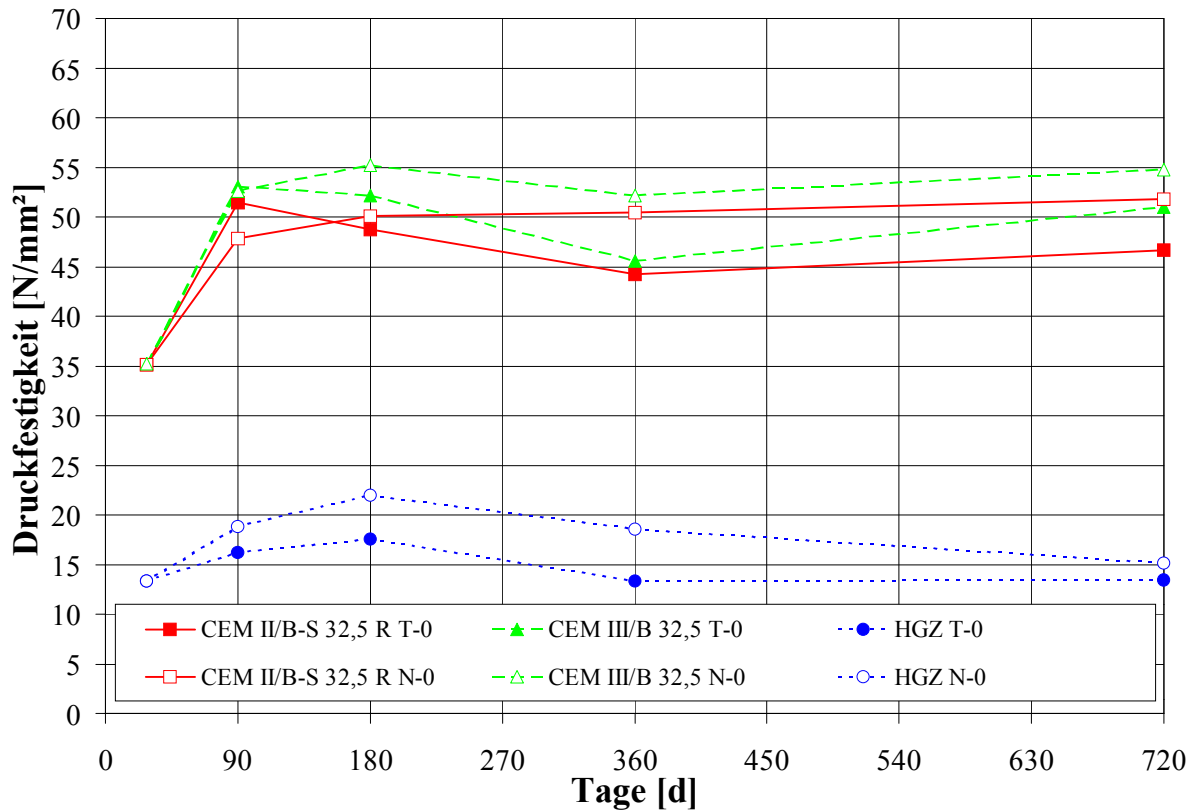


Abbildung 5.15: β_D der T/N-0-Proben der G2-Mörtel

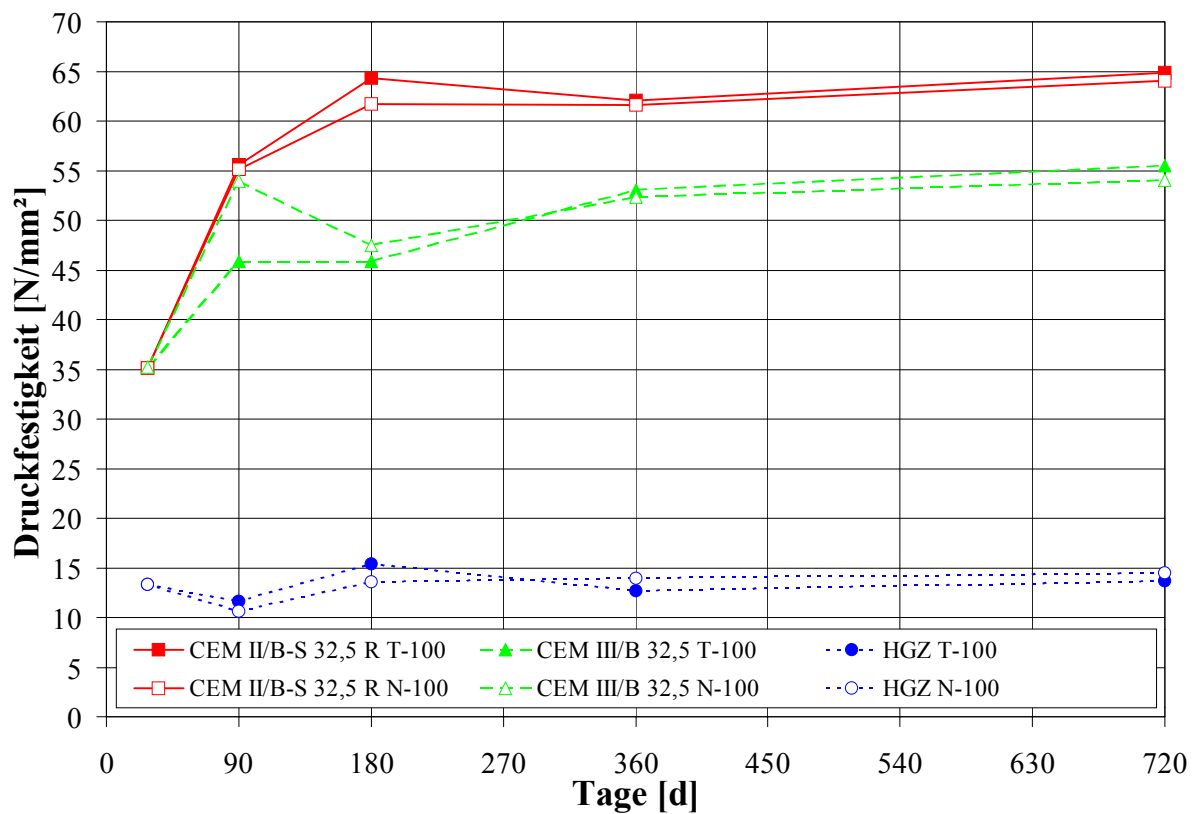


Abbildung 5.16: β_D der T/N-100-Proben der G2-Mörtel

G3-Mörtel: Die Nullproben der G3-Mörtel entwickeln sich sehr unterschiedlich (Abbildung 5.17). Die β_D der CL 90-Mörtel steigen im Laufe der Zeit kontinuierlich an. Dabei zeigt sich erst nach 720d zwischen den T- und N-Proben ein Unterschied von ca. 2 N/mm². Die β_D des N HL 2,0-N-0 steigt bis zur 360d Prüfung kontinuierlich an und bleibt danach konstant. Die β_D der T-Proben ist schon nach 180d konstant. Der hydraulische Charakter des N HL 2,0 zeigt sich in den durchweg höheren β_D der N-Proben. Obwohl der N HL 5,0 eine (nach Norm) höhere β_D als der N HL 2,0 haben soll, zeigen die T/N-0-Proben nach 360d mit ca. 2 N/mm² die geringsten β_D aller G3-Mörtel. Interessanterweise liegen die β_D nach 28d fast doppelt so hoch wie nach 360d. Durch die Bewitterung der Proben wird hauptsächlich eine Zeitraffung erreicht (Abbildung 5.18). Daneben sind die β_D gegenüber den Nullproben leicht erhöht. Besonders deutlich wird dies beim N HL 2,0-T-100. Einzig der leichte Rückgang von ca. 1,2 N/mm² der N HL 2,0-N-100-Proben deutet auf eine beginnende Schädigung durch die Schadgasbewitterung hin. Bis auf den N HL 5,0 (keine Unterschiede) liegen die β_D der N-Proben höher als die der T-Proben. Die regelmäßige Wässerung bewirkt hier eine verbesserte Carbonatisierung bzw. Rekrystallisierung.

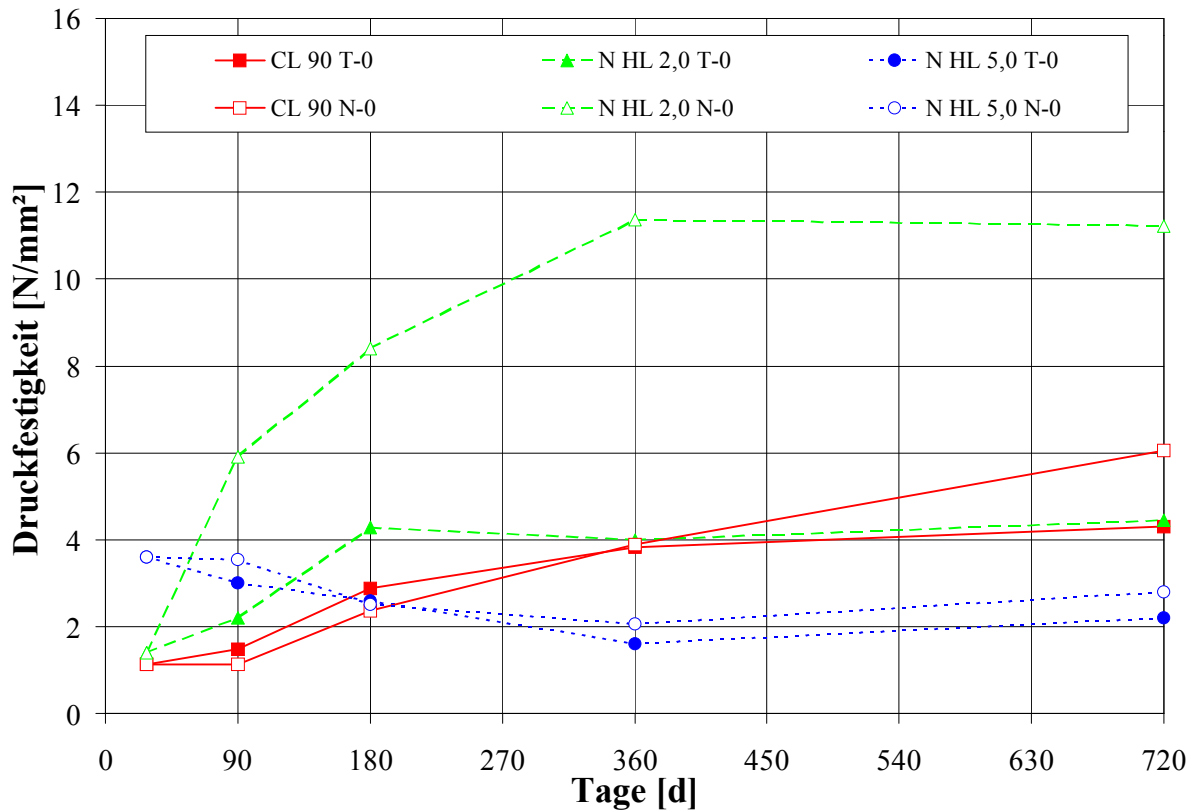


Abbildung 5.17: β_D der T/N-0-Proben der G3-Mörtel

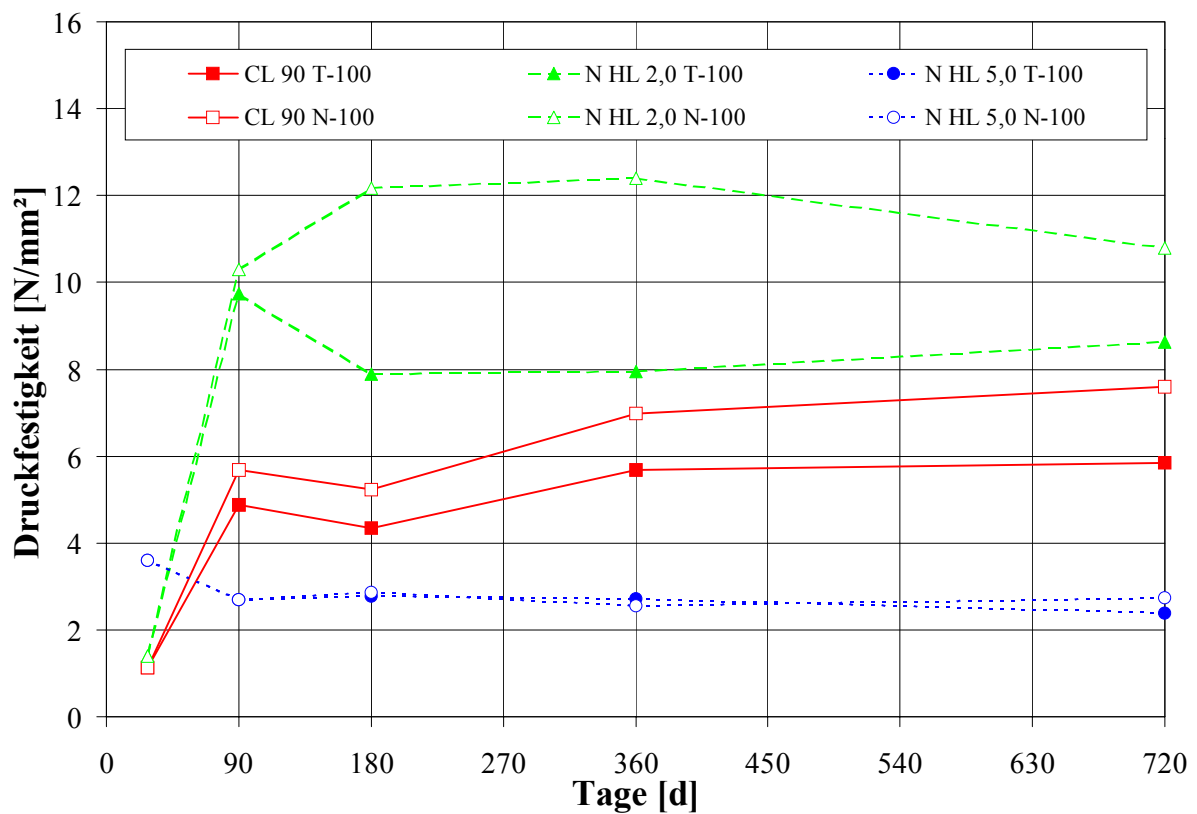


Abbildung 5.18: β_D der T/N-100-Proben der G3-Mörtel

5.4 Wasseraufnahmekoeffizient

G1-Mörtel: Die Wasseraufnahmekoeffizienten (ω) der Nullproben zeigen ein recht ungewöhnliches Verhalten (Abbildung 5.19). Bis zur 360d Messung steigen alle ω (Ausnahme CEM I-T-0) stark an. Danach fallen die ω -Werte des CEM I-N-0, des CEM I HS-N-0 und des CEM I-T-0 auf die 90d Werte ab. Die übrigen ω -Werte bleiben konstant. Dieses Verhalten ist nur schwer zu verstehen. Durch die Neutralisierung (Carbonatisierung, s.a. 5.9) tritt normalerweise eine Gefügeverdichtung ein. Ein steigender ω bis zur 360d Messung deutet aber auf eine Gefügevergrößerung hin, so daß Wasser besser aufgenommen wird. Drei Proben zeigen dann eine Gefügeverdichtung, der ω geht zurück. Dieser Rückgang geht jedoch nicht mit einem β_D Anstieg einher.

Die bewitterten Proben zeigen ein anderes Verhalten (Abbildung 5.20). Die ω -Werte liegen, verglichen mit den Nullproben, deutlich niedriger. Abgesehen von leicht erhöhten Werten bei der 180d Messung sind die ω -Werte durchweg konstant. Die Bewitterung bewirkt offensichtlich schon nach 90d eine weitgehende Oberflächenverdichtung. Der Durchgang des Wassers durch die Oberfläche ist dann der geschwindigkeitsbestimmende Schritt für den ω . Da nach 720d die ω -Werte der N-Proben deutlich unter denen der T-Proben liegen, wirkt sich die Oberflächenverdichtung bzw. die oberflächennahe Porenverstopfung auf die N-Proben erwartungsgemäß stärker aus.

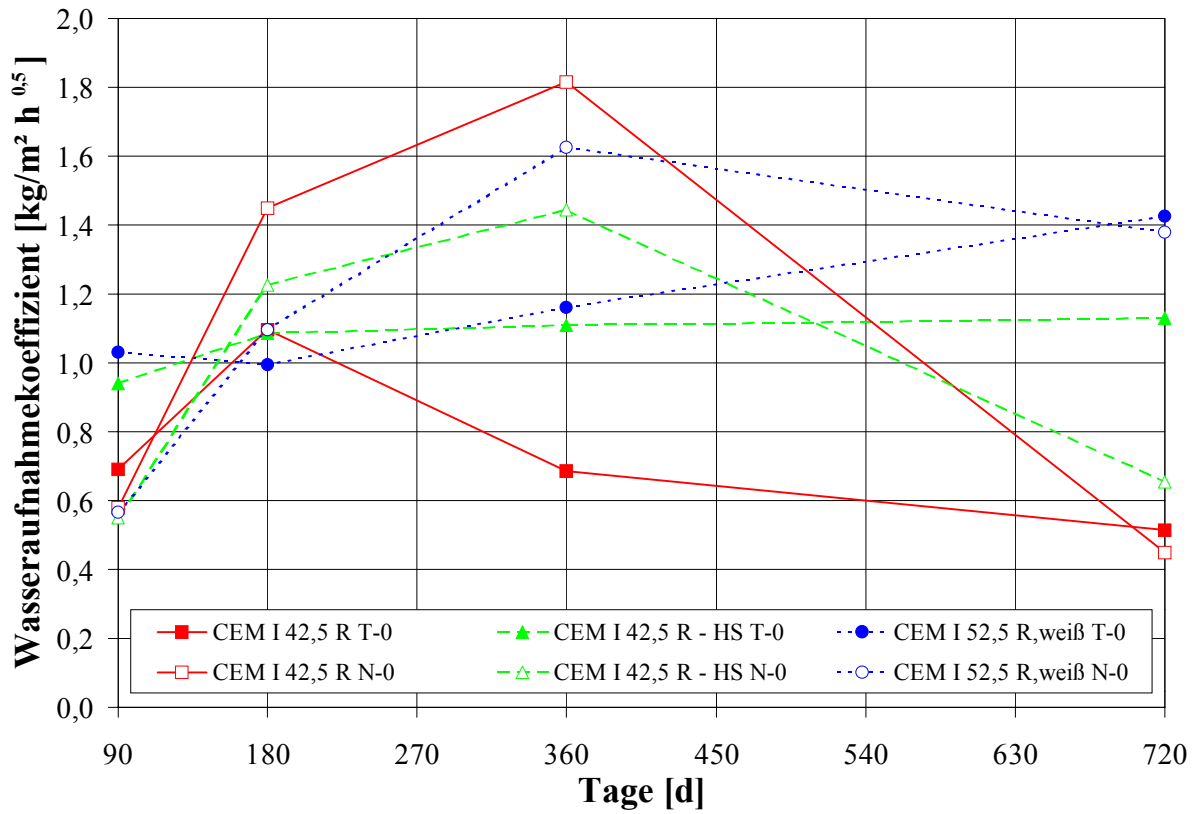


Abbildung 5.19: Wasseraufnahmekoeffizienten der T/N-0-Proben der G1-Mörtel

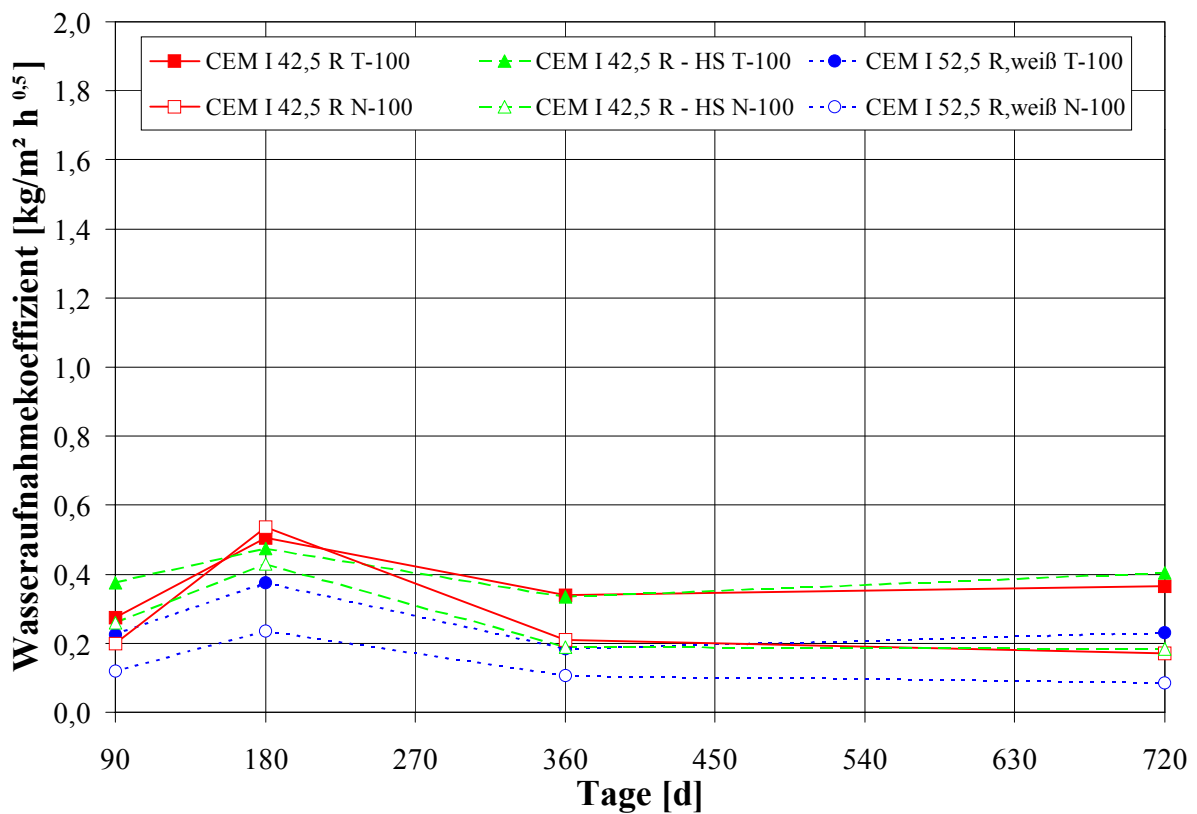


Abbildung 5.20: Wasseraufnahmekoeffizienten der T/N-100-Proben der G1-Mörtel

G2-Mörtel: Im Gegensatz zu den Nullproben der G1-Mörtel zeigen die ω der Nullproben der G2-Mörtel ein deutliches Bild (Abbildung 5.21). Der ω der CEM II-T-0 bleibt, bis auf eine Abweichung bei der 360d Messung, konstant. Der CEM II-N-0 zeigt ebenso wie der CEM III gleichmäßig ansteigende ω -Werte. Der CEM III verdoppelt dabei den ω von 90d nach 720d. Auch der HGZ zeigt diese gleichmäßig ansteigenden ω -Werte. Die T-0-Proben liegen dabei über den N-0-Proben. Je höher also der HÜS-Anteil, um so stärker steigt im Laufe der Zeit der ω an.

Daß bei den Nullproben des HGZ die stetige Steigerung des ω nicht abgeschlossen ist, zeigt sich bei den bewitterten Proben (Abbildung 5.22). Nach 90d liegen die ω der T/N-100-Proben deutlich über den T/N-0 nach 720d. Der dann folgende Abfall des ω der T/N-100-Proben des HGZ ist auf Neubildungen, wie z.B. Gips, zurückzuführen. Solche Neubildungen bewirken auch die im Vergleich zu den Nullproben niedrigeren ω der bewitterten CEM II-Proben. Der CEM III zeigt zunächst auch einen Anstieg des ω (bis 360d), danach wieder einen Rückgang. Hier wirken zwei Effekte gegenläufig, der Einfluß des HÜS und der Einfluß der Neubildungen.

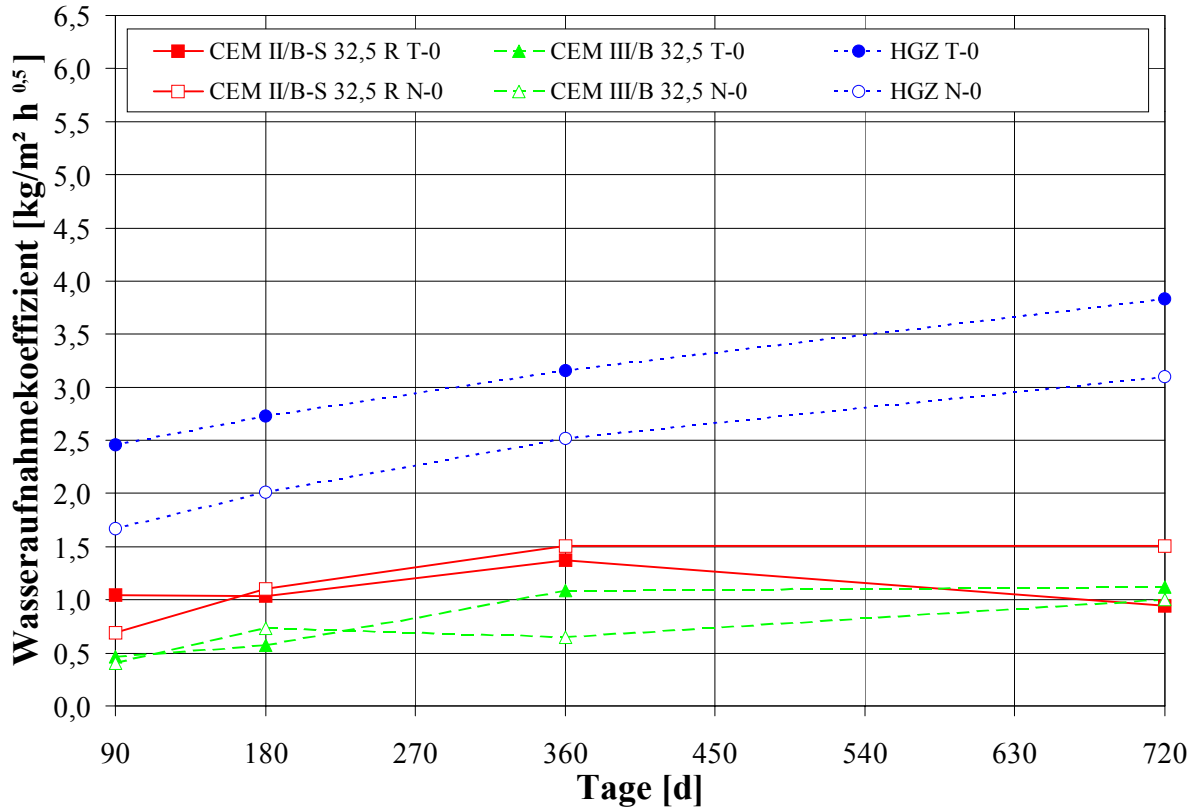


Abbildung 5.21: Wasseraufnahmekoeffizienten der T/N-0-Proben der G2-Mörtel

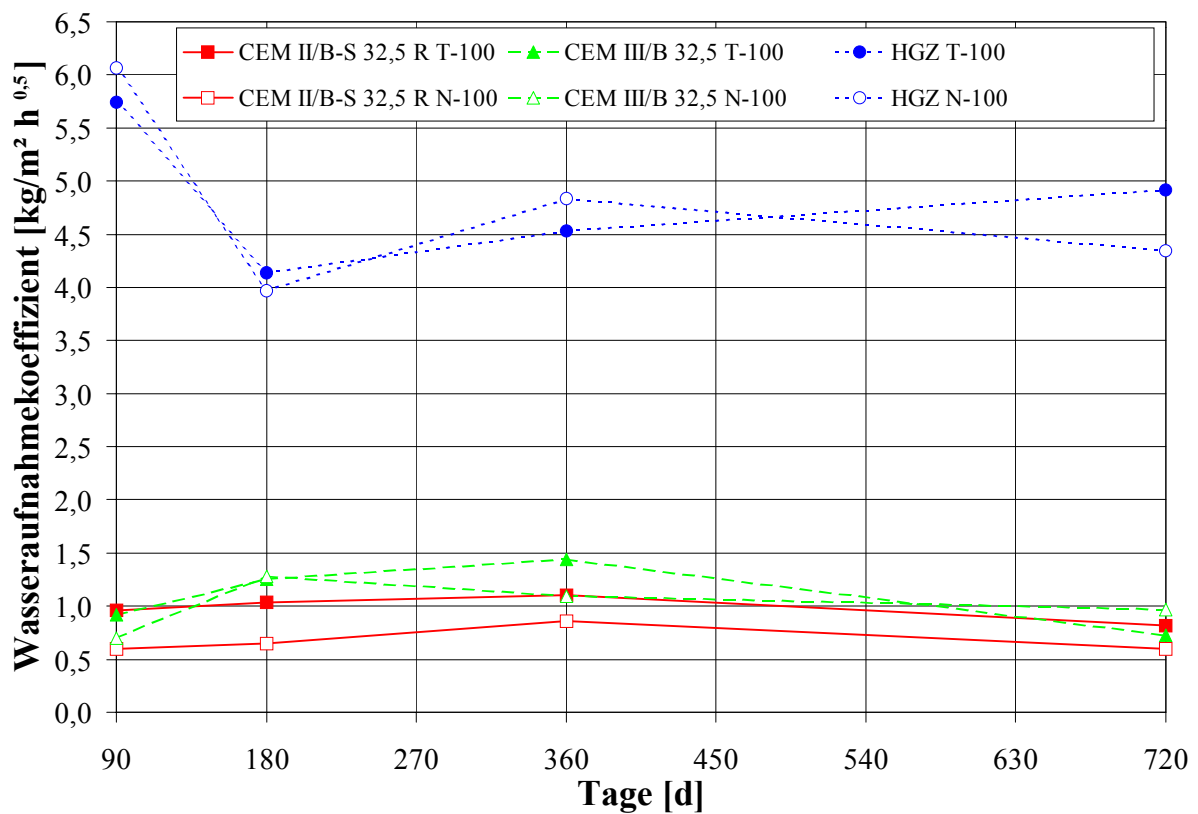


Abbildung 5.22: Wasseraufnahmekoeffizienten der T/N-100-Proben der G2-Mörtel

G3-Mörtel: Die ω der G3-Mörtel verändern sich im Laufe der Zeit sehr stark (Abbildung 5.23). Die ω der T-0- und der N-0-Lagerung des N HL 2,0 entfernen sich von 90d nach 720d sehr stark voneinander. Während die T-0-Proben steigende ω -Werte aufweisen, fallen sie bei den N-0-Proben stark ab. Dies geht einher mit der Neutralisierungstiefe (s. 5.9). Ähnlich verhalten sich die N-0-Proben des CL 90, nur ist dort der Rückgang weniger ausgeprägt. Die ω der T-0-Proben des CL 90 und des N HL 5,0 bleiben weitgehend konstant. Die N-0-Proben des N HL 5,0 zeigen zunächst (bis 180d) eine starke Zunahme des ω , danach fällt der ω wieder allmählich auf den 90d Wert ab.

Im Vergleich zu den Nullproben verhalten sich die ω der bewitterten Proben sehr ähnlich (Abbildung 5.24). Die Unterschiede liegen hauptsächlich im Betrag des ω . Durch die Bewitterung wird die Oberfläche durch Neubildungen dichter und der ω -Wert geht zurück. Der zeitliche Verlauf wird davon jedoch nur wenig beeinflusst.

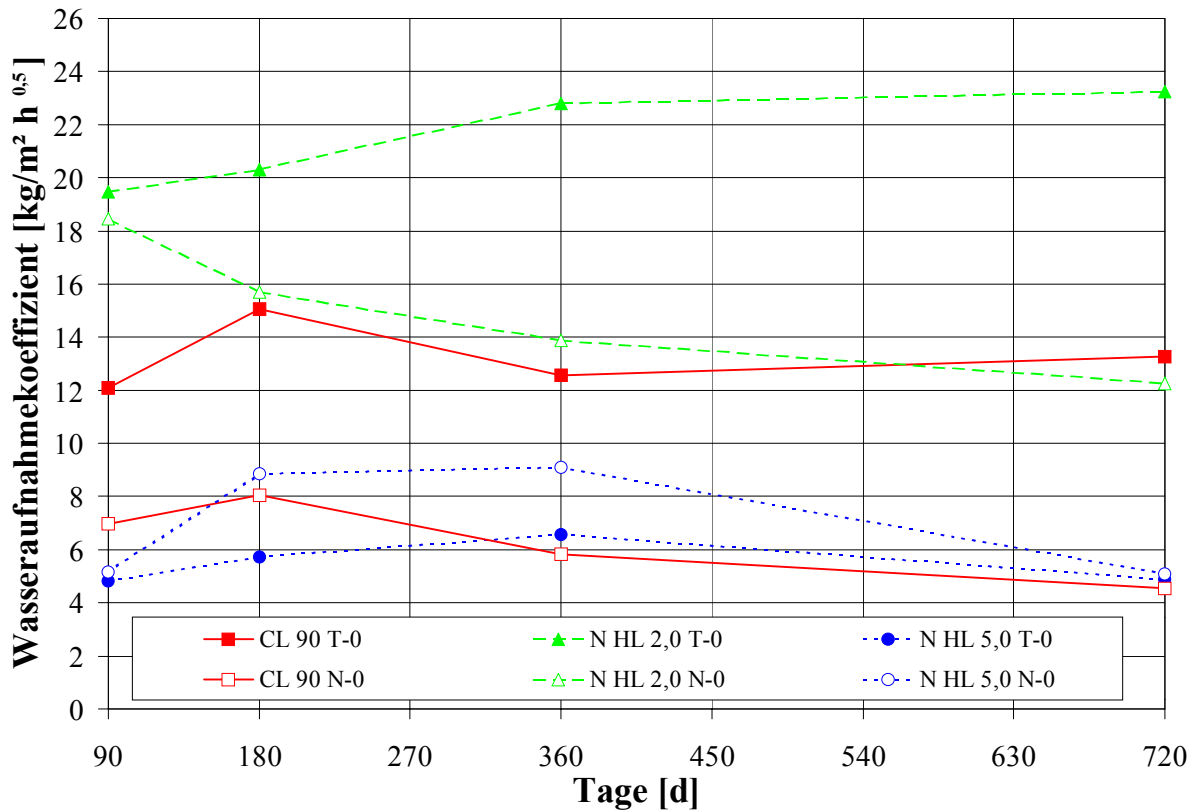


Abbildung 5.23: Wasseraufnahmekoeffizienten der T/N-0-Proben der G3-Mörtel

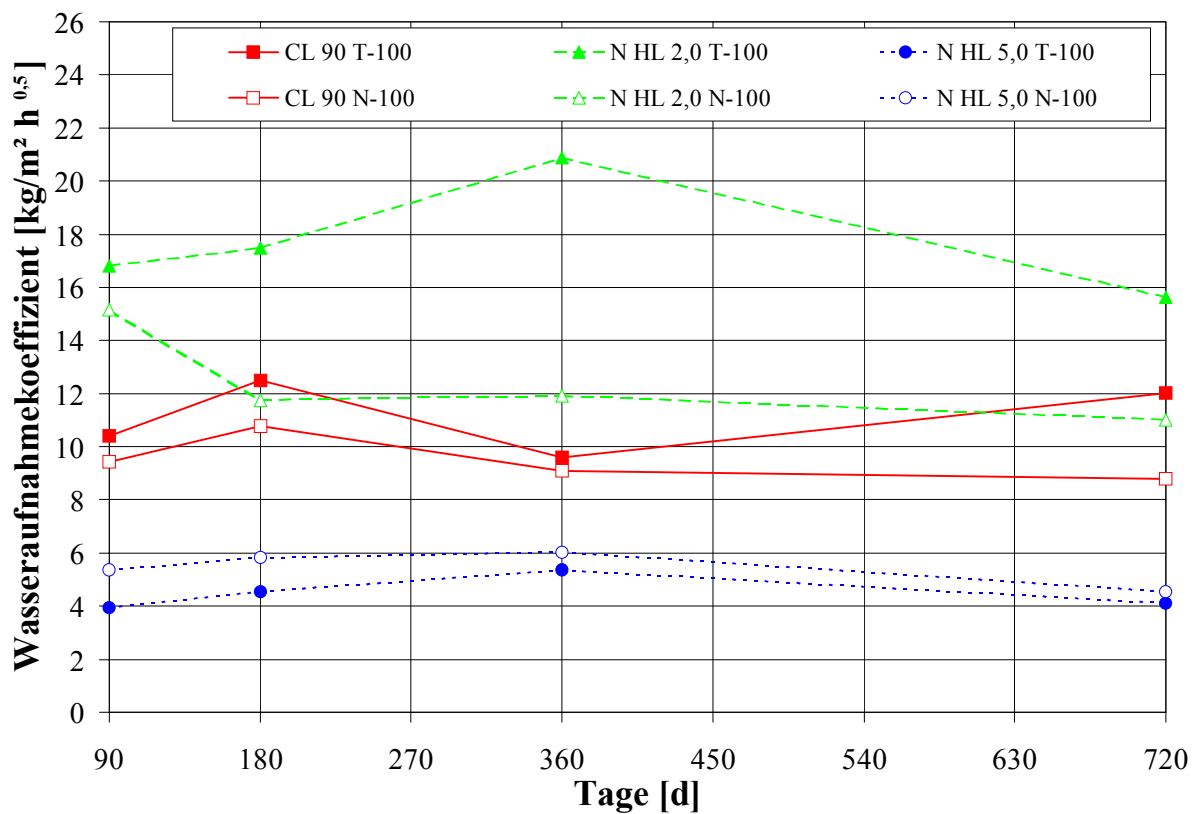


Abbildung 5.24: Wasseraufnahmekoeffizienten der T/N-100-Proben der G3-Mörtel

5.5 Offene Porosität

G1-Mörtel: Die offene Porosität (OP) der Nullproben steigt bis zur 360d Messung an und bleibt dann weitgehend konstant (Abbildung 5.25). Diese Gefügevergrößerung läßt sich z.T. auch anhand der Hg-Druckporosimetrie beobachten (s. 6.3). Jedoch wird bei der Bestimmung der OP der gesamte Probenkörper erfaßt, während die Hg-Druckporosimetrie nur in bestimmten Schichten durchgeführt wurde. Aufgrund des deutlichen Anstiegs der OP liegt der Schluß nahe, daß sich die gefügevergrößernden Effekte im Inneren des Probekörpers abspielen (Tiefer als 8 mm unter der Oberfläche). Diese Effekte werden durch die Bewitterung spürbar beeinflusst (Abbildung 5.26). Die OP der T/N-100-Proben liegt mehr als 2 Vol.-% niedriger als die der T/N-0-Proben. Ursachen hierfür dürften Neubildungen in den Poren des Gefüges sein. Außerdem ist nur ein geringer Anstieg bis zur 180d Messung zu beobachten, danach bleiben die Werte weitgehend konstant. Die Unterschiede zwischen T und N sind gering.

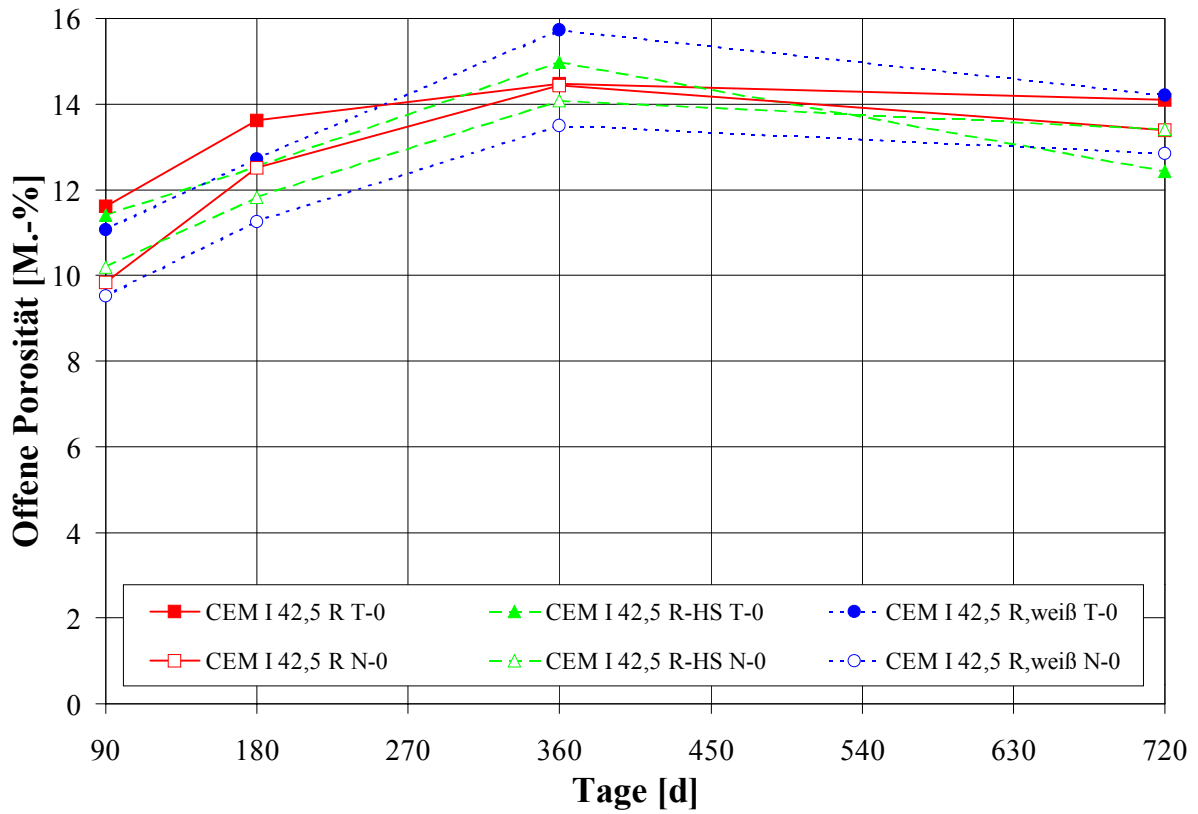


Abbildung 5.25: Offene Porosität der T/N-0-Proben der G1-Mörtel

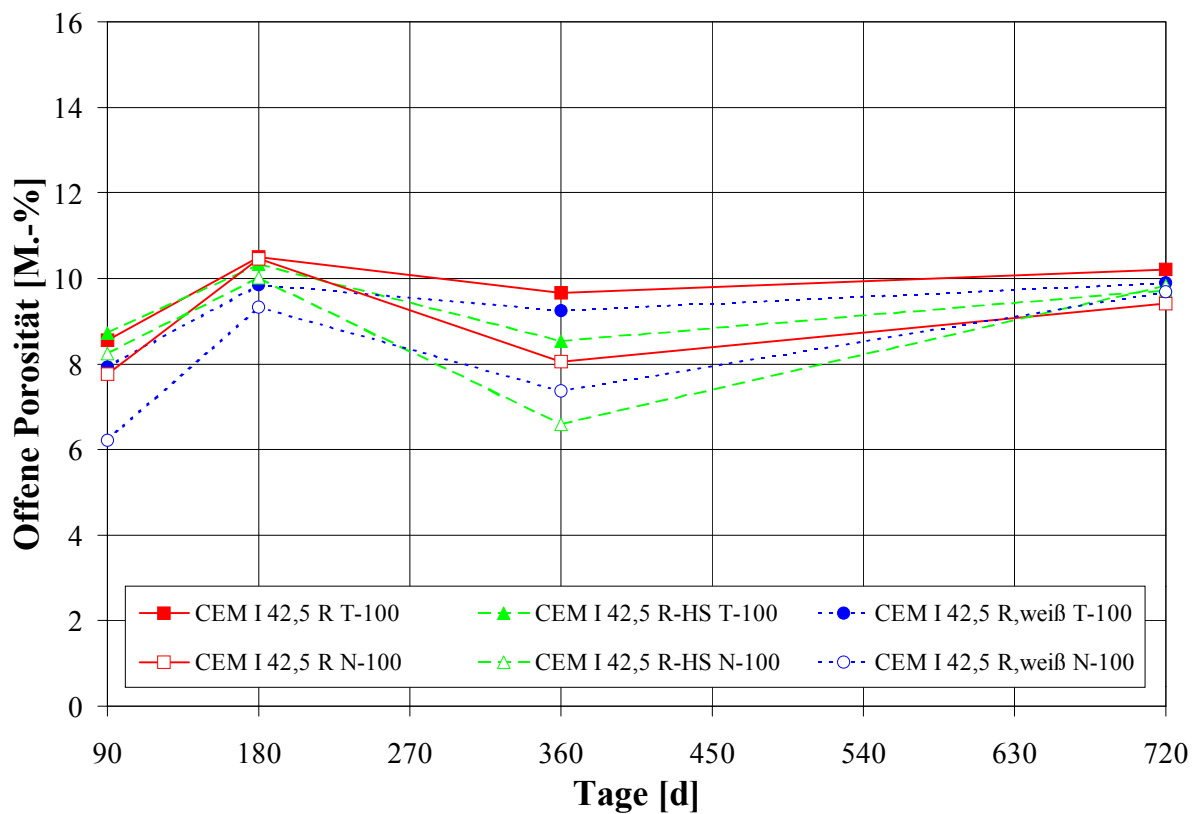


Abbildung 5.26: Offene Porosität der T/N-100-Proben der G1-Mörtel

G2-Mörtel: Eine Gefügevergrößerung und damit ein Anstieg der OP ist auch bei den Nullproben der G2-Mörtel zu beobachten (Abbildung 5.27). Die OP des CEM II steigt, ebenso wie bei den G1-Mörteln, bis zur 360d Messung an und bleibt danach weitgehend konstant. Der CEM III und der HGZ zeigen einen relativ gleichmäßigen Anstieg der OP über den gesamten Untersuchungszeitraum. Der steigende HÜS-Anteil in den verschiedenen G3-Mörteln beeinflusst die Entwicklung der OP. Ähnlich wie bei den G1-Mörteln liegen die OP der bewitterten G2-Mörtel niedriger als die der Nullproben (Abbildung 5.28). Außerdem ist nach der 360d Messung ein Rückgang der OP, verursacht durch Neubildungen, zu beobachten. Wider Erwarten ist dieser Rückgang bei dem HÜS ärmsten Bindemittel, dem CEM II, am stärksten. Ein höherer HÜS-Anteil reduziert den Rückgang der OP. Wiederum ist der Unterschied zwischen T- und N-Proben nur gering.

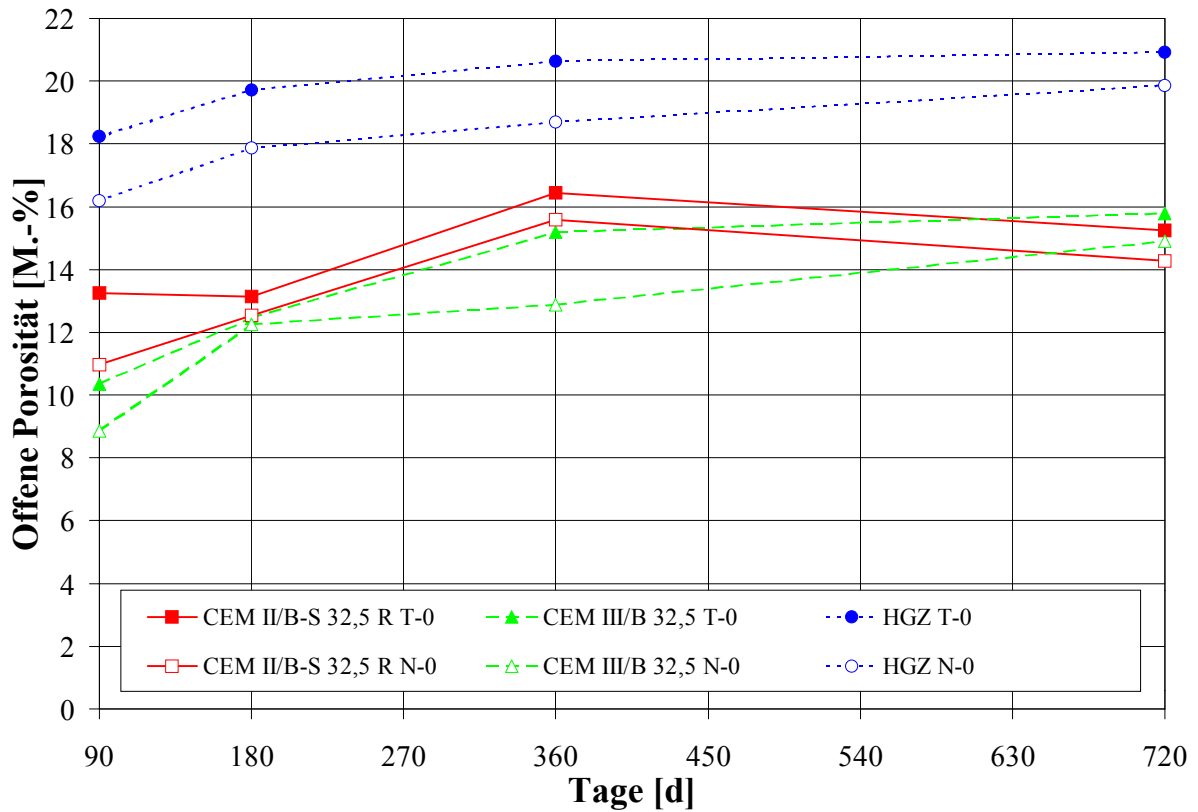


Abbildung 5.27: Offene Porosität der T/N-0-Proben der G2-Mörtel

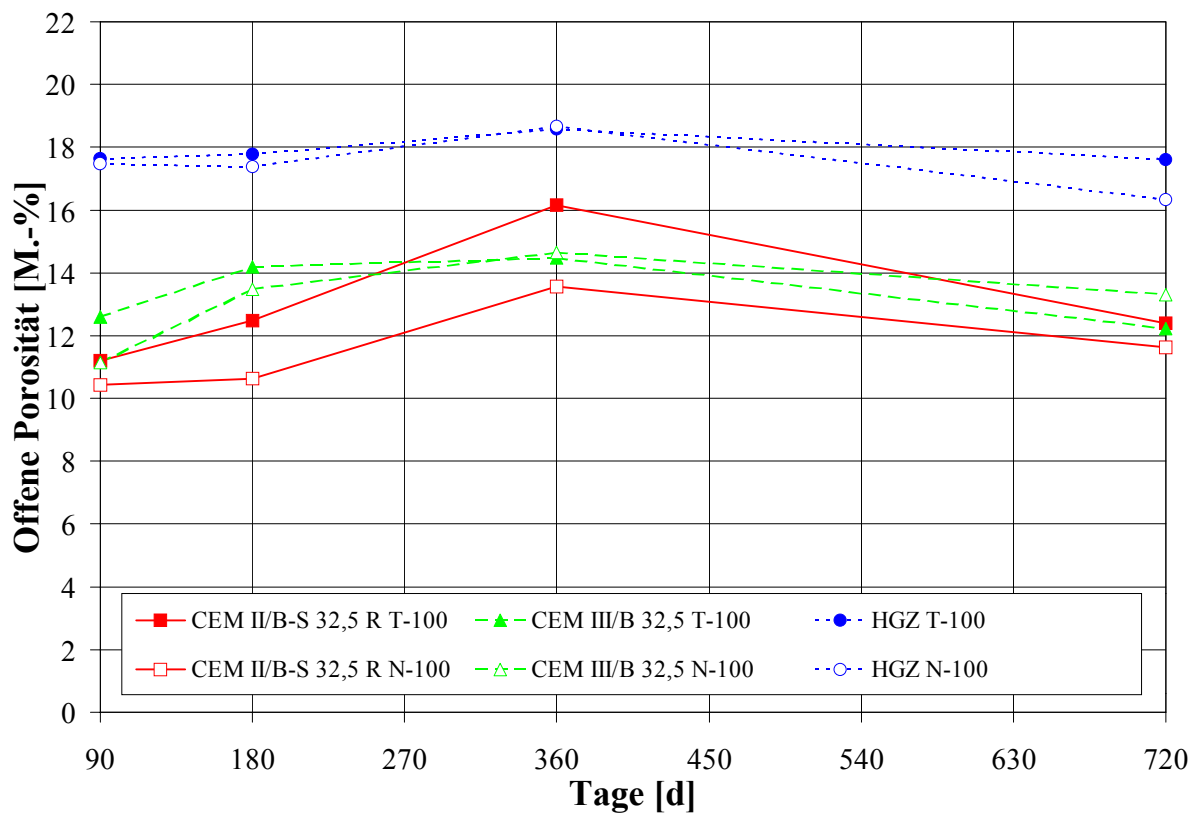


Abbildung 5.28: Offene Porosität der T/N-100-Proben der G2-Mörtel

G3-Mörtel: Die G3-Mörtel besitzen eine relativ hohe OP von über 20 Vol.-% (Abbildung 5.29). Während der CL 90 und der N HL 2,0 bis zur 720d Messung konstante OP aufweisen, steigt die OP beim N HL 5,0 bis zur 360d Messung an und bleibt danach konstant. Dieses Verhalten erinnert an die G1-Mörtel. Der hydraulische Anteil beim N HL 5,0 dürfte für dieses Verhalten verantwortlich sein. Der N HL 5,0 enthält neben C_2S auch C_3A . Bei der Hydratation bildet sich daraus C_4AH_{13} , wenn dieses carbonatisiert bildet sich Porenraum, die OP steigt an. Die bewitterten Proben (Abbildung 5.30) zeigen ein fast identisches Bild, die OP liegt aber unter der der Nullproben. Lediglich der CL 90 zeigt ab der 180d Messung einen leichten Rückgang der OP.

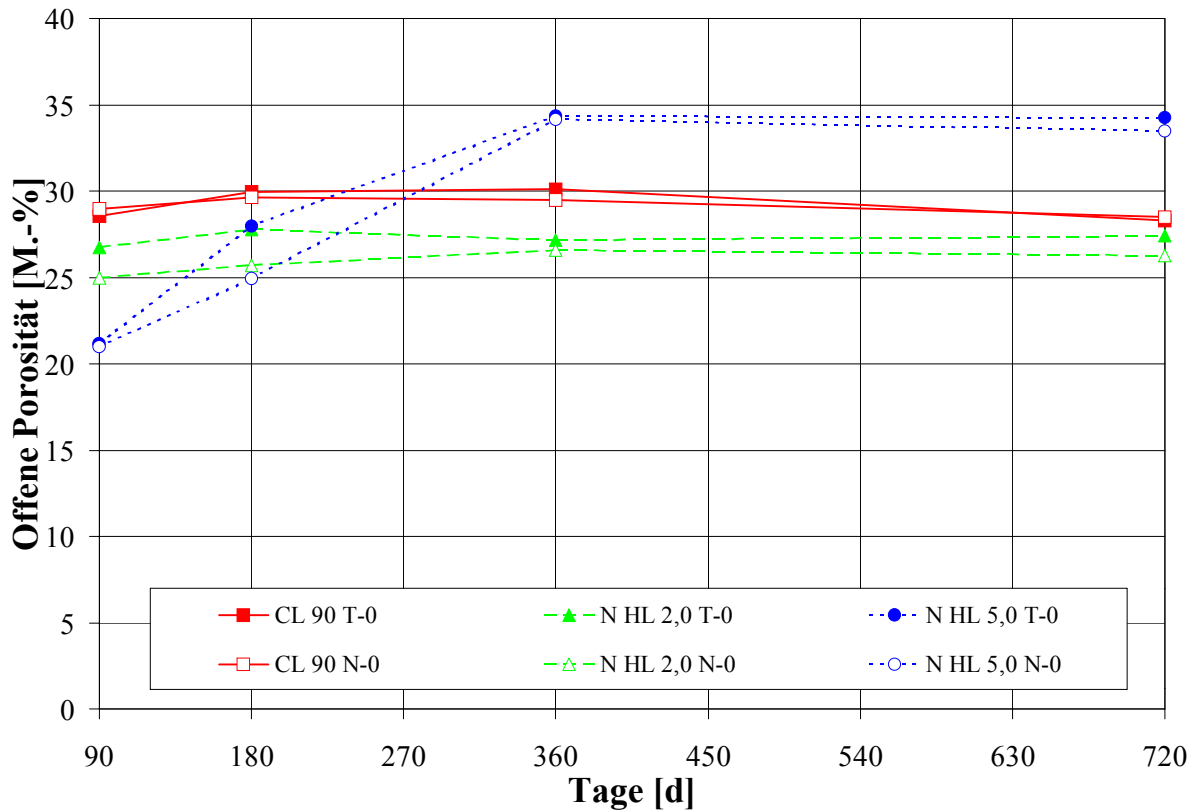


Abbildung 5.29: Offene Porosität der T/N-0-Proben der G3-Mörtel

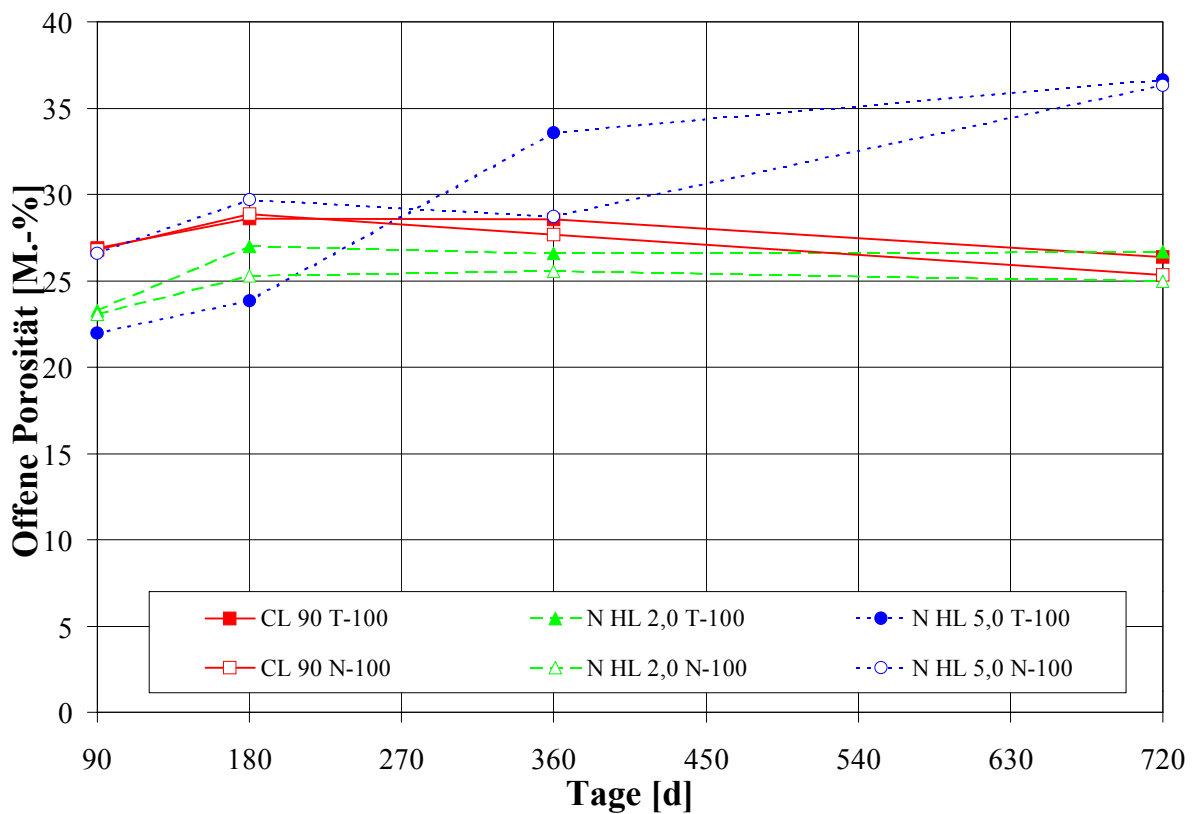


Abbildung 5.30: Offene Porosität der T/N-100-Proben der G3-Mörtel

5.6 Frost-Tauwechsel-Widerstand

G1-Mörtel: Der FTW der Nullproben zeigt ein recht ungewöhnliches Bild (Abbildung 5.31). Während nach 50 Zyklen der CEM I, weiß über den gesamten Untersuchungszeitraum nur geringe Absplitterungen aufweist (Abbildung A 6), zeigt der CEM I einen dramatischen Anstieg der Absplitterungen. Nach 360d werden durch die Befrostung nur ca. 1 M.-% abgetragen, nach 720d hingegen ca. 20 M.-% (T-0-Proben) bzw. ca. 40 M.-% (N-0-Proben). Dabei steigt die Menge der Absplitterungen vor allem nach dem 20. Zyklus stark an (Abbildung A 7). Noch ungewöhnlicher ist das Verhalten des CEM I HS. Dort zeigen die 90d und 720d alten Proben hohe, die 180d und 360d alten Proben nur geringe Absplitterungsmengen (Abbildung A 8). Aufgrund dieses Verhaltens liegt die Vermutung nahe, daß die untersuchten Proben Vorschädigungen, entstanden z.B. bei der Probenherstellung, aufwiesen. Für die Bestimmung des FTW wurde, wie unter 3.1.5 beschrieben, eine Hälfte eines Prismas der β_{BZ} Untersuchung verwendet. Die über diese Prismen vorliegenden E-Modul, β_{BZ} und β_D Werte lassen jedoch nicht auf eine Vorschädigung schließen. Eine Klärung ist somit nicht möglich.

Aufgrund des ungewöhnlichen Verhaltens der Nullproben ist ein Vergleich mit den bewitterten Proben schwierig. Die zunächst sehr niedrige Absplitterungsmenge nimmt im zeitlichen Verlauf leicht zu (Abbildung 5.32). Lediglich die N-100-Proben des CEM I HS und des CEM I, weiß weisen nach 720d gegenüber den übrigen Proben etwas erhöhte Absplitterungsmengen aus. Ansonsten sind die Unterschiede der übrigen Proben gering, die Abbildung 5.32 ist daher auch anders skaliert als die Abbildung 5.31.

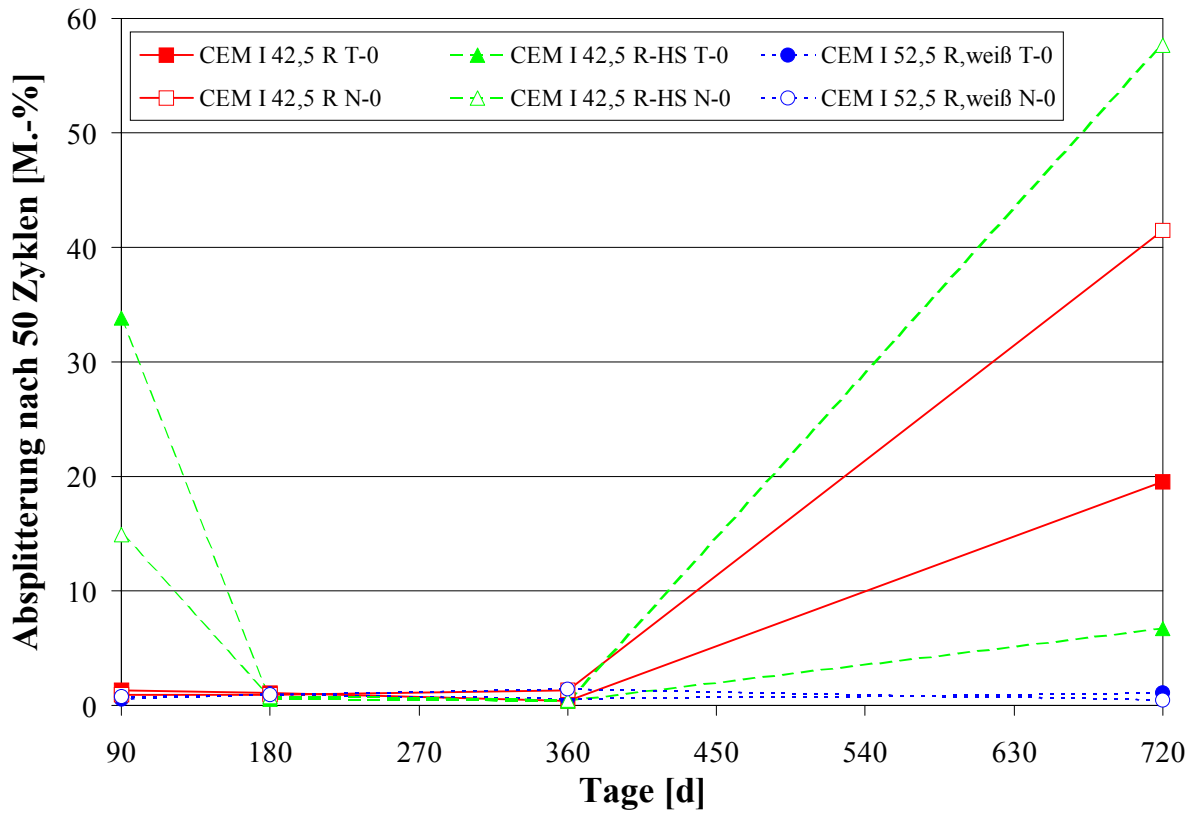


Abbildung 5.31: FTW-Verhalten der T/N-0-Proben der G1-Mörtel

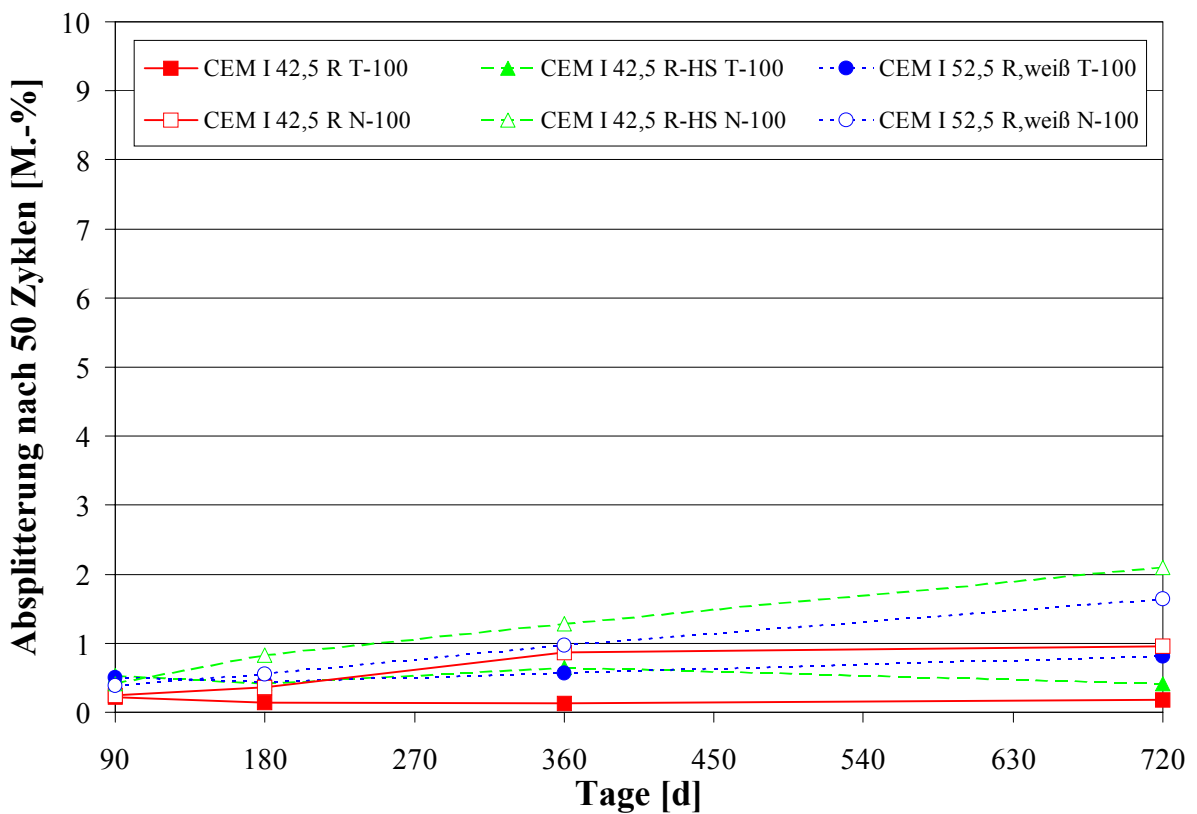


Abbildung 5.32: FTW-Verhalten der T/N-100-Proben der G1-Mörtel

G2-Mörtel: Von den G2-Mörteln sind nur der CEM II und der CEM III nach Verfahren II (s.a. 3.1.5) geprüft worden. Die Nullproben zeigen dabei im zeitlichen Verlauf einen schlechter werdenden FTW (Abbildung 5.33). Die Unterschiede zwischen den T- und N-Proben beim CEM III sind gering, beim CEM II sehr groß. Während der FTW der T-Proben nur leicht ansteigt, werden die N-Proben nach 720d vollständig zerstört.

Durch die Bewitterung wird der FTW deutlich verbessert (Abbildung 5.34). Die Menge der Absplitterungen beim CEM III nehmen zwar im zeitlichen Verlauf etwas zu, liegen aber nach 720d mit ca. 16 M.-% deutlich unter den Nullproben (ca. 60 – 70 M.-%). Bei den CEM II-Proben ist die Veränderung noch deutlicher. Der FTW der T- und N-Proben ist gleich und die Absplitterungsmenge ist mit ca. 5 M.-% nach 720d niedrig.

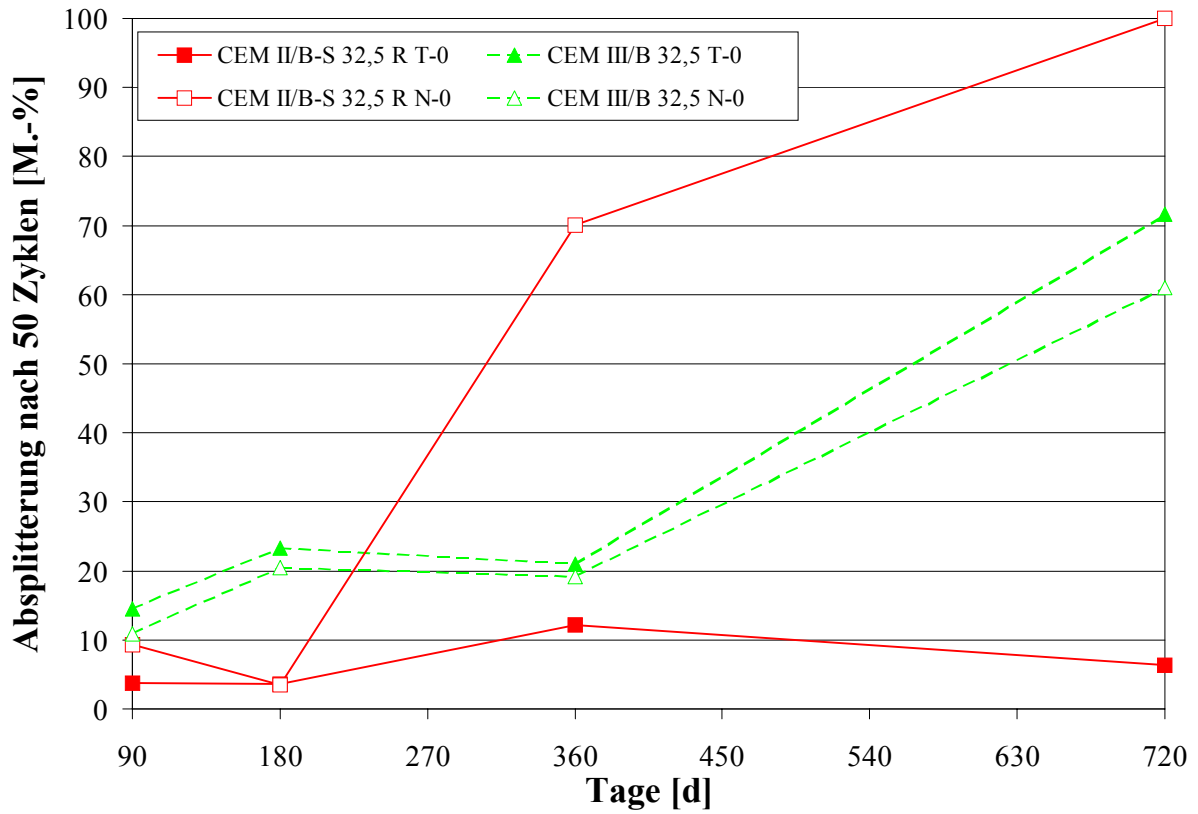


Abbildung 5.33: FTW-Verhalten der T/N-0-Proben der G2-Mörtel (ohne HGZ)

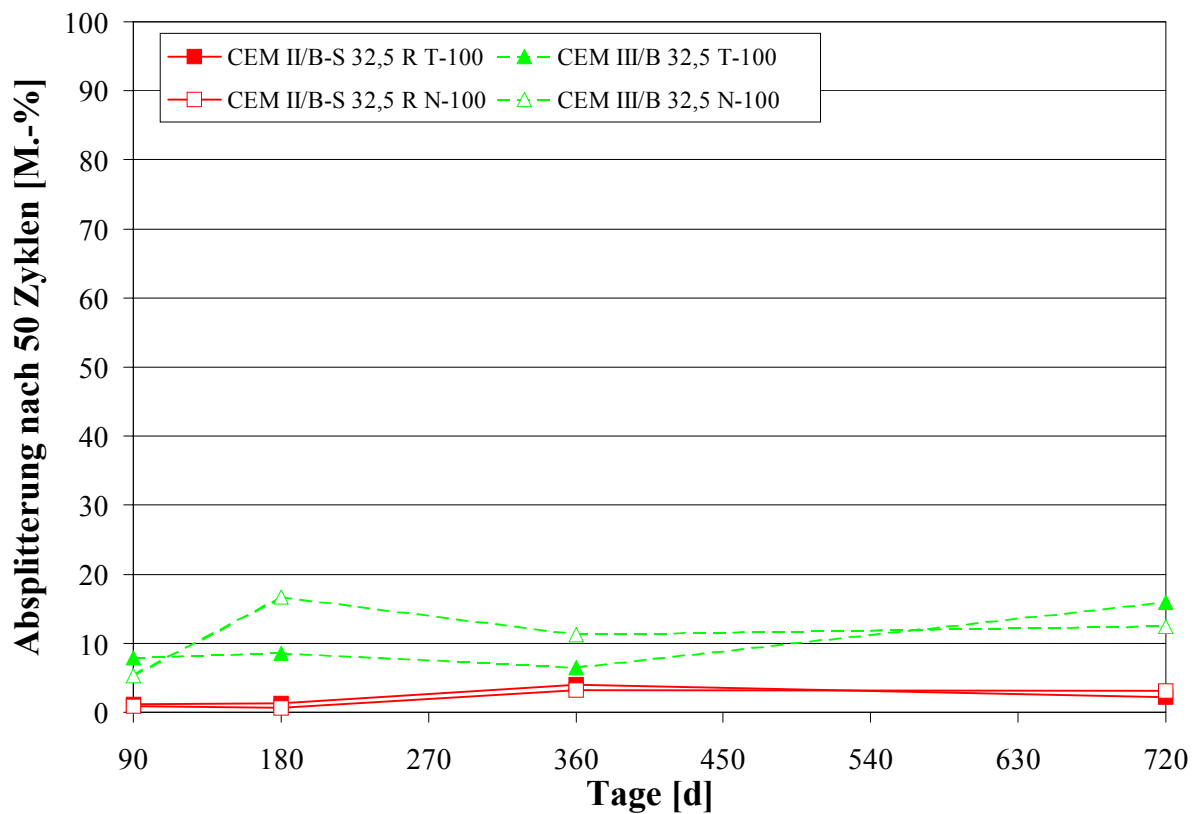


Abbildung 5.34: FTW-Verhalten der T/N-100-Proben der G2-Mörtel (ohne HGZ)

G3-Mörtel und HGZ: Die nach Verfahren I (s.a. 3.1.5) geprüften Mörtel wurden visuell beurteilt. Die Ergebnisse nach dem 50. Zyklus sind in Tabelle 5.1 dargestellt:

Das relativ grobe Raster der neun verschiedenen Schadenseinstufungen läßt nur tendenzielle Aussagen zu. Im Vergleich mit den Nullproben verbessert die Bewitterung das FTW Verhalten (von Ausnahmen abgesehen) geringfügig. Mit fortschreitender Bewitterungsdauer wird beim CL 90 und beim NHL 2,0 der FTW leicht verbessert, beim NHL 5,0 geht der FTW deutlich zurück, vor allem zwischen der 180d und 360d Messung. Der HGZ zeigt bei den bewitterten Proben keine Veränderungen. Lediglich die Nullproben weisen zunächst eine Verbesserung (bis 360d) und danach einen Rückgang des FTW auf.

Untereinander zeigen die vier Mörtel deutliche Unterschiede. Während der CL 90 immer stark geschädigt wird, zeigt der HGZ nur geringe Schäden.

Tabelle 5.1: FTW der G3-Mörtel und des HGZ-Mörtels

Bindemittel	Lagerung	Bewitterungsdauer [d]			
		90	180	360	720
CL 90	T-0	----	----	---	---
	T-30	----	----	---	---
	T-100	----	----	---	---
	N-0	----	----	---	---
	N-30	--	----	---	----
	N-100	---	----	--	--
N HL 2,0	T-0	+	+++	++	++++
	T-30	++	+++	++	+++
	T-100	+++	+++	++++	+++
	N-0	0	+++	+	+++
	N-30	++++	+++	++	++
	N-100	+++	+++	++++	++++
N HL 5,0	T-0	++++	+++	-	--
	T-30	0	+++	-	0
	T-100	-	+++	-	0
	N-0	++++	+++	-	0
	N-30	+++	+++	-	--
	N-100	-	+++	-	0
HGZ	T-0	+++	++++	++++	++++
	T-30	++++	++++	++++	+++
	T-100	++++	++++	++++	++++
	N-0	+	++++	++++	0
	N-30	++++	++++	++++	++++
	N-100	++++	++++	++++	++++

Legende

++++	keine Schäden	-	größere Absplitterungen
+++	Absandungen	--	grobe Abplatzungen
++	kleinere Risse	---	starker Ausbruch
+	größere Risse	----	Bruch
0	geringe Absplitterungen		

5.7 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Zur Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ -Werte) wurde, wie unter 3.1.6 beschrieben, das Trockenbereichsverfahren eingesetzt. Dieses Verfahren hat Vor- und Nachteile. Vorteile sind, daß keine Gefahr des Benetzens der Probekörper mit Salzlösung besteht und daß kein kapillarer Wassertransport die Meßwerte beeinflusst. Beim Naßbereichsverfahren herrscht unter dem Probekörper eine rel. Luftfeuchte von 95 %. Die im Baustoff vorhandenen Kapillaren sind dann z.T. mit Wasser gefüllt. Dieses Wasser kann u.U. kapillar durch den Baustoff transportiert werden und dann an der Oberfläche verdunsten. Die Folge ist ein niedrigerer μ -Wert. Aus diesem Grund sind die Werte zwischen Trocken- und Naßverfahren nicht miteinander vergleichbar. Nachteil des Trockenverfahrens ist eine längere Meßdauer gegenüber der des Naßverfahrens, da es wesentlich länger dauert, bis sich ein konstanter Wasserdampfstrom eingestellt hat. Da immer mit den selben Probekörpern gemessen worden ist, konnten die Untersuchungen aus Zeitgründen nur an drei der vier Meßtermine durchgeführt werden (90d, 180d und 360d).

G1-Mörtel: Die μ -Werte der Nullproben verhalten sich uneinheitlich (Abbildung 5.35). Die N-0-Proben liegen nach 360d deutlich über den T-0-Proben. Die regelmäßigen Wässerungen bewirken eine stärkere Hydratation und somit ein dichteres Gefüge. Je höher der μ -Wert, desto dichter ist der Probekörper. Interessant ist der zwischenzeitliche Rückgang der μ -Werte des CEM I und des CEM I HS-T-0 bei der 180d Messung. Die μ -Werte der bewitterten Proben liegen, bis auf zwei Ausnahmen, generell über den μ -Werten der Nullproben (Abbildung 5.36). Die Schadgase bewirken hier durch Neubildungen eine deutliche Abdichtung des Mörtelgefüges. Der Rückgang der μ -Werte bei der 180d Messung ist hier ausgeprägter als bei den Nullproben und bei fast jeder Probe zu beobachten. Die μ -Werte der T-Proben liegen, sowohl bei der 180d als auch bei der 360d Messung, etwas über den N-Proben. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu anderen Untersuchungen, die auf ein dichteres Gefüge bei den N-Proben schließen lassen. Dieses dichtere Gefüge sollte höhere μ -Werte bedingen.

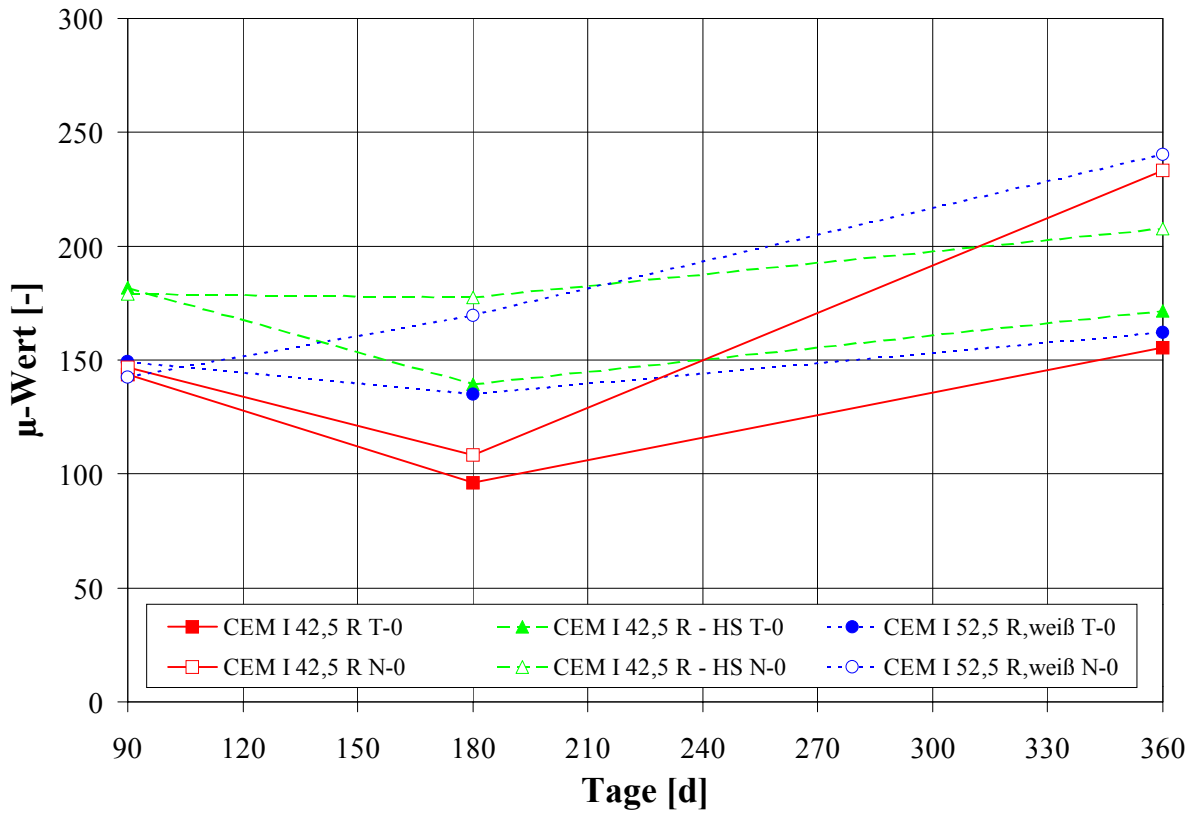


Abbildung 5.35: μ -Werte der T/N-0-Proben der G1-Mörtel

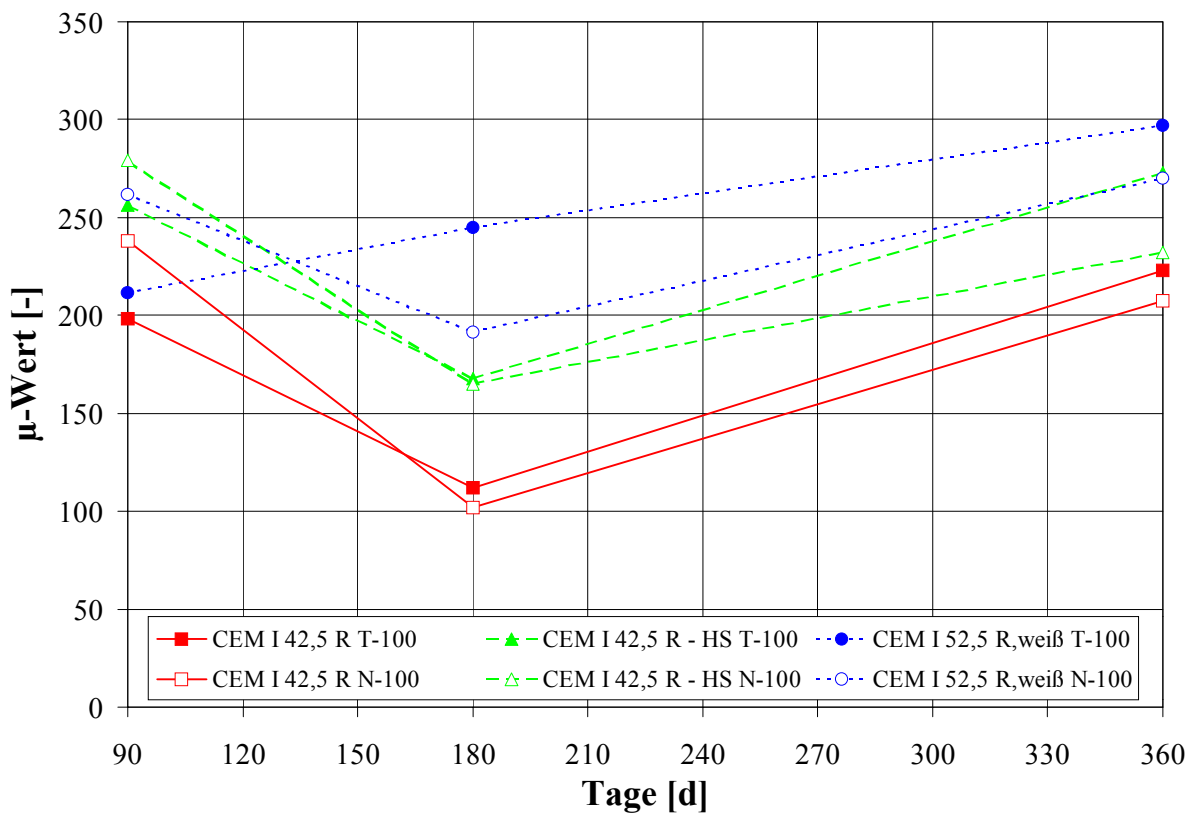


Abbildung 5.36: μ -Werte der T/N-100-Proben der G1-Mörtel

G2-Mörtel: Eine unterschiedliche Entwicklung der μ -Werte zeigen die Nullproben (Abbildung 5.37). Der HGZ weist konstante Werte über den gesamten Untersuchungszeitraum auf. Die μ -Werte der T-0-Proben des CEM II und besonders des CEM III gehen im Laufe der Zeit deutlich zurück, es findet also eine Öffnung des Gefüges statt. Die μ -Werte der N-0-Proben des CEM II und CEM III steigen dagegen an. Die regelmäßige Wässerung bewirkt hier, wie bei den G1, eine verstärkte Hydratisierung und damit eine Verdichtung des Gefüges.

Die schon bei den T-0-Proben beobachtete Gefügeöffnung ist bei den bewitterten Proben sehr deutlich zu beobachten (Abbildung 5.38). Schon nach 90d liegen die μ -Werte der CEM II und CEM III deutlich unter denen der Nullproben und bleiben dann weitgehend unverändert. Die Unterschiede zwischen T- und N-Proben sind sehr gering. Auffällig ist, daß die μ -Werte des HGZ sich gegenüber denen der Nullproben kaum verändern. Durch den mittleren HÜS-Anteil beim CEM II und CEM III wird der μ -Wert durch die Bewitterung deutlich beeinflusst. Die durch die Schadgase bewirkte Öffnung des Porengefüges wird nicht oder nur sehr unzureichend durch Neubildungen kompensiert. Aufgrund der unveränderten μ -Werte der HGZ Proben findet hier diese Kompensation in ausgewogenem Maße statt.

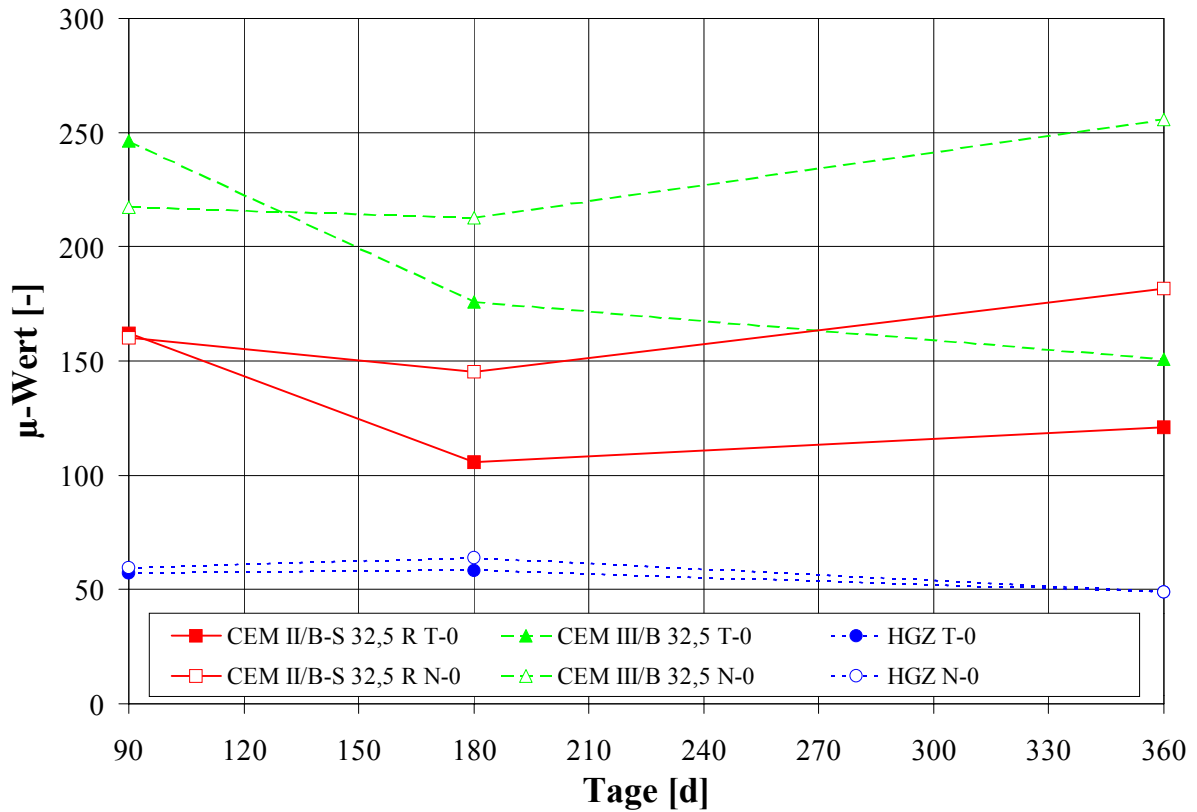


Abbildung 5.37: μ -Werte der T/N-0-Proben der G2-Mörtel

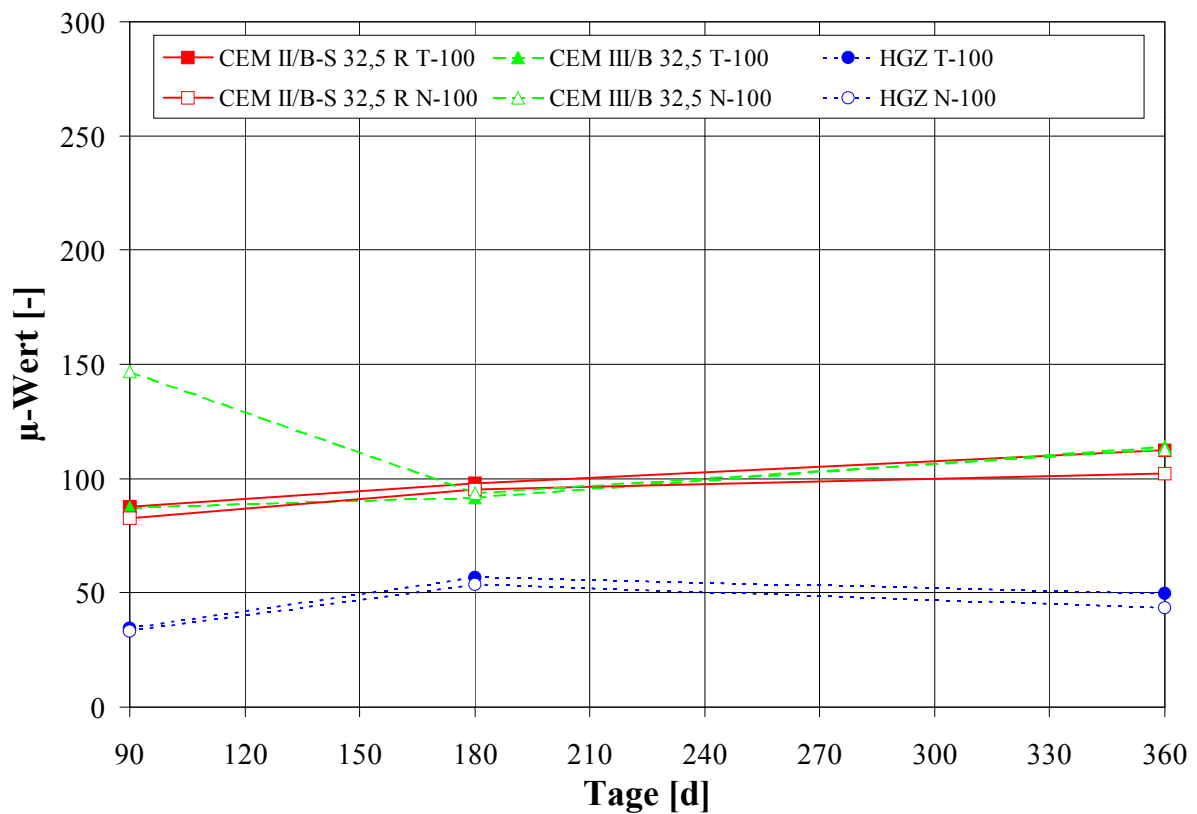


Abbildung 5.38: μ -Werte der T/N-100-Proben der G2-Mörtel

G3-Mörtel: Aufgrund der Natur dieser Mörtel liegen die μ -Werte erheblich niedriger als die der G1-bzw G2-Mörtel. Die μ -Werte der Nullproben (Abbildung 5.39) steigen zunächst an, um dann wieder auf fast den 90d Wert abzufallen. Durch die natürliche Carbonatisierung wird zunächst das Gefüge dichter, Rekristallisationsprozesse führen dann wieder zu einer Gefügevergrößerung. Beim CL 90 und N HL 2,0 liegen die μ -Werte der N-Proben klar über denen der T-Proben, beim N HL 5,0 sind diese Unterschiede sehr gering.

Die Bewitterung führt zu kaum veränderten μ -Werten (Abbildung 5.40). Lediglich bei zwei Proben zeigen sich Veränderungen. Die N-100-Proben des CL 90 zeigen einen kleineren, die T-100-Proben des N HL 2,0 einen größeren μ -Wert als die Nullproben. Dafür zeigen die T/N-100-Proben des N HL 5,0 fast identische μ -Werte gegenüber den Nullproben. Ursache für die Unempfindlichkeit des μ -Wertes der G3-Mörtel durch die Bewitterung dürfte in der Porenstruktur liegen. Die G3-Mörtel haben erheblich größere Mengen an Luftporen (s.a. 6.3) als die G1-bzw G2-Mörtel. Neubildungen, die durch die Schadgase verursacht werden, können in diesen Luftporen kristallisieren. Der Luftporengehalt beeinflusst den μ -Wert kaum, der Kapillarporengehalt jedoch stark. Bei den übrigen Mörteln kristallisieren die Neubildungen verstärkt in den Kapillarporen und beeinflussen somit den μ -Wert.

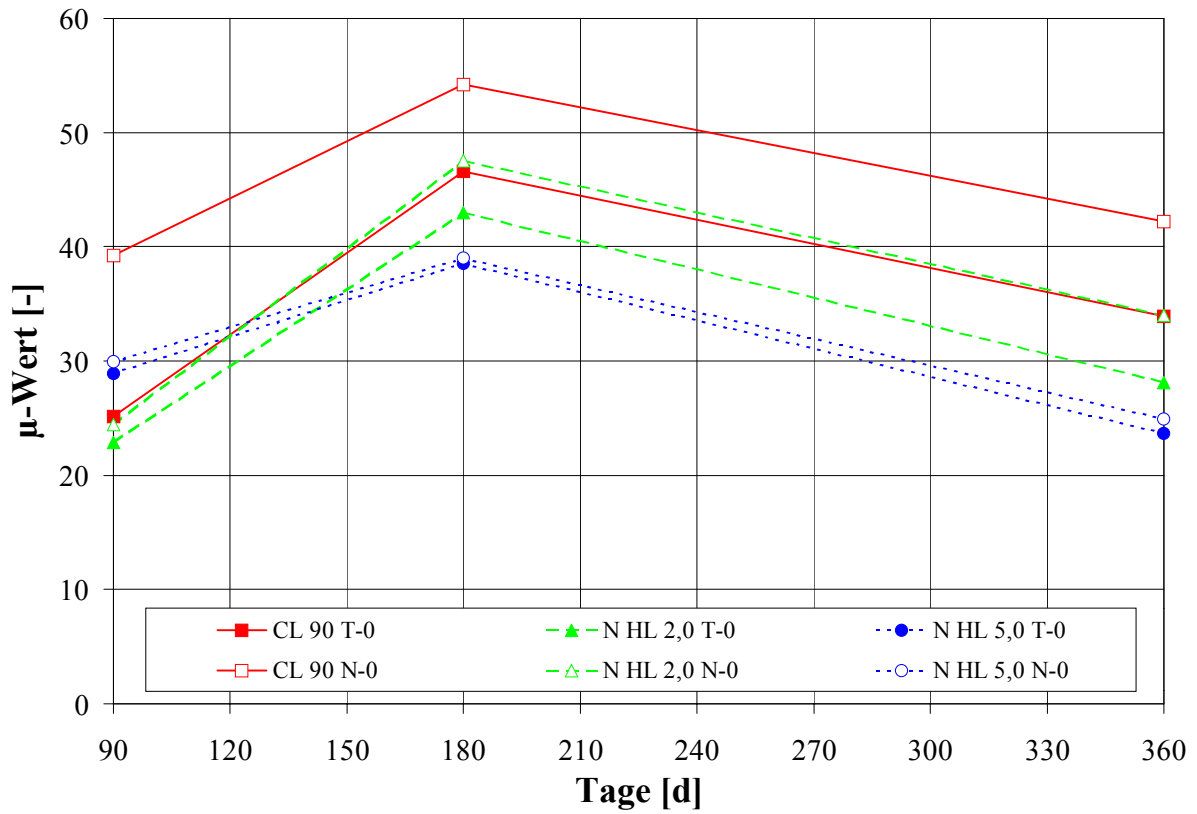


Abbildung 5.39: μ -Werte der T/N-0-Proben der G3-Mörtel

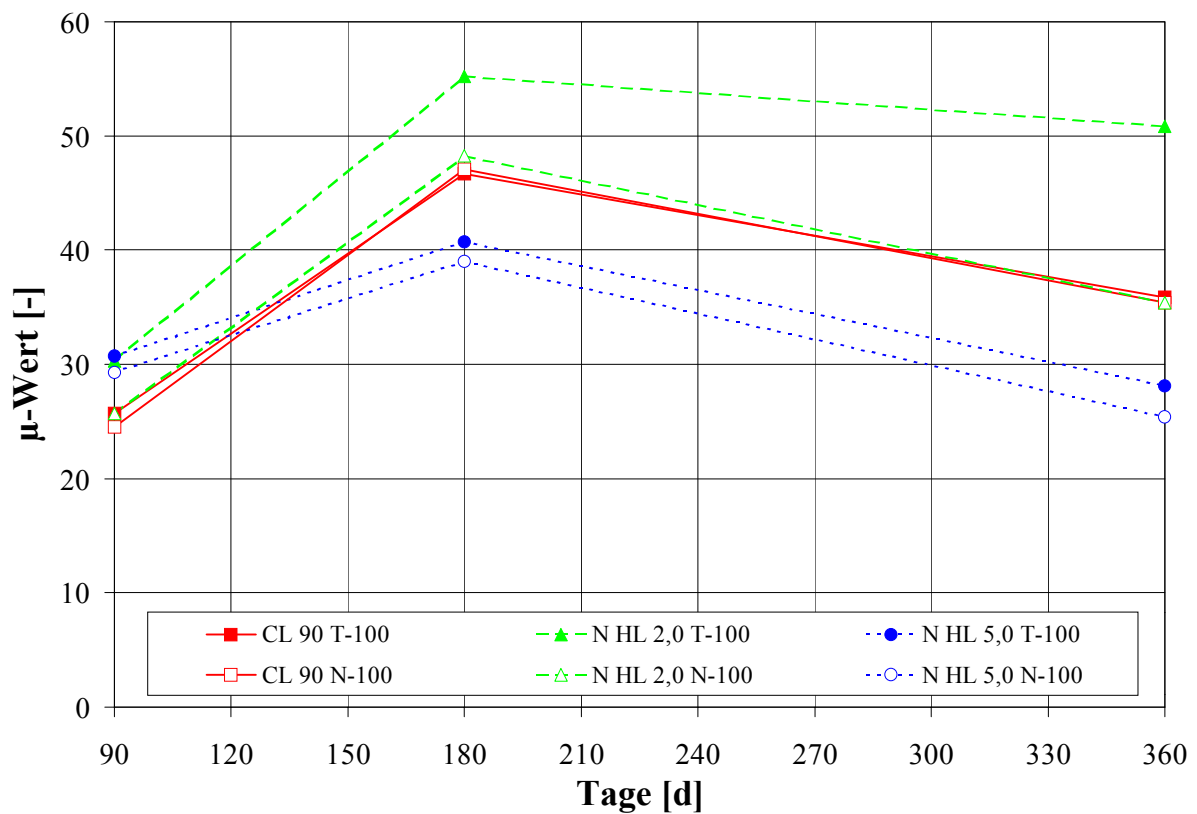


Abbildung 5.40: μ -Werte der T/N-100-Proben der G3-Mörtel

5.8 Schwinden

Die Untersuchung des Schwindverhaltens erfolgt nur an den 180d Proben. Um ausschließlich den Einfluß der Bewitterung zu erfassen, wurden die Meßzapfen (Edelstahlmeßzapfen, um Korrosion zu vermeiden) nach der 28d Vorlagerung auf beiden zu bewitternden Seiten aufgeklebt. Zu diesem Zeitpunkt ist z.B. das starke anfängliche Schwinden (Schrumpfen, „Schwinden in der Form“) der G3-Mörtel abgeschlossen.

Die Messungen erfolgten immer unmittelbar vor den Wässerungen der N-Proben, so daß von gleichen Probefeuchtigkeiten ausgegangen werden konnte. Hier angegeben ist jeweils die gesamte Längenänderung zwischen dem 28. und 180. Tag nach Probenherstellung.

G1-Mörtel: Die Bewitterung wirkt sich nur sehr gering auf das Schwinden aus (Abbildung 5.41). Die T-30- bzw. T-100-Proben zeigen einen sehr leichten Rückgang der Schwindwerte gegenüber den T-0-Proben. Bei den bewitterten N-Proben sind diese Werte gegenüber den N-0-Proben i.d.R. leicht erhöht. Die Unterschiede zwischen T- und N-Proben sind gering.

Auch hier bestätigt sich wieder, daß die Schadgase nicht auf den gesamten Probekörper Einfluß nehmen und außer dem CO₂ nicht tief in die Probekörper eindringen, da die Bewitterung sich kaum auf die Längenänderung auswirkt.

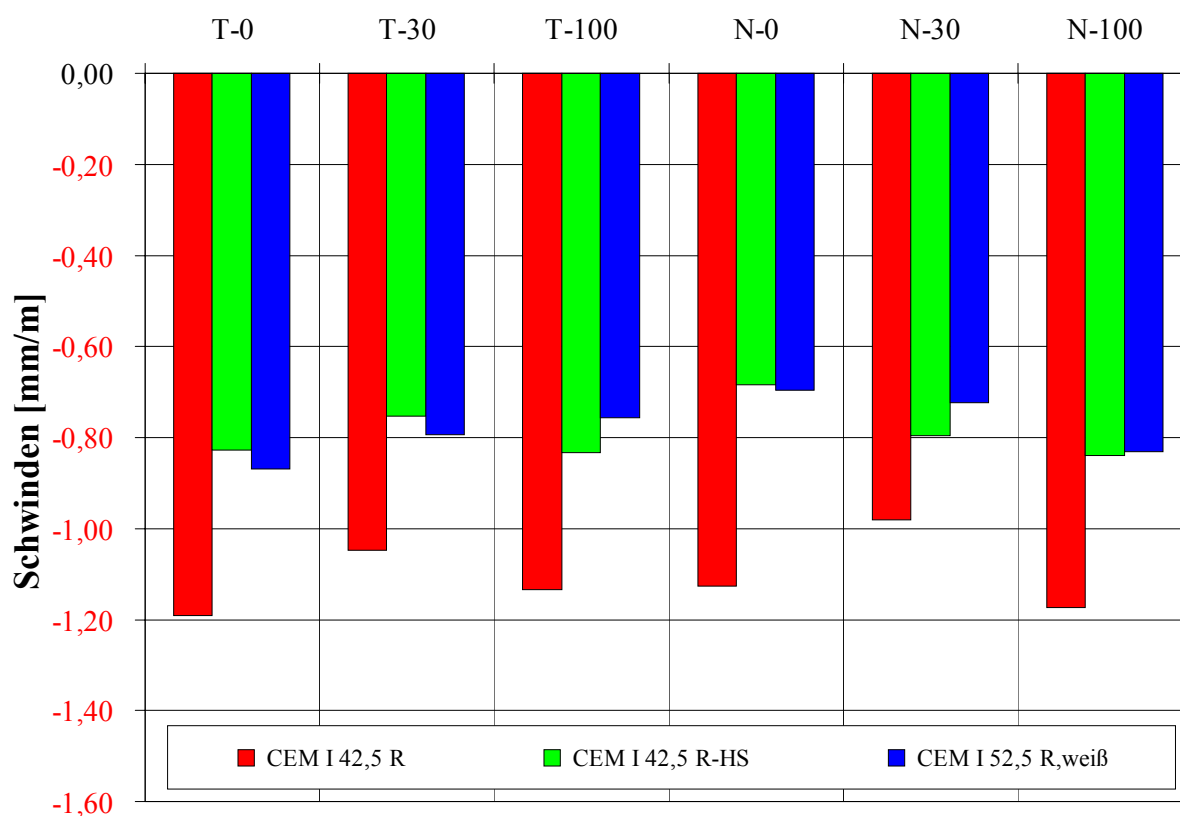


Abbildung 5.41: Schwinden der G1-Mörtel

G2-Mörtel: Die Schadgase wirken sich hier unterschiedlich aus (Abbildung 5.42). Der CEM II und der CEM III zeigt wieder seine Verwandtschaft zu den G1-Mörteln. Das Schwinden wird, im Vergleich zu den Nullproben, kaum beeinflusst, lediglich die T-100-Proben des CEM II schwinden etwas stärker. Beim HGZ wird das Schwinden der T-30-Proben gegenüber den Nullproben stark reduziert, bei den T-100-Proben leicht erhöht. Bei den N-Proben ist nur der Schwindwert der N-100-Lagerung deutlich erhöht. Die Unterschiede zwischen T- und N-Proben sind bei den CEM II und CEM III nur gering. Beim HGZ führt die Wässerung zu geringeren Schwindwerten (Ausnahme N-100) als bei den T-Proben. Bei der N-100-Probe des HGZ überlagern sich zwei Effekte. Zum einen wird das Schwinden durch die regelmäßige Wässerung reduziert, zum anderen durch die Schadgase erhöht.

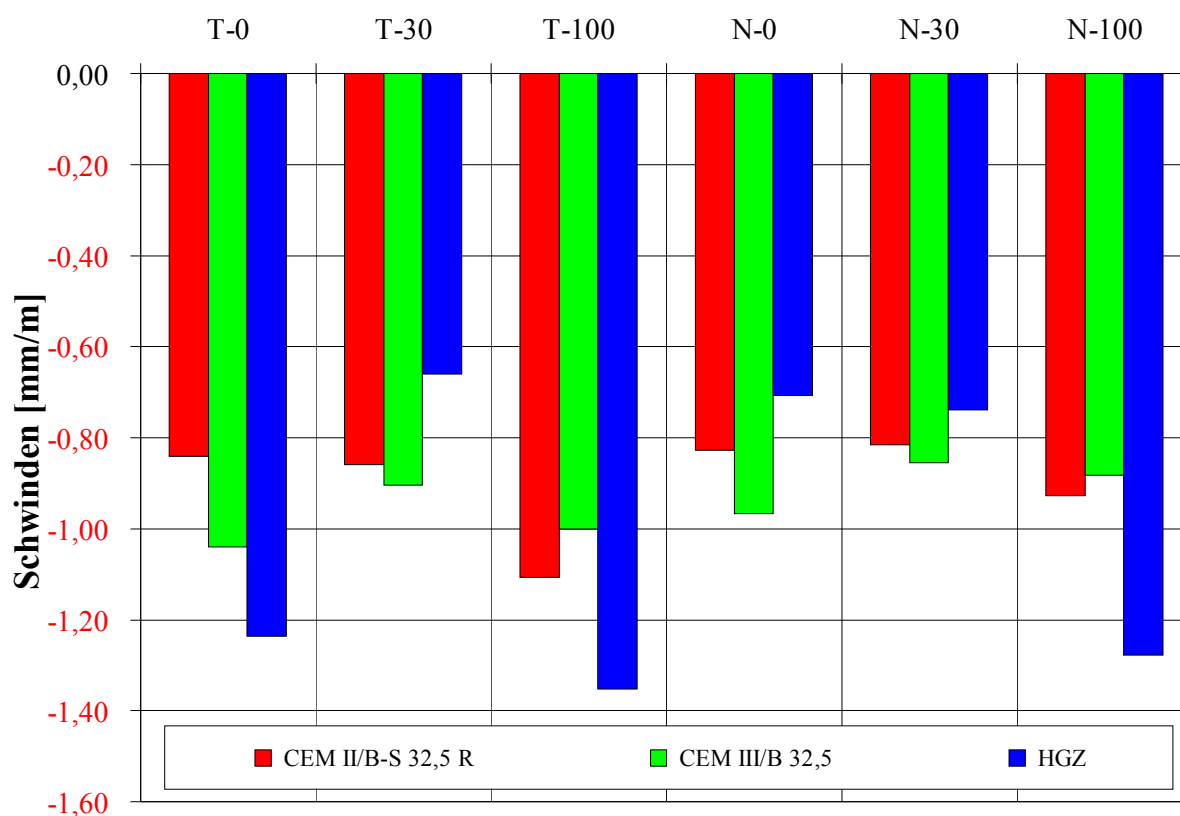


Abbildung 5.42: Schwinden der G2-Mörtel

G3-Mörtel: Auch hier wirkt sich die Bewitterung unterschiedlich aus (Abbildung 5.43). Nach der 28d Vorlagerung ist das Schwinden des CL 90 weitestgehend abgeschlossen. Die Bewitterung bewirkt lediglich ein geringfügig stärkeres Schwinden. Ganz ähnlich verhält sich der NHL 2,0. Mit Ausnahme der T-0-Proben unterscheiden sich die Schwindwerte nicht, liegen aber deutlich höher als die des CL 90. Beim NHL 5,0 ist durch die Bewitterung eine eindeutige Zunahme des Schwindens zu beobachten. Die Schwindwerte der N-Proben liegen dabei etwas niedriger als die der T-Proben.

Offensichtlich sind hydraulische Bestandteile bzw. CSH/CAH-Phasen für die veränderten Schwindprozesse durch die Bewitterung verantwortlich. Der CL 90 ist das einzige CSH/CAH-Phasen freie untersuchte Bindemittel und zeigt die geringsten Änderungen der Schwindwerte durch die Bewitterung. Mit steigendem CSH/CAH-Phasen-Anteil wird die Beeinflussung stärker.

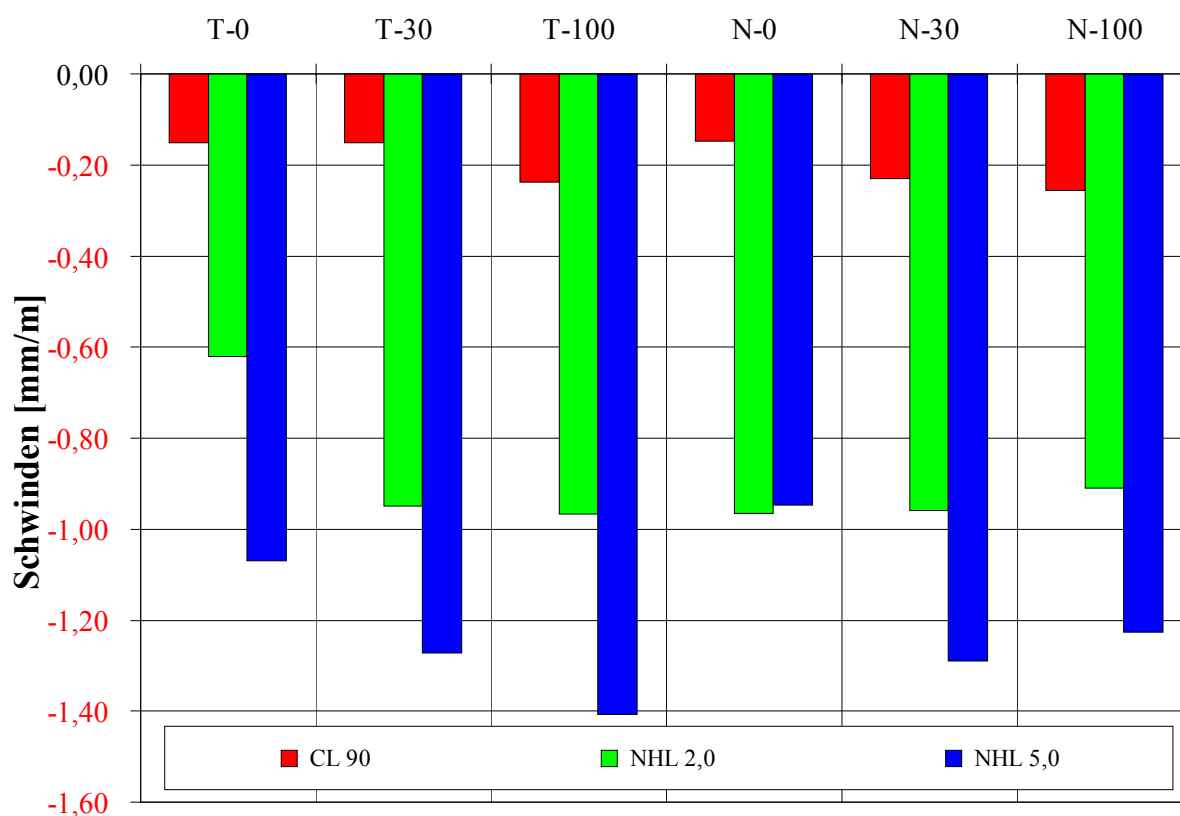


Abbildung 5.43: Schwinden der G3-Mörtel

5.9 Neutralisierungstiefe

Das in allen untersuchten Bindemitteln vorhandene bzw. durch Hydratation entstandene $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (pH ca. 12,5) wird durch CO_2 , SO_2 und NO_x in Produkte umgewandelt (s.a. 2.2), deren pH-Wert unter 9 liegt. Der Indikator Phenolphthalein besitzt einen Umschlagbereich von ca. pH 9 und zeigt eine solche Neutralisierung gut an.

In der Literatur [z.B. HAMADA 1968] wird häufig berichtet, daß die Tiefe der Carbonatisierung (Neutralisierung nur mit CO_2) proportional zur Wurzel der Zeit ist. Andere Autoren [SCHIEBL 1975 oder BRIEGER 1986] stellen jedoch fest, daß diese Abhängigkeit nur grob gegeben ist und erweiterten die vorhandenen Beziehungen um weitere Faktoren. Allen gemein ist hingegen, daß die Abhängigkeit der Neutralisierungstiefe nicht spezifisch nur für das CO_2 gilt. Unter Berücksichtigung von z.B. anderen Diffusionskonstanten können die Beziehungen auch auf z.B. SO_2 und NO_x übertragen werden. Auch hier gilt die nur grobe Abhängigkeit der Neutralisierungstiefe von der Wurzel der Zeit. Die im Rahmen dieser Arbeit bestimmten Neutralisierungstiefen wurden daher gegen die Wurzel der Zeit aufgetragen und diskutiert.

G1-Mörtel: Die Nullproben zeigen, aufgrund der nur geringen CO_2 -Konzentration in der normalen Atmosphäre, eine nur geringe Neutralisierungstiefe (NT) (Abbildung 5.44). Nach 720d sind alle G1-Mörtel ca. 4 mm tief neutralisiert. Die Unterschiede zwischen T und N sind gering. Bis auf den CEM I, weiß folgen die Nullproben gut dem Wurzel-Zeit-Gesetz. Die Bewitterung bewirkt bezüglich der Nullproben eine wesentlich größere NT. Der CEM I wird dabei am tiefsten und am schnellsten neutralisiert.

Die bewitterten Proben zeigen keine gute Übereinstimmung mit dem Wurzel-Zeit-Gesetz. Das gilt sowohl für die 30- als auch 100-fach belasteten Proben. Ursache hierfür ist vor allem die Überlagerung von verschiedenen Prozessen. Wie sich im Kapitel 6 zeigen wird, dringt SO_2 nicht sehr tief in die Mörtel ein. In Tiefen von ca. 5 mm wird die Neutralisierung praktisch nur noch vom CO_2 hervorgerufen. Das SO_2 hat hingegen eine oberflächenabdichtende Wirkung und beeinflusst daher das Eindringen von CO_2 . Die Abbildung 5.45 zeigt vor allem viel größere NT gegenüber den Nullproben. Außerdem zeigen sich, im Gegensatz zu den Nullproben, deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Bindemitteln und T- bzw. N-Lagerungen. Alle T-Lagerungen sind nach 720d deutlich tiefer neutralisiert als die N-Proben. Durch die regelmäßigen Wässerungen werden zwar z.T.

lösliche Salze ausgewaschen, der verbleibende Rest kann jedoch in dem oberflächennahen Porensystem rekristallisieren. Dies führt vermutlich zu einer stärkeren Abdichtung und damit zu einem erschwerten Angriff von CO_2 . Daneben verbleibt nach einer Wässerung für eine gewisse Zeit Wasser im Porensystem, welches das Eindiffundieren von CO_2 behindert und ebenfalls die Neutralisierungsgeschwindigkeit verringert sowie die Hydratation verbessert. Erwartungsgemäß zeigt der CEM I die größte NT, dicht gefolgt vom CEM I HS und, in deutlichem Abstand, vom CEM I, weiß.

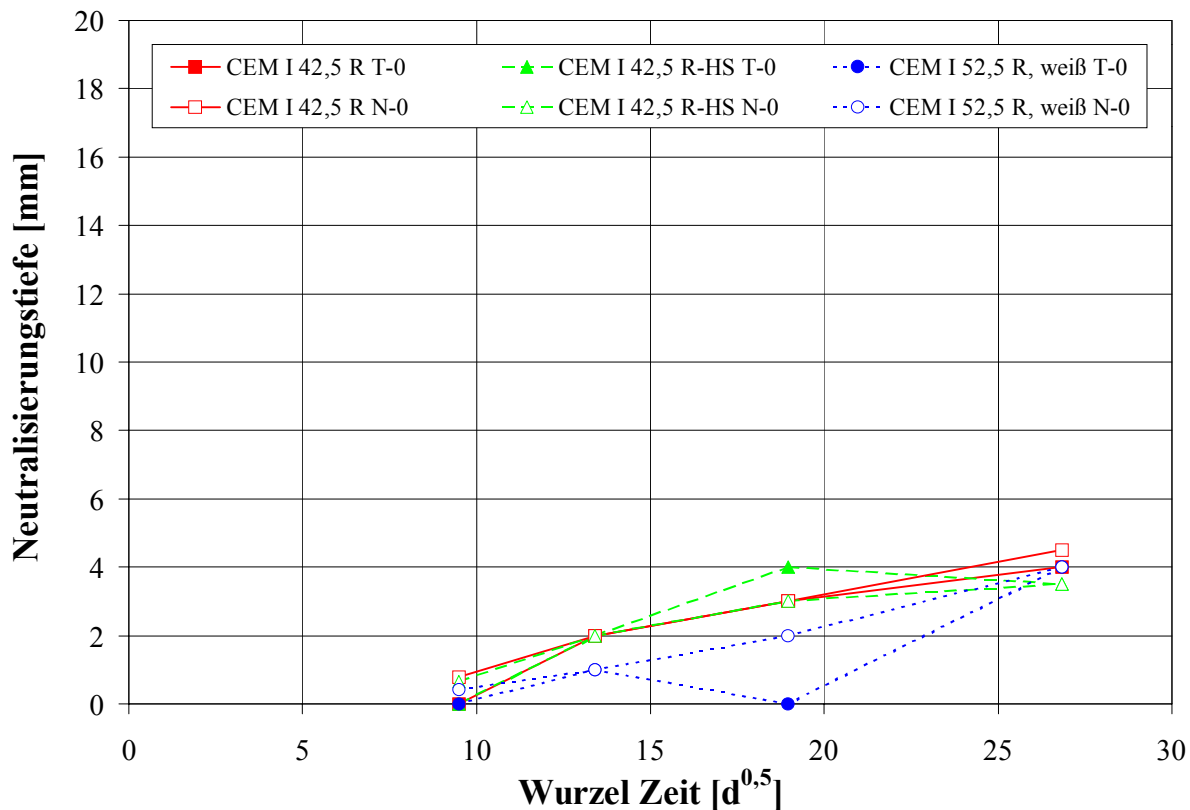


Abbildung 5.44: Neutralisierungstiefen der T/N-0-Proben der G1-Mörtel

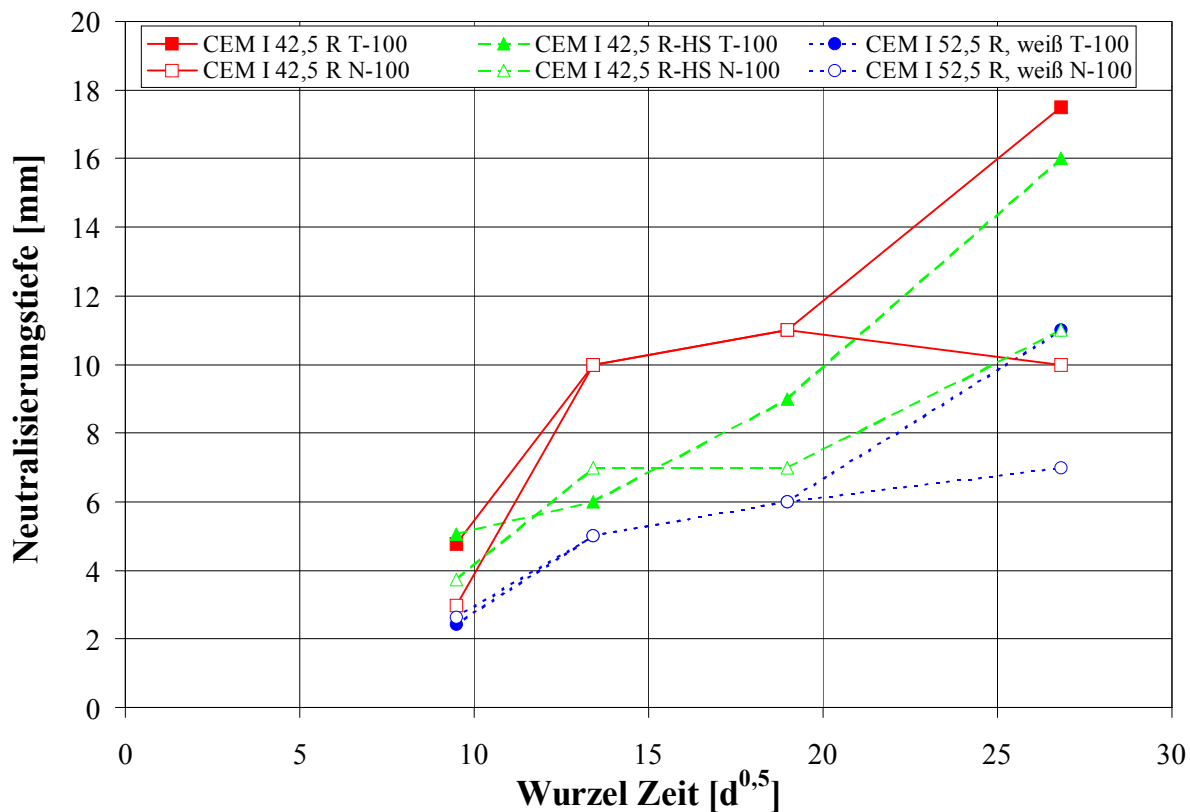


Abbildung 5.45: Neutralisierungstiefen der T/N-100-Proben der G1-Mörtel

G2-Mörtel: Auch hier folgen die Nullproben gut dem Wurzel-Zeit-Gesetz (Abbildung 5.46). Aufgrund des HÜS-Anteils besitzen die G2-Mörtel jedoch weniger Ca(OH)_2 und werden im gleichen Zeitraum tiefer neutralisiert als die G1-Mörtel. Außerdem bewirkt die höhere Porosität eine schnellere Neutralisierung. Der HGZ ist nach 360d bereits vollständig neutralisiert. Dieses Bindemittel besitzt den geringsten Ca(OH)_2 -Gehalt und in dieser Bindemittelgruppe den höchsten Porengehalt. Der CEM II und der CEM III wird erheblich langsamer als der HGZ neutralisiert, aber deutlich schneller als die Nullproben der G1-Mörtel. Die NT des CEM III liegt geringfügig über der des CEM II. Die Unterschiede zwischen T- und N-Proben sind bei allen Nullproben gering.

Durch die Bewitterung wird eine erhebliche Beschleunigung der Neutralisierung erreicht. Alle T/N-100-Proben sind schon nach 360d vollständig neutralisiert (Abbildung 5.48). Der CEM II wird dabei am langsamsten neutralisiert. Bei den T/N-30-Proben (Abbildung 5.47) ist der HGZ schon nach 90d vollständig neutralisiert. Die übrigen Bindemittel zeigen eine gewisse Wurzel-Zeit-Abhängigkeit. Der CEM III wird etwas schneller neutralisiert als der CEM II, da der CEM III weniger Ca(OH)_2 bildet als CEM II. Die NT der T-Proben liegt wieder über der der N-Proben.

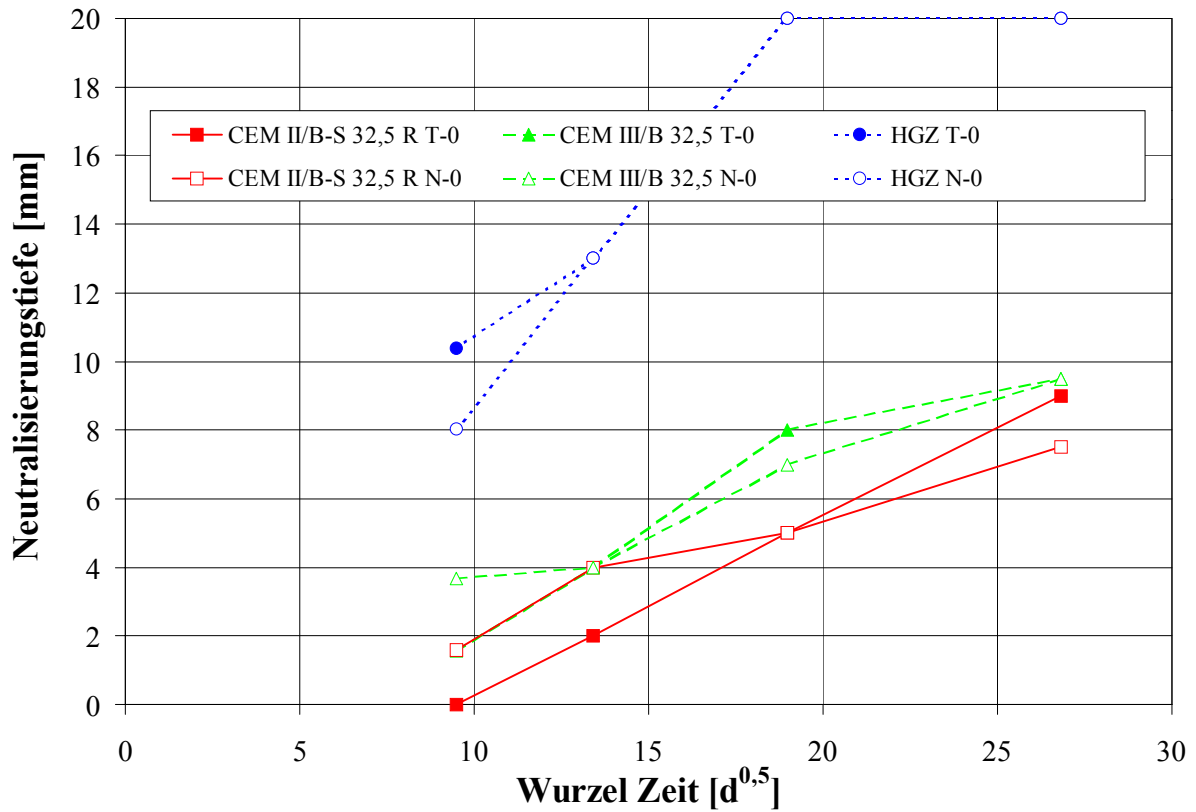


Abbildung 5.46: Neutralisierungstiefen der T/N-0-Proben der G2-Mörtel

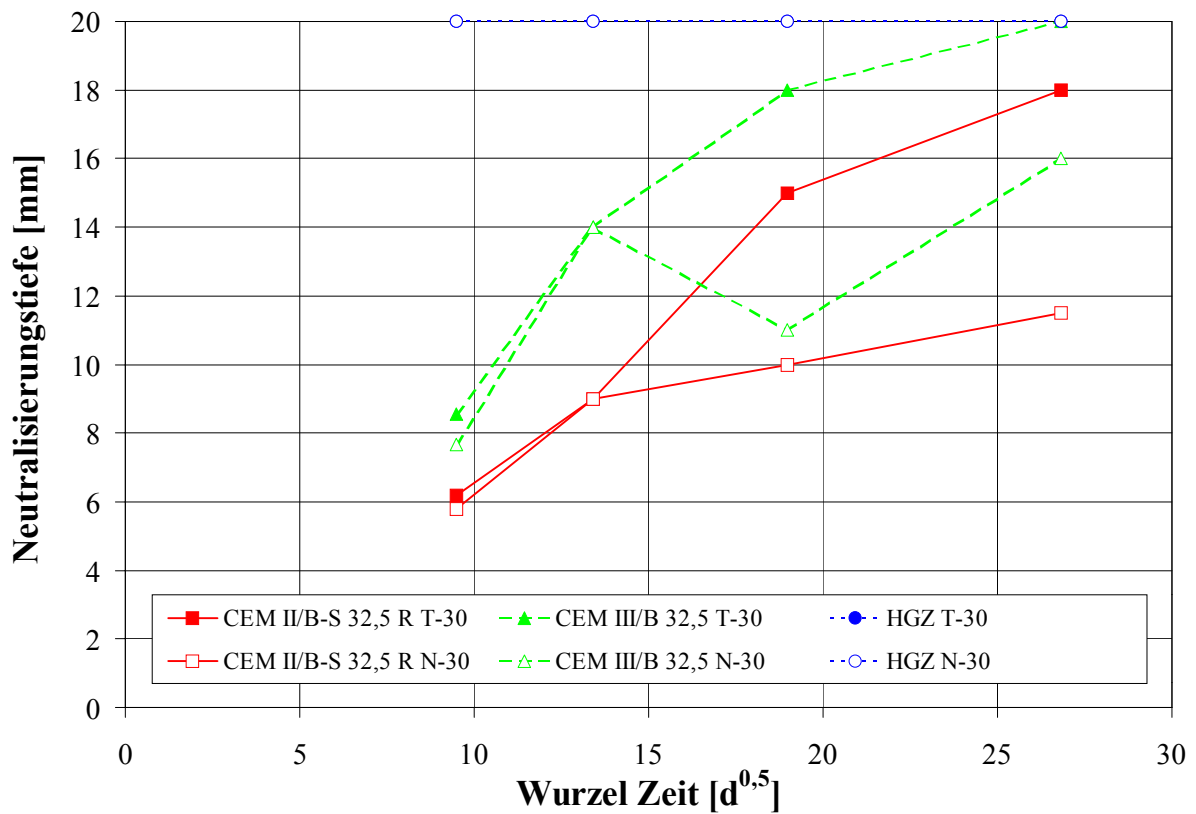


Abbildung 5.47: Neutralisierungstiefen der T/N-30-Proben der G2-Mörtel

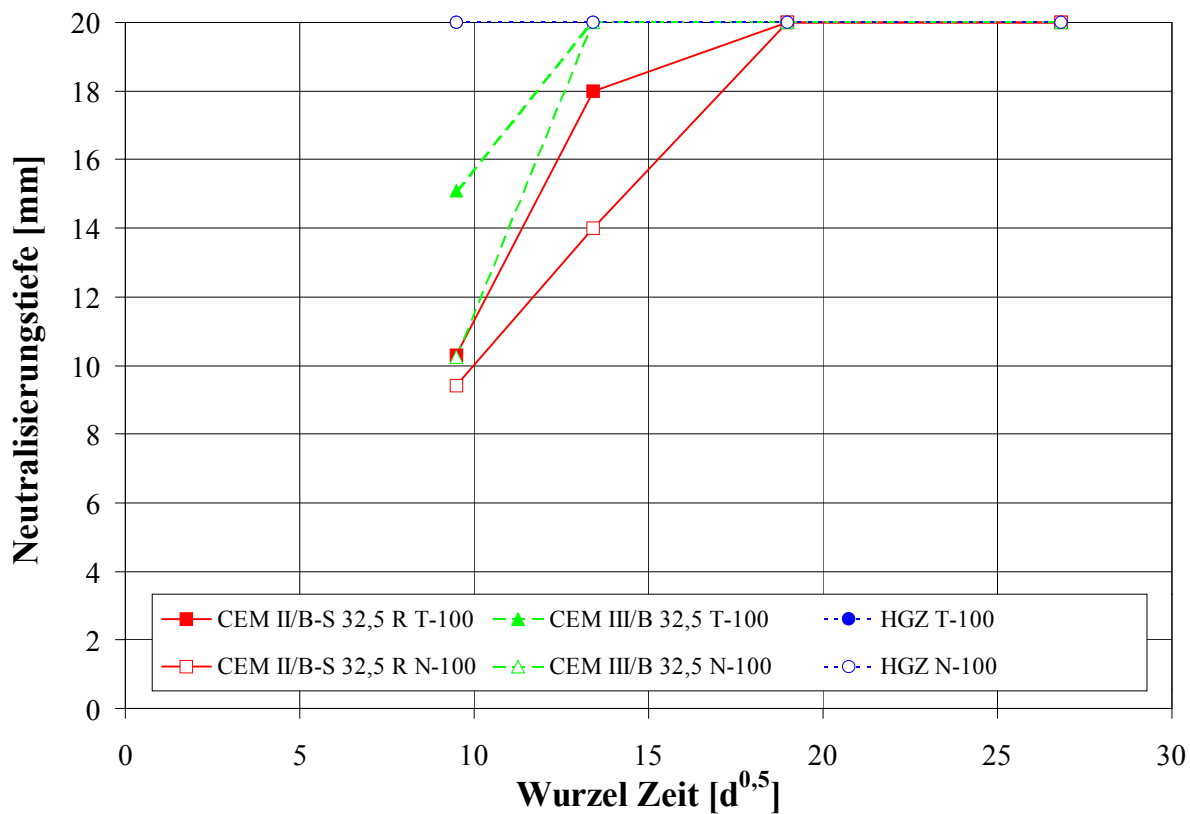


Abbildung 5.48: Neutralisierungstiefen der T/N-100-Proben der G2-Mörtel

G3-Mörtel: Die NT zeigen hier eine Reihe von Besonderheiten auf. Zwei der Nullproben, der CL 90-N-0 und der N HL 2,0-N-0, folgen dem Wurzel-Zeit-Gesetz sehr gut (Abbildung 5.49). Die Nullproben des N HL 5,0 zeigen jedoch, bis auf die 90d Probe der N-Lagerung, eine vollständige Neutralisierung. Dieses Bindemittel besitzt, ähnlich dem HGZ, nur rel. wenig $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und der daraus hergestellte Mörtel eine hohe Porosität. Infolge dessen zeigen auch die bewitterten Proben (T und N) des N HL 5,0 zu jedem Prüftermin eine vollständige Neutralisierung. Ebenfalls eine vollständige Neutralisierung zeigen die bewitterten N-Proben des CL 90 und des N HL 2,0.

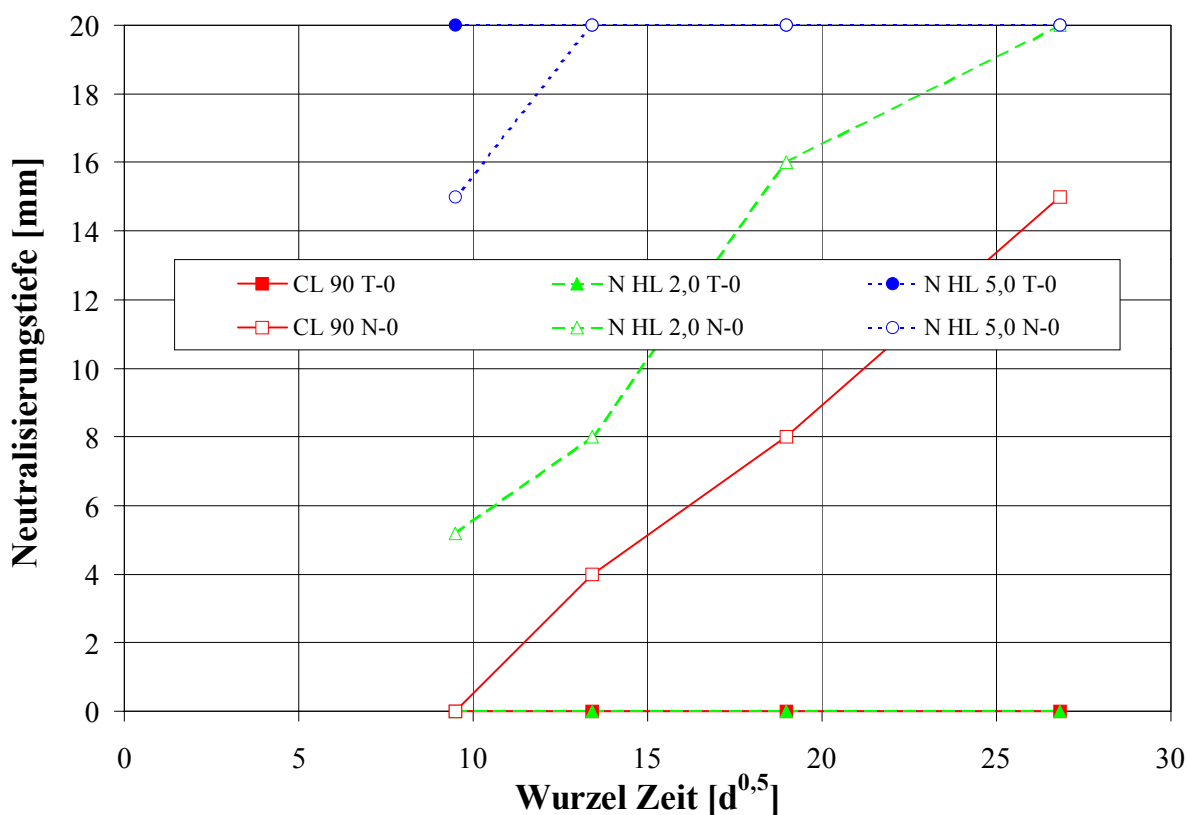


Abbildung 5.49: Neutralisierungstiefen der T/N-0-Proben der G3-Mörtel

Überraschenderweise zeigen die T-Proben des CL 90 und des NHL 2,0 eine vollkommen andere Entwicklung. Die bewitterten T-Proben zeigen bei allen Prüfterminen eine „inverse“ Neutralisierung, d.h. die Bruchflächen der Mörtel zeigen äußere Randzonen, die der Indikator violett einfärbt. Dieses Phänomen ist am Beispiel des CL 90 in Abbildung 5.50 dargestellt. Anzumerken ist, daß nach dem Aufsprühen der Indikatorlösung erst allmählich eine Violett färbung in den Randzonen eintrat. Dieses Erscheinungsbild legt die Vermutung nahe, daß andere, alkalische Bestandteile im Mörtel in den Randzonen angereichert wurden. Aufgrund der Inhaltsstoffe der Mörtel können diese Bestandteile nur Alkalien sein. Es wurden daher, exemplarisch am NHL 2,0 nach 720d, in verschiedenen Schichttiefen die Alkaligehalte mit Hilfe der Ionenchromatographie bestimmt. Die Vermutung wurde bestätigt. Die T-Proben zeigen in den äußeren Schichten einen höheren Alkaligehalt (Abbildung 5.51) als in tieferen Schichten.

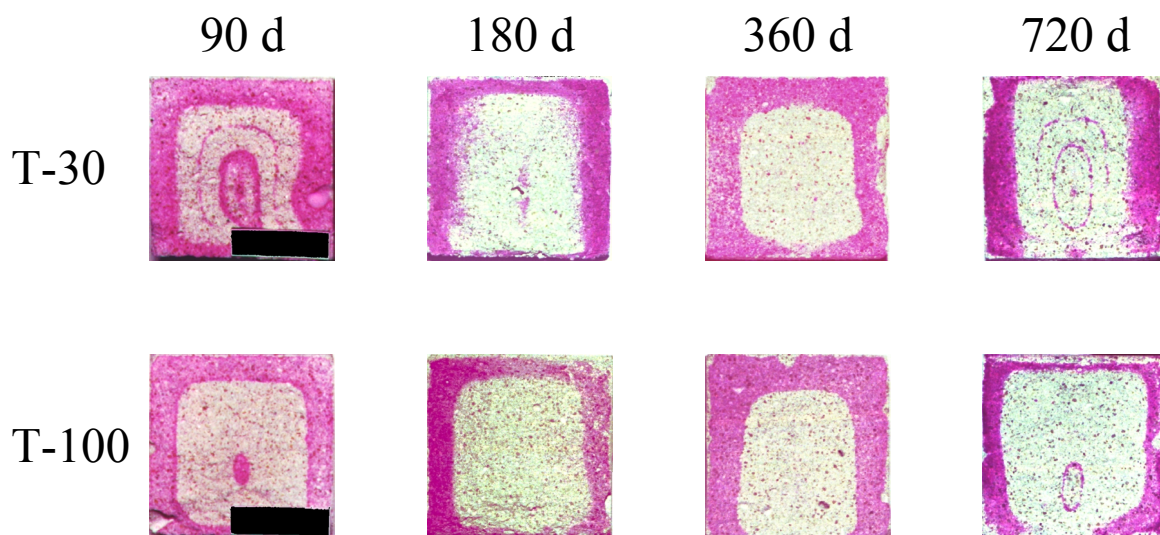


Abbildung 5.50: Prismenquerschnitte der CL 90-Mörtel

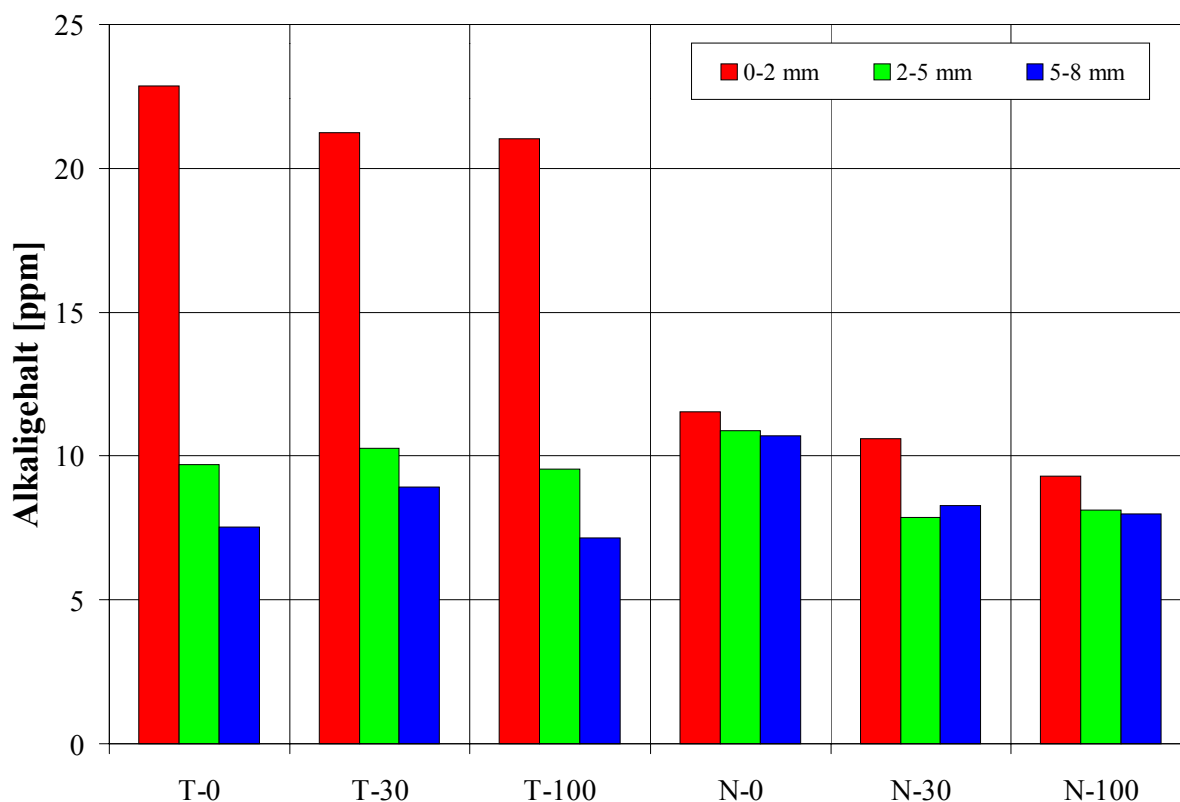


Abbildung 5.51: Alkaligehalte (Σ Na und K) der N HL 2,0-Mörtel nach 720d

Allerdings zeigen auch die T-0-Proben des N HL 2,0 in den äußeren Schichten einen erhöhten Alkaligehalt. Nach erstem Augenschein weisen jedoch die Nullproben des CL 90 und des N HL 2,0 selbst nach 720d keine Neutralisierung auf. Dies steht aber im Widerspruch zu den im zeitlichen Verlauf ansteigenden β_D (s.a. 5.3) oder den Carbonatgehalten (s.a. 6.2). Eine genauere Untersuchung der fotografierten Bruchflächen wies auf eine optische Täuschung hin. Nach dem Besprühen mit Indikatorlösung zeigte sich bei Tageslicht eine gleichmäßige Violettäufärbung der Bruchfläche. Die Fotografie erfolgte aber mit einem Blitzgerät. Beim Anfertigen der Bilder werden die entwickelten Negative standardmäßig so gefiltert, daß die Abzüge ein Tageslichtverhalten wiedergeben. Im Rahmen der Arbeit wurden die Negative jedoch auch mit einem speziellen Negativ-Filmscanner, Typ Jescan JS 21 (Hersteller: Jenoptik), digital eingescannt. Dabei erfolgte zunächst keine Filterung. Auffällig waren dabei die deutlich helleren Randzonen gegenüber der dunkleren Mitte. Die Abbildung 5.52 versucht dies am Beispiel von CL 90-Bruchflächen darzustellen. Der beobachtete Effekt wird als Metamerie bezeichnet. Ein Objekt zeigt dabei unter verschiedenen Lichtquellen verschiedene Farben (s.a. DIN 5033). Dem Auge erscheint hier bei Tageslicht die Bruchfläche des Mörtelprismas farbeinheitlich (Abbildung 5.52 rechts), während durch die Blitzlichtbeleuchtung die Farbunterschiede sichtbar werden (Abbildung 5.52 links).

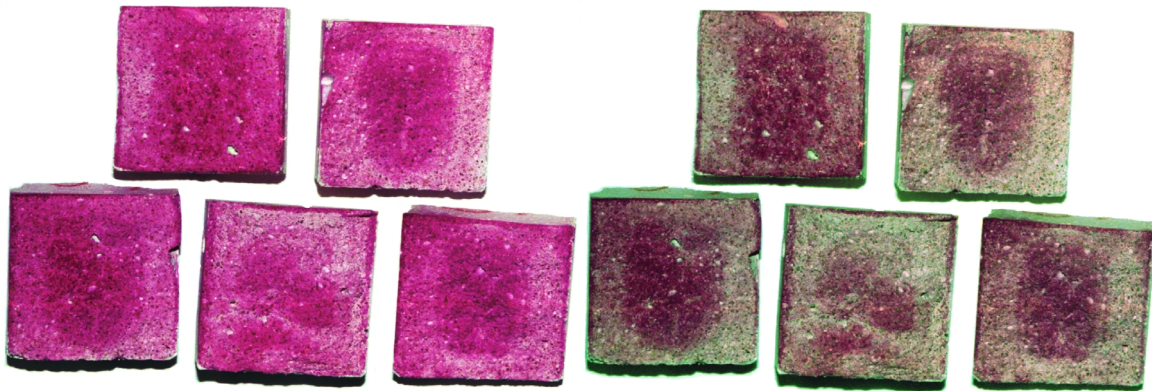


Abbildung 5.52: Frische Bruchflächen von T-0-Proben der CL 90-Mörtel, links die „normale“ Darstellung wie auf einem Papierfotoabzug, rechts die vom Negativ eingescannte „spezial“ Darstellung (ungefiltert).

Der Vorgang der „inversen“ Neutralisierung bei den T-Proben des CL 90 und des N HL 2,0 läßt sich nun so beschreiben: Durch die Carbonatisierung des im Mörtel vorliegenden $\text{Ca}(\text{OH})_2$ wird Wasser frei. Dieses wandert an die Oberfläche, um dort zu verdunsten. Dabei transportiert es im Mörtel enthaltene Alkalien (aus dem Bindemittel und/oder Zuschlag) in die äußeren Randzonen. Dort kommt es zu einer Anreicherung dieser Alkalien, die eine Violett-färbung durch den Indikator verursacht. Somit ist auch der Widerspruch bei den T-0-Proben gelöst. Der Anstieg der β_D und der Carbonatgehalte wird durch die Carbonatisierung verursacht. Der Indikator reagiert dabei in den Randzonen auf die Alkalien (heller) und in der Mitte auf unverbrauchtes $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Die N-Proben zeigen dieses Phänomen nicht, da durch die regelmäßige Wässerung die Alkalien ausgewaschen und/oder gleichmäßig im Mörtel verteilt werden.

6 ERGEBNISSE II – TIEFENPROFILE

Die hier vorgestellten Ergebnisse beziehen sich nicht mehr auf den gesamten Probekörper, sondern auf dünne Schichten, die von der bewitterten Oberfläche der Mörtel abgetragen wurden. Die Tabelle 6.1 zeigt eine Übersicht über die untersuchten Schichttiefen (ST).

Tabelle 6.1: Schichttiefen und Prüftermine

Prüftermin [d]	Schichttiefe [mm]		
	0 - 2	2 - 5	5 – 8
90	X	X	-
180	X	X	-
360	X	X	X
720	X	X	X

Die in Kapitel 5 diskutierten Ergebnisabbildungen zeigen immer die T- und N-Proben vergleichend zusammen in einem Diagramm. Durch die ST-Bestimmungen ist die darzustellende Datenmenge jedoch zu groß, um weiterhin T- und N-Proben in einem Diagramm abbilden zu können. Daher werden die T- und N-Proben in getrennten Diagrammen (exemplarisch) dargestellt.

Wie schon in Kapitel 5 erwähnt, zeigen auch hier wieder die 30-fach belasteten Proben Tendenzen auf, die durch die 100-fache Schadgasbelastung verstärkt werden. Zumeist sind die Untersuchungsergebnisse der äußeren, 0-2 mm Schicht betragsmäßig höher. Daher werden auch hier lediglich die Ergebnisse der un- und der 100-fach belasteten Proben dargestellt.

6.1 Ionenchromatographie

Da für die ionenchromatographischen Bestimmungen immer genau 1 g Probenmaterial eingesetzt wurde, entsprechen 100 ppm in den Datentabellen im Anhang immer 1 M.-%.

6.1.1 Sulfat-Bestimmungen

G1-Mörtel: Dem Zement wird zur Steuerung des Erstarrungsverhaltens Sulfatträger (Gips und/oder Anhydrit) zugemahlen. Daher besitzen die Nullproben schon von Hause aus einen gewissen Sulfatanteil (Abbildung 6.1). Die T-0-Proben zeigen in allen ST tendenziell einen leichten Rückgang der Sulfatgehalte. Dies ist jedoch nur ein scheinbarer Rückgang. Durch die Carbonatisierung der Nullproben wird Ca(OH)_2 in CaCO_3 umgewandelt. Dies hat eine geringe Dichtezunahme zur Folge. Aufgrund dessen geht die Massenkonzentration an Sulfat zurück, es wird aber kein Sulfat aus dem Mörtel heraustransportiert. Die 2-5 mm und 5-8 mm Schicht der N-0-Proben zeigen ebenfalls diesen leichten Rückgang der Sulfatgehalte (Abbildung 6.2). Die äußere 0-2 mm Schicht verliert durch die regelmäßige Wässerung Sulfat. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Bindemitteln sind sehr gering.

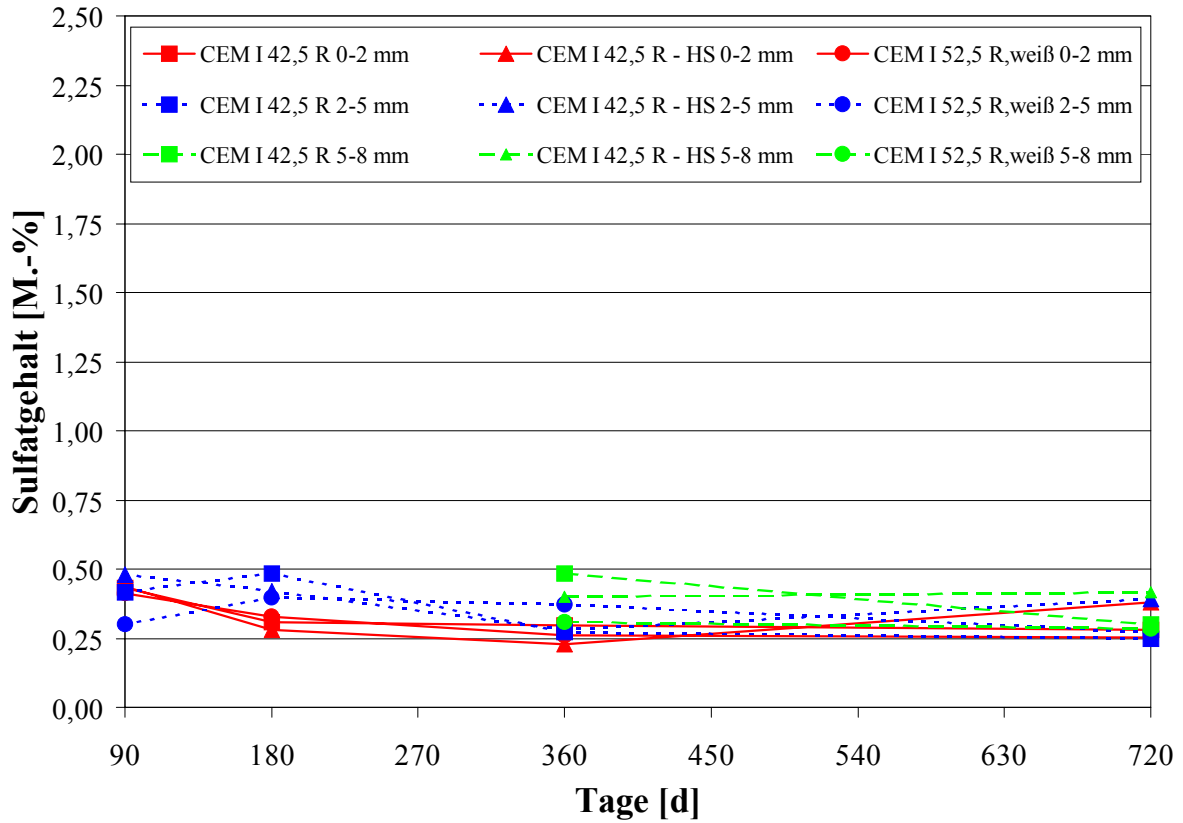


Abbildung 6.1: Sulfatgehalte der T-0-Proben der G1-Mörtel

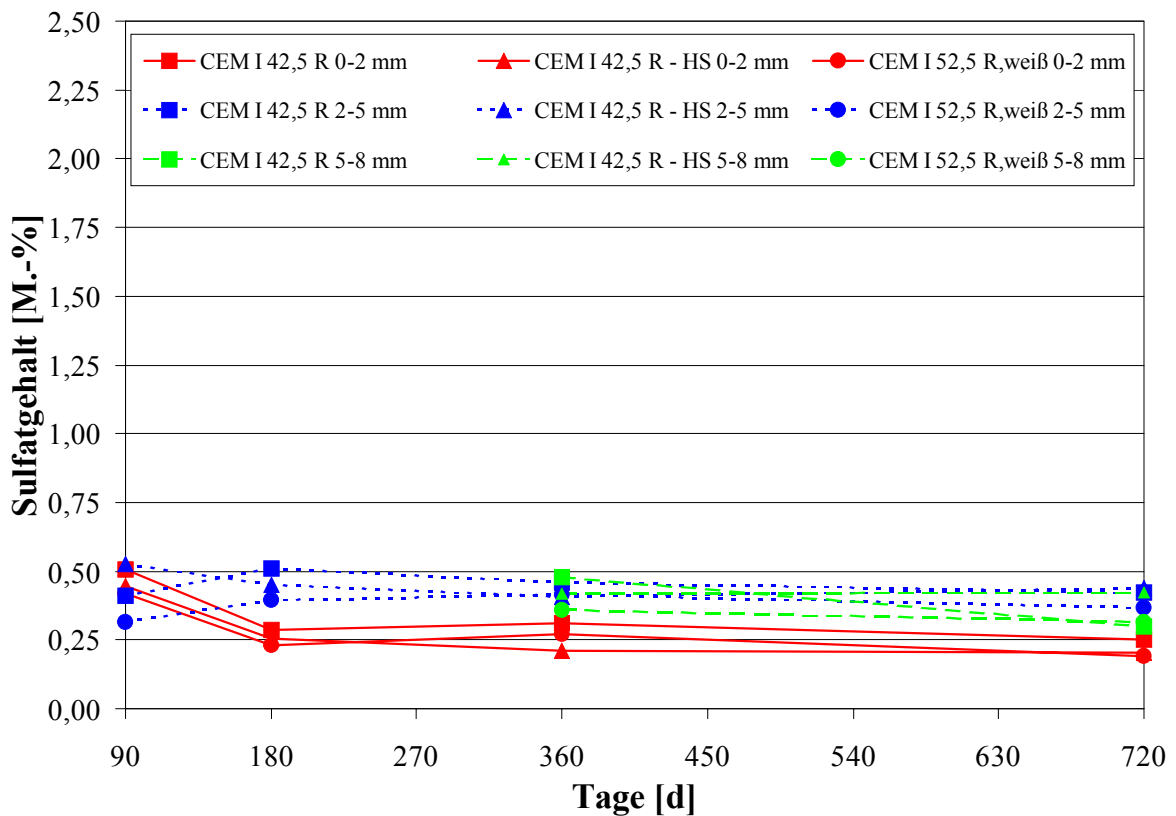


Abbildung 6.2: Sulfatgehalte der N-0-Proben der G1-Mörtel

Die 2-5 mm und 5-8 mm Schicht der T-100-Proben verhalten sich sehr ähnlich (Abbildung 6.3). Von der 90d zur 180d Messung ist ein geringer, scheinbarer Rückgang (s.o.) der Sulfatgehalte zu erkennen, danach bleiben die Werte konstant und liegen im Bereich der Nullproben. SO₂ dringt also nicht tiefer als 2 mm in die Mörtel ein. Die äußere 0-2 mm Schicht zeigt dagegen eine deutliche Zunahme der Sulfatgehalte. Eine höhere Schadgaskonzentration bewirkt höhere Sulfatgehalte der 0-2 mm Schicht. Bei dem sehr hohen 360d Meßwert des CEM I HS 0-2 mm T-100 handelt es sich wahrscheinlich um einen „Ausreißer“. Ansonsten verhalten sich die drei Bindemittel sehr ähnlich, lediglich der CEM I, weiß zeigt nach 720d in der äußeren Schicht etwas geringere Sulfatgehalte.

Durch die regelmäßige Wässerung der bewitterten N-Proben werden die Proben stärker beeinflusst (Abbildung 6.4). Die Sulfatgehalte der 0-2 mm Schicht steigen erheblich stärker an als die der T-Proben. Das Wasser löst immer einen gewissen Anteil an Sulfat aus dem Mörtel heraus, bewirkt jedoch auch eine Um- und Rekristallisation des Sulfats (meist als Gips vorliegend) von kleinen zu größeren Kristallen. Dadurch wird die Oberfläche geöffnet und weiteres Eindringen von SO₂ erleichtert. Bei den T-Proben findet dieser Prozeß nicht statt und das Eindringen von SO₂ wird im Laufe der Zeit immer mehr erschwert. Zusätzlich bewirkt das bei der Wässerung eindringende Wasser in den inneren Schichten eine leichte Erhöhung der Sulfatgehalte. Dabei zeigt der CEM I, weiß etwas niedrigere, der CEM I HS etwas höhere Werte als der CEM I bezüglich der 2-5 mm und 5-8 mm Schicht.

Insgesamt betrachtet liegen die Sulfatbelastungen der Mörtel dieser Bindemittelgruppe recht niedrig. Selbst nach 720d mit 100-facher Schadgaskonzentration liegt im Mörtel nur maximal ca. 2 M.-% Sulfat, umgerechnet ca. 3,5 M.-% CaSO₄ · 2 H₂O vor. Allerdings liegt diese Konzentration nur in der äußersten Schicht vor, unterhalb von 2 mm Tiefe ist die Erhöhung durch die Bewitterung nur minimal. Da sich die Konzentration nicht schlagartig ändert, ist zu vermuten, daß der größte Anteil der ca. 2 M.-% Sulfat in nur 0-1 mm Schichtdicke zu erwarten ist. Untermauert wird diese Vermutung durch exemplarisch angefertigte Dünnschliffe und deren lichtmikroskopische Auswertung (s. 7.3).

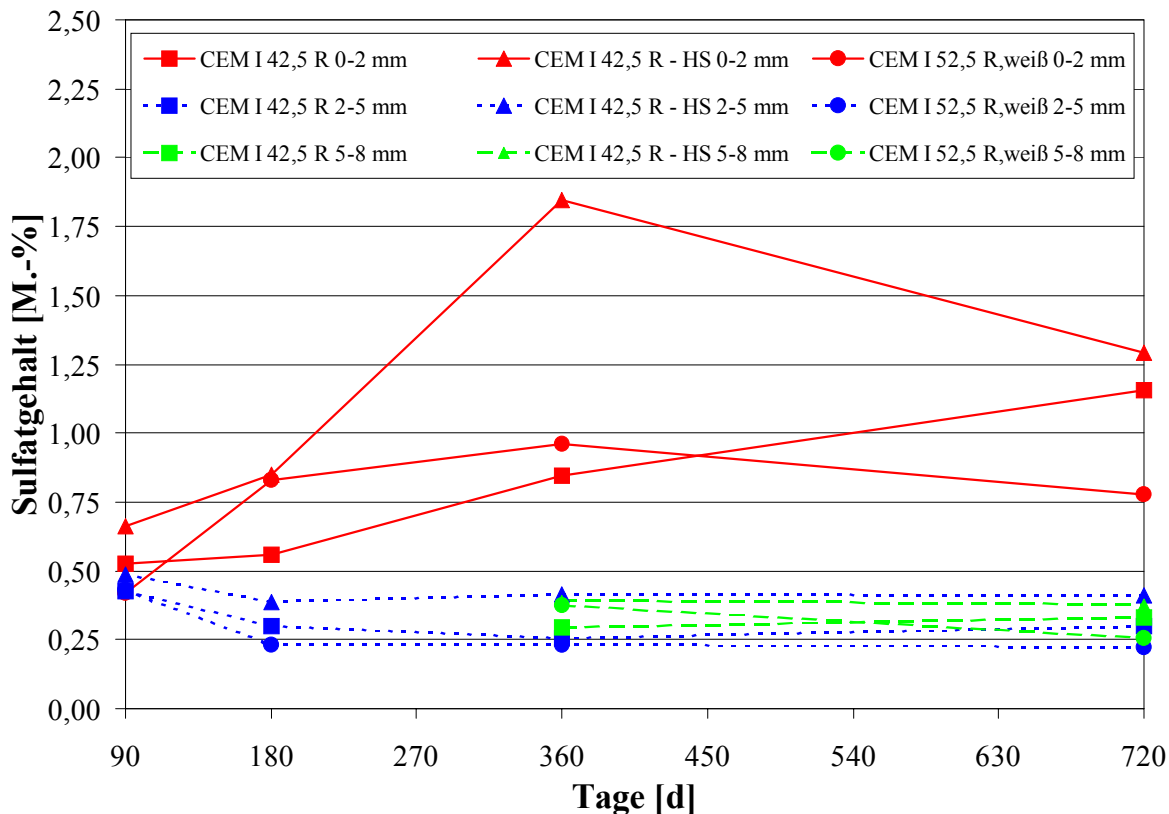


Abbildung 6.3: Sulfatgehalte der T-100-Proben der G1-Mörtel

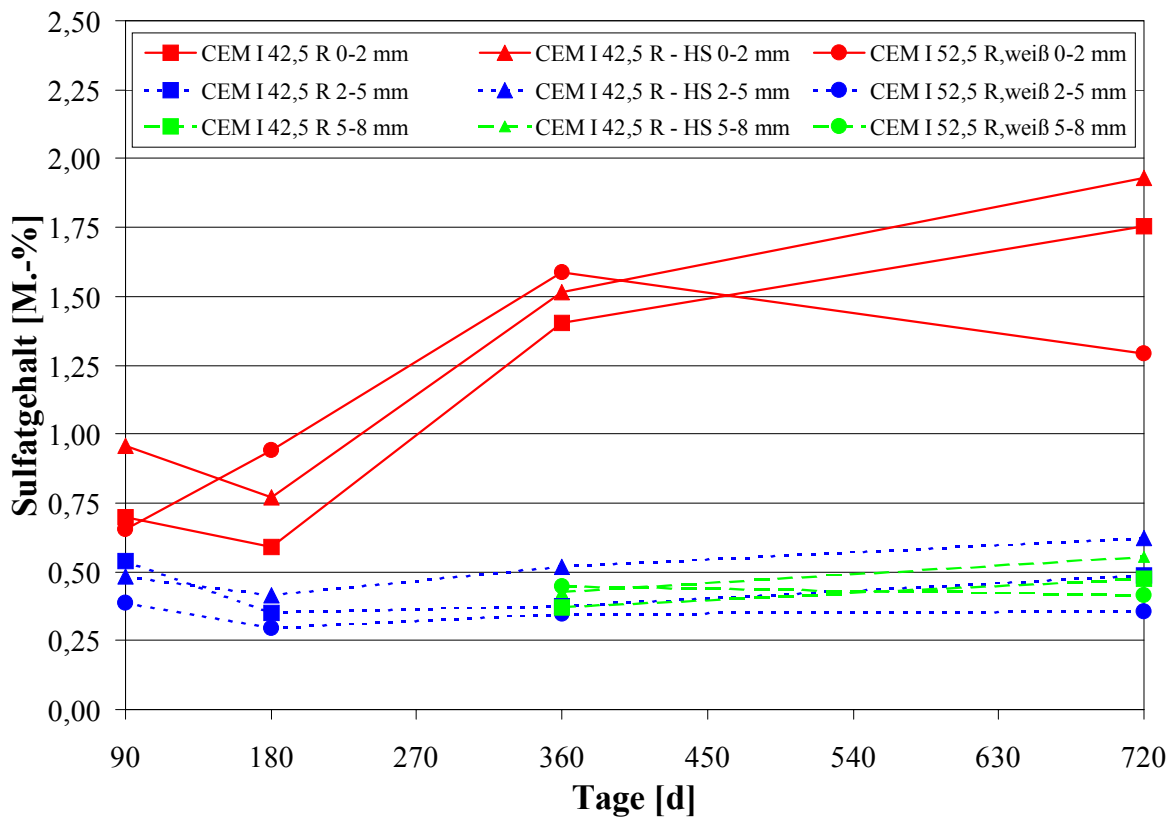


Abbildung 6.4: Sulfatgehalte der N-100-Proben der G1-Mörtel

G2-Mörtel: Die Nullproben der G2-Mörtel unterscheiden sich deutlich. Der HGZ hat einen ca. doppelt so hohen Sulfatgehalt wie der CEM II und der CEM III. Die T-Proben verändern in allen ST über den gesamten Untersuchungszeitraum ihre Sulfatgehalte nicht, lediglich beim HGZ zeigt sich nach 720d ein leichter Anstieg (Abbildung 6.5). Dies ist vermutlich auf die Carbonatisierung des im HGZ vorliegenden Ettringits zurückzuführen. Das bei der Carbonatisierung entstehende Wasser kann verdunsten und die Dichte dadurch leicht zurück gehen. Eine scheinbare Zunahme des Sulfatgehaltes ist die Folge. Die inneren Schichten (2-5 mm und 5-8 mm) der N-0-Proben bleiben unverändert, während die äußeren Schichten durch Auswaschung Sulfat verlieren (Abbildung 6.6).

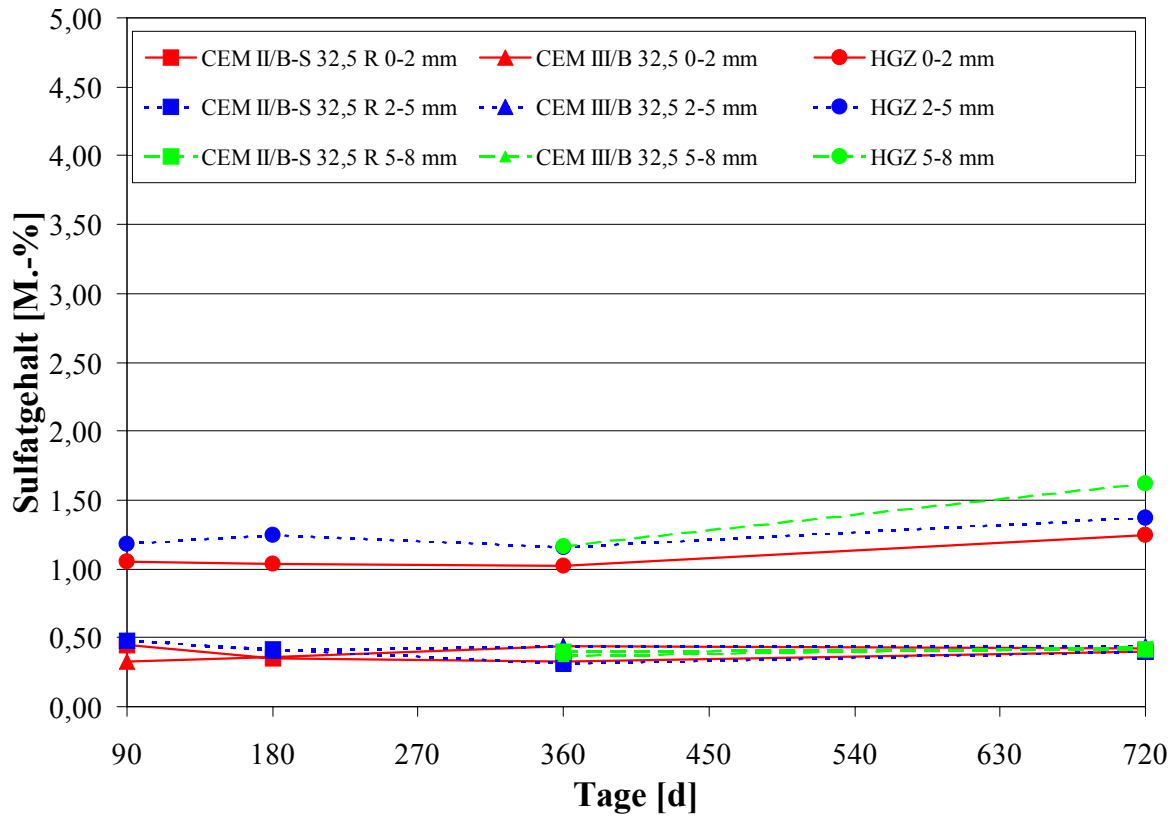


Abbildung 6.5: Sulfatgehalte der T-0-Proben der G2-Mörtel

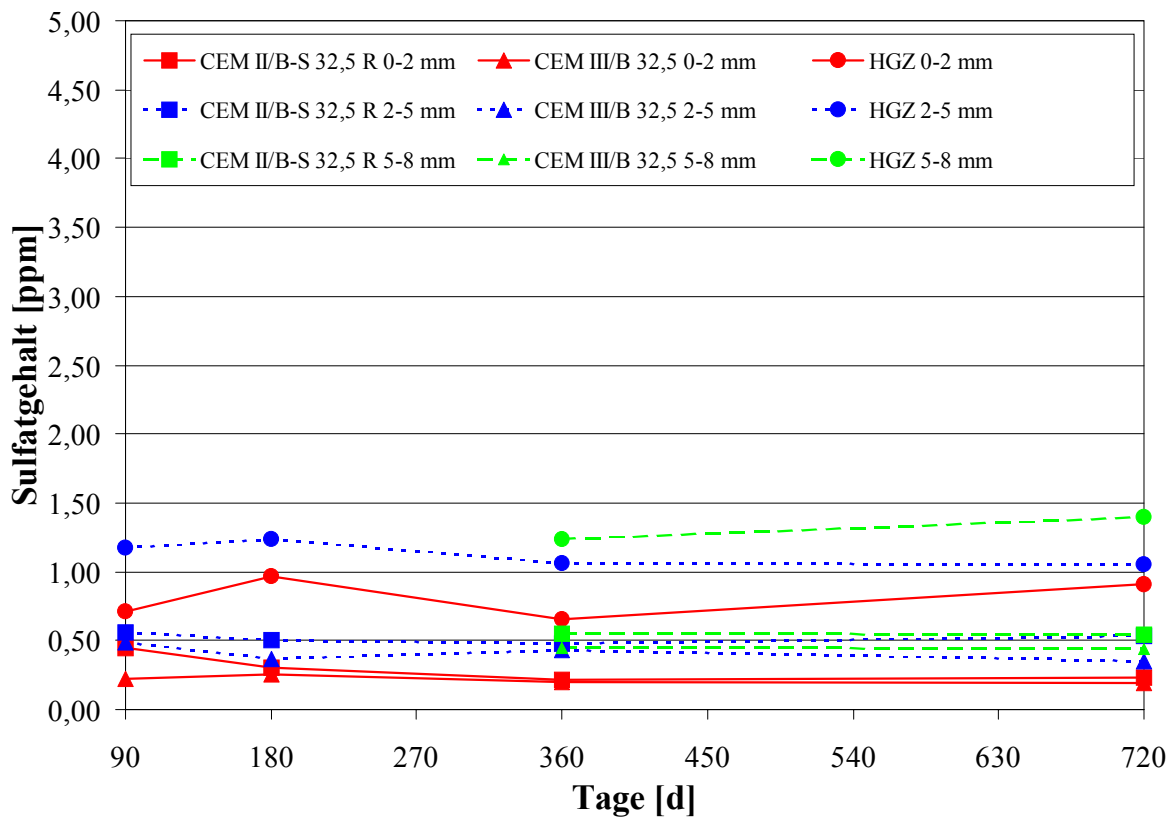


Abbildung 6.6: Sulfatgehalte der N-0-Proben der G2-Mörtel

Analog zu den G1-Mörteln verhalten sich die Sulfatgehalte der inneren Schichten der bewitterten T-Proben (Abbildung 6.7). Diese bleiben in beiden ST über den gesamten Untersuchungszeitraum nahezu konstant. Die äußere Schicht zeigt wiederum eine starke Zunahme der Sulfatgehalte. Während beim CEM III und beim HGZ die Sulfatgehalte kontinuierlich mit der Zeit ansteigen, bleiben sie beim CEM II nach 180d konstant. Durch die regelmäßige Wässerung der N-Proben wird dieser Sachverhalt kaum verändert (Abbildung 6.8). Der CEM II und der CEM III zeigen in der äußeren Schicht gegenüber den T-100-Proben nur gering erhöhte Sulfatgehalte. Eine verstärkte Sulfatisierung durch die N-Lagerung, wie bei den G1-Mörteln beobachtet, ist nicht festzustellen.

Wie schon bei den G1-Mörteln zeigt sich auch bei dieser Bindemittelgruppe lediglich eine Erhöhung der Sulfatgehalte in der 0-2 mm Schicht. Die tieferen Schichten bleiben weitgehend unverändert. Auch hier ist zu vermuten, daß sich der größte Anteil der Sulfatgehalte in einer ST von ca. 1 mm befindet.

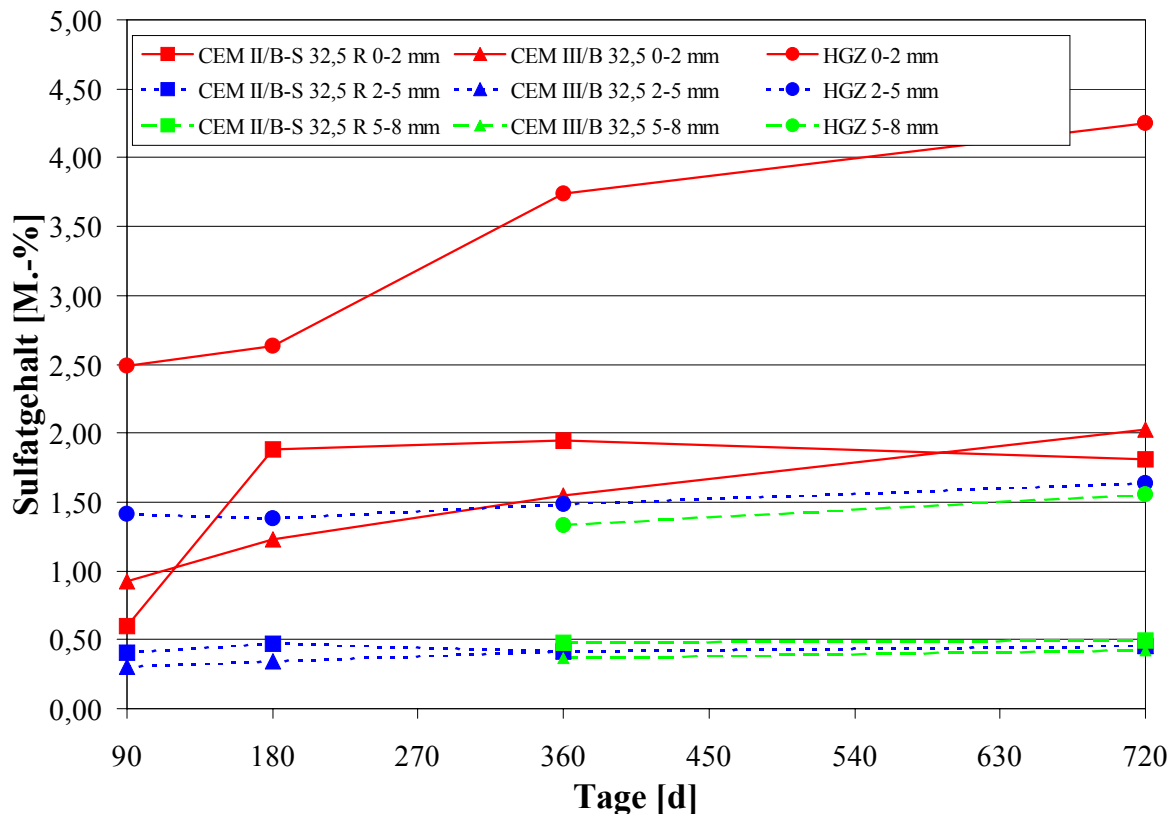


Abbildung 6.7: Sulfatgehalte der T-100-Proben der G2-Mörtel

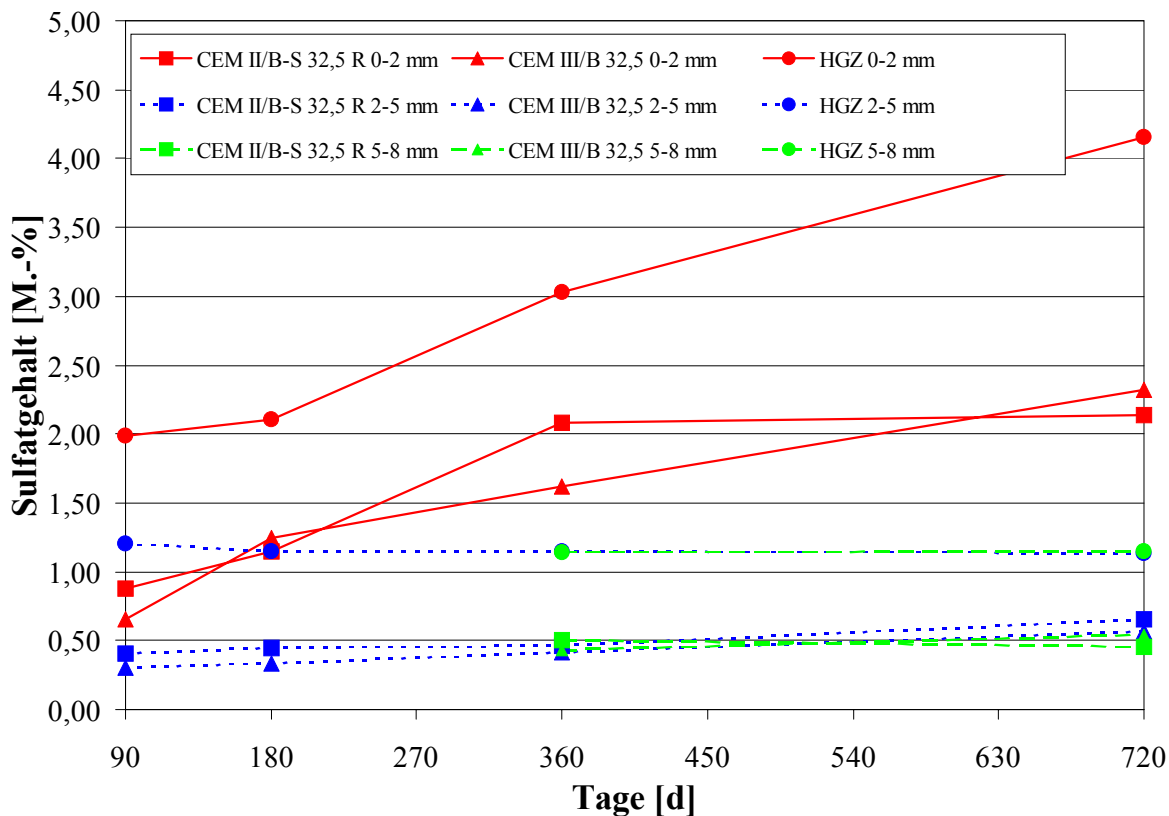


Abbildung 6.8: Sulfatgehalte der N-100-Proben der G2-Mörtel

G3-Mörtel: Die stärkste Beeinflussung durch die Bewitterung bezüglich der Sulfatgehalte zeigen die G3-Mörtel. Die Nullproben des CL 90 und des NHL 2,0 sind weitgehend sulfatfrei. Die gemessenen Werte (s.a. Tabelle A 30) werden durch einen geringen Sulfatgehalt im Zugabewasser (ca. 0,15 – 0,30 M.-%) verursacht bzw. liegen innerhalb der Meßgenauigkeit. Die Nullproben des NHL 5,0 haben einen Sulfatgehalt von ca. 0,50 M.-% (Abbildung 6.9 und Abbildung 6.10). Durch die Wässerung der N-Proben wird dieser Sulfatgehalt deutlich erniedrigt. Aufgrund der hohen Porosität des NHL 5,0 betrifft die Erniedrigung auch die inneren ST.

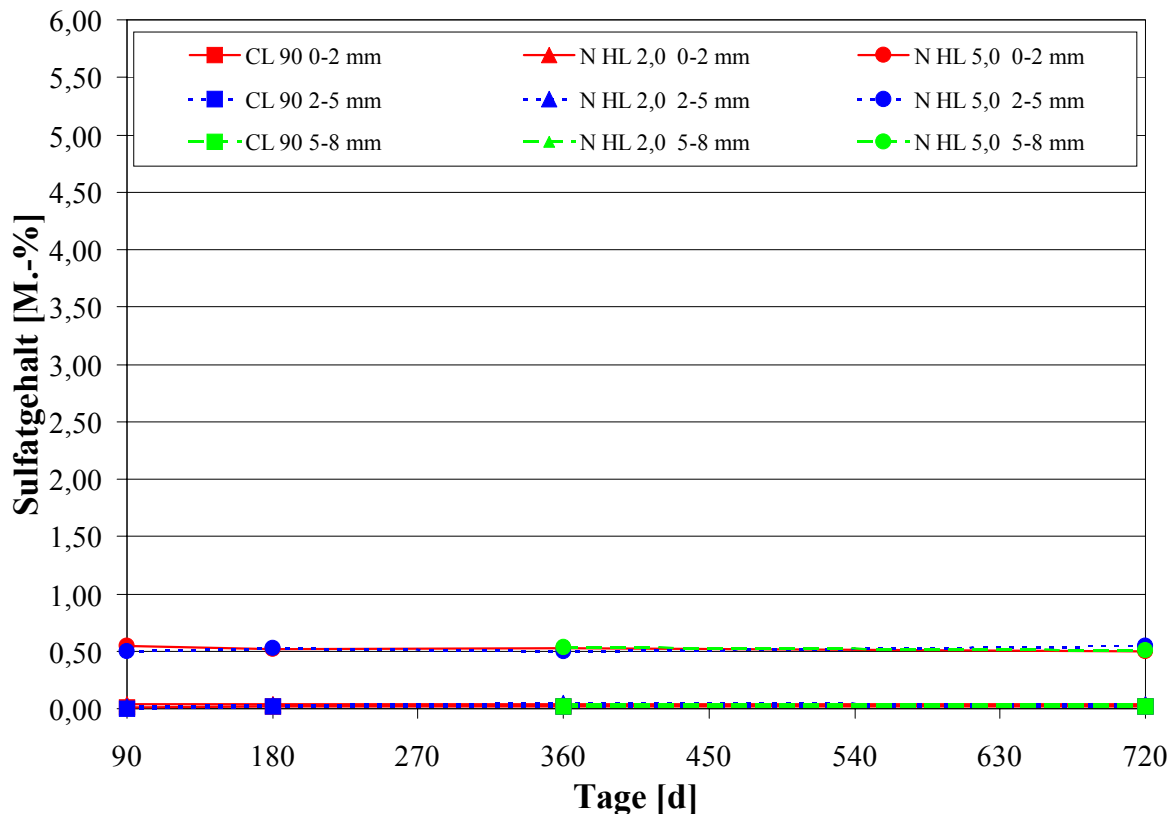


Abbildung 6.9: Sulfatgehalte der T-0-Proben der G3-Mörtel

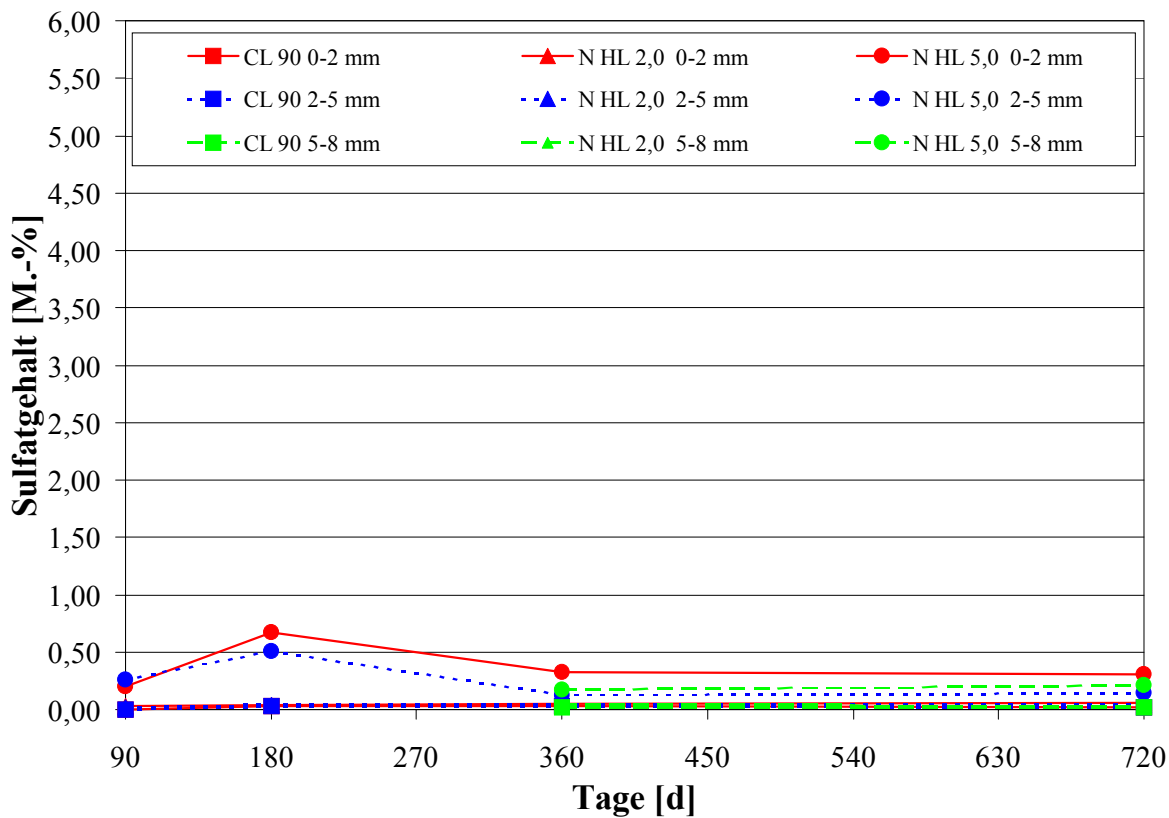


Abbildung 6.10: Sulfatgehalte der N-0-Proben der G3-Mörtel

Durch die Bewitterung steigen, wie schon bei den G1- und G2-Mörteln festgestellt, die Sulfatgehalte vor allem in den äußeren Schichten an. Bei den T-Proben zeigt die 0-2 mm Schicht des N HL 5,0 den mit Abstand stärksten Anstieg der Sulfatgehalte (Abbildung 6.11). Die hohe Porosität des N HL 5,0 läßt daneben auch eine deutliche Erhöhung der Sulfatgehalte in den tieferen Schichten zu. Der CL 90 und der N HL 2,0 zeigen in der 0-2 mm Schicht nach 360d eine Stagnation der Sulfatgehalte; in den inneren Schichten steigen die Sulfatgehalte nur geringfügig.

Ein deutlich anderes Bild zeigen die bewitterten N-Proben der G3-Mörtel (Abbildung 6.12). In den äußeren 0-2 mm Schichten steigen bei allen 3 Mörteln die Sulfatgehalte sehr stark an, beim N HL 5,0 sogar fast linear zur Bewitterungsdauer. Durch die regelmäßige Wässerung wird Sulfat in die tieferliegenden Schichten transportiert. Der Anstieg ist, gemessen an den äußeren Schichten, jedoch gering. Das SO₂ dringt also auch bei den G3-Mörteln nicht tiefer als 2 mm ein. Wie schon bei den G1- und G2-Mörteln findet auch hier primär eine Sulfatanreicherung in den obersten Schichten statt, größten Teils vermutlich bis zu 1 mm Tiefe. Auch hier wird die Vermutung durch die Dünnschliffe bestätigt (s. 7.3). Die höchsten gemessenen Sulfatgehalte (ca. 6 M.-%) entsprechen ca. 10 M.-% Dihydrat nach 720d Bewitterung. Diese recht hohe Menge führte jedoch nicht zu Schäden wie Rissen oder Abplatzungen. Die G3-Mörtel besitzen also eine hohe „Sulfataufnahmekapazität“.

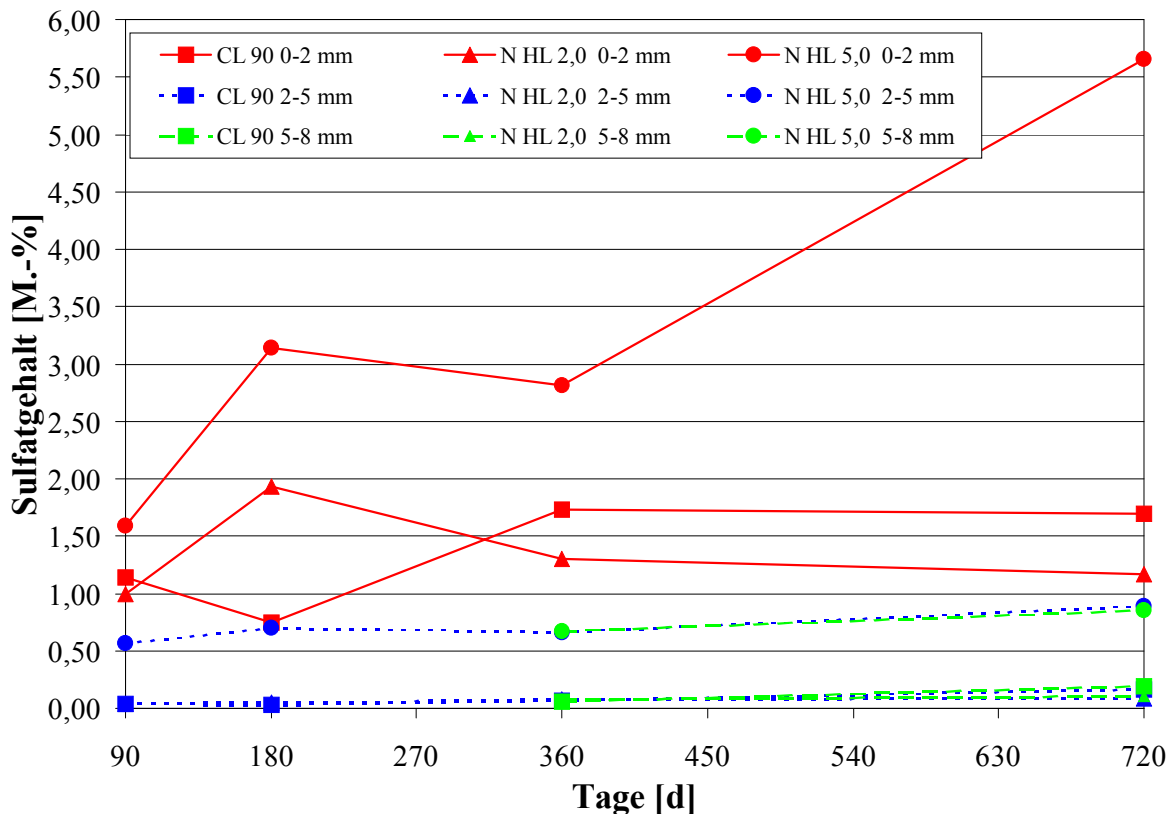


Abbildung 6.11: Sulfatgehalte der T-100-Proben der G3-Mörtel

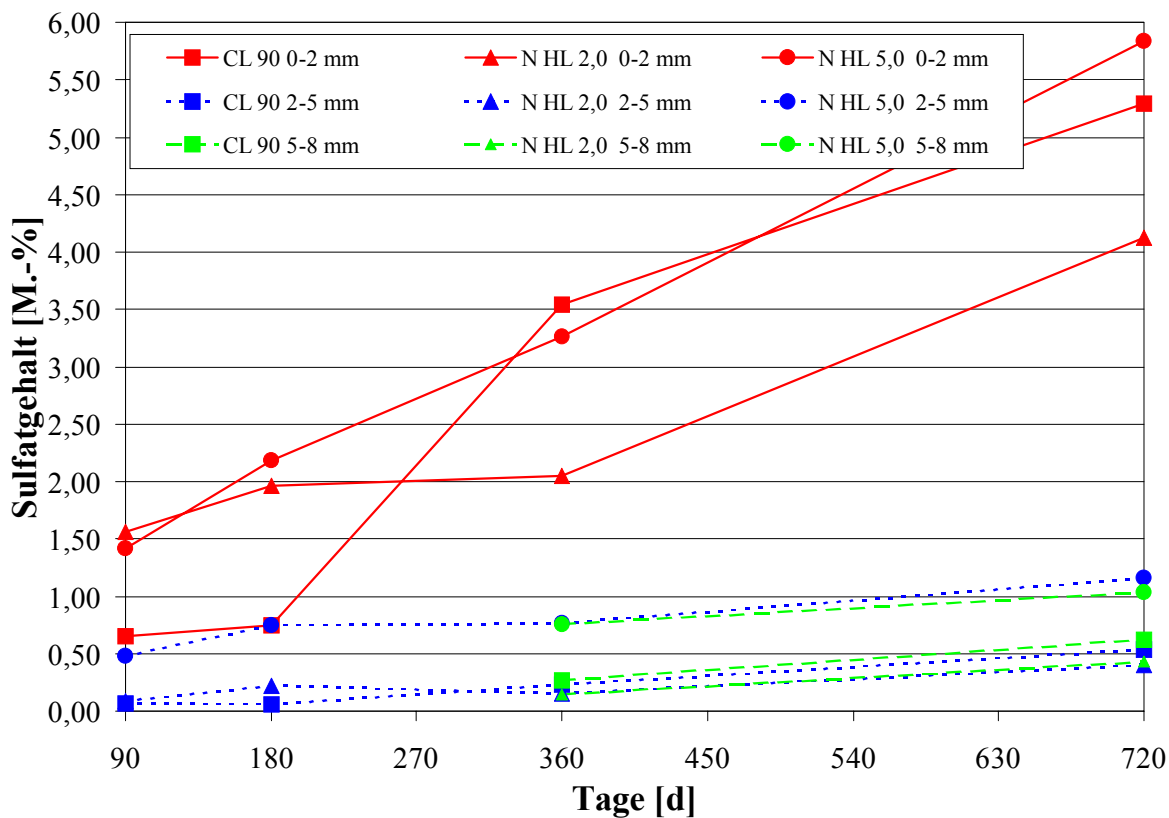


Abbildung 6.12: Sulfatgehalte der N-100-Proben der G3-Mörtel

Auffällig bei einigen der IC-Bestimmungen, insbesondere bei den G3-Mörteln, war im Chromatogramm ein unbekannter Peak vor dem Sulfatpeak, der sowohl bei den T/N-30-als auch bei dem T/N-100-Proben auftrat. Die Abbildung 6.13 zeigt exemplarisch ein solches Chromatogramm. Vergleichsmessungen zeigten, daß es sich dabei um Sulfit, SO_3^{2-} handelt. Aufgrund fehlender Standards bzw. fehlender Reinsubstanzen von SO_3^{2-} war es leider nicht möglich, diese Sulfit-Konzentrationen zu quantifizieren. CaSO_3 ist an der Luft nicht stabil und wird langsam zu CaSO_4 oxidiert. Um so interessanter war es, selbst nach 720d Lagerung und der Präparationsprozedur noch deutliche Mengen an Sulfit im Chromatogramm zu finden. Dieser Befund erhärtet die Theorie, das SO_2 zunächst mit Calcit oder Portlandit zum Sulfit reagiert und erst danach weiter zum Sulfat bzw. Gips. Aufgrund der geringen Mengen ist das Sulfit nur in wenigen Fällen auch röntgenographisch nachweisbar (s.a. 7.1)

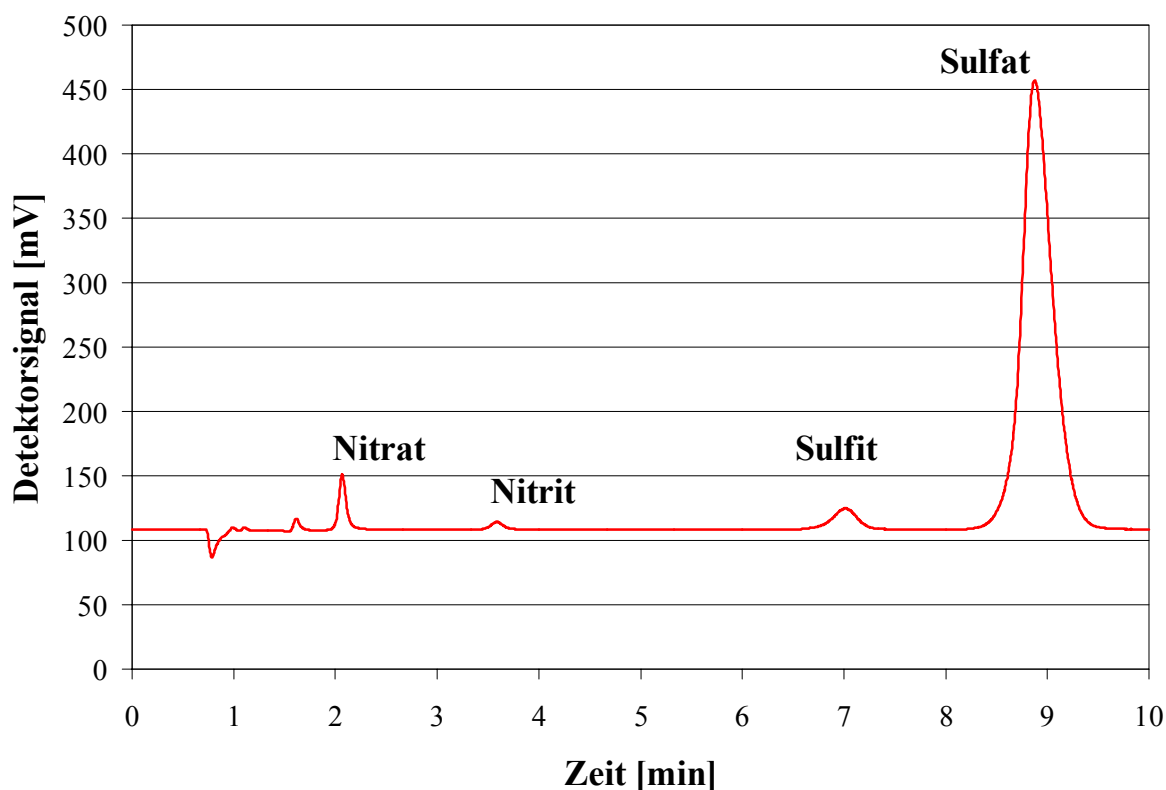
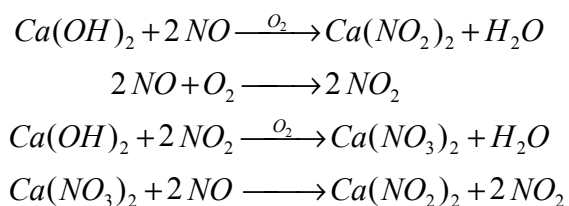


Abbildung 6.13: Beispielchromatogramm mit Sulfitpeak (CL 90, 0-2 mm, T-100, 720d)

6.1.2 Nitrat/Nitrit-Bestimmung

Die bewitterten Mörtelproben wurden zunächst mit Hilfe der IC nur auf Nitrat untersucht. Es zeigten sich aber in den Chromatogrammen neben den Nitrat-Peaks weitere, unbekannte Peaks, die sehr schnell als Nitrit identifiziert werden konnten. Daraufhin wurden die untersuchten Ionen um das Nitrit-Ion erweitert. Im Gegensatz zum Sulfid sind dafür stabile Eichlösungen vorhanden.

Die Anwesenheit von Nitrit kann verschiedene Ursachen haben. Zum einen kann das in der Bewitterungsumgebung vorhandene NO direkt mit Calcit oder Portlandit zu Nitrit reagieren. Daneben kann aber auch NO durch Luftsauerstoff zu NO₂ oxidiert werden, das dann mit Calcit oder Portlandit zum Nitrat reagiert. Dieses Nitrat, ein starkes Oxidationsmittel, kann dann wiederum mit NO zu Nitrit und NO₂ reagieren. Die folgenden Reaktionsgleichungen verdeutlichen diesen Sachverhalt:



Nach Abschluß aller Untersuchungen zeigte sich aber, daß selbst nach 720d Bewitterung keine Nitrat- oder Nitritgehalte von über 0,1 M.-% gemessen wurden. Selbst die Summe aus Nitrit- und Nitrationen, also die NO_x⁻ - Ionenkonzentration, wies nur bei **zwei** Proben (von insgesamt 540 untersuchten Proben) mehr als 0,1 M.-% auf. Dies ist um so erstaunlicher, da die Stoffmengenkonzentration an NO bzw. NO₂ bei der Bewitterung etwa doppelt so groß ist wie die Stoffmengenkonzentration an SO₂. Offensichtlich ist die Reaktivität der NO_x-Gase erheblich niedriger als die des SO₂-Gases. Außerdem sind Nitrate und Nitrite sehr gut löslich, so daß sie sich im Mörtel relativ gleichmäßig verteilen können. Für diese Verteilung ist schon die rel. Luftfeuchtigkeit von ca. 75 % ausreichend.

Die Abbildung 6.14 und Abbildung 6.15 zeigen exemplarisch Nitrat+Nitrit Werte der T-100-Proben der CEM-Mörtel bzw. der G3/HGZ-Mörtel.

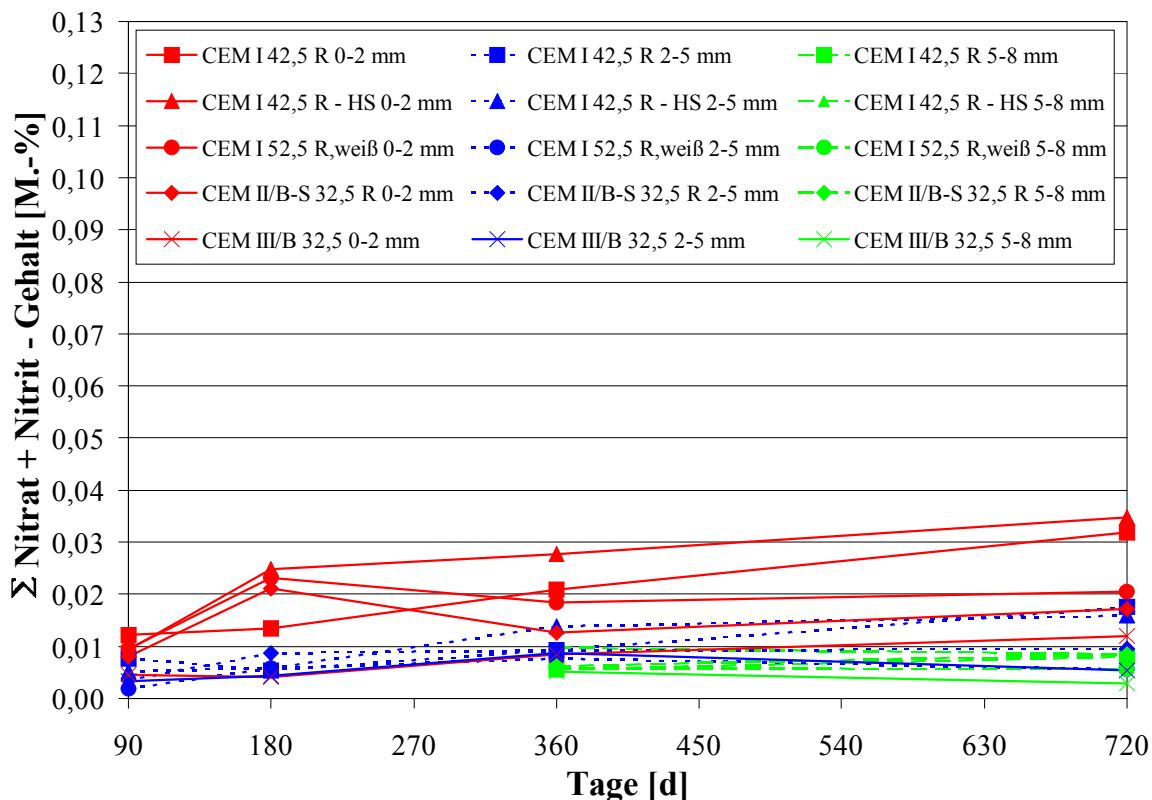


Abbildung 6.14: Summe der Nitrat + Nitrit – Gehalte der T-100-Proben der CEM-Mörtel (CEM I; CEM I HS; CEM I, weiß; CEM II; CEM III)

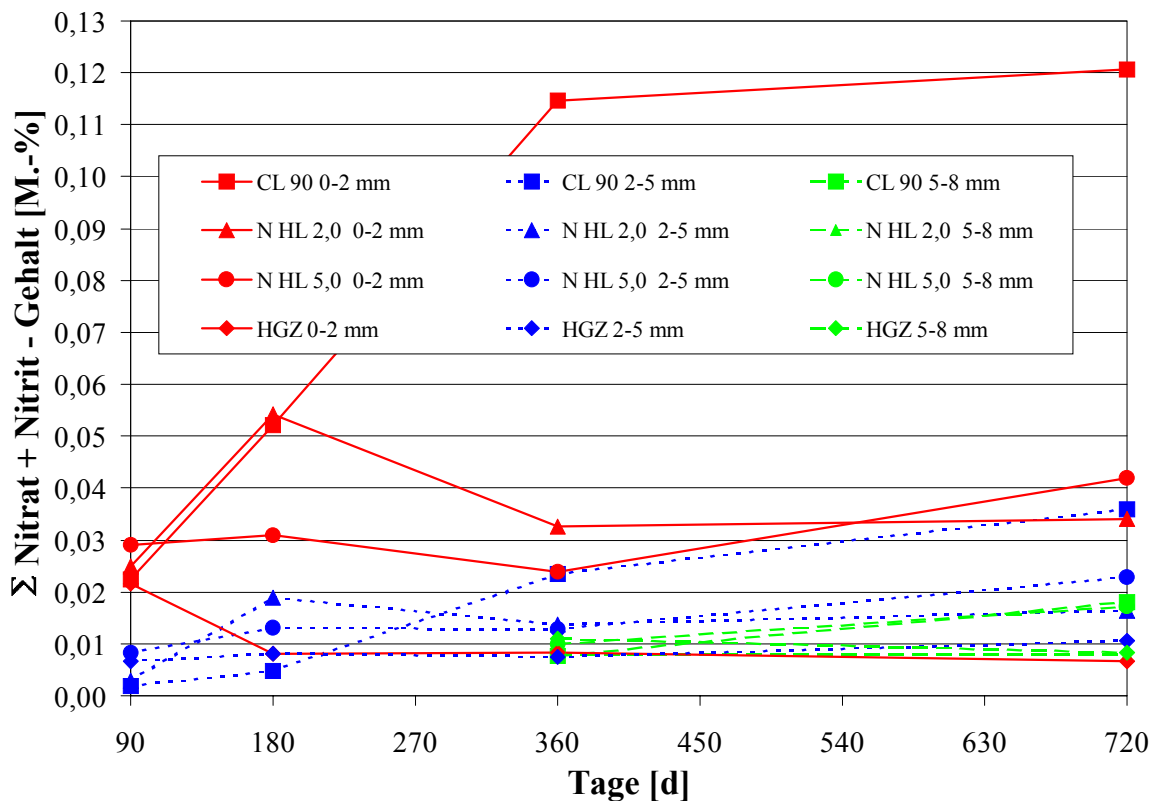


Abbildung 6.15: Summe der Nitrat + Nitrit – Gehalte der T-100-Proben der G3/HGZ-Mörtel (CL 90; N HL 2,0; N HL 5,0; HGZ)

Insgesamt betrachtet kann davon ausgegangen werden, daß die Stickoxide nach längerer Exposition bei hohen NO bzw. NO₂ Konzentrationen keine Gefährdung für die untersuchten Mörtel darstellen.

6.2 Carbonatbestimmung

G1-Mörtel: Die Nullproben lagerten in normaler Laborluft, die ca. 0,03 Vol.-% CO₂ enthält. Diese geringe CO₂-Konzentration führt zu einer Carbonatisierung der Nullproben (Abbildung 6.16 und Abbildung 6.17). Die 0-2 mm Schicht der G1-T/N-0-Proben ist schon nach 180d vollständig carbonatisiert und verändert sich danach nur noch wenig. Im Gegensatz zum SO₂ dringt CO₂ erheblich tiefer in den Mörtel ein. Die Carbonatgehalte der 2-5 mm Schichten steigen im Laufe der Zeit deutlich an und streben den Gehalten der 0-2 mm Schichten entgegen. Verglichen damit werden die 5-8 mm tiefen Schichten nur wenig beeinflusst.

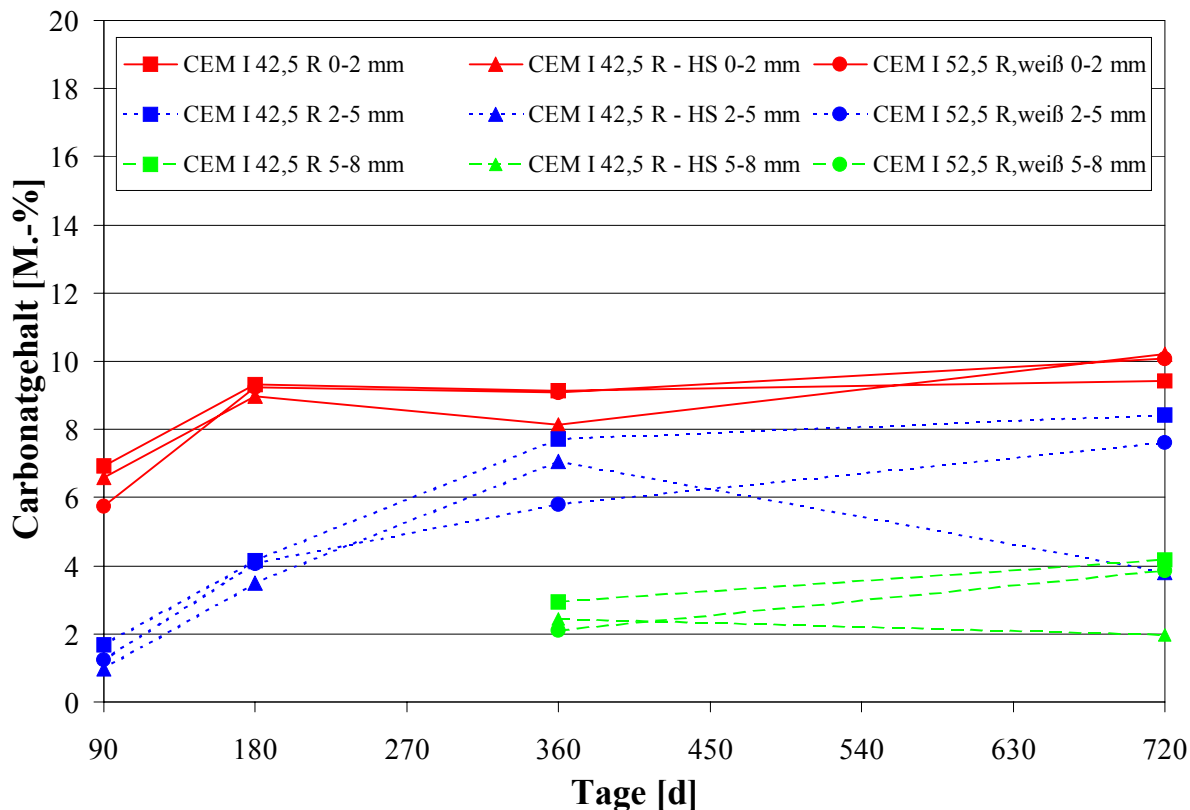


Abbildung 6.16: Carbonatgehalte der T-0-Proben der G1-Mörtel

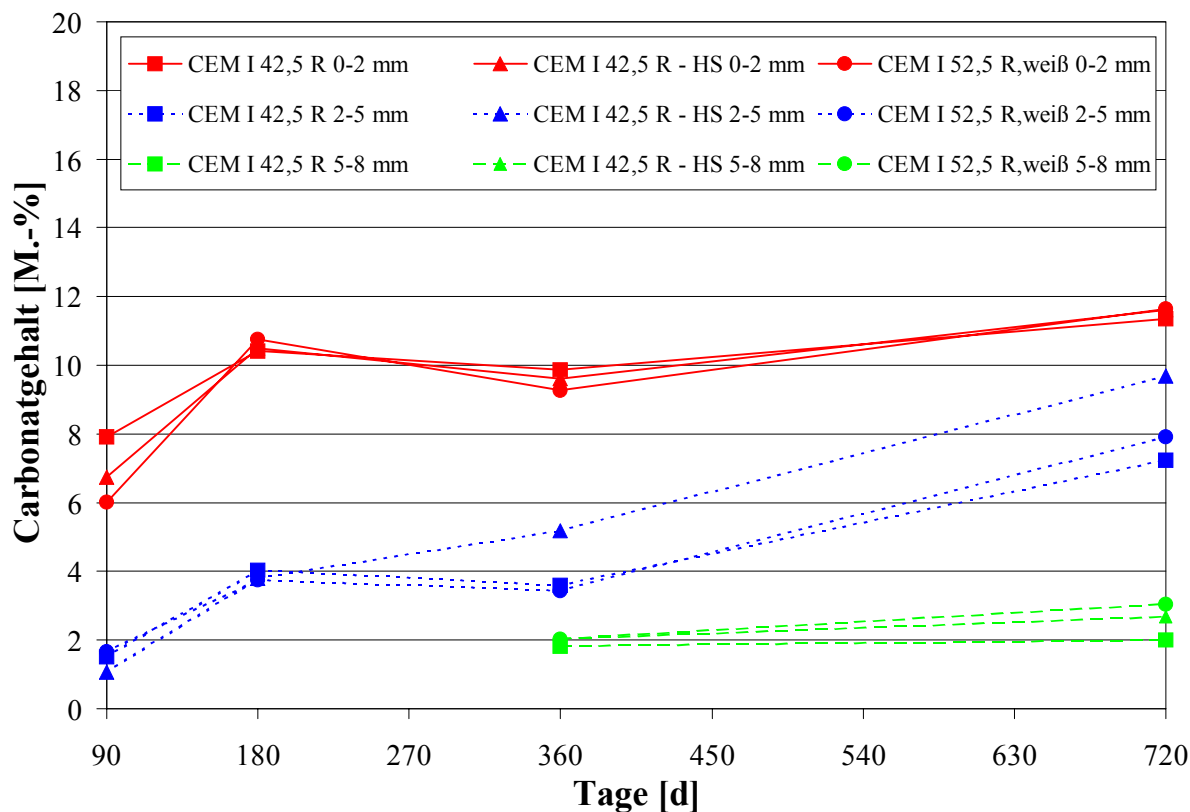


Abbildung 6.17: Carbonatgehalte der N-0-Proben der G1-Mörtel

Durch die erhöhten CO₂-Konzentrationen bei der Bewitterung wird die Carbonatisierung erheblich beschleunigt (Abbildung 6.18 und Abbildung 6.19). Nach 180d bzw. 360d haben alle untersuchten Schichten einen maximalen Carbonatgehalt von ca. 12 M.-% erreicht. Auffällig sind die etwas höheren Carbonatgehalte der inneren Schichten gegenüber der 0-2 mm Schicht nach 720d. Die Carbonatgehalte der N-100-Proben zeigen bei der 0-2 mm Schicht ab der 180d Messung leicht rückläufige Werte. Ursache hierfür ist, wie unter 6.1.1 beschrieben, die zunehmende Sulfatisierung dieser Schicht.

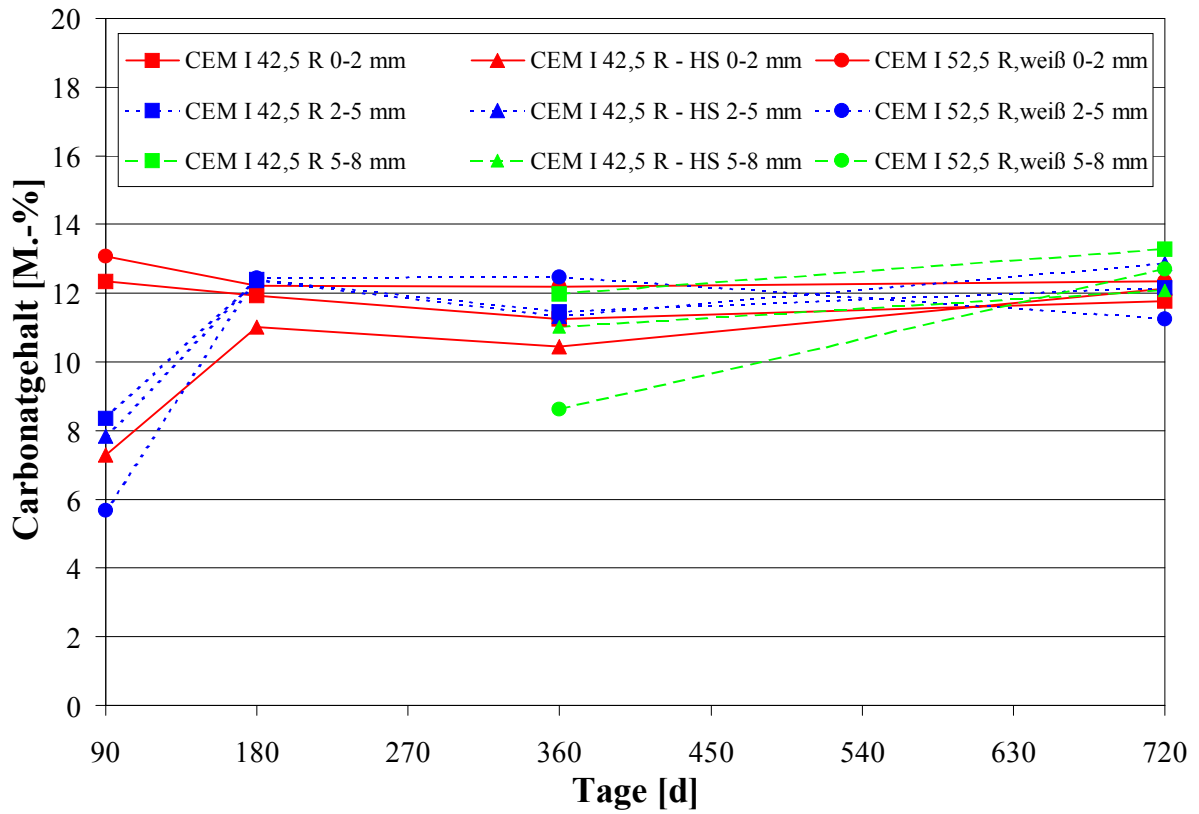


Abbildung 6.18: Carbonatgehalte der T-100-Proben der G1-Mörtel

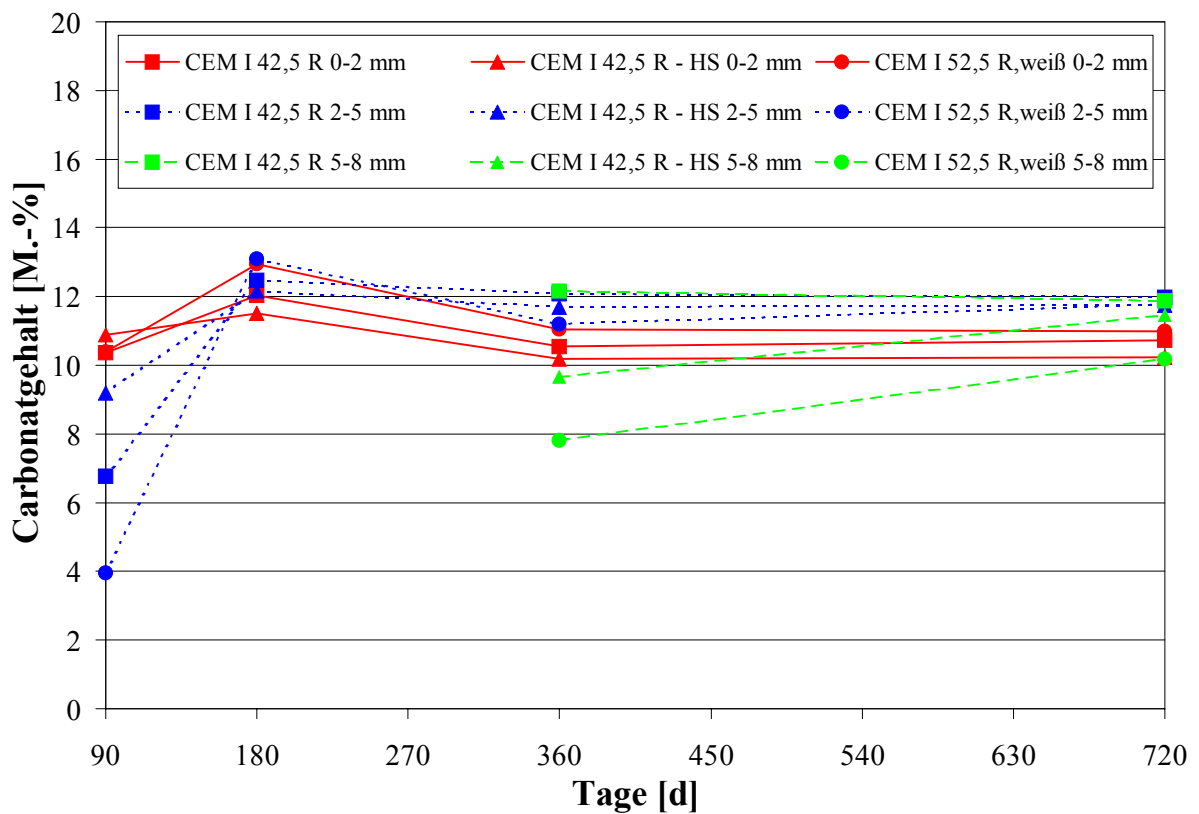


Abbildung 6.19: Carbonatgehalte der N-100-Proben der G1-Mörtel

Daneben zeigen die Ergebnisse der Carbonatbestimmungen die große Ähnlichkeit der drei G1-Mörtel untereinander. Die Carbonatgehalte der einzelnen Schichten zeigen kaum eine Abhängigkeit vom Bindemittel.

G2-Mörtel: Die Carbonatgehalte zeigen deutlich die Unterschiede zwischen diesen Mörteln. Mit steigendem HÜS-Anteil der Bindemittel gehen die Carbonatgehalte der Mörtel deutlich zurück. Die hohe Porosität fördert außerdem die rasche Carbonatisierung bis in die 5-8 mm tiefe Schicht. Die T-0-Proben zeigen ab der 180d Messung in allen ST weitgehend konstante Carbonatgehalte (Abbildung 6.20). Die regelmäßige Wässerung der N-0-Proben verlangsamt die Carbonatisierung vor allem der inneren Schichten (Abbildung 6.21). Dies bewirkt, daß beim CEM II die Carbonatgehalte der 5-8 mm Schicht der N-0-Proben deutlich unter denen der T-0-Proben liegen.

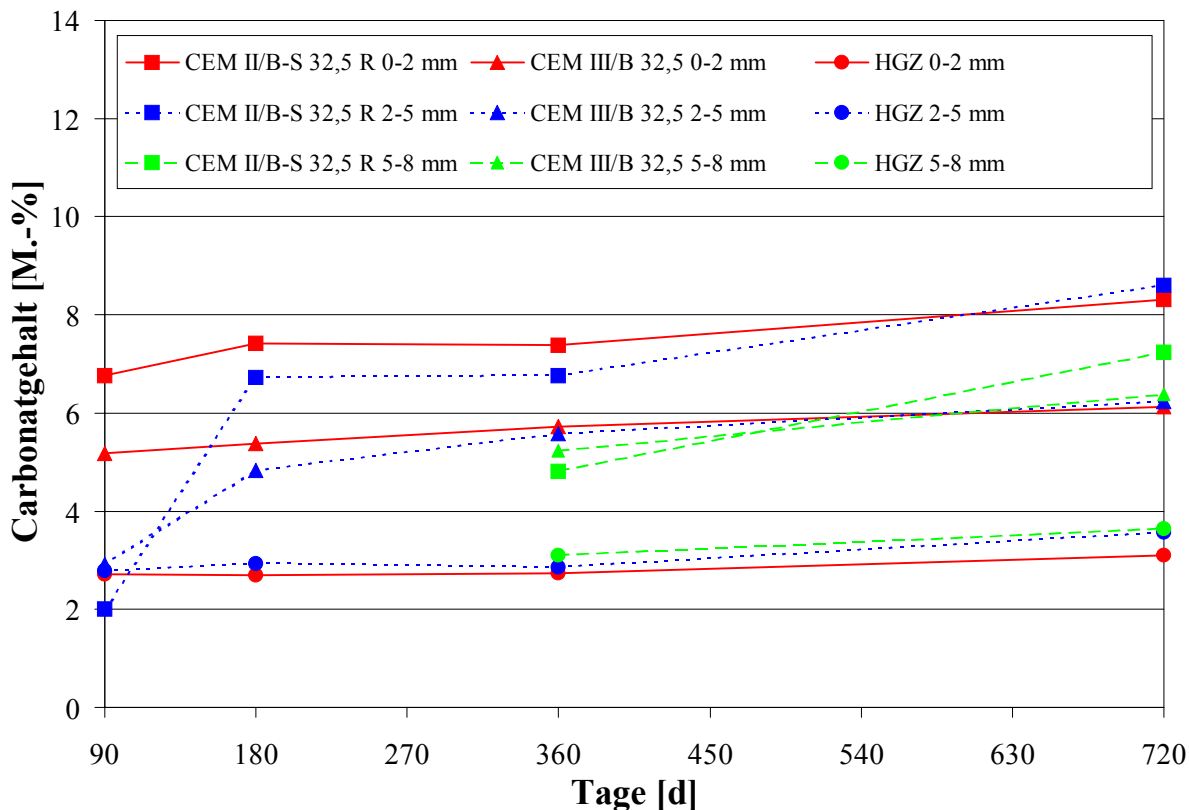


Abbildung 6.20: Carbonatgehalte der T-0-Proben der G2-Mörtel

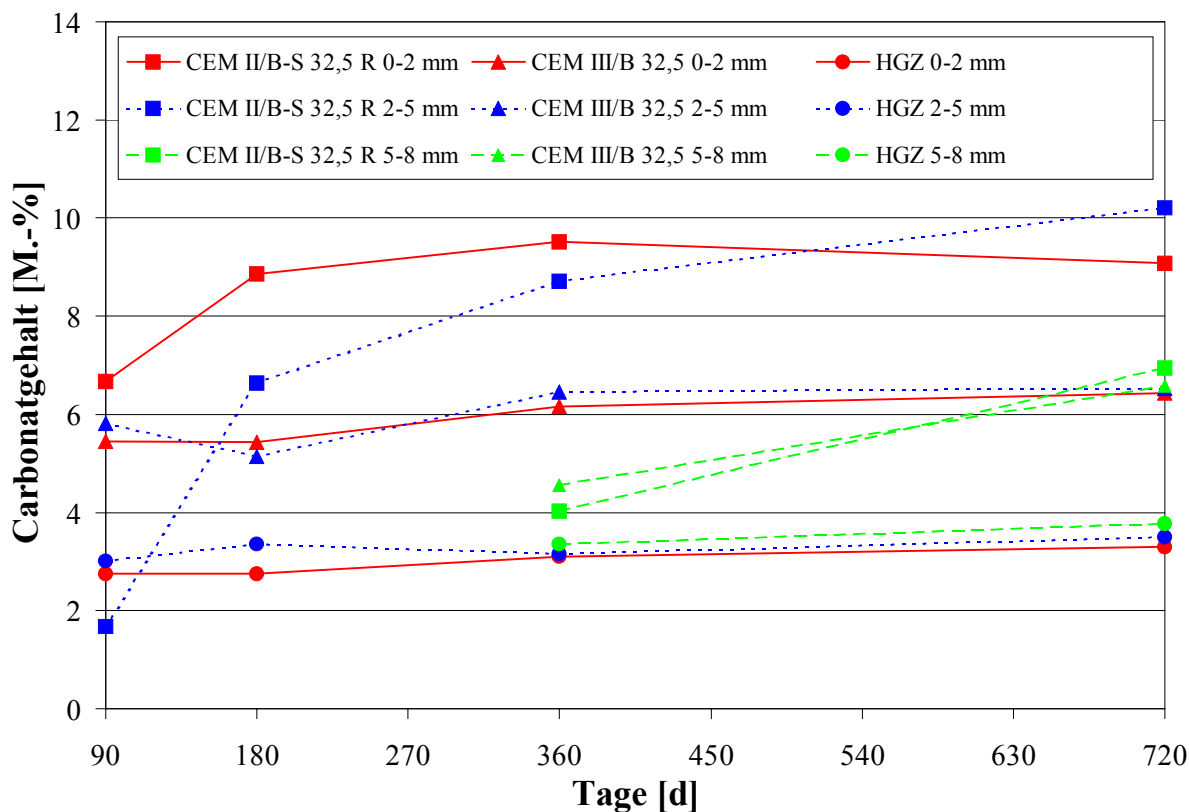


Abbildung 6.21: Carbonatgehalte der N-0-Proben der G2-Mörtel

Die bewitterten Proben zeigen durch die erhöhte CO₂-Konzentration schon ab der 90d Messung in den inneren Schichten konstante Carbonatgehalte (Abbildung 6.22 und Abbildung 6.23). Durch das SO₂ und zum geringen Teil auch durch die Stickoxide gehen die Carbonatgehalte der 0-2 mm Schicht im Laufe der Zeit deutlich zurück und liegen dabei immer unter denen der inneren Schichten. Die regelmäßige Wässerung der N-Proben verstärkt diesen Effekt. Nach 720d Bewitterung besitzen die äußeren Schichten der Mörtel bis zu 3 M.-% weniger Carbonat als die inneren Schichten.

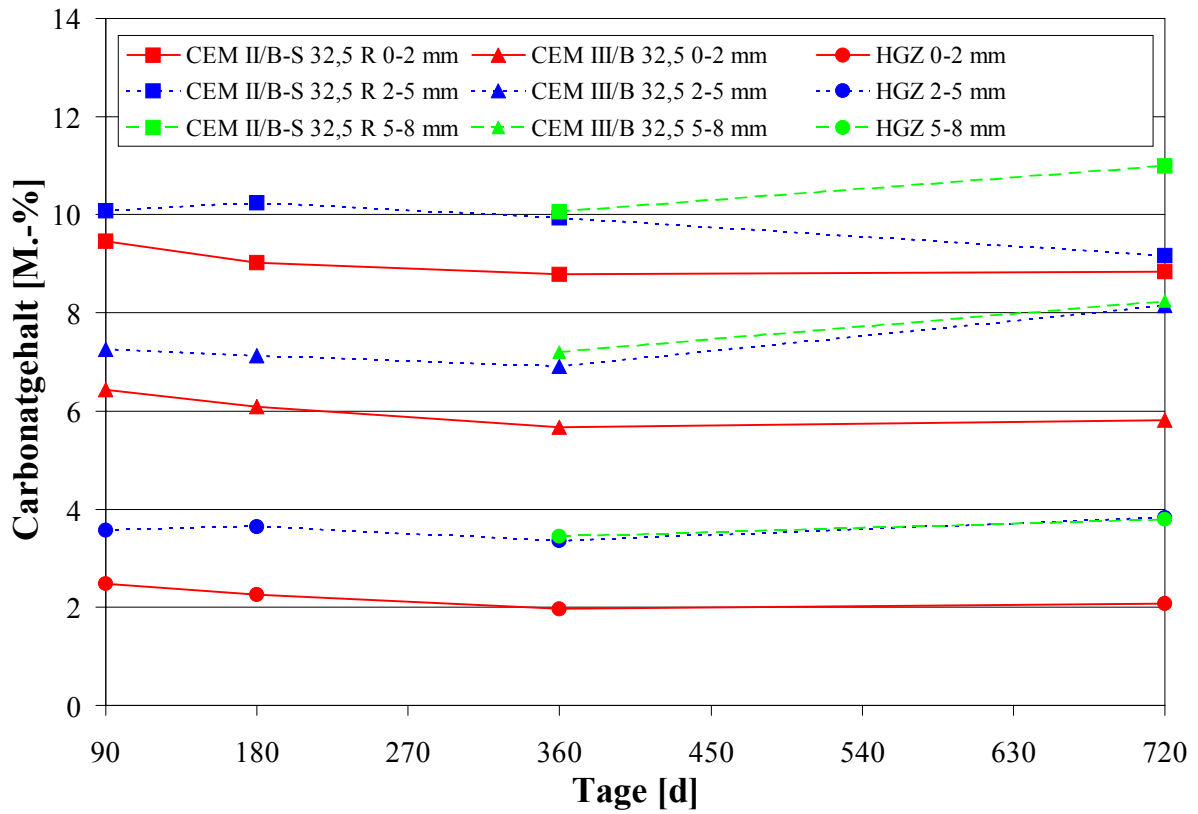


Abbildung 6.22: Carbonatgehalte der T-100-Proben der G2-Mörtel

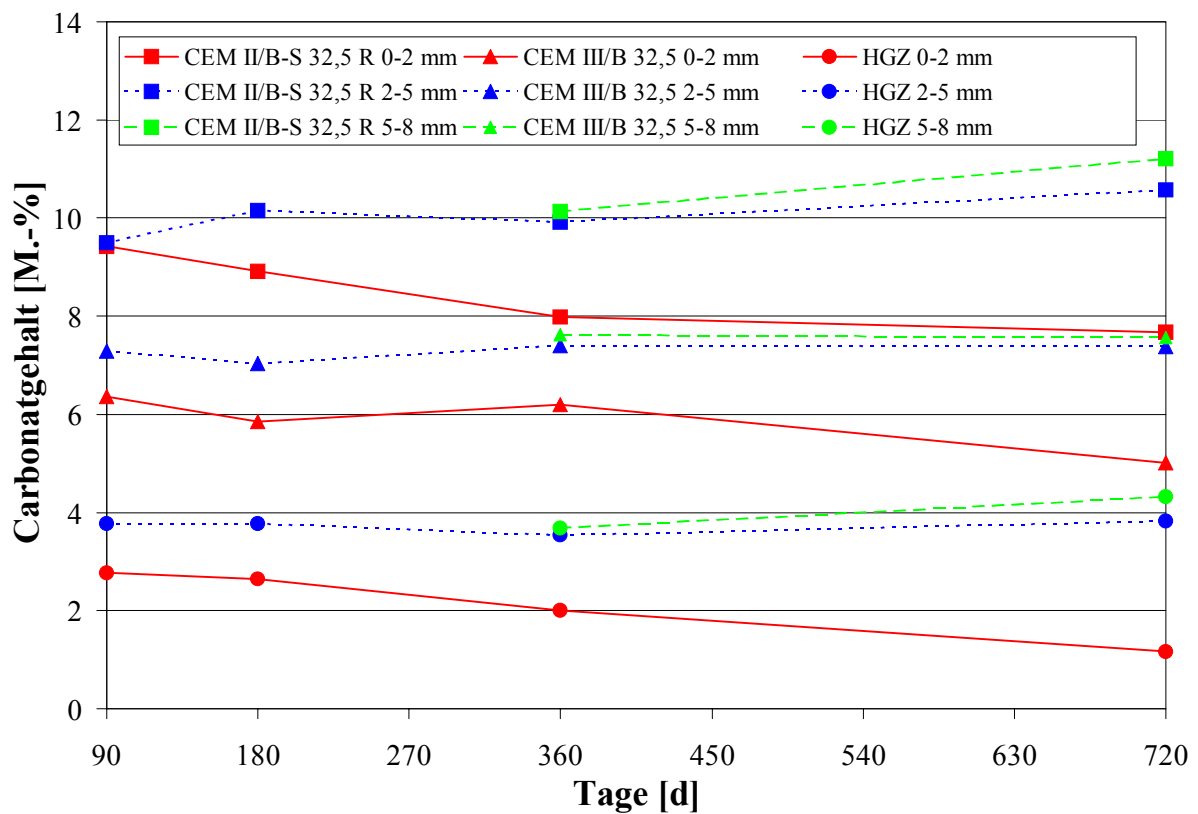


Abbildung 6.23: Carbonatgehalte der N-100-Proben der G2-Mörtel

G3-Mörtel: Diese Mörtel verhalten sich ähnlich wie die G2-Mörtel. Mit steigendem Anteil von hydraulischen Bestandteilen im Bindemittel geht der Carbonatgehalt im Mörtel zurück (Abbildung 6.24 und Abbildung 6.25). Die hohe Porosität der Mörtel bewirkt bei den T-0-Proben einen konstanten Carbonatgehalt schon nach 90d in allen Schichttiefen. Die regelmäßige Wässerung der N-0-Proben verzögert, im Gegensatz zu den G1- und G2-Mörteln, die Carbonatisierung der inneren Schichten dieser Mörtel nicht. Bedingt durch die hohe Porosität der Mörtel kann das Wasser nach einer Wässerung schnell verdunsten und somit die Diffusion von CO₂ nicht wesentlich behindern.

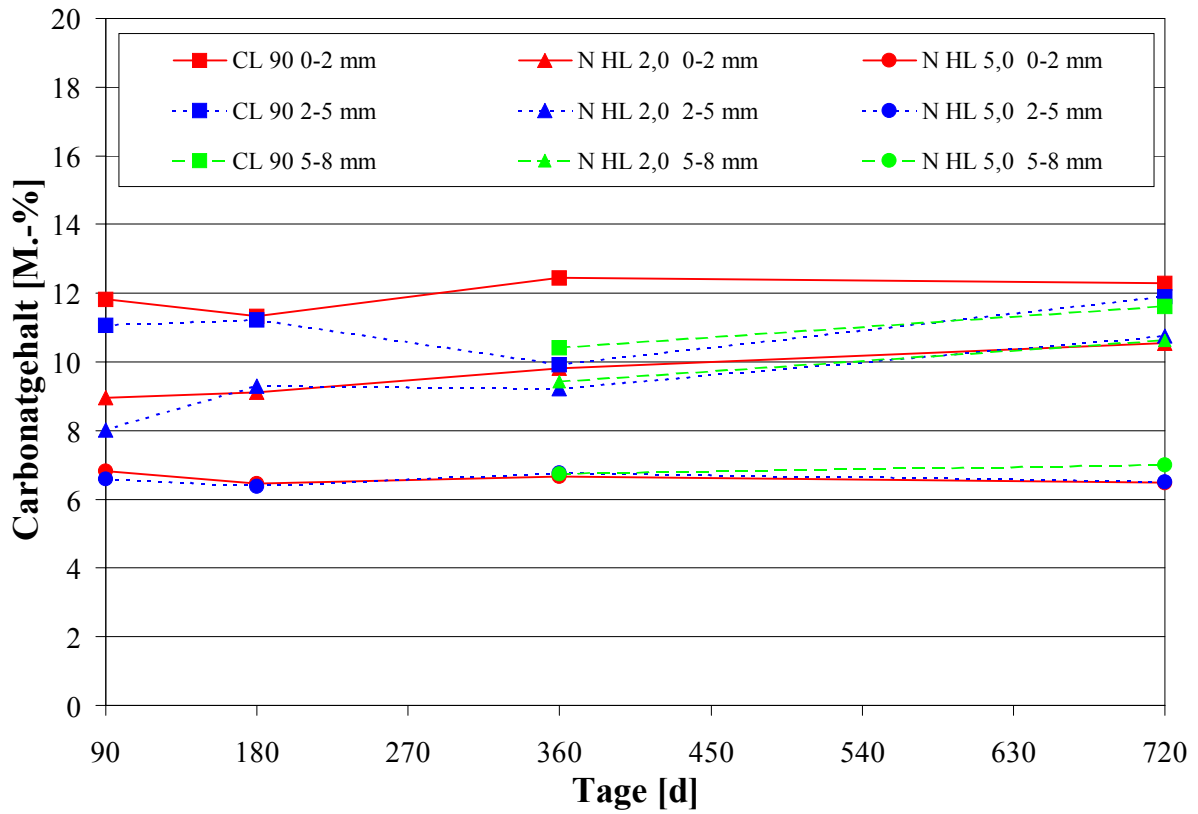


Abbildung 6.24: Carbonatgehalte der T-0-Proben der G3-Mörtel

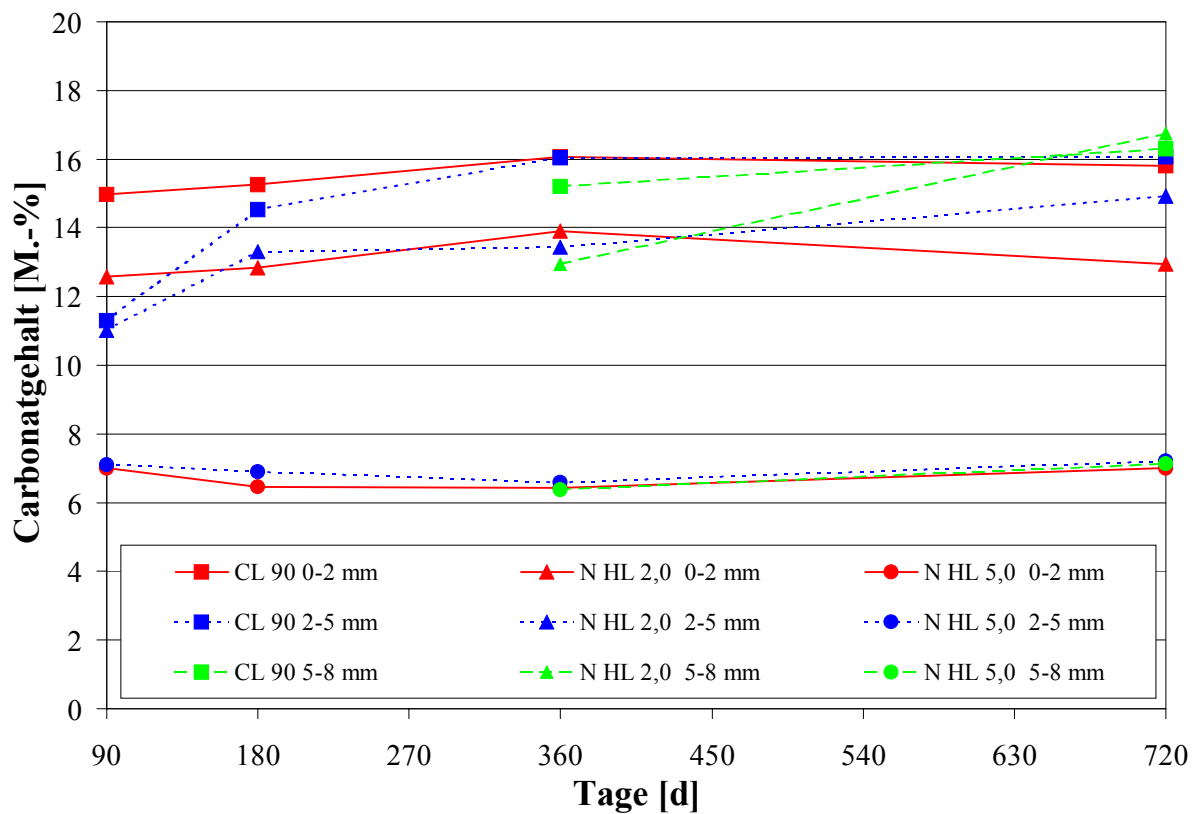


Abbildung 6.25: Carbonatgehalte der N-0-Proben der G3-Mörtel

Durch die Bewitterung sinken, im Vergleich zu den Nullproben, die Carbonatgehalte der äußeren 0-2 mm Schicht im Laufe der Zeit ab. Wie schon bei den G2-Mörteln ist hierfür wiederum die Sulfatisierung dieser Schicht verantwortlich (Abbildung 6.26 und Abbildung 6.27). Bei den T-100-Proben ist dieser Rückgang bei den CL 90-Mörteln nur gering, während er beim NHL 5,0 deutlich ausgeprägt ist. Durch die regelmäßige Wässerung wird der Carbonatverlust der äußeren Schichten verstärkt. Die 0-2 mm Schichten der 720d Proben weisen bis zu ca. 6 M.-% weniger an Carbonat auf als die inneren Schichten. Diese Ergebnisse stehen in gutem Einklang zu den Bestimmungen der Sulfatgehalte.

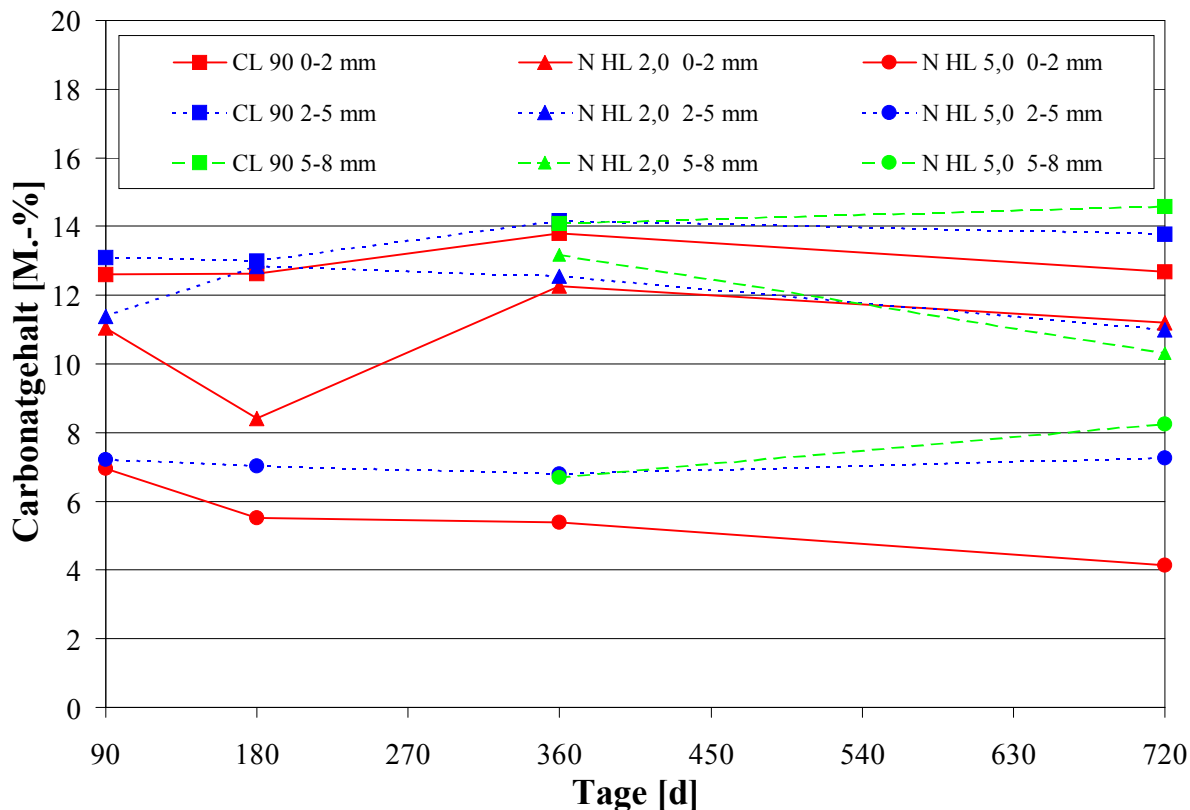


Abbildung 6.26: Carbonatgehalte der T-100-Proben der G3-Mörtel

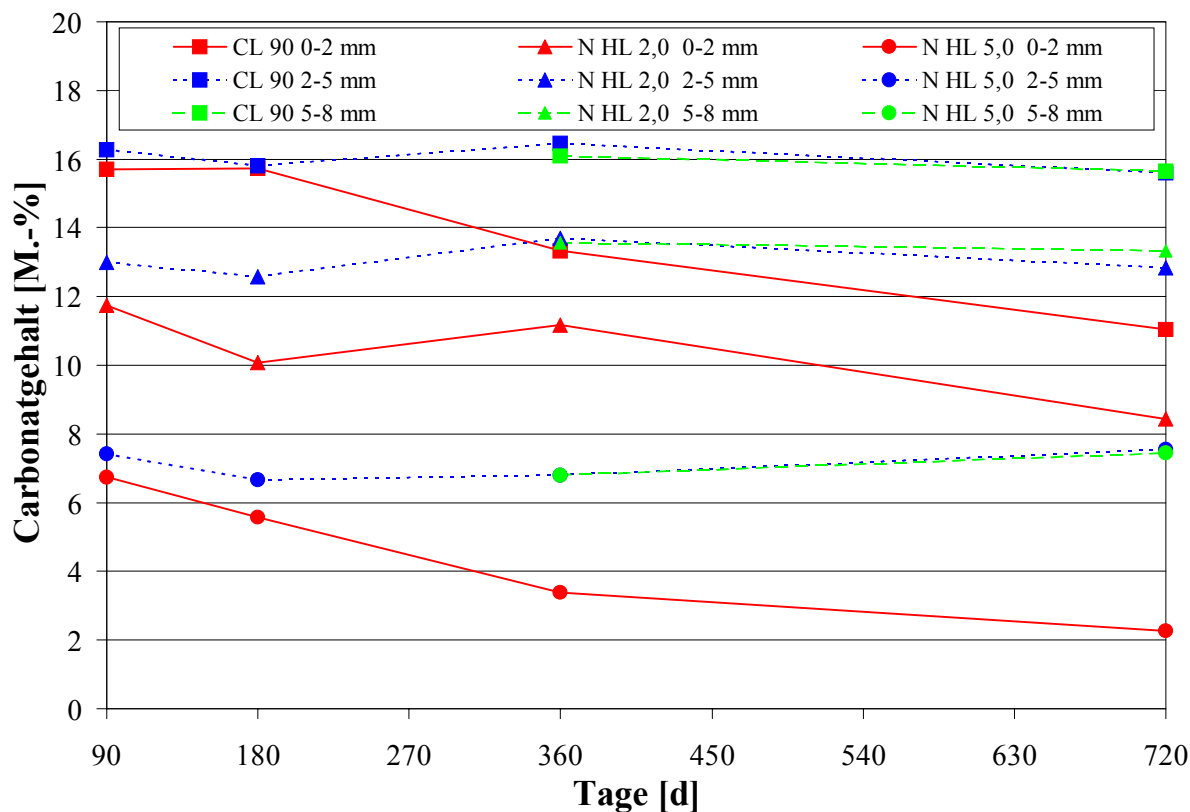


Abbildung 6.27: Carbonatgehalte der N-100-Proben der G3-Mörtel

6.3 Quecksilberdruckporosimetrie

Die 90d Proben des CEM III und des HGZ konnten nicht nach der unter 3.2 beschriebenen Methode präpariert werden und fehlen daher in den Ergebnissen der Hg-Druckporosimetrie. Bei dem Versuch, die Proben im Sägemikrotom zu sägen, wurde nach 1 bis 2 Schnitten das Sägeblatt zerstört. Eine Ursache hierfür könnte in dem amorphen, glasartigen Hüttensand liegen. Der Hüttensand setzt sich auf der diamantbeschichteten Oberfläche des Sägeblattes fest und verhindert ein effektives Sägen. Die Folge war ein extrem hoher Verschleiß. Für die Präparation der Proben der späteren Prüftermine wurden spezielle Sägeblätter mit einer größeren Diamantkörnung hergestellt (Hersteller: Ernst Winter & Sohn Diamantwerkzeuge GmbH & Co., Norderstedt). Damit war es mit einem vertretbaren Verschleiß möglich, auch die Proben des CEM III und des HGZ zu präparieren.

Die 516 gemessenen Proben (ohne Vergleichs- bzw. Wiederholungsmessungen) ergeben ca. 75000 einzelne Datenpunkte und alleine über 2000 Porositäten (Σ GesP, LP, KP, GP). Aufgrund dieser hohen Datenmenge kann im Rahmen dieser Arbeit nur eine zusammengefaßte Auswertung der Hg-Druckporosimetrie vorgenommen werden, die sich auf die Auswertung der Porengehalte (GesP, KP, GP) beschränkt. Aufgrund der unterschiedlichen Porengehalte sind die Abbildungen der GesP, der KP und der GP jeweils unterschiedlich skaliert.

G1-Mörtel: Die Mörtel dieser Gruppe unterscheiden sich bezüglich der Bindemittel nur sehr wenig in den einzelnen Porositäten. Prinzipiell liegen die Porositäten des CEM I, weiß geringfügig niedriger als die der beiden anderen Bindemittel.

Erwartungsgemäß wird die GesP bei den T-Proben verringert (Abbildung 6.28 und Abbildung 6.29). Diese Verringerung beruht hauptsächlich auf einem Rückgang der KP-Gehalte. Die LP-Gehalte bleiben in allen ST der G1-Mörtel über den gesamten Untersuchungszeitraum rel. konstant, anders bei den KP- und GP-Gehalten. Während die KP- und GP-Gehalte der 0-2 mm Schicht durch die Bewitterung kaum verändert werden, wird die 2-5 mm Schicht mäßig und die 5-8 mm Schicht stark beeinträchtigt (Abbildung 6.30 bis Abbildung 6.33). Die KP- und GP-Gehalte verändern sich dabei gegenläufig. Die KP-Gehalte gehen zurück, die GP-Gehalte nehmen zu. Die Summe (GesP-Gehalte) bleibt dabei konstant. Es liegt die Vermutung nahe, daß die durch die Bewitterung gebildeten Neubildungen (in der äußersten Schicht Calcit und Gips, in den inneren Schichten hauptsächlich Calcit) in den KP kristallisieren. Die KP werden dadurch verkleinert und meßtechnisch als GP erfaßt. Diese Effekte werden gut von der Rasterelektronenmikroskopie (s. 7.2) bestätigt.

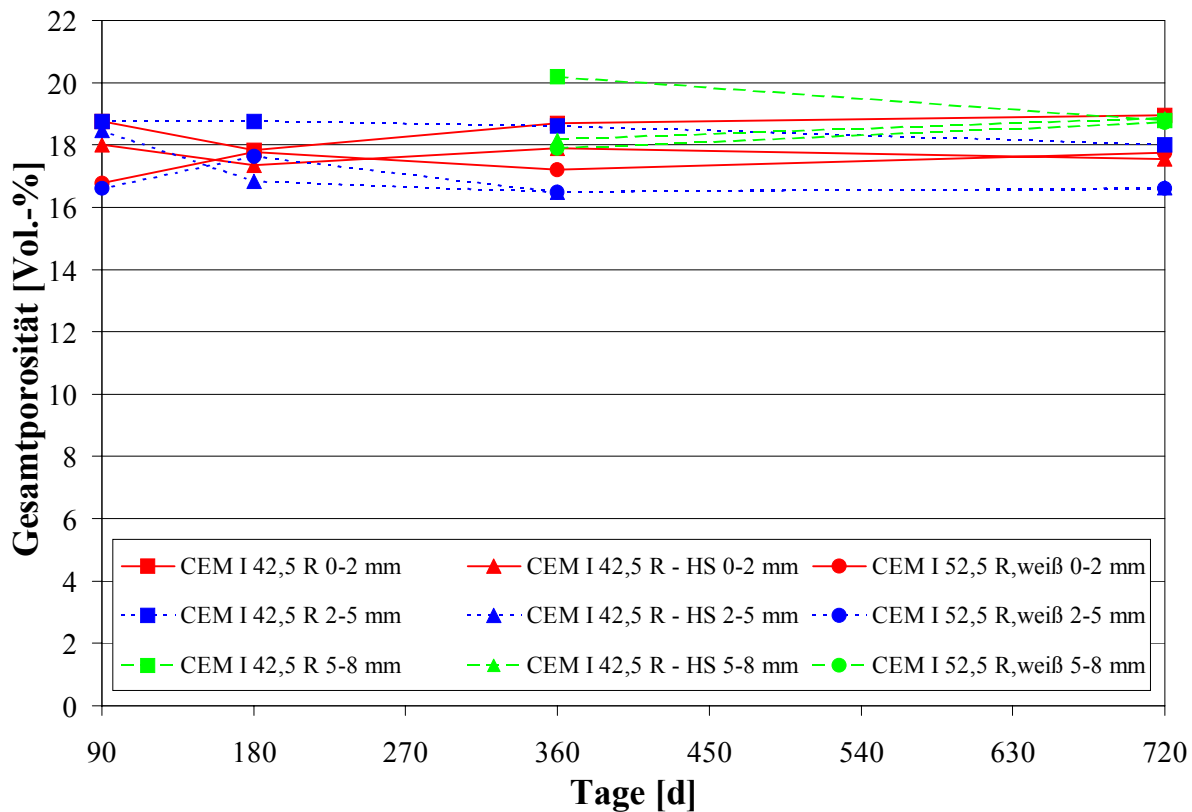


Abbildung 6.28: GesP-Gehalte der T-0-Proben der G1-Mörtel

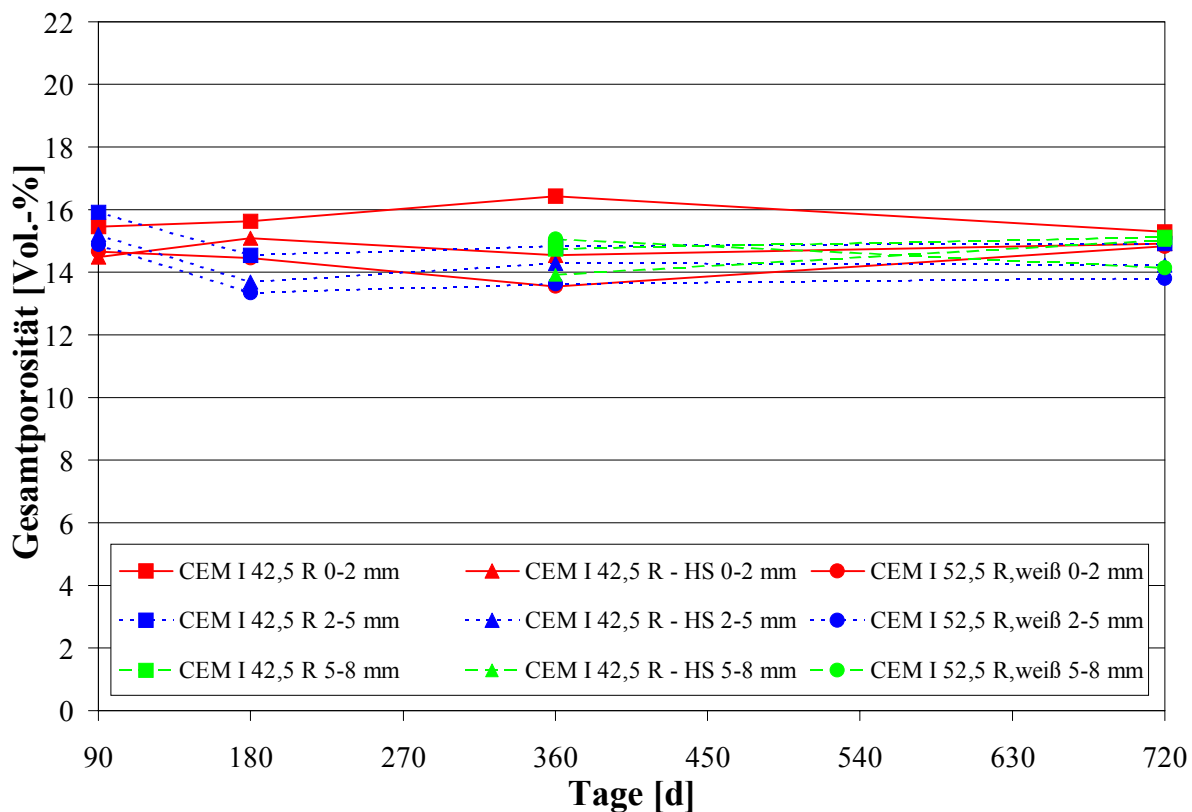


Abbildung 6.29: GesP-Gehalte der T-100-Proben der G1-Mörtel

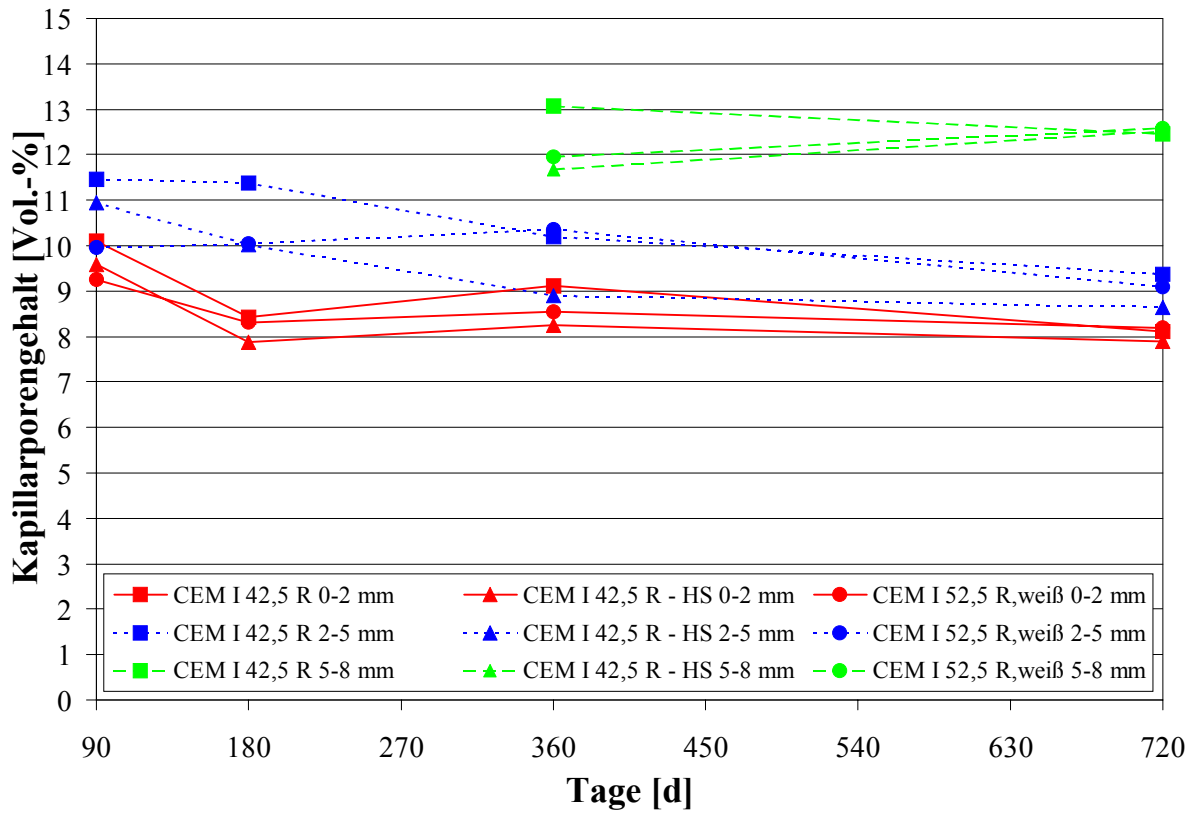


Abbildung 6.30: KP-Gehalte der T-0-Proben der G1-Mörtel

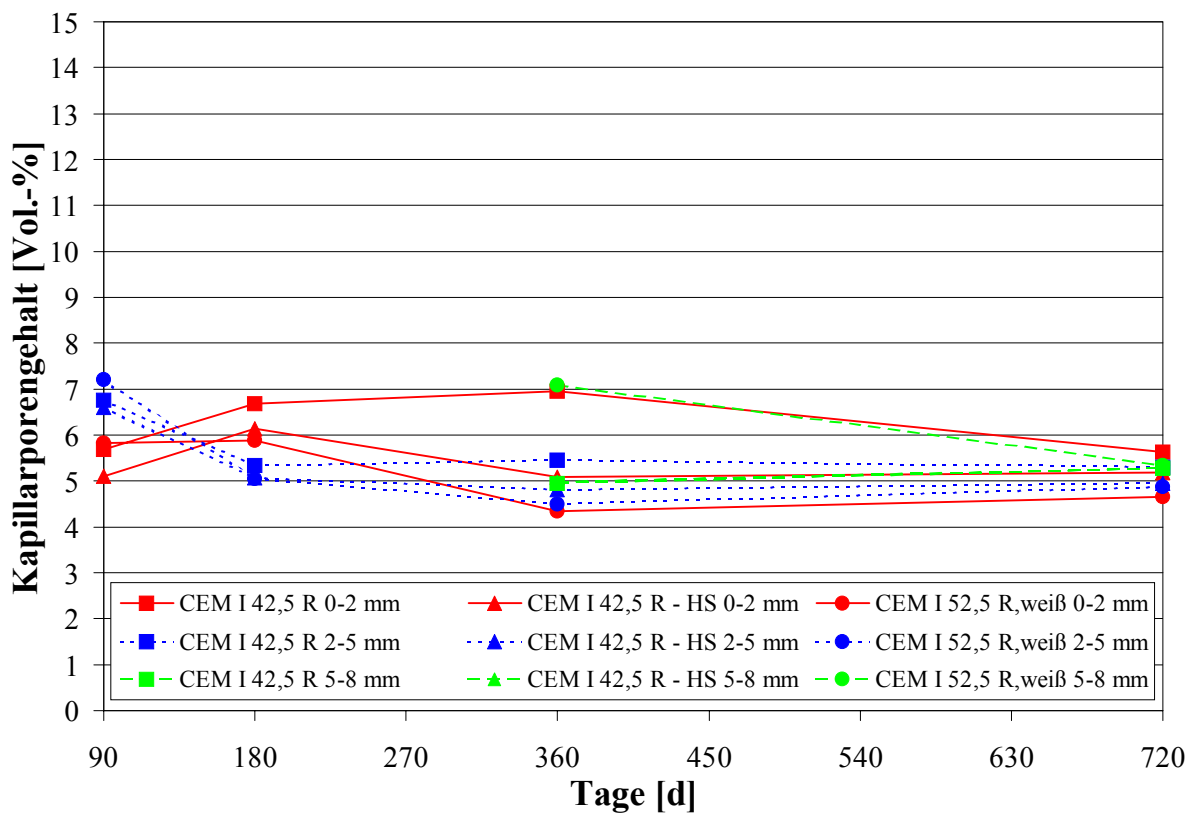


Abbildung 6.31: KP-Gehalte der T-100-Proben der G1-Mörtel

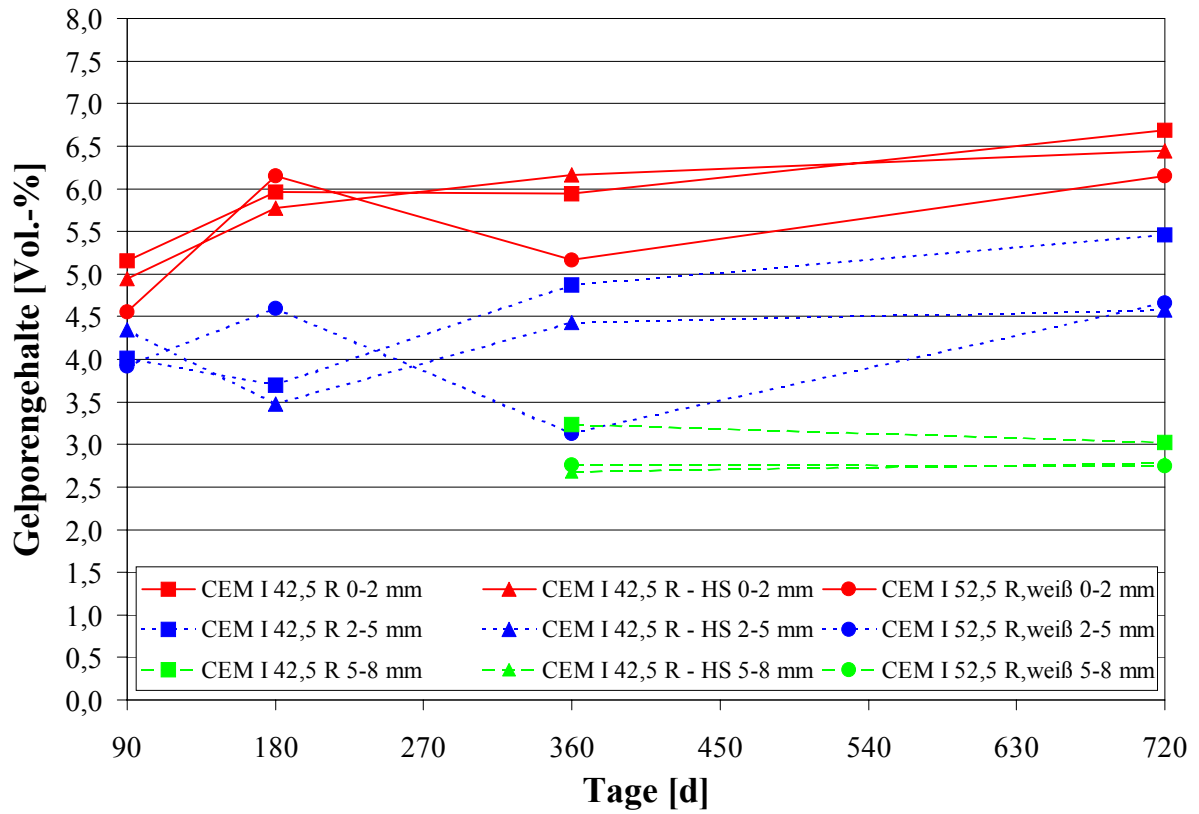


Abbildung 6.32: GP-Gehalte der T-0-Proben der G1-Mörtel

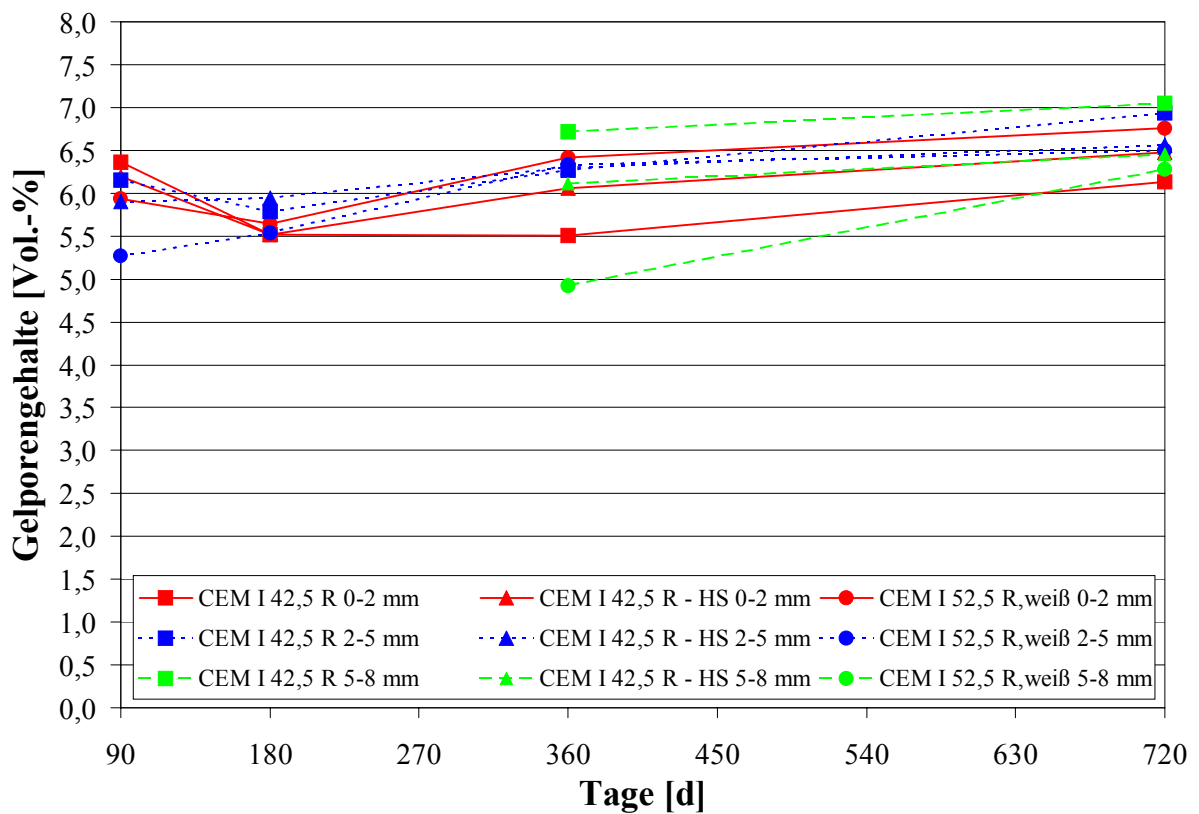


Abbildung 6.33: GP-Gehalte der T-100-Proben der G1-Mörtel

Die N-Proben verhalten sich bezüglich der Porositäten ähnlich wie die T-Proben, allerdings ist die Schwankungsbreite der einzelnen Porositäten größer. Diese Schwankungen werden dadurch verursacht, daß sich Lösungs- und Rekristallisationsprozesse mit Neubildungsprozessen überlagern. Im Vergleich zu den Nullproben gehen die GesP-Gehalte der N-100-Proben leicht zurück (Abbildung 6.34 und Abbildung 6.35), die LP-Gehalte bleiben rel. konstant. Die KP- und GP-Gehalte werden auch hier in den inneren Schichten durch Calcit-Bildungen in gegenläufiger Weise verändert (Abbildung 6.36 bis Abbildung 6.39). Wie schon bei den T-Proben sind wiederum KP meßtechnisch in GP umgewandelt worden.

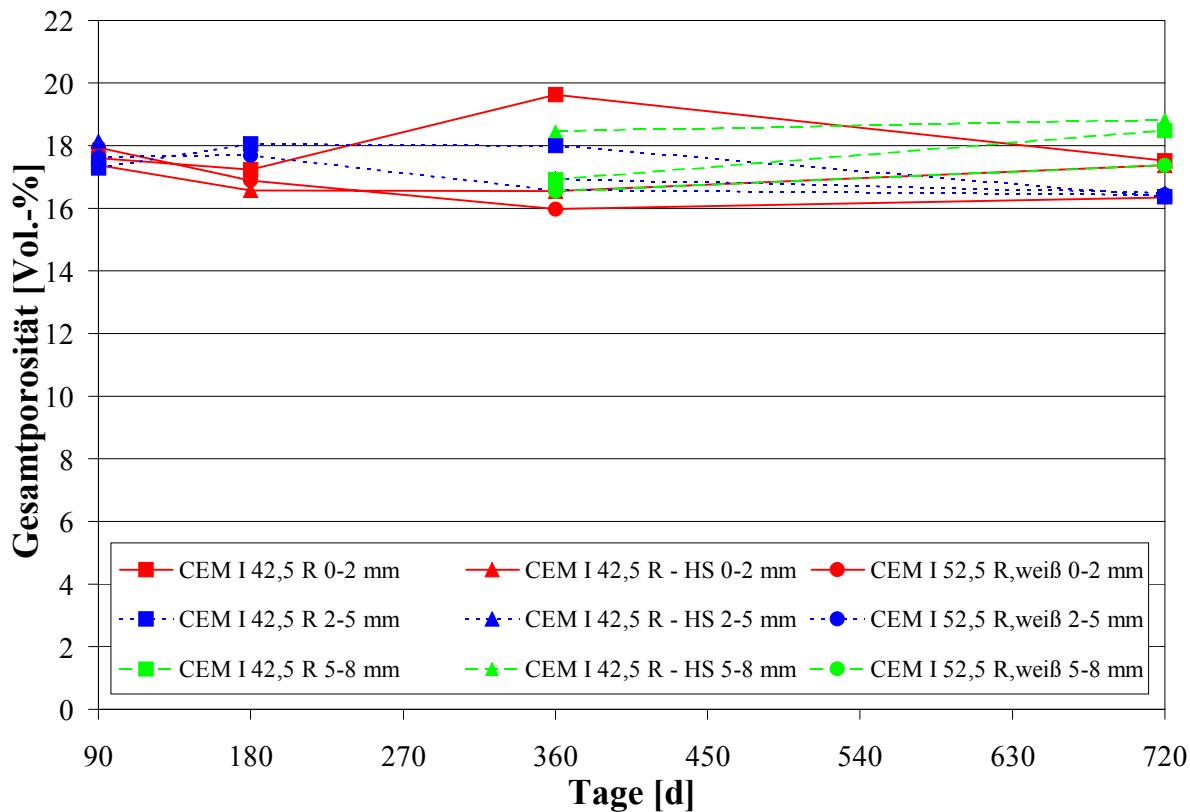


Abbildung 6.34: GesP-Gehalte der N-0-Proben der G1-Mörtel

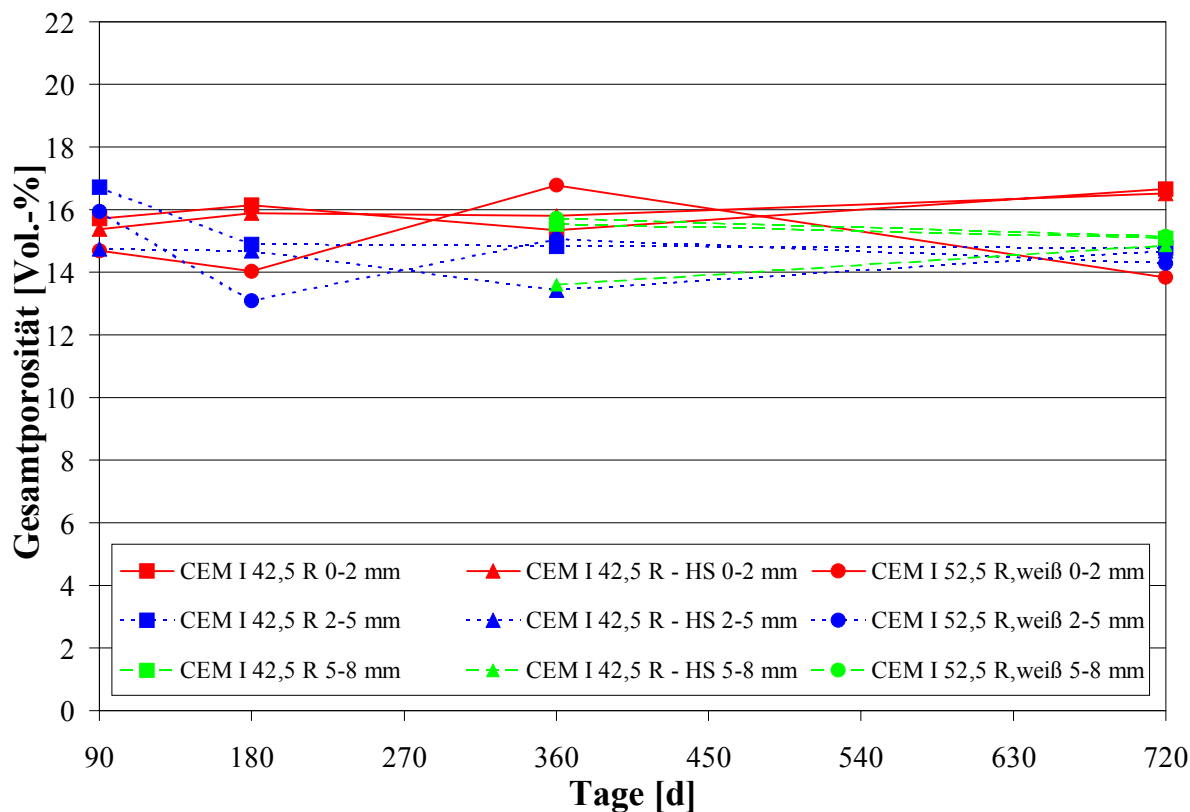


Abbildung 6.35: GesP-Gehalte der N-100-Proben der G1-Mörtel

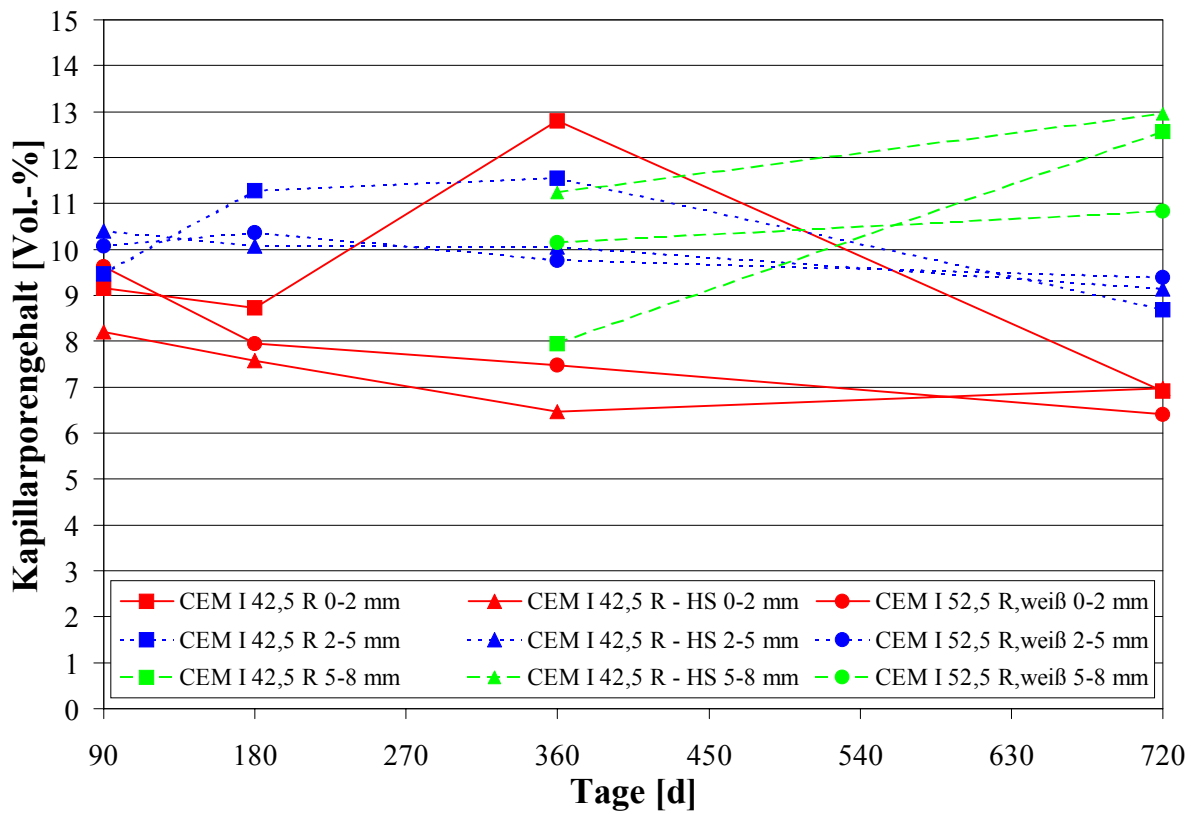


Abbildung 6.36: KP-Gehalte der N-0-Proben der G1-Mörtel

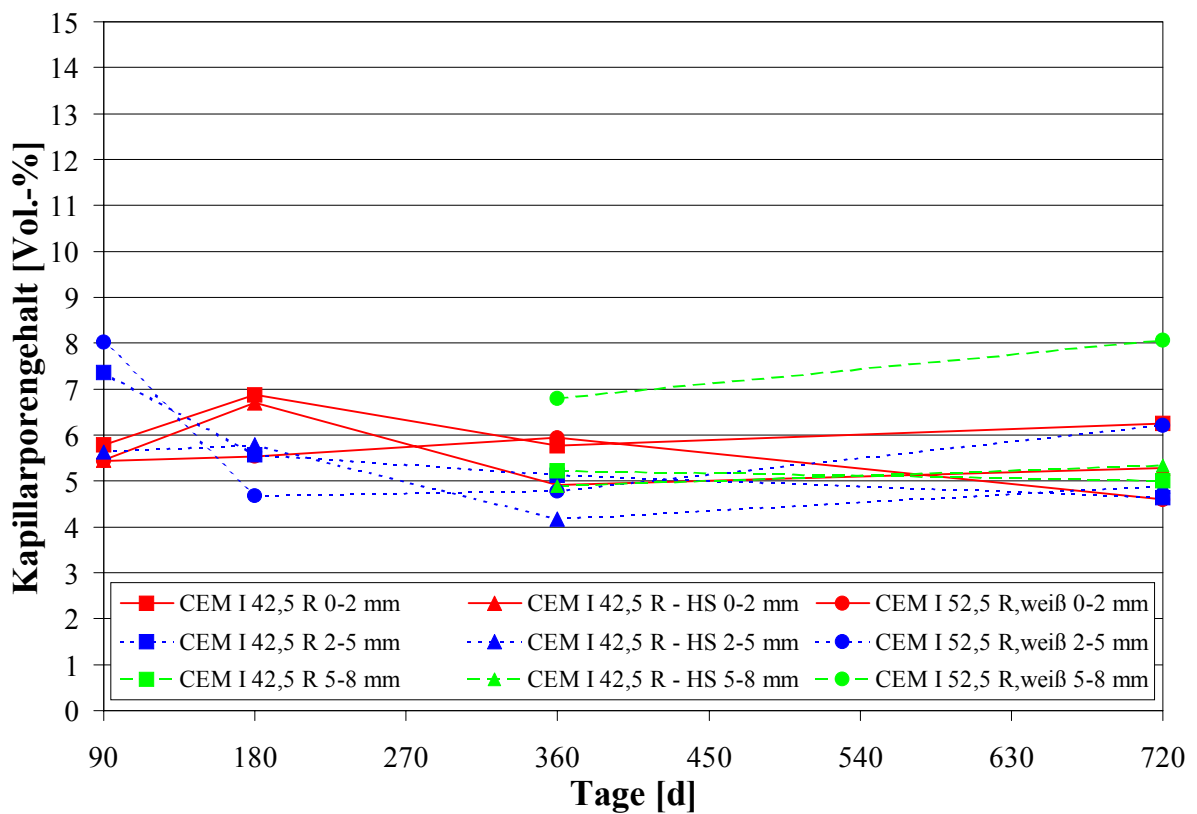


Abbildung 6.37: KP-Gehalte der N-100-Proben der G1-Mörtel

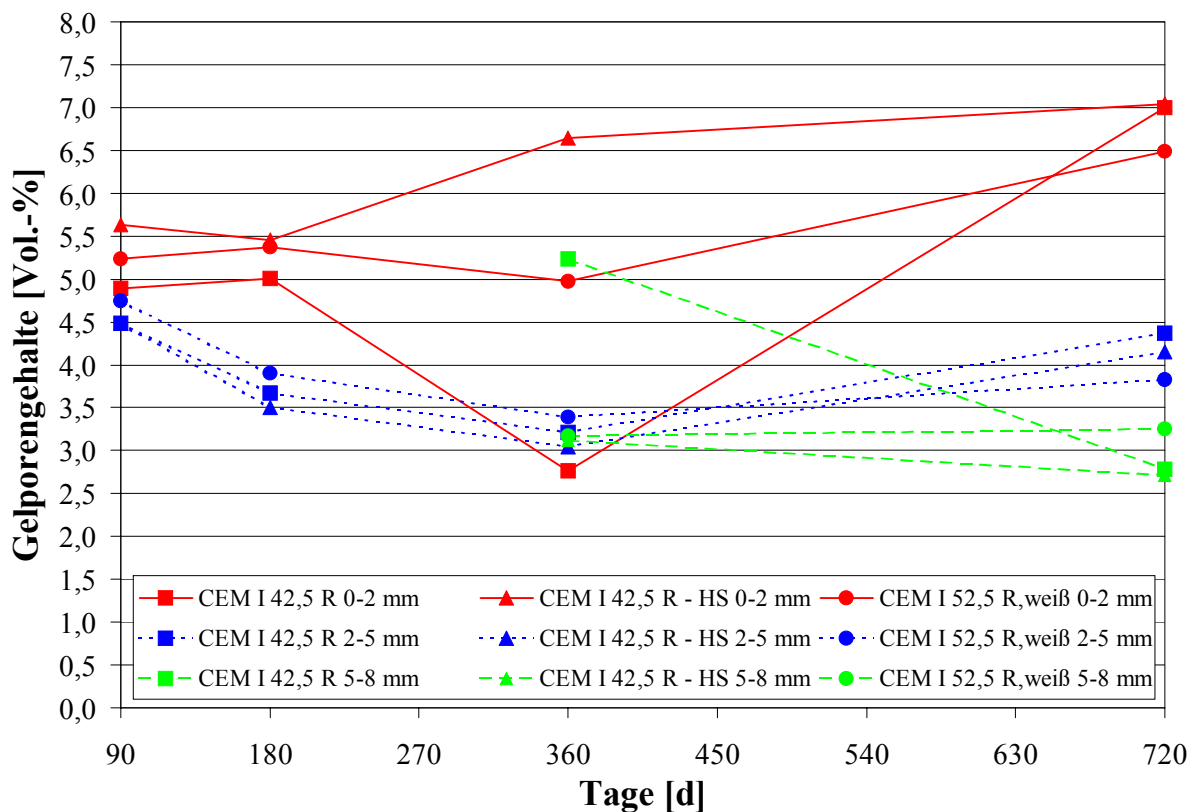


Abbildung 6.38: GP-Gehalte der N-0-Proben der G1-Mörtel

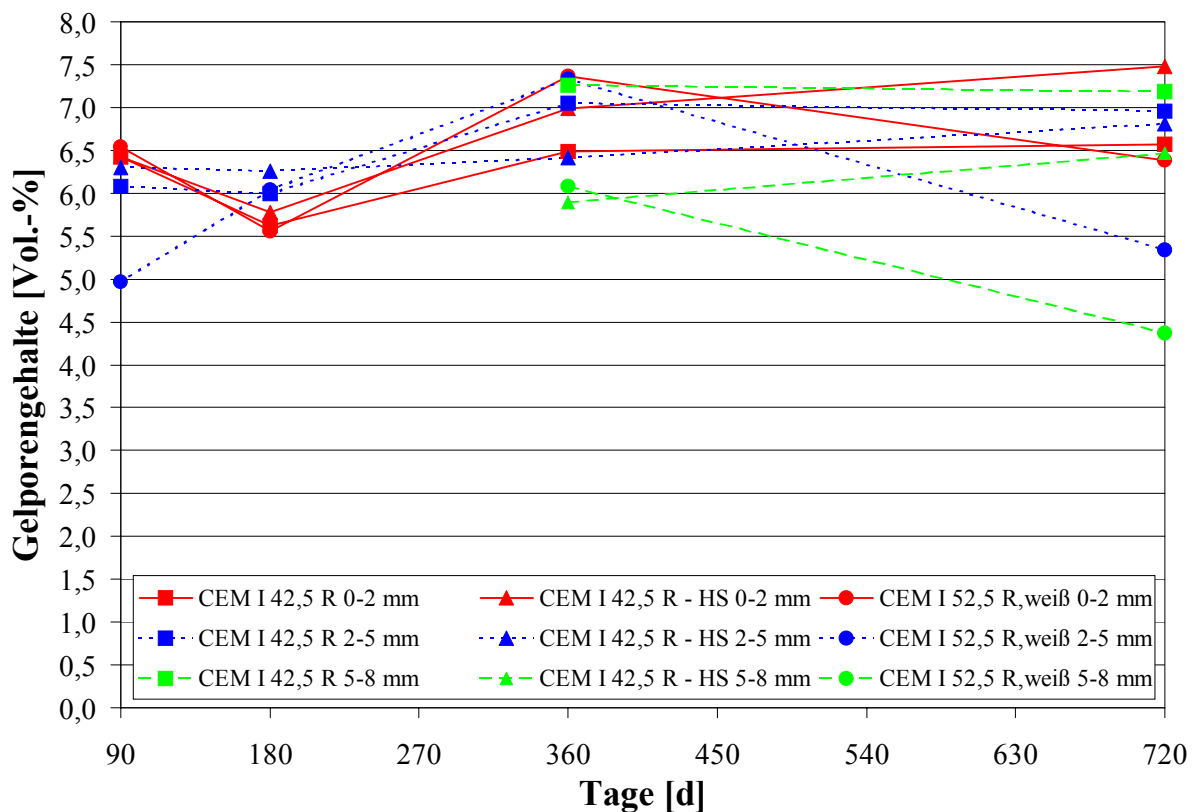


Abbildung 6.39: GP-Gehalte der N-100-Proben der G1-Mörtel

G2-Mörtel: Im Gegensatz zu den G1-Mörteln verhalten sich hier die verschiedenen Bindemittel unterschiedlich. Der HÜS-Anteil im CEM II und CEM III bewirkt eine Unempfindlichkeit der Porengehalte durch die Bewitterung. Die GesP der T-100-Proben liegen etwas unter denen der T-0-Proben (Abbildung 6.40 und Abbildung 6.41). Dabei ist dieser Rückgang bei dem CEM II deutlicher als bei dem CEM III. Ein höherer HÜS-Gehalt bewirkt eine höhere Unempfindlichkeit. Die geringeren GesP-Gehalte verteilen sich recht gleichmäßig auf die LP-, KP- und GP-Gehalte. Interessanterweise zeigt sich im Laufe der Zeit bei den T-100-Proben des CEM II ein leichter Anstieg der GesP-Gehalte.

Etwas stärker wird der HGZ durch die Bewitterung beeinflusst. Die GesP-Gehalte gehen, vor allem in der 0-2 mm Schicht, deutlich zurück. Diese äußere Schicht wird von Gips- und Calcit-Neubildungen beeinflusst. Die LP-Gehalte bleiben unverändert, die KP- und GP-Gehalte gehen leicht zurück (Abbildung 6.42 bis Abbildung 6.45).

Die Porositäten der N-Proben der G2-Mörtel werden sehr ähnlich beeinflusst. Die Unterschiede sind hier jedoch noch etwas geringer. Wie schon bei den G1-Mörteln überlagern sich die Neubildungen von Calcit bzw. Gips mit Lösungs- und Rekristallisationsprozessen. Zusammengefaßt läßt sich feststellen, daß durch den HÜS-Anteil der G2-Mörtel die Schadgase die Porenstruktur nur wenig beeinflussen.

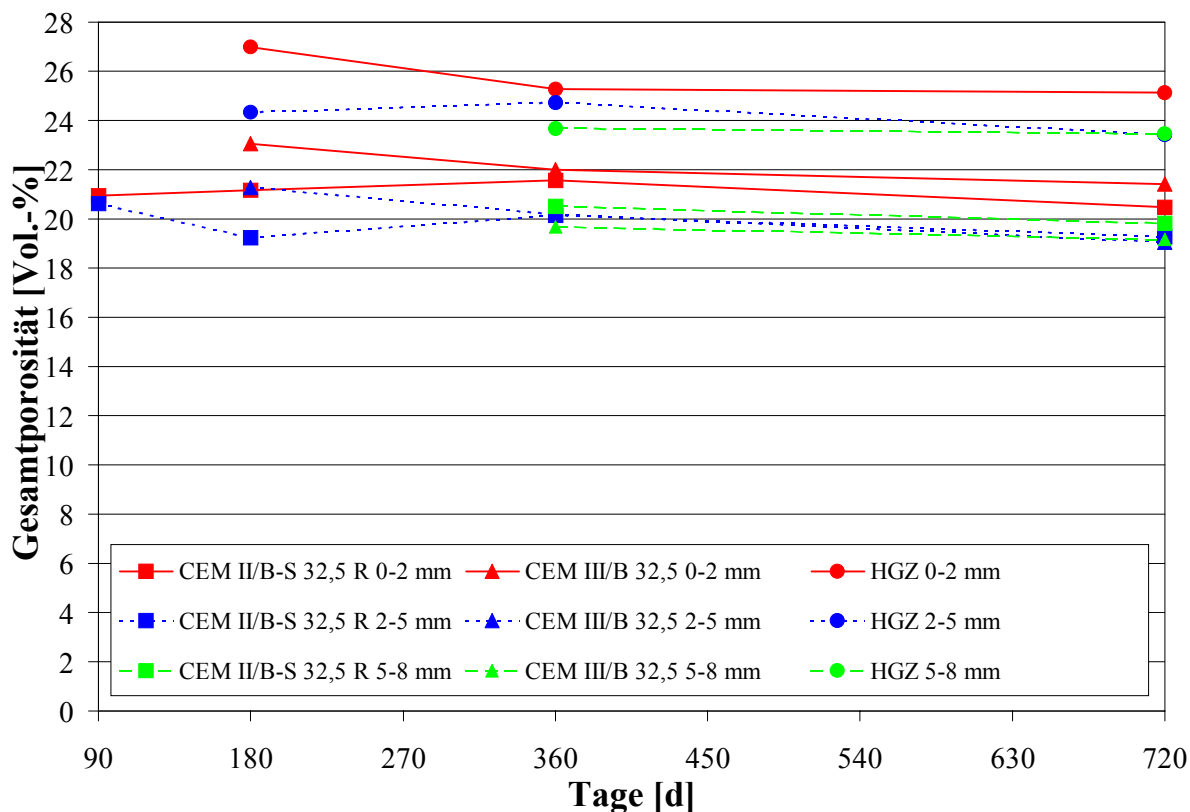


Abbildung 6.40: GesP-Gehalte der T-0-Proben der G2-Mörtel

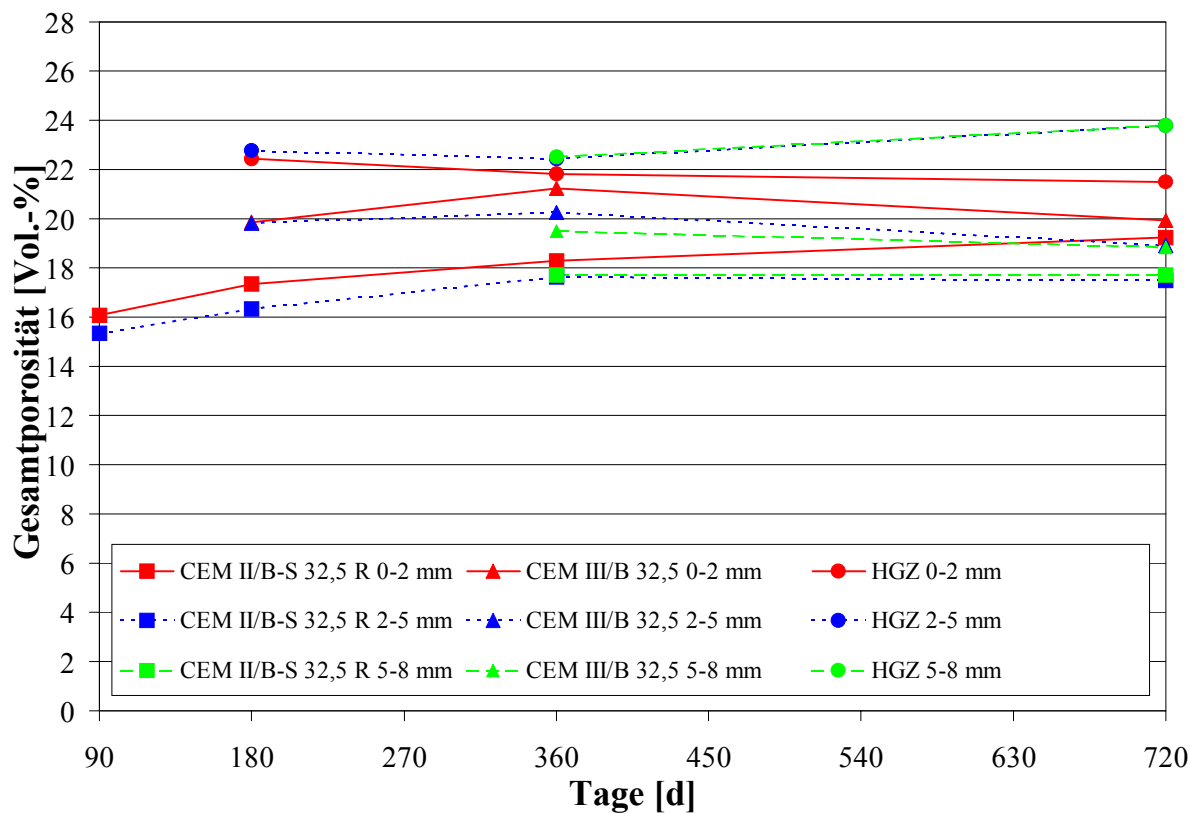


Abbildung 6.41: GesP-Gehalte der T-100-Proben der G2-Mörtel

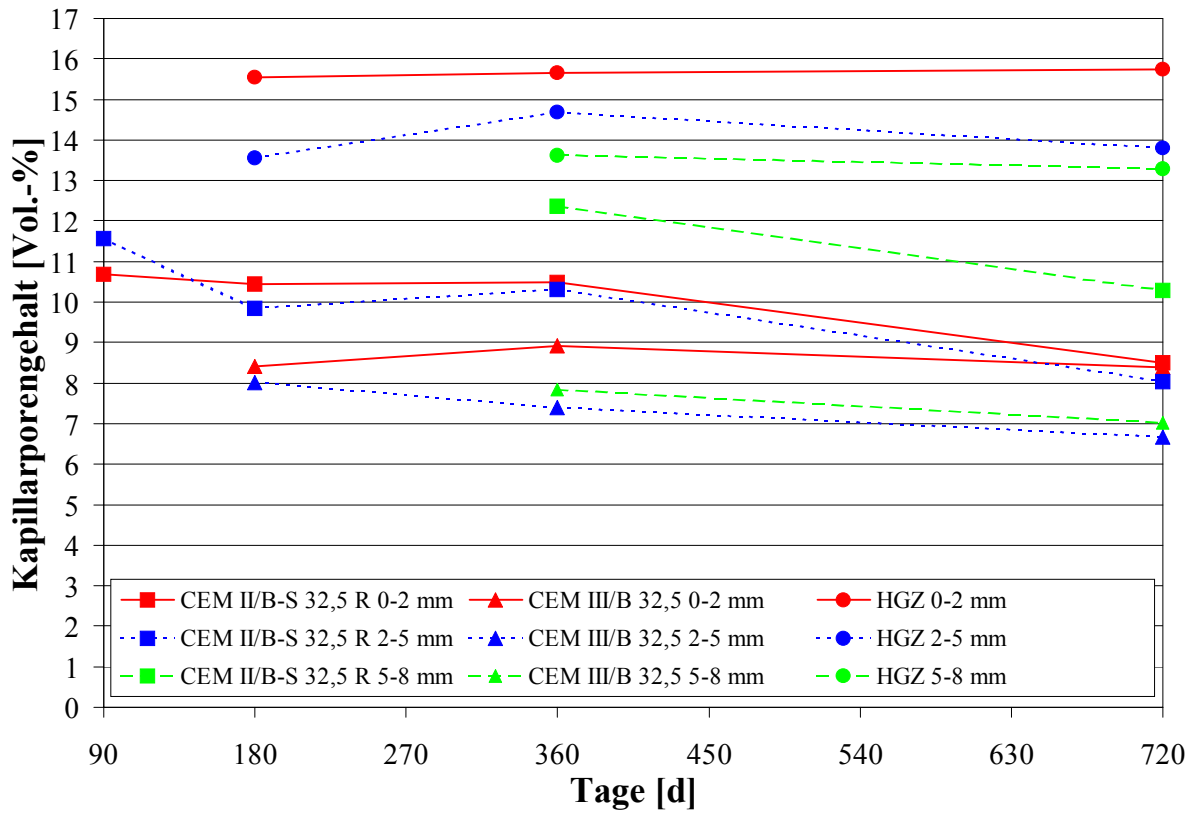


Abbildung 6.42: KP-Gehalte der T-0-Proben der G2-Mörtel

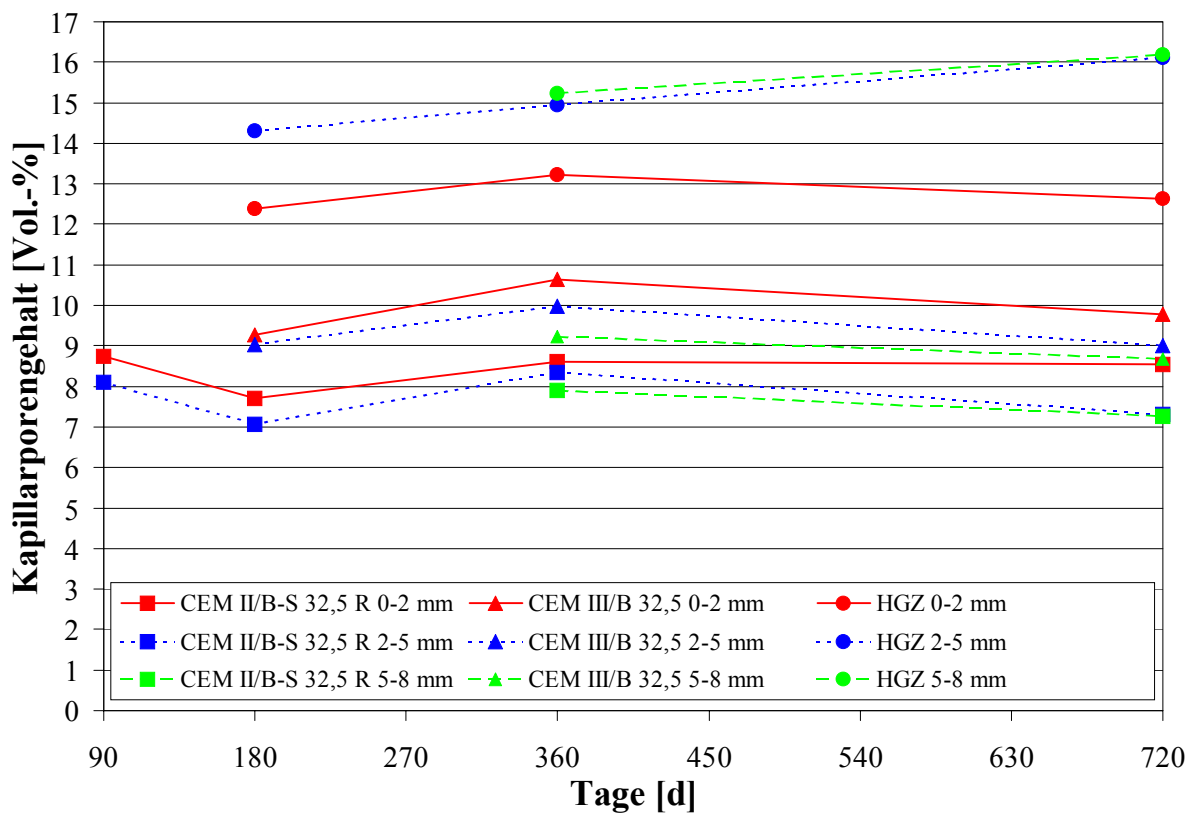


Abbildung 6.43: KP-Gehalte der T-100-Proben der G2-Mörtel

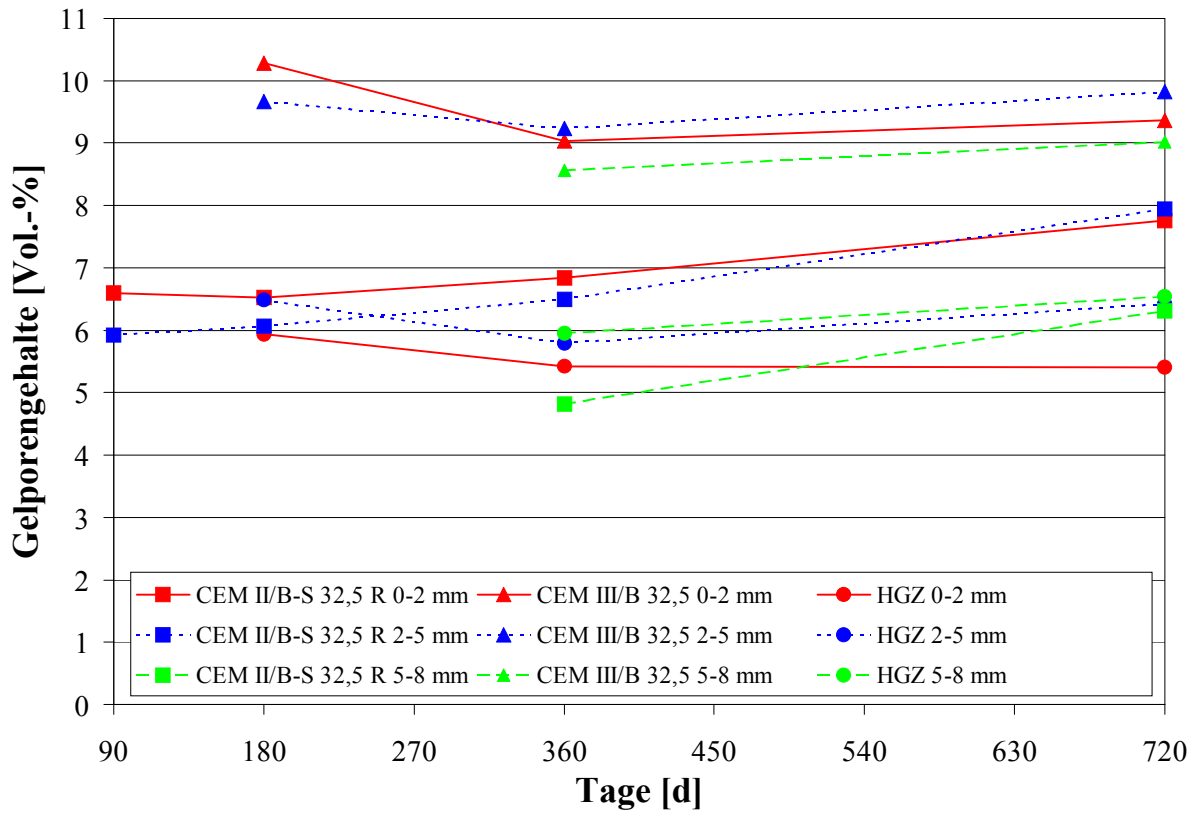


Abbildung 6.44: GP-Gehalte der T-0-Proben der G2-Mörtel

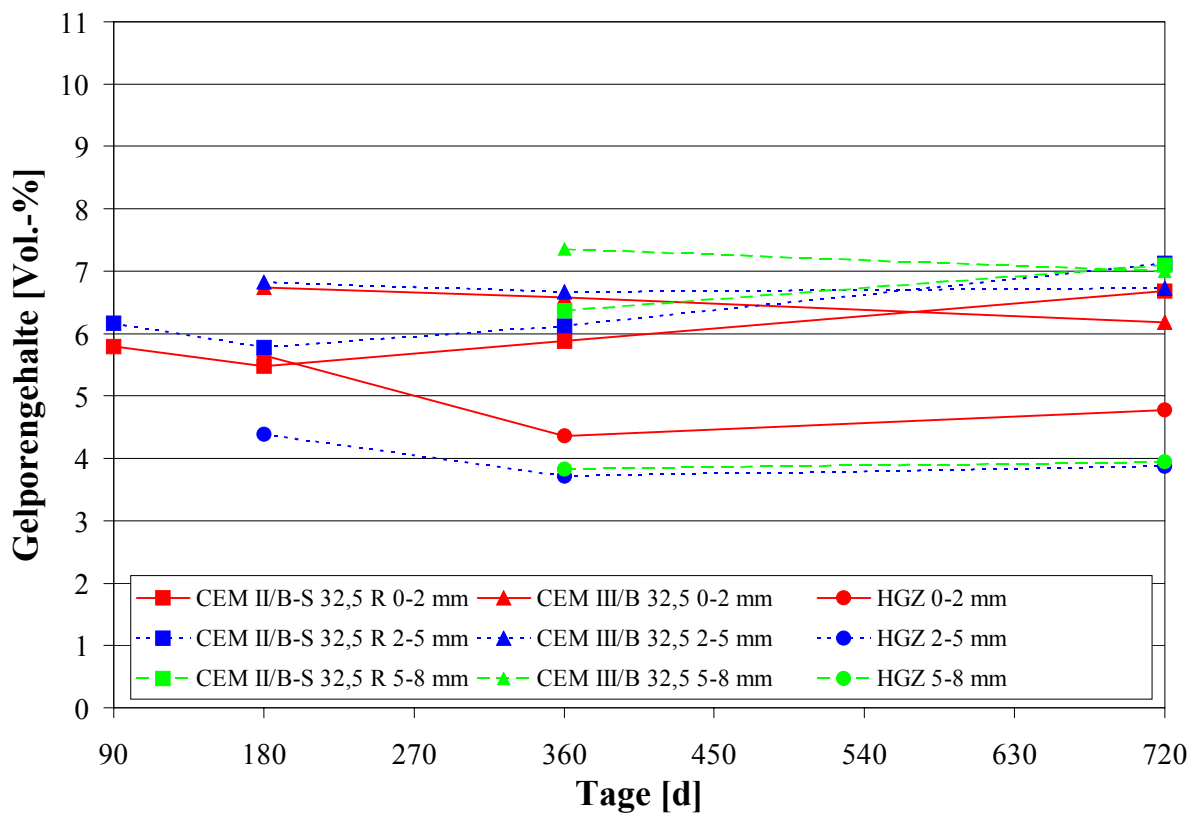


Abbildung 6.45: GP-Gehalte der T-100-Proben der G2-Mörtel

G3-Mörtel: Die Auswertung und Interpretation der quecksilberdruckporosimetrischen Untersuchungen gestaltet sich äußerst schwierig. Die ermittelten Porengehalte verhalten sich uneinheitlich und schwanken in weiten Grenzen. Eindeutige Abhängigkeiten zwischen Bewitterung, Dauer, Bindemittel und Lagerung lassen sich nicht erkennen. Allenfalls zeigen sich grobe Tendenzen. Die Porositäten gehen im Laufe der Zeit zurück, die bewitterten äußeren Schichten zeigen niedrigere Porengehalte als die unbewitterten Nullproben. Die starken Schwankungen haben zwei Ursachen:

Bei der Präparation der G1- und G2-Mörtel wurden komplette 2 bzw. 3 mm dicke Scheiben von den Prüfkörpern abgesägt. Dies war bei den G3-Mörteln nicht möglich. Durch die geringen Festigkeiten konnten nur mehr oder weniger grobe Pulver erzeugt werden, dessen Größtkorn bei ca. 1 – 2 mm lang. Für die Messungen wurden daher Pulverpenetrometer eingesetzt. Die in den Pulvern vorliegenden Haufwerksporen werden dann u.U. so klein, daß sie als LP mit erfaßt werden und die Ergebnisse verfälschen. Darüber hinaus traten mit den Pulverpenetrometern häufig eigenartige Fehlmessungen auf, bei denen das Hg-Intrusionsvolumen plötzlich rapide anstieg und im weiteren Verlauf der Messung wieder abfiel.

Daneben besitzen die G3-Mörtel einen recht hohen GesP-Gehalt von ca. 30 Vol.-% und mehr. Die mit Hilfe der IC ermittelten Sulfatgehalte von ca. 6 M.-% erniedrigen diese GesP-Gehalte nur gering. Die hohen Sulfatgehalte lassen sich außerdem nur in der 0-2 mm Schicht bestimmen; dort verringern sich tendenziell auch die Porositätsgehalte durch die Bewitterung. Ein Vergleich mit der offenen Porosität (s. 5.5) zeigt eine gute Übereinstimmung. Die Änderungen durch die Bewitterung sind gering, die offene Porosität liegt nur wenig unter der mit Hilfe der Hg-Druckporosimetrie bestimmten GesP.

7 ERGEBNISSE III – ERGÄNZENDE UNTERSUCHUNGEN

Zur Verringerung des experimentellen Arbeitsumfanges sind in diesem Kapitel nur ausgewählte Proben untersucht worden.

7.1 Röntgenbeugungsanalyse

Mit Hilfe der Röntgenbeugungsanalyse wurden zunächst alle 90d Proben untersucht. Damit konnte ein Ausgangszustand festgelegt werden. Dabei zeigte sich, daß in alle Mörtelproben neben Quarz nur Calcit und Portlandit nachweisbar waren. Dabei muß berücksichtigt werden, daß die Nachweisgrenze der verschiedenen möglichen Verbindungen bei ca. 1 bis 3 M.-% liegt. Von den späteren Prüfterminen sind dann neben den abgeschabten Oberflächen (s.a. 3.3.1) vorwiegend die T/N-100- und die Nullproben untersucht worden. Gut sichtbare Veränderungen konnten jedoch erst bei den 720d Proben im Röntgenbeugungsdiagramm nachgewiesen werden. Auffällig war auch, daß nur die 0-2 mm Schicht diese Veränderungen auswies. Die tieferen Schichten waren im Vergleich zu den 90d Proben unverändert.

Die Abbildung 7.1 zeigt die 0-2 mm Schicht der T-100-Proben nach 720d. Die Zuordnung der Röntgenreflexe zeigt neben den Gipsneubildungen interessanter Weise auch Anhydrit bzw. Portlandit. Die Bildung von Anhydrit ist durch die Aggressivität des SO_2 -Gases zu erklären. Wahrscheinlich entwässert das SO_2 -Gas den gebildeten oder vorhandenen Gips. Untermuert wird diese Vermutung durch die direkte Bewitterung von reinem Gips. Dazu wurde Gips mit wenig Wasser aufgeschlämmt und für 28 Tage in der 100-fach belasteten Kammer bewittert. Nach ca. 8-10 Tagen war das Wasser verdunstet. Eine nach 14 Tagen entnommene Probe zeigte im Röntgendiffraktogramm ein Gemisch aus Gips und Anhydrit. Nach 28 Tagen konnte nur noch Anhydrit nachgewiesen werden (Abbildung 7.2). Die Anwesenheit von Portlandit ist nur schwer zu erklären. Vorstellbar ist ein nur oberflächlicher Angriff von CO_2 bzw. SO_2 auf größere Portlanditkristalle. Eine Schicht aus Calcit bzw. Gips ummantelt dann den Portlandit und schützt ihn vor weiteren Angriffen. Durch die durchgängig trockene Lagerung bleibt die Schutzschicht erhalten. Die N-100-Proben zeigen neben Quarz, Calcit und Gips keine weiteren röntgenographisch nachweisbaren Bestandteile. Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen (KNÖFEL 1992) konnte bei der 100-fachen Belastung (3 Vol.-% CO_2) kein Vaterit nachgewiesen werden.



Abbildung 7.1: Röntgenbeugungsdiagramme der T-100 0-2 mm Proben nach 720d

G: Gips A: Anhydrit P: Portlandit C: Calcit Q: Quarz

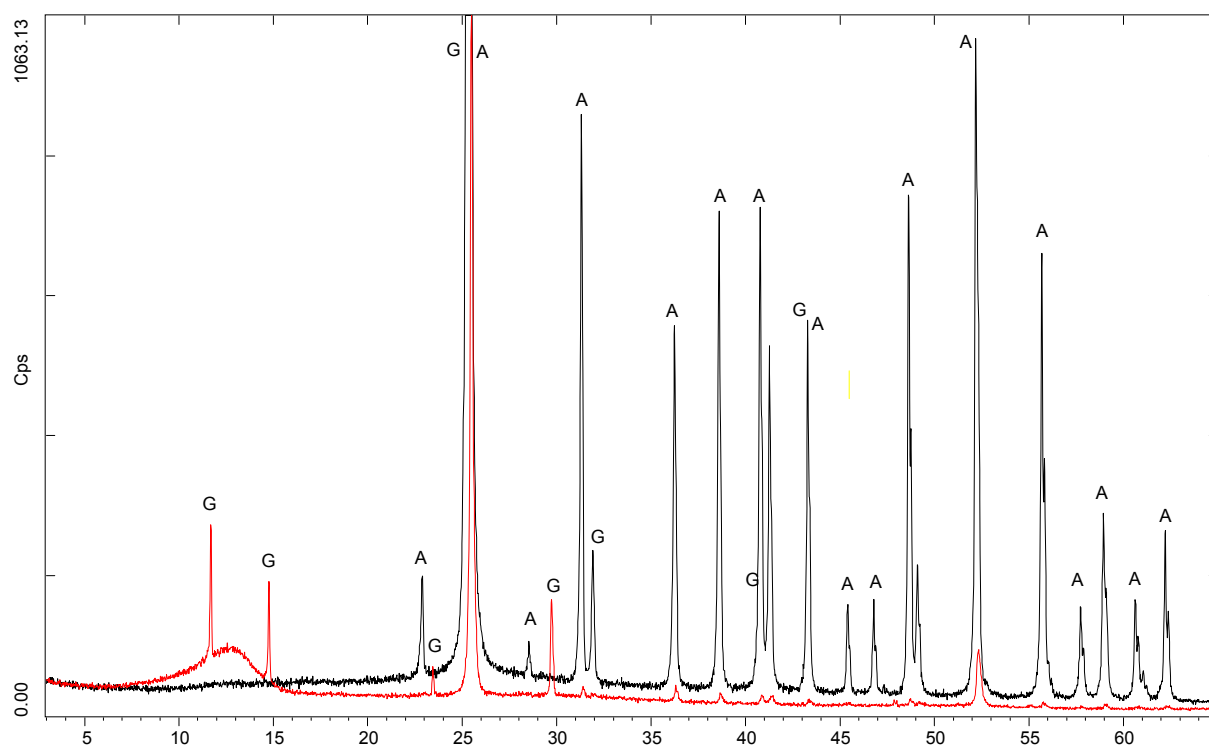


Abbildung 7.2: Röntgenbeugungsdiagramm von bewittertem Gips

Rot: nach 14 Tagen Bewitterung

G: Gips bzw. Calciumsulfathydrat

Schwarz: nach 28 Tagen Bewitterung

A: Anhydrit

Bei der Untersuchung der abgeschabten Oberflächen konnte neben den oben beschriebenen Verbindungen ein weiteres Mineral, Hannebachit (CaSO_3) nachgewiesen werden (Abbildung 7.3). Der Hannebachit zeigte sich jedoch nur bei den T-100-Proben. Der röntgenographische Nachweis von Sulfit untermauert die Vermutung, daß das SO_2 zunächst mit den Mörtelbestandteilen zum CaSO_3 reagiert und erst anschließend zum Gips oxidiert wird.

Neben dem Gips (s.o) wurden noch weitere, reine Salze in wässriger Lösung bzw. Aufschlämmung untersucht. Reiner Calcit wurde dabei ausschließlich in Gips umgewandelt. Die Bildung von Anhydrit konnte nicht beobachtet werden. Die Bewitterung von reinem Calciumnitrat ergab nach 28 Tagen vorwiegend Gips. Das Nitrat konnte nicht mehr nachgewiesen werden. Diese Beobachtung erklärt u.a. die niedrigen Nitrat/Nitrit Gehalte in den Mörteln. Wird durch das NO_x im Mörtel Nitrit bzw. Nitrat gebildet, so kann dieses durch das SO_2 in z.B. Gips umgewandelt werden. Die Nitrit/Nitrat Gehalte gehen zurück.

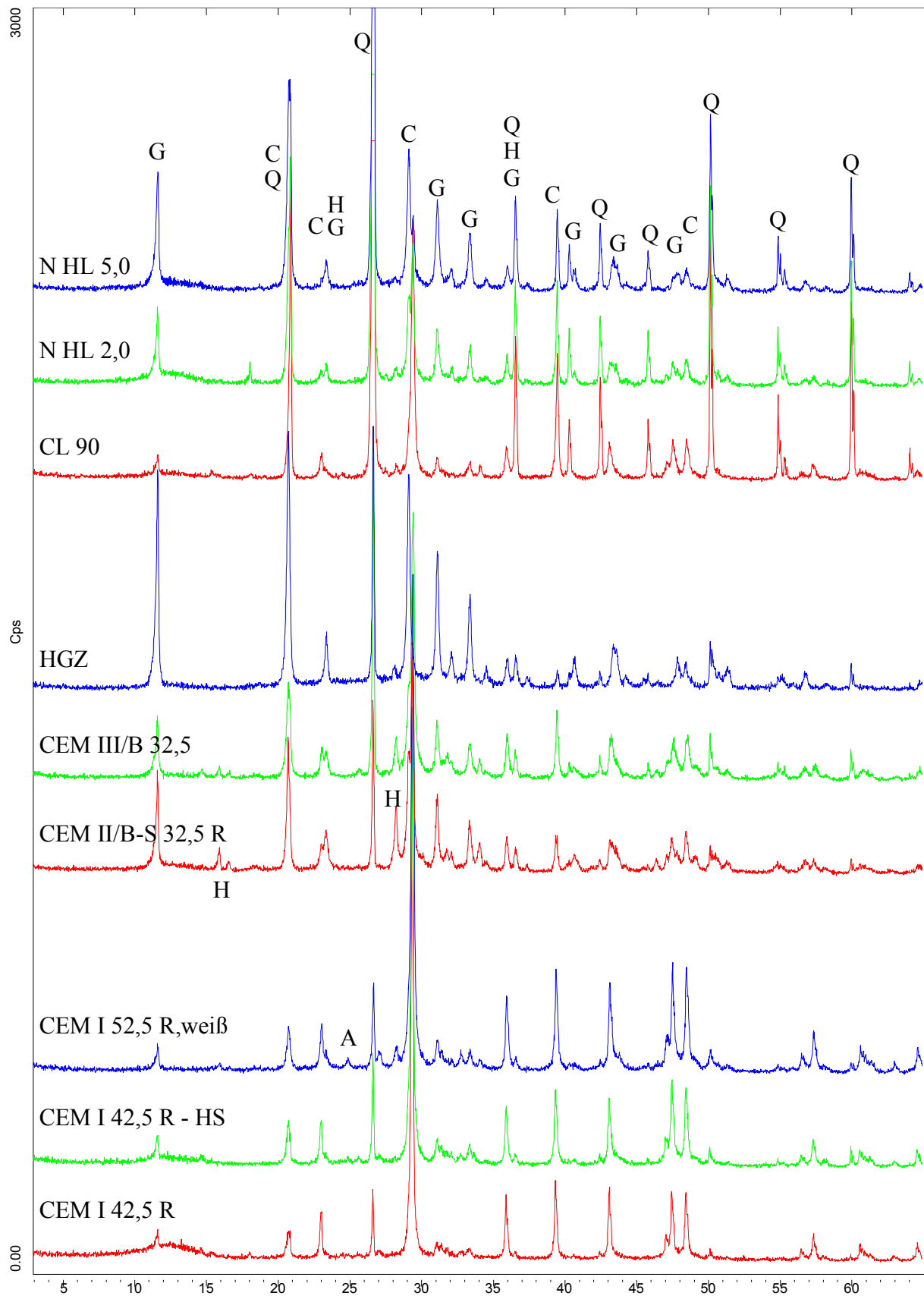


Abbildung 7.3: Röntgenbeugungsdiagramme der abgeschabten Oberflächen der T-100-Proben nach 720d

G: Gips A: Anhydrit H: Hannebachit C: Calcit Q: Quarz

7.2 Rasterelektronenmikroskopie

Wie schon bei der Röntgenbeugungsanalyse wurden auch mit Hilfe der REM über den gesamten Untersuchungszeitraum immer wieder ausgewählte Proben untersucht. Die deutlichsten Veränderungen zeigten dabei, wie erwartet, die 720d Proben.

Die Bewitterung hat bei keiner Probe Schäden in Form von Rissen oder Abplatzungen hervorgerufen. Außerdem zeigen auch die übrigen Untersuchungsmethoden vorwiegend eine Beeinflussung in der oberen Schicht. Daher wurden vorzugsweise die Oberflächen bzw. die oberflächennahen Zonen untersucht.

Rasterelektronenmikroskopisch wurden kaum Unterschiede zwischen den verschiedenen Bindemitteln festgestellt. Stellvertretend für die anderen Proben werden daher hier die Mörtel mit CEM I, weiß und CL 90 als Bindemittel nach 720d diskutiert.

Die Abbildung 7.4 zeigt den CEM I, weiß T-100 mit Blick auf die Oberfläche. Im linken Bildteil ist gut eine dichte Schicht aus Kristalliten zu erkennen, die auf die Oberfläche aufgewachsen ist. Die darunterliegende Bindemittelmatrix (rechter Bildteil) ist rissfrei, auch der Zuschlag (dunkle Bereiche) ist fest in der Matrix integriert. Die Abbildung 7.5 zeigt die gleiche Probe mit Blick auf eine Bruchfläche senkrecht zur Oberfläche. Die EDX-Untersuchung zeigte eine Besonderheit. Die direkte Oberfläche ist in einem Bereich von ca. 5 - 10 μm sehr schwefelarm, zeigt aber viel Kohlenstoff. Die darunter liegenden Zonen sind aber schwefelreich. Dieser Befund zeigte sich bei vielen der untersuchten Proben. Auf der Oberfläche scheint sich ein dünner „Calcitrassen“ gebildet zu haben; erst darunter befinden sich die Gips Neubildungen. Vermutlich enthält die 10 μm dicke Schicht zuwenig Feuchtigkeit, um eine Reaktion mit dem SO_2 zu ermöglichen. Erst die tieferen Zonen enthalten genug Feuchtigkeit, um mit SO_2 schweflige Säure zu bilden, die wiederum mit Calcit (nach Oxidation) zu Gips reagieren kann.

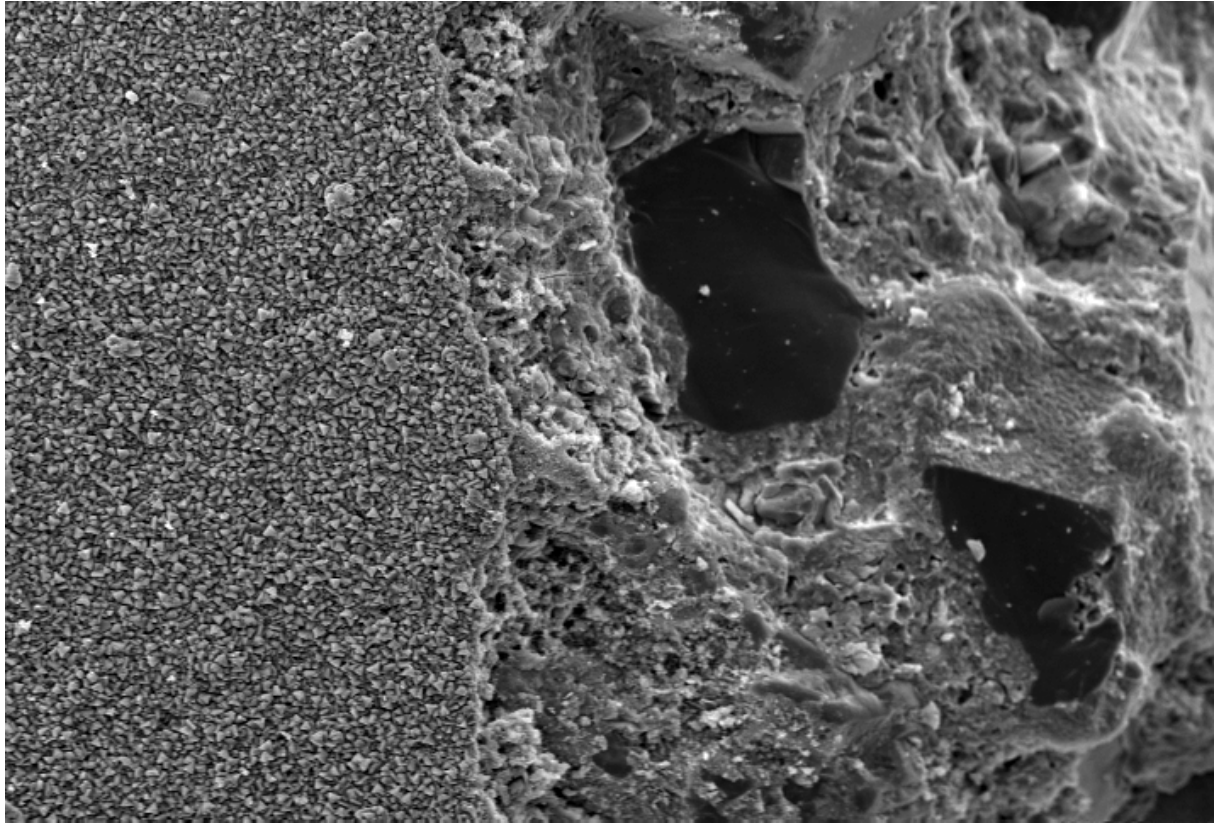


Abbildung 7.4: REM Aufnahme CEM I, weiß-T-100

(untere Bildkante = 450 µm)

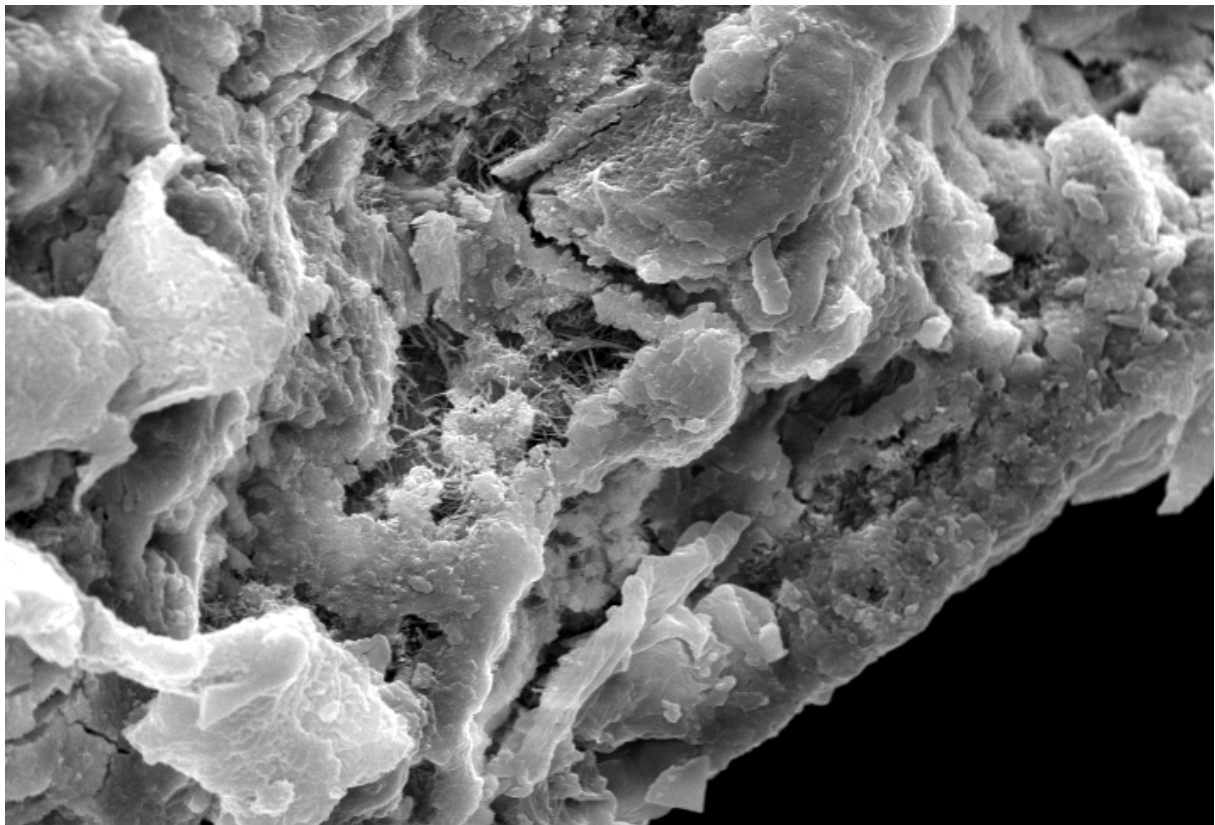


Abbildung 7.5: REM Aufnahme CEM I, weiß-T-100

(untere Bildkante = 66 µm)

Die Abbildung 7.6 (CEM I, weiß-T-100) zeigt ein gutes Beispiel für die unter 6.3 beschriebene „Umwandlung“ von groben in feinere Poren. Die abgebildete Luftpore (\varnothing ca. 200 μm) wird durch Kristallisation von Calcit in verschiedene Poren mit einem Durchmesser von unter 10 μm umgewandelt, d.h. es bilden sich aus Luftporen Kapillarporen. Auch dieser Effekt wurde häufig bei den untersuchten Proben beobachtet.

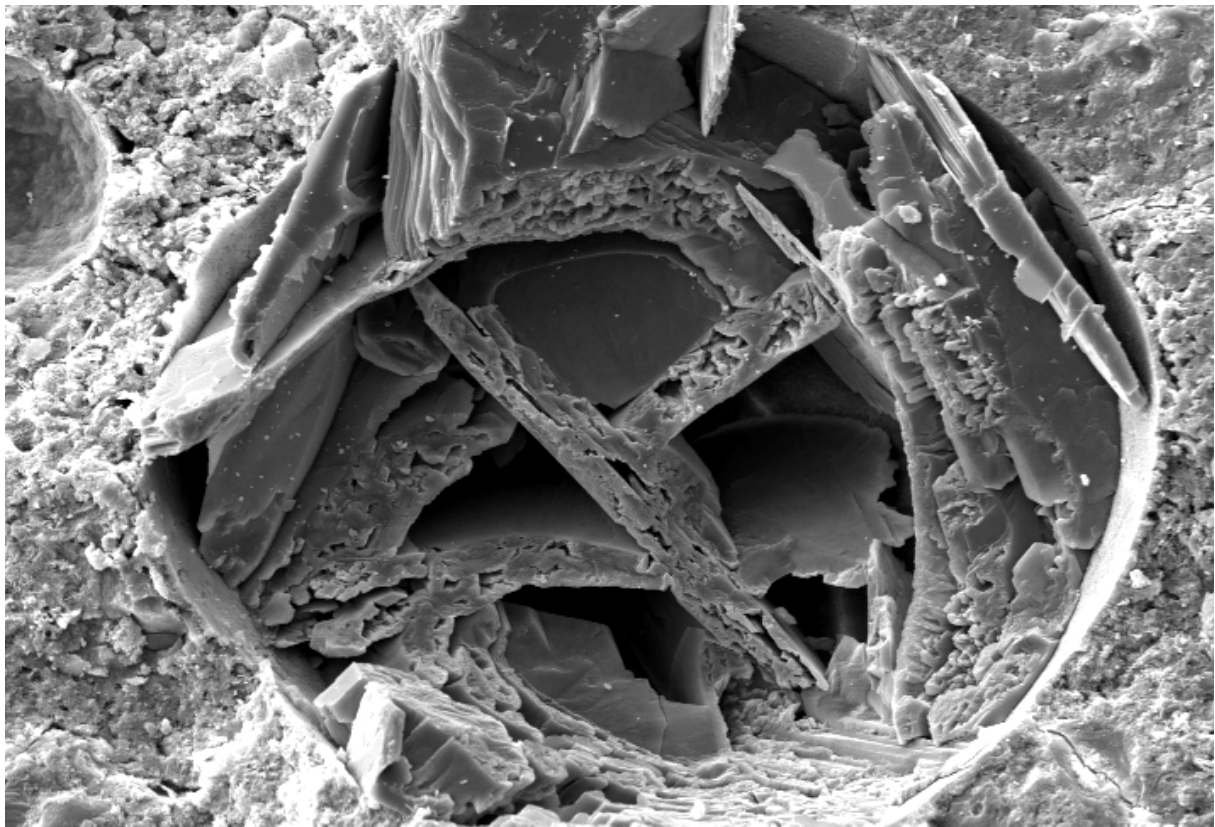


Abbildung 7.6: REM Aufnahme CEM I, weiß-T-100

(untere Bildkante = 290 μm)

Die Abbildung 7.7 und die Abbildung 7.8 zeigen die CEM I, weiß-T-0-Probe mit Blick von oben bzw. von der Seite. Beide Abbildungen zeigen deutlich einen aufgewachsenen „Calcitrassen“ mit ca. 15 μm Dicke. Bei der Carbonatisierung der Matrix wird Wasser frei, das Portlandit an die Oberfläche transportiert. Dieser reagiert dort mit CO_2 zu Calcit und dichtet die Oberfläche ab. Besonders Abbildung 7.8 zeigt den guten Verbund der Calcitschicht mit dem Untergrund.

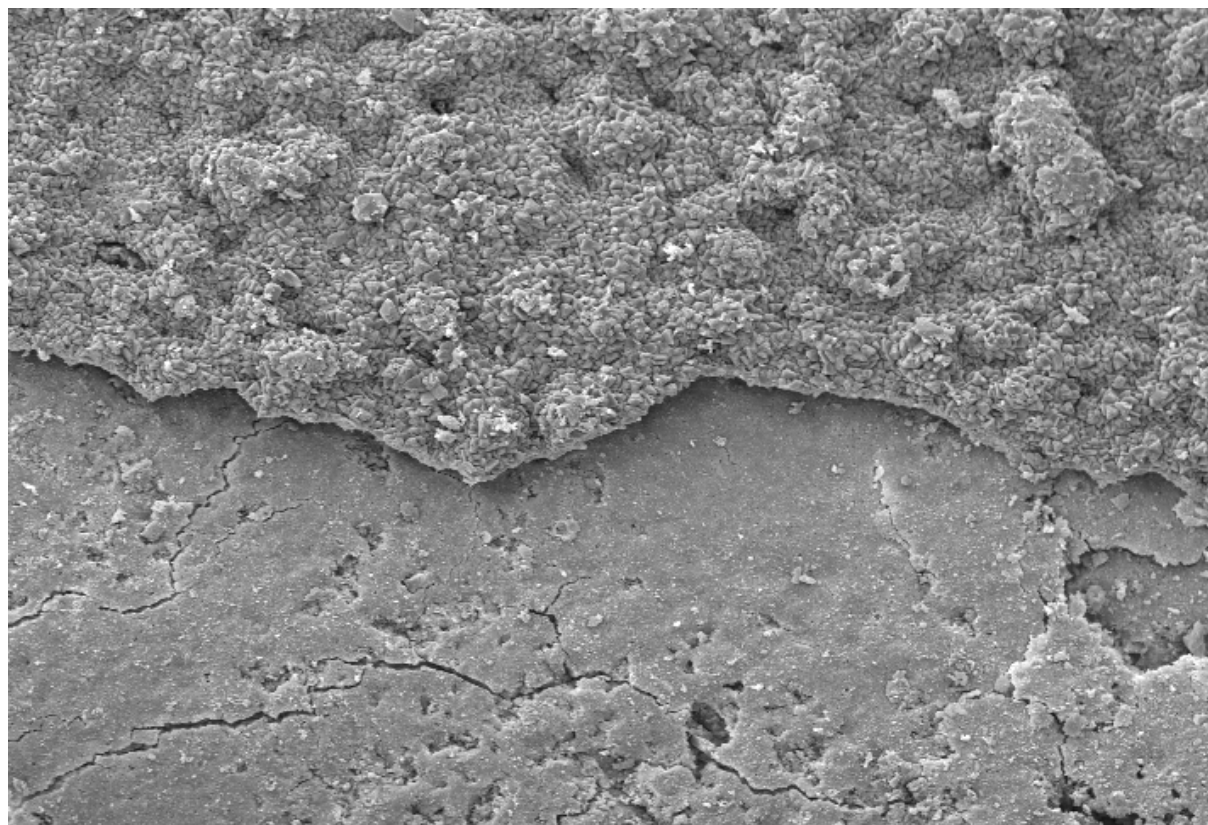


Abbildung 7.7: REM Aufnahme CEM I, weiß-T-0

(untere Bildkante = 450 µm)

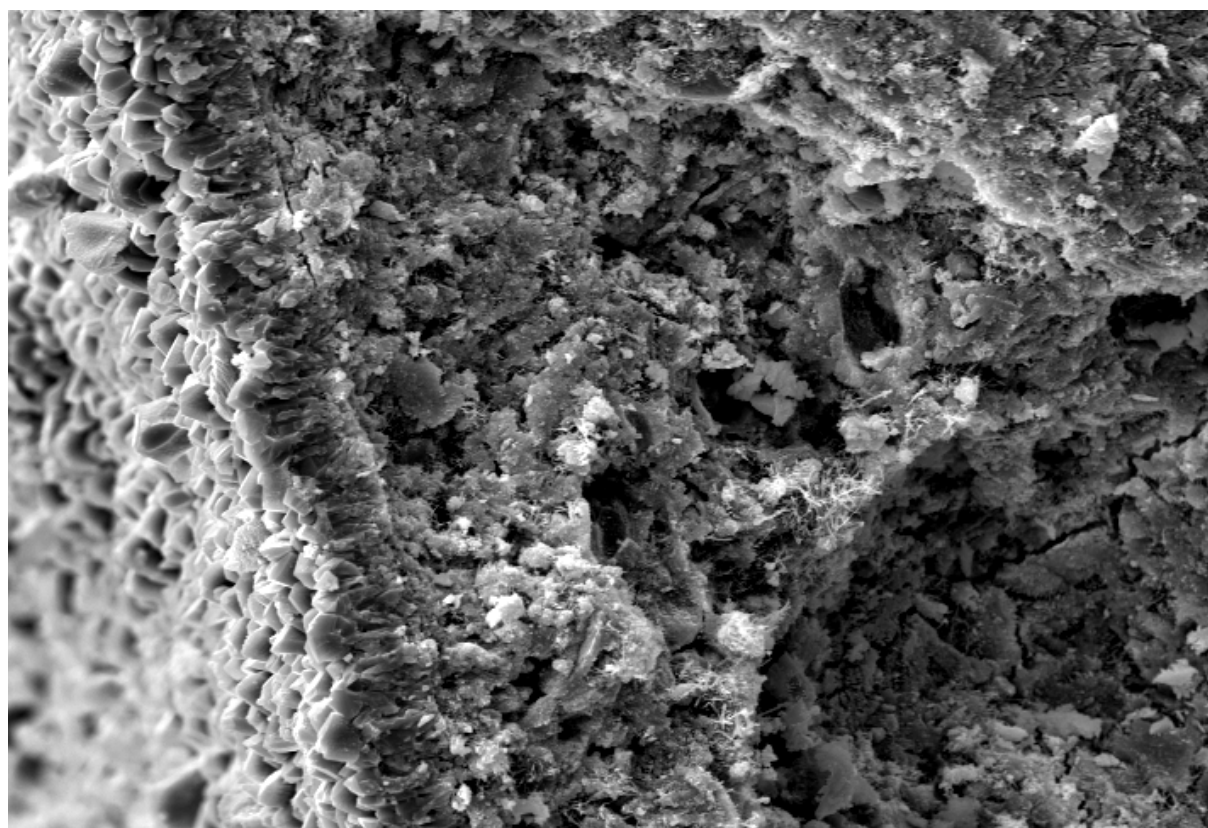


Abbildung 7.8: REM Aufnahme CEM I, weiß-T-0

(untere Bildkante = 150 µm)

Die hohen Sulfatgehalte der äußeren Schicht (s.a. 6.1.1) der G3-Mörtel zeigt exemplarisch die Abbildung 7.9 (CL 90-T-100). Eine oberflächliche Pore ist vollständig und dicht mit einem Gipsrasen überzogen. Die Abbildung 7.10 zeigt eine Detailaufnahme mit gut zu erkennenden Gipskristallen. Trotz der langen Bewitterungsdauer ist die Gipsschicht nur ca. 10 bis 15 μm dick. Auch hier findet wieder eine Selbstabdichtung durch den Gips statt, die ein weiteres Eindringen von SO_2 verlangsamt.

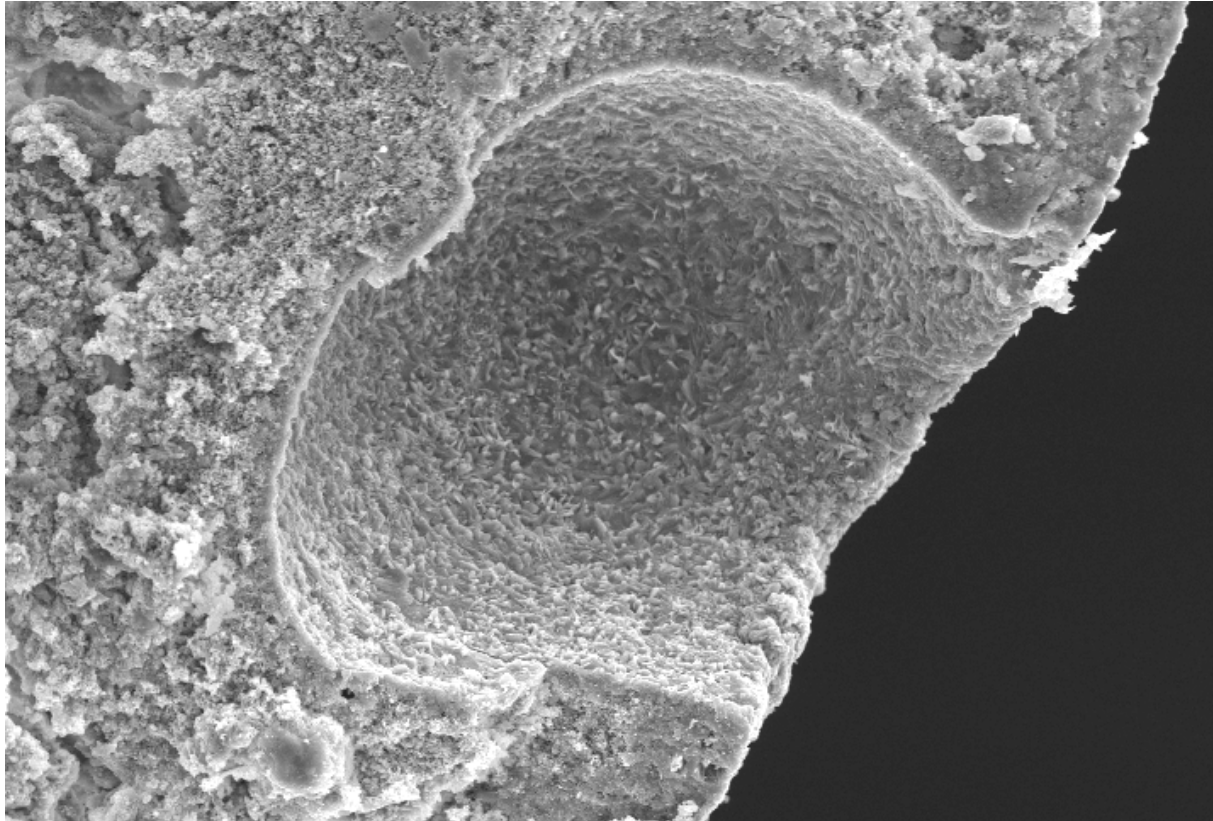
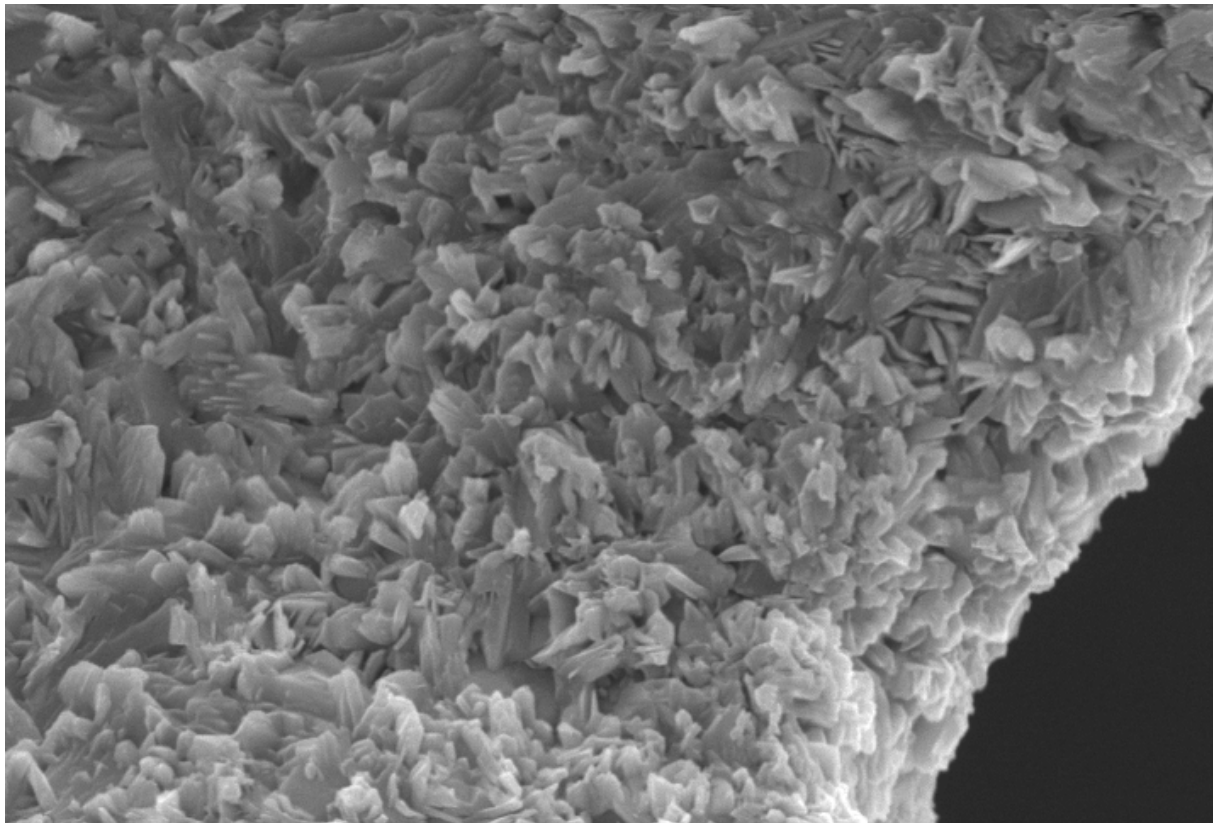


Abbildung 7.9: REM Aufnahme CL 90-T-100

(untere Bildkante = 230 μm)

**Abbildung 7.10: REM Aufnahme CL 90-T-100***(untere Bildkante = 46 μm)*

Den Einfluß der regelmäßigen Wässerung zeigt Abbildung 7.11. Dargestellt ist die CL 90-N-100 Probe mit Blick auf die Oberfläche. Deutlich zu erkennen sind die freigelegten Zuschlagskörner. An der Oberfläche wird die Matrix aus Calcit durch den SO_2 -Angriff in Gips umgewandelt. Durch die Wässerung wird dieser Gips gelöst. Es kann sich keine dichte Gipsschicht ausbilden und die Calcitmatrix wird Schicht für Schicht abgetragen. Eine Detailaufnahme dieser Oberfläche zeigt Abbildung 7.12. Gut zu erkennen sind die Gipskristalle, die deutlich größer ausgebildet sind als z.B. die in Abbildung 7.10. Durch die Wässerung bilden sich größere Kristalle, die aber auch durch erneute Anlösung Löcher aufweisen.

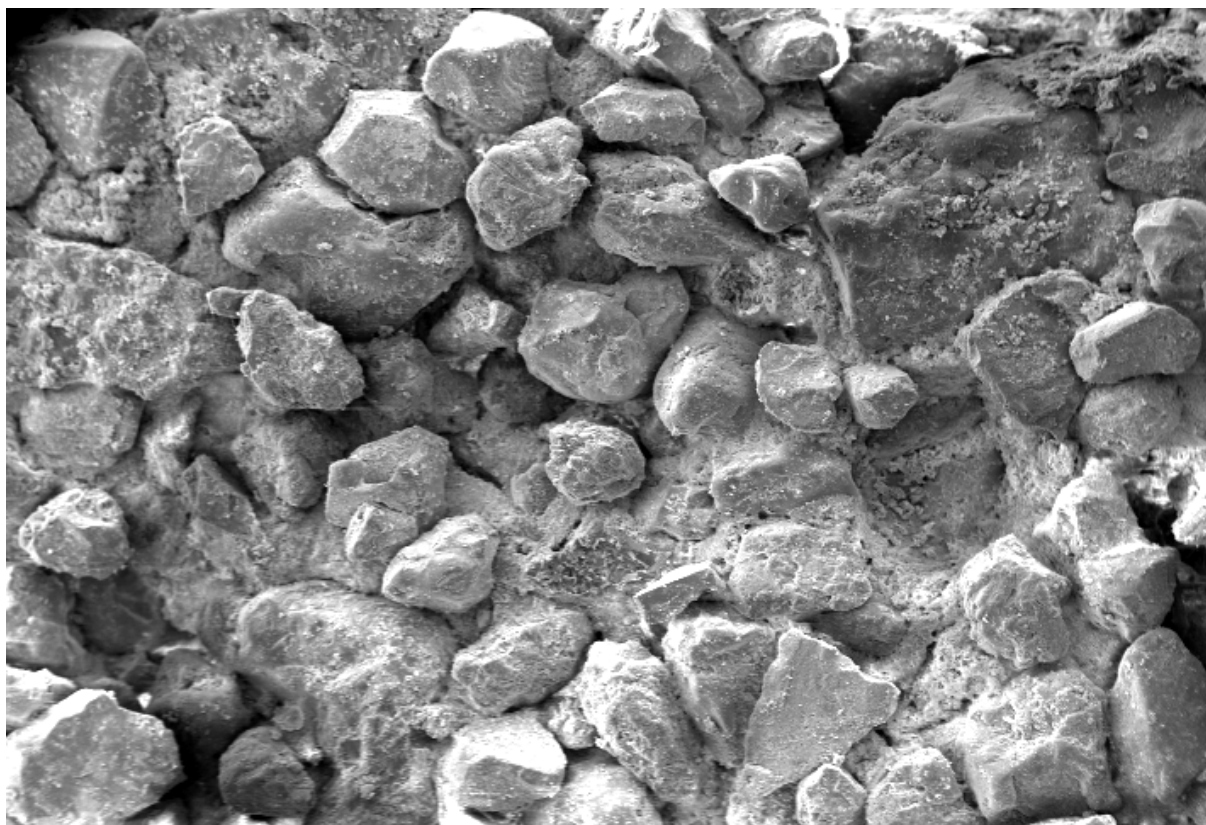


Abbildung 7.11: REM Aufnahme CL 90-N-100

(untere Bildkante = 2,3 mm)

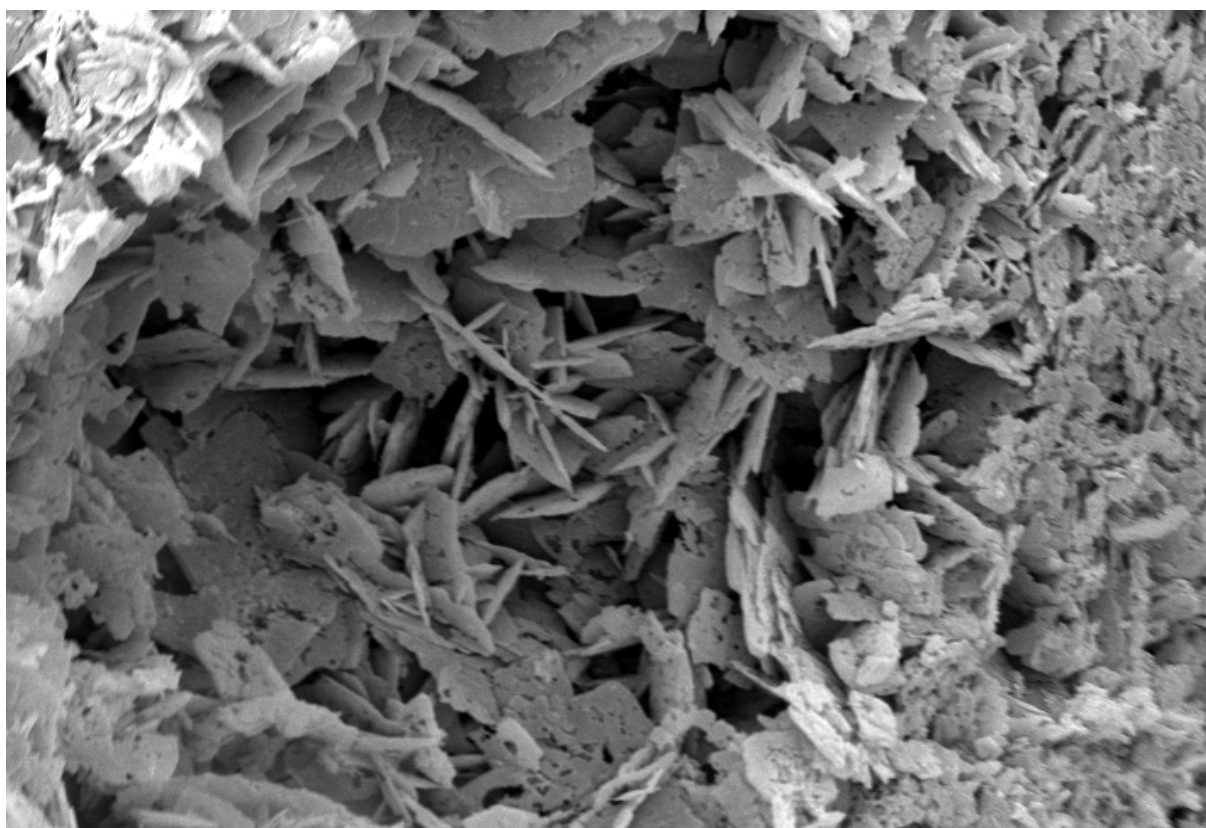


Abbildung 7.12: REM Aufnahme CL 90-N-100

(untere Bildkante = 90 µm)

7.3 Lichtmikroskopie

Die, wie unter 3.3.3 beschrieben, angefertigten Bilder zeigen unterschiedlich gefärbte Bereiche. Diese Farben entstehen durch die Kombination von gekreuzten Polarisatoren und den λ -Plättchen. Die im Mörtel vorkommenden Bestandteile sind zum größten Teil optisch aktiv (anisotrop) und drehen die Polarisationssebene des Lichtes. Das λ -Plättchen hat die Eigenschaft, das Licht wellenlängenabhängig in der Polarisationssebene zu drehen. Durch einen Polfilter entsteht dann farbiges Licht.

Die im Rahmen dieser Arbeit dargestellten Bilder zeigen für die unterschiedlichen Mörtelbestandteile verschiedene Farben. Poren (und der Bereich über der Oberfläche) wird violett dargestellt, die Mörtelmatrix dunkel bis hell. Der Zuschlag (Quarz) ist anisotrop und zeigt daher scharf begrenzte Bereiche, die von weiß über gelb und blau bis rot gehen können. Alle Bilder zeigen die Mörtel nach 720d mit ca. 37-facher Vergrößerung, d.h. die untere Bildkante (UBK) der einzelnen Bilder entspricht 4,3 mm.

Wie schon bei der REM zeigen sich auch hier kaum Unterschiede bezüglich der Bindemittel. Die Lagerungsarten wirken sich dagegen sehr deutlich auf die Proben aus. Ein typisches Bild der Nullproben zeigt Abbildung 7.13. Eine helle Matrix zeigt einen carbonatisierten, eine dunkle Matrix einen nicht carbonatisierten Bereich an. Der helle, oberflächliche Saum zeigt, wie schon bei der REM, eine sehr dünne Calcitschicht an.

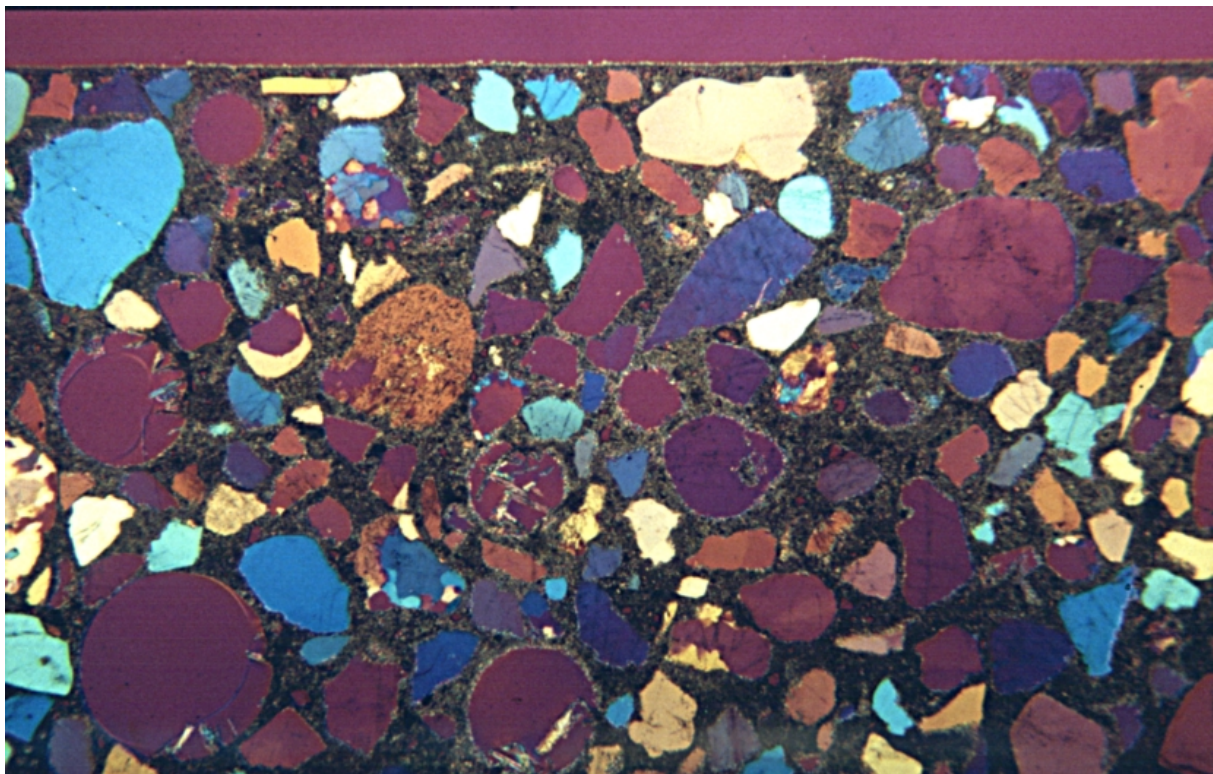


Abbildung 7.13: Lichtmikroskopische Aufnahme CEM II-N-0

(UBK = 4,3 mm)

Die bewitterten T-Proben lassen ein unerwartetes Verhalten erkennen. Die Abbildung 7.14 zeigt an der Oberfläche rote Bereiche. Eine rot gefärbte Matrix zeigt einen sulfatisierten Bereich an, der einen hohen Gehalt an Gips aufweist. Die T-Proben sulfatisieren inselartig, und nicht, wie eigentlich erwartet, flächig. Diese Sulfatinseln erreichen dabei Tiefen von ca. 150 µm. Die in Kapitel 6.1 vermuteten Sulfatisierungstiefen von höchstens 1 mm werden bestätigt. Auch bei den erheblich poröseren G3-Mörteln werden keine größeren Tiefen erreicht, wie die Abbildung 7.15 zeigt. Allerdings lassen sich hier keine klaren Grenzen der rötlichen Sulfatinseln erkennen.

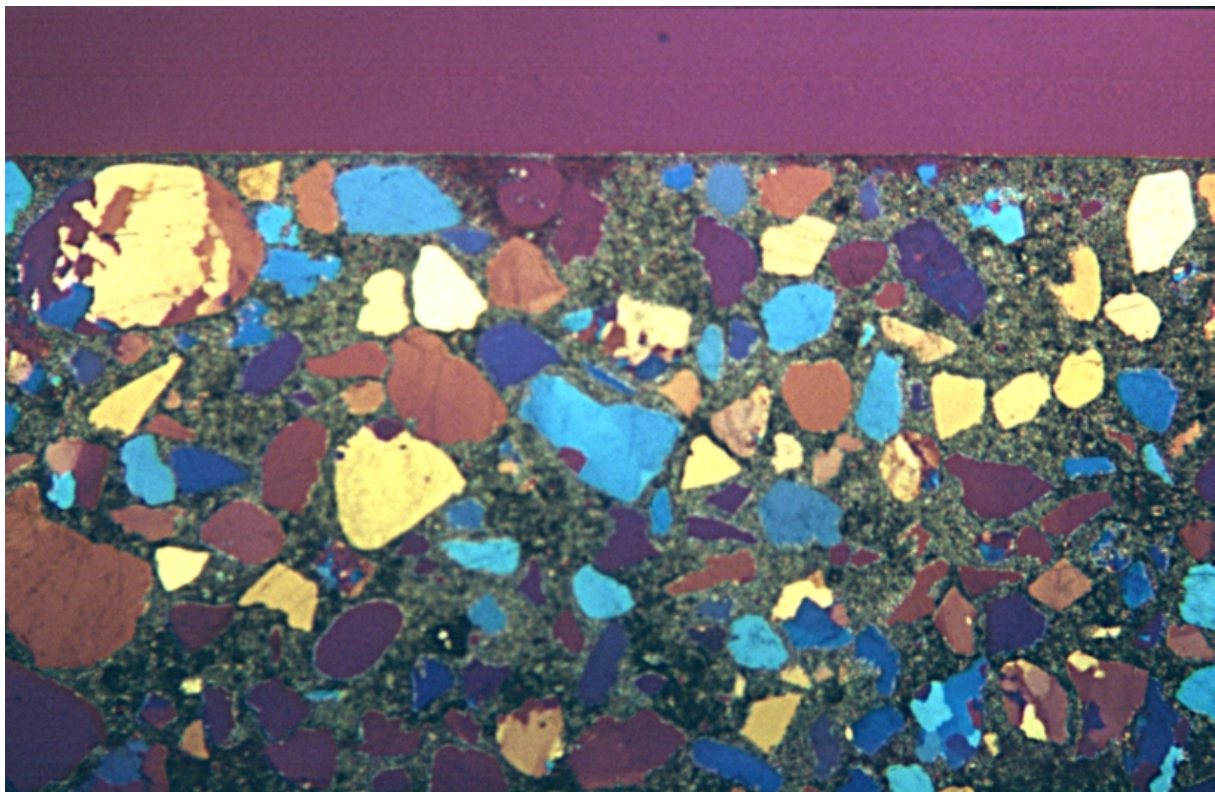


Abbildung 7.14: Lichtmikroskopische Aufnahme CEM I, weiß-T-100 (UBK = 4,3 mm)

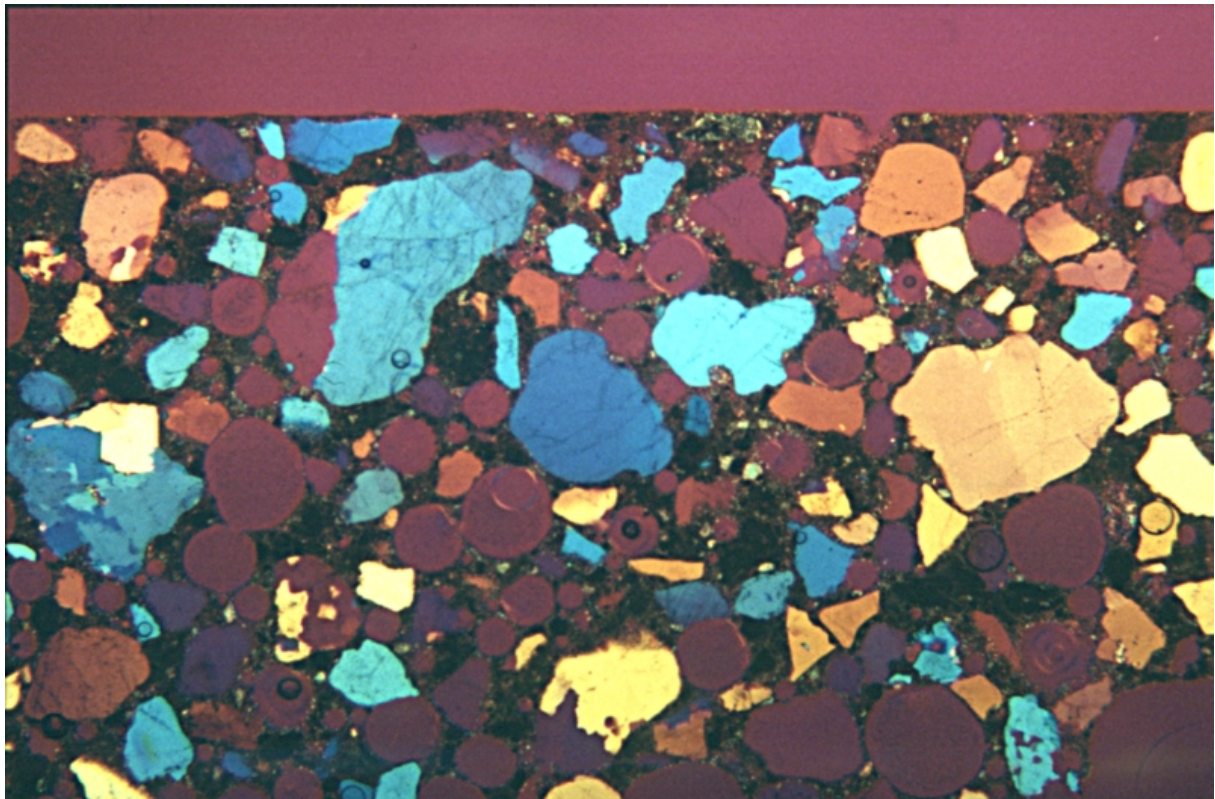


Abbildung 7.15: Lichtmikroskopische Aufnahme N HL 5,0-T-100 (UBK = 4,3 mm)

Durch die regelmäßige Wässerung der N-Proben wird ein anderes Ergebnis erreicht. Die Abbildung 7.16 zeigt eine gleichmäßig sulfatisierte Schicht mit einer Dicke von ca. 150 bis 300 μm . Das Wasser bewirkt hier also eine Verteilung des Gips. Außerdem lassen sich oberflächliche Abwitterungen erkennen. Die Oberfläche ist unregelmäßig und z.T. liegen Zuschlagskörner frei. Noch deutlicher wird dieses Verhalten in Abbildung 7.17 (CEM III-N-100) und in Abbildung 7.18 (N HL 2,0-N-100). Die sulfatisierte Schicht ist hier bis zu ca. 750 μm dick und der Oberflächenabtrag ist sehr deutlich zu erkennen.

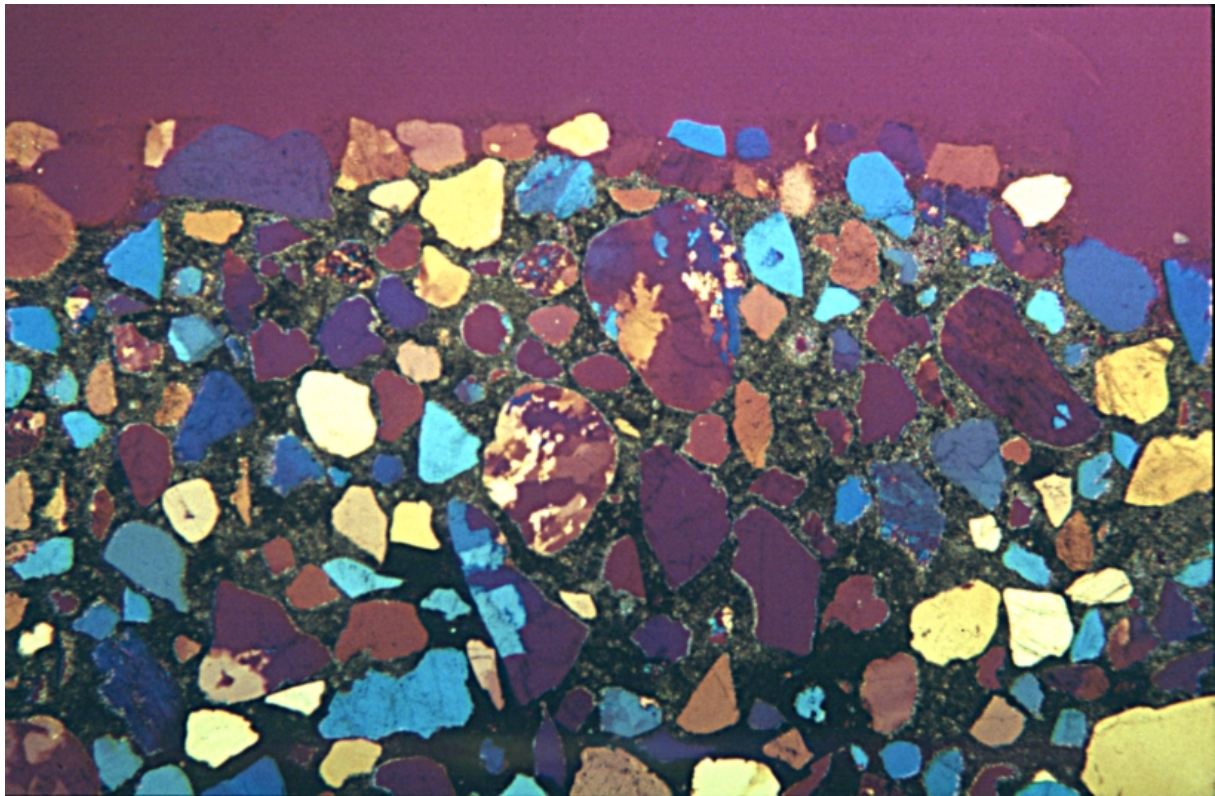


Abbildung 7.16: Lichtmikroskopische Aufnahme CEM I, weiß-N-100 (UBK = 4,3 mm)

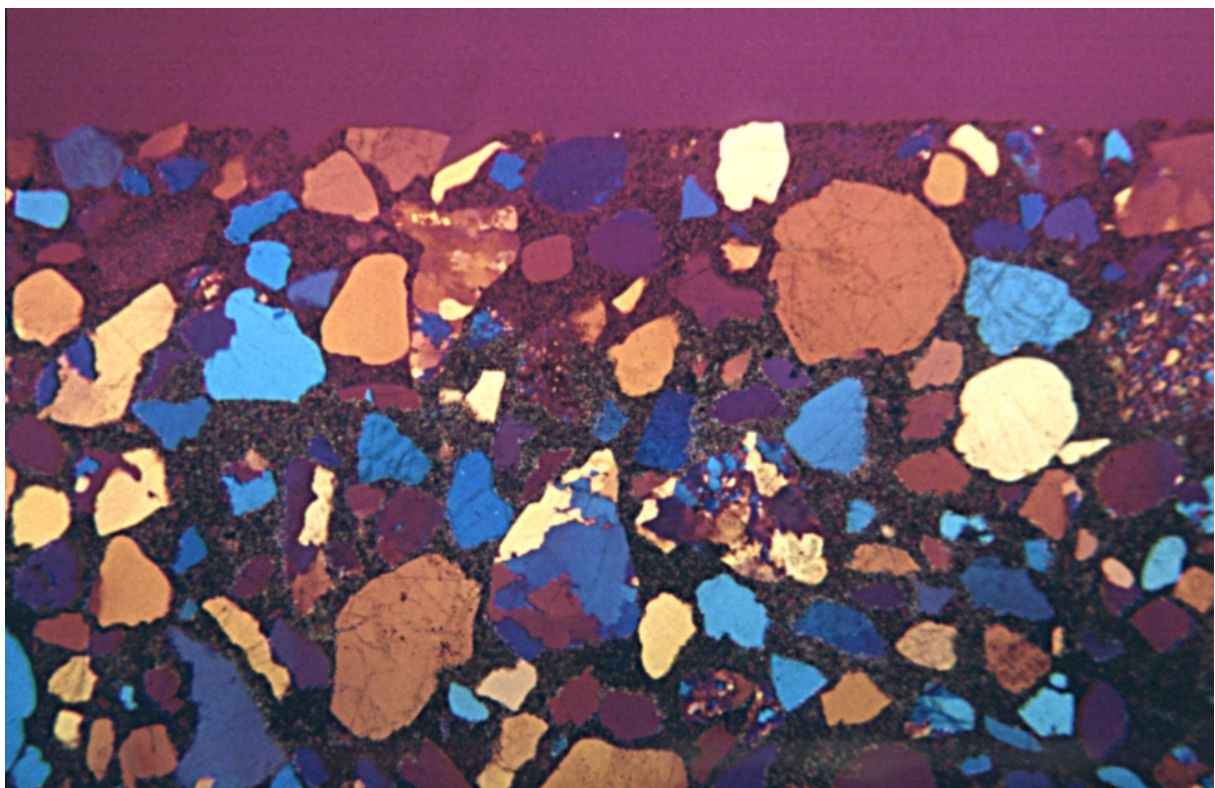


Abbildung 7.17: Lichtmikroskopische Aufnahme CEM III-N-100 (UBK = 4,3 mm)

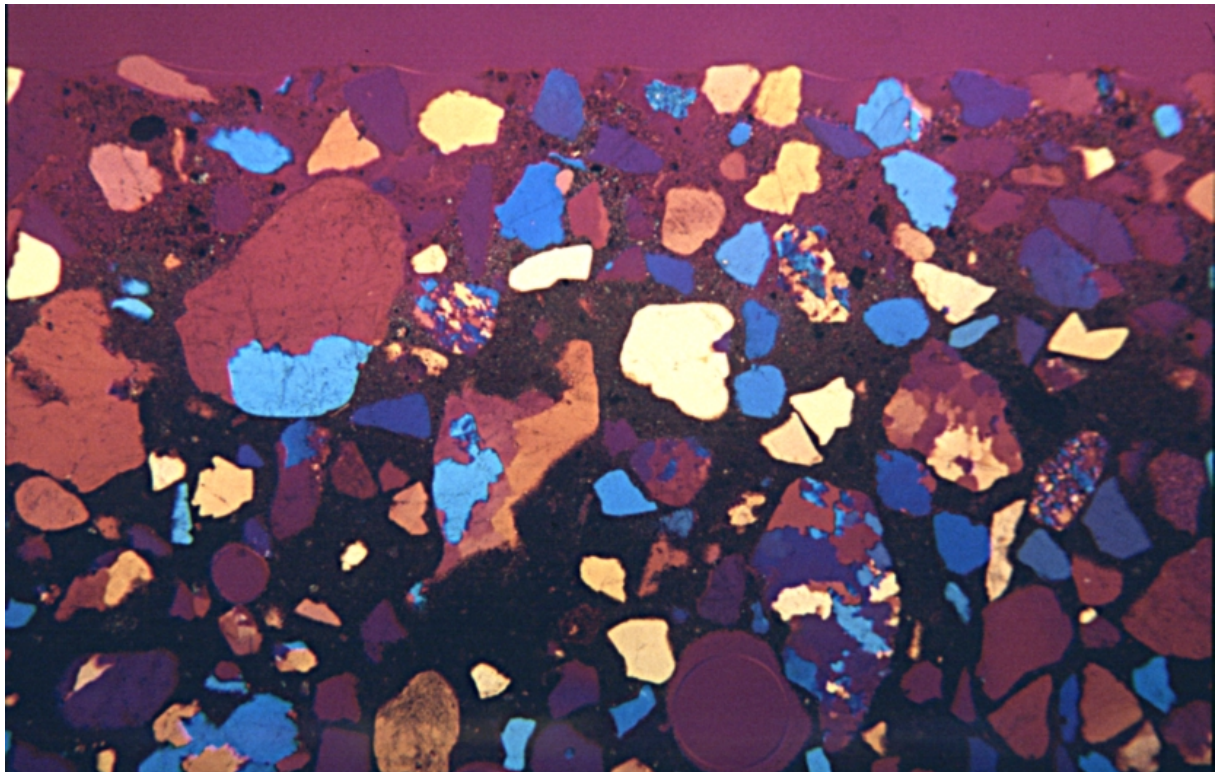


Abbildung 7.18: Lichtmikroskopische Aufnahme N HL 2,0-N-100 (UBK = 4,3 mm)

Keine der untersuchten Proben zeigte einen roten, sulfatisierten Bereich von mehr als 1 mm Dicke. Wiederum ist damit bestätigt, daß SO_2 nicht tief in einen Mörtel eindringt und daß eine Gipsbildung hauptsächlich im Bereich von 1 mm stattfindet. Durch Transportvorgänge, wie z.B. durch eindringendes Wasser, kann aber Sulfat in tiefere Schichten vordringen.

8 ZUSAMMENFASSUNG

Ziel der Arbeit war die Klärung der Einflüsse der Schadgase CO_2 , SO_2 und NO_x auf Kalk- und Zementmörtel.

Im ersten Teil der Arbeit wurde eine Bewitterungsapparatur selbst konzipiert und gebaut. Die Untersuchungen erfolgten an Mörteln mit 9 verschiedenen Bindemitteln, die in 3 Gruppen eingeteilt wurden. Die Gruppe 1 (G1) enthält dabei drei Portlandzemente, die Gruppe 2 (G2) drei hüttensandhaltige Bindemittel und die Gruppe 3 (G3) drei Baukalke. Diese Mörtel wurden mit einer künstlichen Atmosphäre bewittert, die die Schadgase CO_2 , SO_2 und NO_x in 30- bzw. 100-facher Konzentration gegenüber einer stark belasteten Industriatmosphäre enthielten. Ein Teil der Proben wurde in diesen künstlichen Atmosphären kontinuierlich bei 20 °C und 75 % rel. LF gelagert (Trockenlagerung / T-Proben), der andere Teil wurde zusätzlich zur Regensimulation alle 2 Wochen für ca. 30 min. unter Wasser gelagert (Naßlagerung /N-Proben). Um vergleichend die natürlichen Bewitterungseffekte zu ermitteln, sind Mörtelproben (Nullproben) auch in normaler Innenraumatmosphäre (kein SO_2 , kein NO_x) - wiederum ohne sowie mit Zwischenlagerung unter Wasser - gelagert worden. Somit ergaben sich 6 verschiedene Lagerungsarten. Der zeitliche Verlauf der Bewitterung wurde durch 4 Prüftermine bestimmt.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen eine unterschiedliche Beeinflussung durch die drei Schadgase. CO_2 ist ein „in die Tiefe“ wirkendes Gas, d.h. es dringt „schnell und tief“ in den Mörtel ein und wirkt somit auf den gesamten Probekörper. SO_2 und NO_x hingegen sind „oberflächlich“ wirkende Gase, d.h. sie dringen nicht in den Mörtel ein und verändern nur die Oberfläche bzw. die oberflächennahe Zone der Probekörper.

Die verschiedenen Untersuchungsmethoden können grob in drei Kategorien eingeteilt werden. Zum einen gibt es Methoden, deren Ergebnisse hauptsächlich durch den gesamten Probekörper, also volumenbezogen, beeinflusst werden (V-Methoden). Dazu zählen der E-Modul, die Druckfestigkeit (β_D), die offene Porosität (OP), das Schwinden und zum Teil der Frost-Tauwechsel-Widerstand (FTW). Zum anderen werden die Ergebnisse einige Untersuchungsmethoden z.T. von der Oberfläche bzw. von Oberflächeneffekten beeinflusst (O-Methoden). Hier sind die Biegezugfestigkeit (β_{BZ}), der Wasseraufnahmekoeffizient (ω), die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ -Wert), die Neutralisierungstiefe (NT) und ebenfalls zum Teil der FTW zu nennen. Die V-Methoden werden überwiegend durch das CO_2

beeinflusst, die O-Methoden zusätzlich durch SO_2 und NO_x . Die dritte Kategorie beinhaltet alle Untersuchungen, die in verschiedenen Schichten durchgeführt wurden.

Die drei Bindemittel (CEM I 42,5 R, CEM I 42,5 R-HS, CEM I 52,5 R, weiß) der G1-Mörtel verhalten sich untereinander sehr ähnlich. Die Ergebnisse der V-Methoden unterscheiden sich kaum. Durch die Bewitterung wird der E-Modul leicht, die β_D deutlich erhöht. Die Reaktion mit CO_2 bewirkt eine etwas niedrigere OP; das Schwinden wird durch die Schadgase nicht beeinflusst. Die Ergebnisse der O-Methoden unterscheiden sich bezüglich der T- und N-Lagerung. Die Bewitterung bewirkt eine deutliche Erhöhung der β_D , die allerdings bei den N-Proben geringer ausfällt als bei den T-Proben. Die regelmäßige Wässerung löst die durch SO_2 gebildeten Neubildungen z.T. auf und legt somit die Bindemittelmatrix wieder frei. Dort kann dann wiederum SO_2 angreifen. Die Folge ist ein Oberflächenabtrag und eine Oberflächenschädigung, die die β_{BZ} erniedrigt.

Der ω wird durch die Bewitterung ebenfalls deutlich erniedrigt. Bei den N-Proben ist dieser Rückgang stärker als bei den T-Proben. Das Wasser löst die Neubildungen zum Teil auf, bewirkt aber auch eine Rekristallisation in den oberflächennahen Poren, die dadurch verstopft werden. Die Folge ist ein erniedrigter ω . Das gleiche gilt auch für die NT. Hier wird durch das - durch die regelmäßige Wässerung verstopfte - oberflächennahe Porensystem das Eindiffundieren von CO_2 gebremst. Daneben sind die Poren für eine gewisse Zeit nach der Wässerung mit Wasser gefüllt und behindern dadurch ebenfalls das Eindiffundieren von CO_2 . Die N-100 Proben zeigen eine ca. 30 % niedrigere NT wie die T-100-Proben. Die Schadgase SO_2 und NO_x bilden somit eine Art „natürlicher“ Carbonatisierungsbremse, da das Innere der Probekörper (tiefer als 2 mm) fast ausschließlich durch CO_2 neutralisiert wird.

Der μ -Wert wird durch die Bewitterung deutlich erhöht, allerdings mit nur geringen Unterschieden zwischen T- und N-Proben. Durch die Bewitterung wird das Gefüge verdichtet und der μ -Wert steigt. Der FTW verhält sich ungewöhnlich. Einzig die Nullproben nach 720d Bewitterung zeigen große Schäden. Die übrigen Proben zeigen allgemein einen hohen FTW.

Bei der Bestimmung der Sulfatgehalte wurde nur in der obersten, 0-2 mm dicken Schicht eine deutliche Erhöhung der Sulfationenkonzentration gefunden. Die lichtmikroskopische Untersuchung der Dünnschliffe ergab, daß das SO_2 wahrscheinlich nicht tiefer als 1 mm eindringt und nur in diesem Bereich Gips bildet. In tieferen Zonen wird Sulfat lediglich durch die regelmäßige Wässerung (N-Proben) transportiert. Dabei diffundiert das Sulfat aber nicht tiefer als 4 mm ein; die Erhöhung des Sulfatgehaltes in der 2-4 mm Schicht ist dabei gering. Neben dem Sulfat wurde aber auch Sulfit gefunden, sowohl mit Hilfe der

Röntgenpulverdiffraktometrie als auch mit Hilfe der Ionenchromatographie. Aufgrund von fehlenden Standards konnte aber keine Quantifizierung durchgeführt werden. Obwohl die NO_x -Konzentration in den Bewitterungskammern deutlich höher als die SO_2 -Konzentration war, wurden keine Nitrat- bzw. Nitritkonzentrationen von über 0,04 M.-% gefunden. Die Bestimmung der Carbonatkonzentration zeigt bei den Nullproben ein allmähliches Fortschreiten der Carbonatisierung von außen nach innen. Die mit Schadgas bewitterten Proben zeigen dagegen in allen untersuchten Schichten nach 720d eine vollständige Carbonatisierung. Die äußere, 0-2 mm Schicht zeigt dabei im Laufe der Zeit einen Rückgang der Carbonatkonzentration, verursacht durch die Reaktion des Calcits mit SO_2 oder NO_x .

Auch die Porenstruktur wird durch die Bewitterung beeinflusst. Während die Gesamtporosität (GesP) weitgehend konstant bleibt, steigen die Gelporen-(GP)-Gehalte zu Lasten der Kapillarporen-(KP)-Gehalte, vor allem in den tieferen Schichten, an. Dabei handelt es sich wahrscheinlich um eine „Umwandlung“ von KP in GP. Durch die Bewitterung kristallisieren die Neubildungen in KP, die somit unterteilt werden. Die neu entstandenen Poren werden dann als GP erfaßt. Bilder, die mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie (REM) angefertigt wurden, bestätigen diesen Vorgang.

Die drei Bindemittel (CEM II/B-S 32,5 R, CEM III/B 32,5, HGZ) der G2-Mörtel zeigen, im Gegensatz zu den G1-Mörteln, ein unterschiedliches Verhalten. Mit steigendem HÜS-Anteil weicht das Verhalten immer stärker von den G1-Mörteln ab. Hier dürften sich zwei Effekte überlagern. Zum einen führt der HÜS in Kombination mit der Schadgas-Bewitterung (speziell mit CO_2) zu einer Gefügevergrößerung. Beim HGZ wird zusätzlich die festigkeitsbildende Ettringitphase durch CO_2 zerstört. Zum anderen erfolgt durch die Neubildungen (z.B. Gips), wie schon bei den G1-Mörteln, eine Gefügeverdichtung.

Bei den V-Methoden zeigt sich durch die Schadgas-Bewitterung mit steigendem HÜS-Anteil ein immer stärkerer Rückgang der E-Moduli und ein immer geringer werdender Anstieg der β_D . Beim CEM II und CEM III geht die OP leicht zurück, das Schwinden bleibt unbeeinflusst. Der HGZ zeigt eine uneinheitliche Entwicklung der OP, das Schwinden wird durch die Bewitterung leicht erhöht.

Bei den O-Methoden wird vor allem bei dem ω und bei dem μ -Wert eine gegenläufige Entwicklung zu den G1-Mörteln deutlich. Während der ω durch die Bewitterung beim CEM II noch zurückgeht, wird er beim CEM III leicht, beim HGZ deutlich erhöht. Der μ -Wert des CEM II und CEM III wird kleiner, hier überwiegt die Gefügevergrößerung. Beim HGZ bleibt der μ -Wert weitgehend konstant. Wie schon bei den G1-Mörteln wird der FTW

drastisch erhöht. Der geringe Portlanditgehalt der G2-Mörtel ist für die vollständige Neutralisierung der Mörtel durch die Schadgas-Bewitterung verantwortlich.

Die Sulfat-, Nitrit-, Nitrat- und Carbonatkonzentrationen in den einzelnen Schichten verhalten sich analog zu den G1-Mörteln. Hier finden die gleichen Reaktionen statt. Auch bei diesen Mörteln konnte Sulfit qualitativ nachgewiesen werden. Die Carbonatkonzentrationen der bewitterten 0-2 mm Schichten geht noch deutlicher als bei den G1-Mörteln zurück. Die Porenstruktur der untersuchten Schichten wird wenig beeinflusst. Ein Rückgang der GesP verteilt sich gleichmäßig auf geringere LP-, KP- und GP-Gehalte. Dabei ist dieser Rückgang mit steigendem HÜS-Anteil geringer.

Die Mörtel der Bindemittelgruppe G3 (CL 90, NHL 2,0, NHL 5,0) zeigen bezüglich der Schadgas-Bewitterung eine nur sehr geringe Beeinflussung. Die erhöhte CO₂ Konzentration bei der Bewitterung bewirkt eine deutliche Zeitraffung der Carbonatisierung. Die Meßwerte nach 720d T/N-0-Lagerung werden bei den bewitterten Proben schon nach 90d erreicht. Die geringe Beeinflussung sowohl der V-, als auch der O-Methoden ist wahrscheinlich in dem hohen Porenanteil der G3-Mörtel begründet. Die Neubildungen haben genügend Raum, um zu kristallisieren, ohne dabei die Eigenschaften zu verändern.

Wie schon bei den G1- und G2-Mörteln sind die Sulfatgehalte ausschließlich in der 0-2 mm Schicht stark erhöht. Die inneren Schichten der N-Proben weisen durch die Transportwirkung des Wassers leicht erhöhte Sulfationenkonzentrationen auf. Auch hier finden sich Sulfit und nur sehr geringe Nitrit- und Nitratkonzentrationen. Aufgrund von Präparationsschwierigkeiten zeigten sich hier bei der Hg-Druckporosimetrie sehr uneinheitliche Ergebnisse.

Unter Berücksichtigung der Einwirkungsdauer und der Konzentration der verschiedenen Schadgase läßt sich nun ein „Bild“ aufstellen, wie eine Bewitterung die Baustoffe bzw. deren Eigenschaften verändert:

Die Zemente hydratisieren zunächst und es bilden sich die CSH- und CAH-Phasen und Portlandit bzw. Ettringit insbesondere beim HGZ. Bedingt durch die Vorlagerung ist hier die Hydratation zu Beginn der Bewitterung zum Großteil abgeschlossen. Die hydraulischen Anteile der hydraulischen Kalke hydratisieren ebenfalls. Ansonsten bauen die Kalke eine Matrix aus Ca(OH)₂ auf. Die Vorlagerung bewirkt hier lediglich eine sehr dünne, äußere Carbonatisierungszone durch die Einwirkung bzw. Reaktion des atmosphärischen CO₂.

Nach der Einlagerung der Proben in die Bewitterungskammern reagiert zunächst, aufgrund der erheblich höheren CO₂-Konzentration, der Portlandit mit dem CO₂ zu Calcit. Das CO₂ hat

überwiegend das $\text{Ca}(\text{OH})_2$ als Reaktionspartner im Mörtel. Geringe Mengen an Portlandit werden auch direkt von SO_2 und NO_x zu den Sulfiten bzw. Nitriten umgesetzt. Während das CO_2 allmählich tief in die Mörtel eindringen kann, finden die Reaktionen mit SO_2 nur an der Oberfläche statt, da das reaktive SO_2 bzw. die schweflige Säure schnell mit Calcit reagieren kann. Erst danach kommt es zur Oxidation des Sulfits zum Sulfat durch Luftsauerstoff oder auch NO_2 . Das SO_2 und das NO_x dringen nicht tief in den Mörtel ein, da diese beiden Gase mit allen Mörtelbestandteilen (bis auf den quarzitären Zuschlag) reagieren können, d.h. sowohl mit Portlandit bzw. Calcit als auch mit den CSH- und CAH-Phasen. Die geringen Nitrit- bzw. Nitratkonzentrationen lassen den Schluß zu, daß zwar Calciumnitrit bzw. Calciumnitrat gebildet wird, dieses jedoch durch SO_2 oder SO_3 zu dem entsprechenden Sulfit bzw. Sulfat umgewandelt wird. Es laufen also die unter 2.2.4 beschriebenen Abbaureaktionen für das Nitrit bzw. Nitrat ab. Die Bewitterung einer Calciumnitratlösung bestätigte diese Vorgänge. Nach 28 Tagen konnte röntgenographisch nur noch das Sulfat nachgewiesen werden.

Insgesamt betrachtet ist die Gefährdung der Mörtel durch die drei Schadgase gering, in vielen Fällen werden die Eigenschaften ggf. sogar verbessert. Das SO_2 führt in Verbindung mit Wasser (z.B. Schlagregen) zu einem Oberflächenabtrag und auf lange Sicht zu einer waschbetonartigen Struktur. NO_x ist für den Mörtel unbedeutend. Einzig das CO_2 kann - wie bekannt ist - sich negativ auf Mörtel bzw. Beton auswirken, sofern dieser bewehrt ist. Durch die oberflächenabdichtende Wirkung der Gipsneubildungen kann dieser Carbonatisierungsprozeß allerdings in gewissen Grenzen gebremst werden.

9 LITERATUR

- BEILKE 1975 Beilke, S.; Lamb, D.; Müller, J.; On the uncatalyzed oxidation of atmospheric SO₂ by oxygen in aqueous systems; Atmospheric Environment Pergmon Press; Vol. 9; S. 1083-1090; 1975.
- BRAUN 1970 Braun, R.C.; Wilson, M.J.G.; The removal of atmospheric sulphur by building stones; Atmospheric Environment Pergmon Press; Vol. 4; S. 371-378; 1970.
- BRIEGER 1986 Brieger, L.M.; Wittmann, F.H.; Numerical simulation of carbonation of concrete; 2. Int. Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bausanierung; S. 635-640; Esslingen; 1986.
- CIMITÀN 1994 Cimitàn, L.; Rossi, P.; Torraca, G.; Accelerated sulphation of calcareous materials in a climatic chamber. Effect of protective coatings and inhibitors; 3rd International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin; S. 233 – 241; 1994.
- COOPER 1994 Cooper, T.; Effects of air pollution on historic buildings and monuments (1986-1990). Scientific basis for conservation: Air pollution levels, stone decay rates and their interrelation at historic monuments; European Cultural Heritage Newsletter on Research (ECHNLR); 8. Jahrgang; Heft 2; S. 13- 21; 1994.
- DIN 1060 Baukalk; Teil 1: Definitionen, Anforderungen, Überwachung; März 1995.
- DIN 1164 Zement; Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen; Oktober 1994.
- DIN 5033 Farbmessung; Teil 1: Grundbegriffe der Farbmessung; März 1979.

-
- DIN 18555 Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln
Teil 1: Allgemeines, Probennahme, Prüfmörtel; September 1982
Teil 3: Bestimmung der Biegezugfestigkeit, Druckfestigkeit und Rohdichte; September 1982.
- DIN 52615 Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen; November 1987.
- DIN 52617 Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen; Mai 1987.
- DIN EN 196 Prüfverfahren für Zement; Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Mai 1995.
- EXNER 1997 Exner, K.; Knöfel, D.; Umweltsimulationsapparatur zur gleichzeitigen künstlichen Bewitterung von Baustoffen mit NO_x, SO₂ und CO₂; Proc. of the 13th Internat. Conference of Building Materials, Weimar; Poster-Nr. 1.06; Band 2; S. 857-867; 1997.
- FELLENBERG 1992 Fellenberg, G.; Chemie der Umweltbelastung; 2. Auflage; B.G. Teubner Stuttgart; (= Teubner Studienbücher: Chemie); 1992.
- GAURI 1983 Gauri, K.L.; Popli, R.; Sarma, A.C.; Effect of relative humidity and grain size on the reaction rates of marble at high concentrations of SO₂ ; Durability of Building Materials; 1; S. 209-216; 1982/83.
- GRAEDEL 1994 Graedel, T.; Crutzen, P.; Chemie der Atmosphäre, Bedeutung für Klima und Umwelt; Spektrum Akademischer Verlag GmbH; Heidelberg, Berlin, Oxford; 1994.

- HAMADA 1968 Hamada, M.; Neutralisation(carbonation) of concrete and corrosion of reinforcing steel; Proceedings of the 5th Int. Symposium on the Chemistry of Cement; S. 343-369; Tokyo; 1968.
- HANEEF 1993 Haneef, S.J.; Jones, M.S.; Johnson, J.B.; Thompson, G.E.; Wood, G.C.; Effects of Air Pollution on Historic Buildings and Monuments; European Cultural Heritage Newsletter on Research; 7; S. 2-10; 1993.
- HENNING 1997 Henning, O.; Knöfel, D.; Baustoffchemie; 5. Auflage; Bauverlag Wiesbaden und Berlin; 1997.
- HENSEL 1985 Hensel, W.; Chemische Reaktionen von Atmosphäriken mit zementgebundenen Baustoffen; Betonwerk und Fertigertechnik; 51;S. 714-721; 1985.
- HOLLEMANN 1985 Hollemann, A.; Lehrbuch der anorganischen Chemie; 91. – 100. Auflage (33. Edition); de Gruyter; Berlin, New York; 1985.
- HOFFMANN 1995 Hoffmann, D.; Niesel, K; Zur Quantifizierung des Effekts von Luftverunreinigung auf Putzmörtel; Forschungsbericht 209; Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM); Berlin; 1995.
- JOHANSSON 1986 Johansson, L.G.; Lindquist, O.; Mangio, R.; A study of the corrosion of calcareous stones exposed to humid air containing SO₂ and NO₂; Air and Pollution Symposium; Rome; S. 15-17; 1986.
- KNÖFEL 1978 Knöfel, D.; Betonkorrosion – eine Übersicht; Teil I und II; Bautenschutz und Bausanierung; 1. Jahrgang; Nr. 2 S. 50-52 (Teil I); Nr. 3 S. 68-72 (Teil II); 1978.

- KNÖFEL 1981 Knöfel, D.; Natursteinschäden an Bauwerken; Symposium Instandsetzung alter Bausubstanz-Technologie; Kassel; S. 73-115; 1981.
- KNÖFEL 1985 Knöfel, D.; Böttger, K.G.; Zum Verhalten von zementgebundenen Baustoffen in SO₂-angereicherter Atmosphäre; Betonwerk und Fertigteiltechnik; 51; S. 107-114; 1985.
- KNÖFEL 1991 Knöfel, D.; Scholl, E.; Einfluß von NO₂-angereicherter Atmosphäre auf zementgebundene Baustoffe; Betonwerk und Fertigteiltechnik; 57; S. 53-60; 1991.
- KNÖFEL 1992 Knöfel, D.; Eßer, G.; Einfluß unterschiedlicher Kohlendioxidkonzentrationen auf Zementmörtel; Werkstoffwissenschaften und Bausanierung; Teil 3; Wittmann, F. [Hrsg.]; expert-Verlag; Ehningen; S. 1408-1418; 1992.
- KNÖFEL 1993 Knöfel, D. und Schubert, P.; Handbuch Mörtel und Steinerfüllstoffe in der Denkmalpflege; Verlag Ernst und Sohn; Berlin; 1993.
- KNÖFEL 1995 Knöfel, D.; Böttger, K.G.; Zum Einfluß SO₂-reicher Atmosphäre auf Zementmörtel; Bautenschutz und Bausanierung; 8; S. 1-5; 1985.
- KNÖFEL 1996 Knöfel, D.; Eßer, G.; Zum Einfluß von SO₂ auf Zement- und Kalkmörtel bei „trockener“ und bei „nasser“ Deposition; DFG-Abschlußkolloquium Korrosion nichtmetallischer anorganischer Werkstoffe im Bauwesen; Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie Karlsruhe; Heft 29; S. 158-174; 1996.

-
- KOLAR 1990 Kolar, J.; Stickstoffoxide und Luftreinhaltung, Grundlagen, Emissionen, Transmission, Immissionen, Wirkungen; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York; 1990.
- KOTTAS 1964 Kottas, H. : Das Resonanzverfahren zur Messung mechanischer Schwingungen und Materialeigenschaften, Zeitschrift für Instrumentenkunde, 72, S. 199-204; 1964.
- KRELL 1986 Krell, J.; Grube, H.; Zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe von Mörtel und Beton; Beton; 36; S. 104-108; 1986.
- MÜLLER 1993 Müller, A.; Einfluß des Luftschadstoffes SO₂ auf Beton; Betonwerk und Fertigteiltechnik; 11; S. 69-73; 1993.
- NICKLITZ 1986 Nicklitz, K. [Hrsg.]; Betonkorrosion im Hochbau; Bauverlag Wiesbaden und Berlin; 1986.
- NIESEL 1979 Niesel, K.; Zur Verwitterung von Baustoffen in schwefeldioxidhaltiger Atmosphäre – Literaturdiskussion; Fortschritte der Mineralogie; 57; S. 68-124; 1979.
- OPPERMANN 1973 Oppermann, B; Die Beständigkeit von Baustoffen und synthetisch hergestellten Calciumsilikathydraten gegenüber Schwefeldioxid; Dissertation TU Clausthal; 1973.
- RÖMPP 1995 Römpp Chemie Lexikon; Hrsg: Falbe, J.; Regitz, M.; Georg Thieme Verlag Stuttgart New York; 1989 – 1992.
- SCHEIBLER/FINKENER Mennerich, H.H.: Bedienungsanleitung für den „Kohlensäureapparat“ nach Scheibler/Finkener, Fa. Geotechnik, Hannover.

- SCHERPKE 1996 Scherpke, G.; Schneider, U.; Schadgaswirkung auf Betonoberflächen; Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen; 2. Jahrgang; Heft 4; S. 291-306; 1996.
- SCHIEBL 1975 Schießl, R.; Zur Frage der zulässigen Rißbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Carbonatisierung des Betons; Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton; Heft 255; 1975.
- SCHMIDT-REINHOLZ 1986 Schmidt-Reinholz, Ch.; Essen-Kray, D.; Herkunft, Kenndaten und Schädlichkeit einiger Luftschadstoffe; TIZ-Fachberichte; Vol. 110; No. 6; S. 387-400; 1986.
- SCHOLL 1991A Scholl, E.; Knöfel, D.; Der Einfluß von Luftschadstoffen auf Betonbauwerke – Untersuchungen an älteren Gebäuden; Beton; 1; S. 17-21; 1991.
- SCHOLL 1991B Scholl, E.; Knöfel, D.; On the effect of SO₂ and CO₂ on cement paste; Cement and Concrete Research; 21; S. 127-136; 1991.
- SCHOLL 1991C Scholl, E.; Zum Einfluß säurebildender Atmosphärien auf zementgebundene Baustoffe; Dissertation Universität-GH Siegen; 1991.
- SCHOLZ 1991 Scholz, W. [Begr.]; Knoblauch, H. [Hrsg.]; Baustoffkenntnis; 12. Auflage; Werner-Verlag; Düsseldorf; 1991.
- SCHURATH 1980 Schurath, U.; Luftchemisches Verhalten von NO_x ; Luftchemisches Verhalten antropogener Schadstoffe; Ergebnisse der VDI-Arbeitsgruppe Luftchemie; Düsseldorf; S. 36-42; 1980.

- SKOULIKIDIS 1981 Skoulikidis, Th.; Papakonstantinou-Ziotis, P.; Mechanism of sulphation by atmospheric SO₂ of the limestones and marbles of the ancient monuments and statues; Br. Corros, J.; Vol. 16; S. 63-69; 1981.
- SMOLCZYK 1976 Smolczyk, H.G.; Romberg, H.; Der Einfluß der Nachbehandlung und der Lagerung auf die Nacherhärtung und Porenverteilung von Beton; Tonindustrie-Zeitung; 100; S. 381 - 390; 1976.
- STARK 1995A Stark, J.; Sulfathüttenzement; Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen; Weimar; 41; S. 7-15; 1995.
- STARK 1995B Stark, J.; Wicht, B.; Dauerhaftigkeit von Beton; Schriften der Hochschule für Architektur und Bauwesen; Weimar; 100; 1995.
- STERNAD 1985 Sternad, B.; Die Einwirkung von Luftschadstoffen auf Putze; Umwelteinflüsse auf Baustoffoberflächen; Beitrag 5; Symposium der Technischen Akademie Esslingen; Bagda, E. [Hrsg.]; 16.-17. Oktober; 1985.
- TRAUTMANN 1993 Trautmann, I.; Knöfel, D.; Entwicklung eines Hüttsand-Gips-Portlandzementmörtels zur Injektion in mehrschaligem Mauerwerk; Zement-Kalk-Gips; 2; S. 95-100; 1993.
- WASHBURN 1921 Washburn, E. W.; The dynamics of capillary flow; The Physical Review; Second Series; 17; S. 273-283; 1921.
- WESCHE 1993 Wesche, K.; Baustoffe für tragende Bauteile; Band 2 Beton; 3. Auflage; Bauverlag Wiesbaden und Berlin; 1993.
- ZEUS 1995 Zeus, K.; Beton nach 50-jähriger Auslagerung; Otto Graf Journal; 6; S. 63 – 78; 1995.

10 ANHANG

10.1 Tabellenanhang

Tabelle A 1: Chemische Analysen der Bindemittel [M.-%] (Herstellerangaben)

	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R-HS	52,5 R, weiß	CEM II/B 32,5 R	CEM III/B 32,5	HÜS	CL 90	NHL 2	NHL 5
CaO	64,52	63,20	66,91	56,02	45,21	38,77	74,28	60,1	37,94
MgO	0,96	1,68	1,10	3,18	6,02	7,70	0,58	2,34	1,11
SiO ₂	20,58	19,67	21,81	26,05	33,02	37,17	0,07	11,12	26,42
Al ₂ O ₃	4,65	3,17	3,91	6,86	9,68	11,36	0,05	3,93	8,96
Fe ₂ O ₃	2,42	6,18	0,24	1,81	1,04	0,58	0,06	1,84	3,05
Na ₂ O	0,40	0,12	0,07	0,33	0,24	0,19	-	0,07	0,07
K ₂ O	0,88	0,95	0,43	0,87	0,87	0,86	-	1,25	1,58
SO ₃	3,26	-	2,54	3,01	2,69	2,50	-	0,44	2,60
CO ₂	1,30*	1,30*	-	-	-	-	2,16	4,83	3,23
H ₂ O	1,30*	0,74*	-	-	-	-	22,80	12,70	13,30

* Glühverlust

- keine Angabe

Tabelle A 2: Sieblinie der verwendeten Sandmischung [M.-%] (Durchgang)

	0,063 mm	0,125 mm	0,250 mm	0,500 mm	1,000 mm	2,000 mm	4,000 mm
F32	0,00	2,00	62,00	99,00	100,00	100,00	100,00
WDQ3	0,00	0,20	3,50	51,30	98,80	100,00	100,00
Mischung	0,00	1,28	38,60	79,92	99,52	100,00	100,00
Normsand	0,14	4,10	23,51	32,82	69,21	99,97	100,00

Tabelle A 3: Chemische Analyse der verwendeten Zuschläge [M.-%] (Herstellerangaben)

	WQD 3	F 32
SiO ₂	> 98	99,7
Al ₂ O ₃	0,13	0,2
Fe ₂ O ₃	< 0,01	0,03

Die folgenden Tabellen enthalten die Meßwerte der einzelnen Untersuchungen. Aus Platzgründen werden die Zahlen ohne Einheiten angegeben; die Einheiten sind in der Tabellenüberschrift wiedergegeben. In der linken Spalte ist die Lagerungsart (LA) angegeben, die ersten beiden Zeilen enthalten die Bindemittelbezeichnung und die Lagerungsdauer (Prüftermin).

Tabelle A 4: E-Moduli [N/mm²] der G1- Mörtel

LA	CEM I 42,5 R					CEM I 42,5 R-HS					CEM I 52,5 R,weiß				
	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d
T-0	34934	30999	28053	27176	30547	35132	33906	32510	31194	32025	35143	34706	30401	30417	31239
T-30	34934	33939	31448	33901	34169	35132	35593	35694	36797	37268	35143	36479	35054	36252	36370
T-100	34934	34216	33446	34294	36386	35132	37035	35726	37360	39085	35143	36330	35709	37457	38510
N-0	34934	31934	28222	29720	30820	35132	34759	32375	33226	33139	35143	34672	33215	32335	32675
N-30	34934	33634	32120	34992	33853	35132	35478	35069	35839	35791	35143	35820	34499	36273	34600
N-100	34934	34019	33883	35486	36386	35132	37429	34670	36452	37771	35143	36353	34938	36405	37409

Tabelle A 5: E-Moduli [N/mm²] der G2- Mörtel

LA	CEM II/B-S 32,5 R					CEM III/B 32,5					HGZ				
	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d
T-0	28412	29804	29499	25828	27185	30578	30522	27879	25926	27773	24339	14116	13708	11651	11381
T-30	28412	31201	32388	27954	30245	30578	27970	25868	25898	27051	24339	10409	12546	11959	11446
T-100	28412	31593	29622	27467	28976	30578	24611	22690	24992	25564	24339	10240	12502	11353	12667
N-0	28412	32052	29416	28603	28945	30578	31221	29409	28712	29121	24339	19183	17005	14165	12744
N-30	28412	31889	30765	31457	31830	30578	28048	25559	27886	27674	24339	10359	12380	11524	12796
N-100	28412	30798	30903	25796	28340	30578	27673	23093	24492	25677	24339	10154	12068	11955	13196

Tabelle A 6: E-Moduli [N/mm²] der G1- Mörtel

LA	CL 90					N HL 2,0					N HL 5,0				
	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d
T-0	4053	6041	5713	6928	7399	2985	4860	7215	6220	6004	5367	4859	4529	3292	3547
T-30	4053	8299	6105	8943	7405	2985	9212	8634	8143	8945	5367	4172	3905	4441	3523
T-100	4053	9026	7487	9200	9329	2985	10242	9957	8440	8829	5367	4075	5054	4543	3985
N-0	4053	5564	6422	8474	11092	2985	9777	11765	11618	10252	5367	5273	4688	4125	4508
N-30	4053	10647	8777	11093	9806	2985	10658	12056	11312	9963	5367	4094	4288	4404	3806
N-100	4053	10357	9240	10737	11647	2985	10714	12268	11579	10195	5367	4078	5014	4397	4412

Tabelle A 7: Biegezugfestigkeiten [N/mm²] der G1- Mörtel

LA	CEM I 42,5 R					CEM I 42,5 R-HS					CEM I 52,5 R,weiß				
	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d
T-0	4,86	9,68	5,62	6,06	7,04	5,36	8,00	6,36	5,48	4,75	5,34	8,41	5,88	6,71	5,53
T-30	4,86	8,21	7,96	11,99	11,87	5,36	7,68	8,55	9,63	11,47	5,34	8,07	6,10	9,25	11,09
T-100	4,86	7,08	10,47	13,73	16,81	5,36	6,95	9,07	10,40	16,23	5,34	8,39	10,94	11,60	16,43
N-0	4,86	7,86	5,65	6,21	6,25	5,36	7,07	6,90	7,43	6,05	5,34	7,63	7,22	7,08	5,94
N-30	4,86	6,94	8,04	9,44	10,51	5,36	7,17	8,18	8,58	10,48	5,34	7,87	8,12	9,86	7,34
N-100	4,86	7,25	9,87	11,59	11,46	5,36	6,77	8,76	10,66	11,78	5,34	7,50	8,28	10,22	10,68

Tabelle A 8: Biegezugfestigkeiten [N/mm²] der G2- Mörtel

LA	CEM II/B-S 32,5 R					CEM III/B 32,5					HGZ				
	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d
T-0	4,11	7,67	5,66	5,35	6,17	4,32	6,47	6,44	6,56	7,42	3,40	2,71	2,52	2,26	2,08
T-30	4,11	7,18	9,48	11,98	13,58	4,32	5,88	8,52	10,54	10,64	3,40	2,47	2,90	2,83	2,77
T-100	4,11	8,19	10,60	10,35	12,86	4,32	7,08	7,60	9,23	9,39	3,40	2,43	2,75	2,53	3,34
N-0	4,11	6,57	5,23	5,59	5,74	4,32	6,10	6,11	4,63	8,55	3,40	2,21	2,07	1,76	2,21
N-30	4,11	6,14	7,98	9,98	12,74	4,32	6,03	7,03	9,73	10,09	3,40	2,35	2,58	2,29	2,46
N-100	4,11	7,05	9,90	8,89	8,15	4,32	5,73	7,41	7,32	8,66	3,40	2,20	2,45	2,14	2,64

Tabelle A 9: Biegezugfestigkeiten [N/mm²] der G3- Mörtel

LA	CL 90					N HL 2,0					N HL 5,0				
	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d
T-0	0,54	0,74	0,80	1,40	1,39	0,50	0,66	1,38	1,10	0,93	0,61	1,03	0,85	0,63	0,96
T-30	0,54	1,10	0,89	1,66	1,36	0,50	1,99	1,90	1,67	1,92	0,61	0,97	0,46	0,93	1,05
T-100	0,54	1,41	1,21	1,84	1,73	0,50	2,46	2,25	1,84	1,55	0,61	0,98	1,18	0,55	0,74
N-0	0,54	0,68	0,90	1,45	1,74	0,50	2,53	2,66	2,86	1,93	0,61	1,00	0,82	0,61	1,01
N-30	0,54	1,85	1,50	2,36	1,98	0,50	2,91	2,95	2,82	2,13	0,61	0,87	0,89	0,59	0,79
N-100	0,54	1,78	1,42	2,71	2,88	0,50	2,26	2,98	3,43	2,36	0,61	0,93	1,05	0,67	1,15

Tabelle A 10: Druckfestigkeiten [N/mm²] der G1- Mörtel

LA	CEM I 42,5 R					CEM I 42,5 R-HS					CEM I 52,5 R,weiß				
	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d
T-0	43,63	44,42	48,07	48,56	49,00	41,13	56,78	58,34	53,80	54,53	42,31	67,97	53,01	55,57	55,76
T-30	43,63	42,48	56,91	57,71	68,78	41,13	61,43	64,90	68,27	67,74	42,31	66,29	65,27	69,12	70,07
T-100	43,63	43,51	65,10	76,63	86,04	41,13	66,13	72,03	82,99	86,75	42,31	65,61	66,43	73,20	81,14
N-0	43,63	46,34	51,87	50,07	53,56	41,13	61,03	63,25	59,76	56,63	42,31	63,52	61,92	64,55	61,14
N-30	43,63	40,53	60,74	64,28	60,01	41,13	58,16	63,47	61,48	65,47	42,31	67,95	64,50	70,05	62,87
N-100	43,63	40,45	63,56	67,50	76,16	41,13	65,82	67,03	67,58	76,84	42,31	65,59	62,26	68,94	67,82

Tabelle A 11: Druckfestigkeiten [N/mm²] der G2- Mörtel

LA	CEM II/B-S 32,5 R					CEM III/B 32,5					HGZ				
	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d
T-0	35,13	51,47	48,73	44,19	46,68	35,22	53,04	52,16	45,59	51,00	13,34	16,23	17,57	13,33	13,40
T-30	35,13	50,51	56,23	59,79	67,14	35,22	50,67	48,95	52,90	57,85	13,34	11,08	15,46	12,70	11,97
T-100	35,13	55,56	64,34	62,08	64,86	35,22	45,84	45,89	53,03	55,50	13,34	11,64	15,39	12,74	13,67
N-0	35,13	47,83	50,08	50,48	51,80	35,22	52,57	55,26	52,17	54,75	13,34	18,79	21,97	18,58	15,14
N-30	35,13	51,54	58,82	61,59	62,00	35,22	51,13	50,30	58,86	57,91	13,34	10,39	13,47	11,06	13,16
N-100	35,13	55,10	61,73	61,61	64,04	35,22	53,94	47,48	52,37	54,02	13,34	10,63	13,62	14,00	14,48

Tabelle A 12: Druckfestigkeiten [N/mm²] der G3- Mörtel

LA	CL 90					N HL 2,0					N HL 5,0				
	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d	28d	90d	180d	360d	720d
T-0	1,12	1,49	2,89	3,84	4,31	1,40	2,20	4,27	4,00	4,44	3,60	3,00	2,60	1,61	2,21
T-30	1,12	3,99	3,05	5,09	4,24	1,40	7,78	6,36	6,41	8,08	3,60	2,52	2,96	2,55	1,96
T-100	1,12	4,88	4,35	5,69	5,86	1,40	9,75	7,88	7,95	8,62	3,60	2,71	2,79	2,71	2,39
N-0	1,12	1,14	2,37	3,88	6,06	1,40	5,92	8,41	11,37	11,22	3,60	3,53	2,52	2,06	2,80
N-30	1,12	5,81	4,79	6,32	5,79	1,40	10,29	10,86	11,72	9,69	3,60	2,70	2,52	2,05	1,81
N-100	1,12	5,69	5,24	6,98	7,59	1,40	10,31	12,17	12,40	10,80	3,60	2,69	2,87	2,55	2,75

Tabelle A 13: Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m² h^{0,5}] der G1- Mörtel

LA	CEM I 42,5 R				CEM I 42,5 R-HS				CEM I 52,5 R,weiß			
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d
T-0	0,69	1,10	0,69	0,52	0,94	1,09	1,11	1,13	1,03	1,00	1,16	1,43
T-30	0,40	0,50	0,37	0,31	0,53	0,42	0,30	0,27	0,47	0,59	0,28	0,27
T-100	0,28	0,51	0,34	0,37	0,38	0,48	0,34	0,41	0,23	0,38	0,19	0,23
N-0	0,58	1,45	1,82	0,45	0,55	1,23	1,45	0,66	0,57	1,10	1,63	1,38
N-30	0,29	0,44	0,15	0,14	0,32	0,43	0,16	0,18	0,18	0,62	0,11	0,11
N-100	0,20	0,54	0,21	0,17	0,26	0,43	0,19	0,19	0,12	0,24	0,11	0,09

Tabelle A 14: Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m² h^{0,5}] der G2- Mörtel

LA	CEM II/B-S 32,5 R				CEM III/B 32,5				HGZ			
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d
T-0	1,05	1,04	1,38	0,94	0,47	0,57	1,09	1,12	2,46	2,73	4,32	3,83
T-30	1,01	1,00	1,20	0,87	0,56	1,01	1,07	1,13	3,84	2,99	3,16	3,63
T-100	0,96	1,04	1,11	0,82	0,92	1,26	1,44	0,72	5,74	4,14	4,53	4,92
N-0	0,69	1,10	1,51	1,51	0,40	0,74	0,65	1,00	1,67	2,01	2,52	3,10
N-30	0,41	0,81	0,74	0,54	0,50	0,97	0,97	0,85	4,80	3,52	3,60	4,02
N-100	0,60	0,65	0,86	0,60	0,70	1,28	1,10	0,97	6,06	3,97	4,83	4,35

Tabelle A 15: Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m² h^{0,5}] der G3- Mörtel

LA	CL 90				N HL 2,0				N HL 5,0			
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d
T-0	12,09	15,05	12,58	13,27	19,45	20,32	22,82	23,24	4,81	5,73	6,57	4,87
T-30	11,29	13,60	10,71	12,54	18,55	18,82	21,69	16,48	4,05	4,24	5,40	5,11
T-100	10,40	12,50	9,61	12,04	16,82	17,50	20,90	15,62	3,96	4,53	5,37	4,10
N-0	6,97	8,05	5,83	4,55	18,44	15,68	13,88	12,27	5,16	8,85	9,10	5,10
N-30	9,85	10,19	8,57	9,99	14,18	13,40	11,78	10,96	4,63	5,28	7,06	6,11
N-100	9,43	10,77	9,11	8,81	15,16	11,77	11,94	11,01	5,34	5,83	6,04	4,56

Tabelle A 16: Offene Porosität [Vol.-%] der G1- Mörtel

LA	CEM I 42,5 R				CEM I 42,5 R-HS				CEM I 52,5 R,weiß			
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d
T-0	11,61	13,63	14,48	14,09	11,41	12,53	14,97	12,42	11,06	12,72	15,73	14,20
T-30	8,81	11,11	10,22	10,87	9,65	10,32	9,87	10,28	8,56	9,80	9,69	11,04
T-100	8,55	10,50	9,67	10,21	8,73	10,34	8,53	9,72	7,93	9,86	9,25	9,90
N-0	9,84	12,51	14,44	13,40	10,20	11,82	14,07	13,41	9,52	11,26	13,49	12,85
N-30	9,41	10,46	6,59	10,16	8,16	10,30	6,47	10,50	7,81	9,62	8,75	9,73
N-100	7,77	10,45	8,05	9,42	8,25	10,02	6,59	9,82	6,21	9,33	7,37	9,68

Tabelle A 17: Offene Porosität [Vol.-%] der G2- Mörtel

LA	CEM II/B-S 32,5 R				CEM III/B 32,5				HGZ			
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d
T-0	13,26	13,15	16,44	15,24	10,35	12,46	15,19	15,79	18,24	19,73	20,63	20,91
T-30	10,92	12,56	13,97	12,71	10,42	13,71	13,68	13,91	18,50	18,26	18,21	18,73
T-100	11,21	12,48	16,15	12,41	12,58	14,19	14,48	12,23	17,63	17,78	18,57	17,62
N-0	10,97	12,53	15,59	14,29	8,87	12,24	12,88	14,90	16,20	17,87	18,69	19,87
N-30	9,73	11,53	12,22	11,76	9,48	12,97	13,13	12,81	18,13	18,02	18,11	17,84
N-100	10,42	10,63	13,55	11,64	11,15	13,47	14,65	13,31	17,46	17,39	18,68	16,33

Tabelle A 18: Offene Porosität [Vol.-%] der G3-Mörtel

LA	CL 90				N HL 2,0				N HL 5,0			
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d
T-0	28,54	29,96	30,09	28,28	26,75	27,75	27,15	27,43	21,12	27,96	34,36	34,27
T-30	27,20	29,22	28,26	28,85	23,50	26,53	26,53	26,01	22,61	24,71	32,47	37,96
T-100	26,90	28,59	28,56	26,37	23,24	27,00	26,58	26,68	21,98	23,85	33,59	36,61
N-0	28,98	29,62	29,51	28,50	24,95	25,71	26,60	26,26	21,01	24,94	34,15	33,48
N-30	26,55	28,68	26,97	26,24	22,69	25,12	24,93	25,28	21,57	24,89	35,70	37,15
N-100	26,79	28,88	27,65	25,31	23,03	25,27	25,54	24,95	26,56	29,67	28,72	36,33

Tabelle A 19: FTW-Absplitterungen [M.-%] der G1-Mörtel nach 50 Zyklen

LA	CEM I 42,5 R				CEM I 42,5 R-HS				CEM I 52,5 R,weiß			
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d
T-0	1,36	1,11	0,39	19,53	33,82	0,57	0,37	6,75	0,54	0,98	0,54	1,09
T-30	0,27	0,38	0,54	0,45	2,15	0,18	0,37	0,85	0,46	0,49	0,49	0,66
T-100	0,22	0,14	0,13	0,19	0,53	0,41	0,64	0,41	0,50	0,44	0,57	0,81
N-0	0,94	0,93	1,35	41,51	14,89	0,78	0,44	57,69	0,77	0,97	1,38	0,50
N-30	0,32	0,64	0,64	1,41	0,48	0,41	1,42	2,64	0,53	0,66	0,81	1,30
N-100	0,25	0,36	0,86	0,96	0,42	0,83	1,29	2,09	0,39	0,56	0,97	1,64

Tabelle A 20: FTW-Absplitterungen [M.-%] der G2-Mörtel nach 50 Zyklen (ohne HGZ)

LA	CEM II/B-S 32,5 R				CEM III/B 32,5			
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d
T-0	3,79	3,69	12,13	6,40	14,48	23,30	20,98	71,61
T-30	0,95	0,93	3,10	3,24	6,04	6,53	11,06	16,42
T-100	1,21	1,30	4,00	2,16	7,84	8,59	6,54	15,94
N-0	9,36	3,51	70,03	100,0	10,89	20,52	19,19	61,06
N-30	1,15	1,33	4,88	3,10	6,74	18,01	10,93	16,22
N-100	0,89	0,60	3,30	3,05	5,31	16,73	11,32	12,48

Tabelle A 21: μ -Werte [-] der G1-Mörtel

LA	CEM I 42,5 R			CEM I 42,5 R-HS			CEM I 52,5 R,weiß		
	90d	180d	360d	90d	180d	360d	90d	180d	360d
T-0	143,90	96,09	155,31	181,99	139,49	171,74	149,41	135,08	162,02
T-30	176,22	121,97	199,03	238,95	143,30	248,50	218,10	184,77	266,54
T-100	198,24	112,00	222,77	256,27	167,55	272,65	211,77	245,09	297,08
N-0	146,99	108,55	233,36	179,10	177,54	207,62	142,52	169,76	240,38
N-30	194,18	106,01	187,10	254,42	170,35	208,40	208,81	181,83	260,51
N-100	237,84	101,72	207,28	279,13	164,83	232,15	261,94	191,49	270,25

Tabelle A 22: μ -Werte [-] der G2-Mörtel

LA	CEM II/B-S 32,5 R			CEM III/B 32,5			HGZ		
	90d	180d	360d	90d	180d	360d	90d	180d	360d
T-0	162,28	105,55	121,18	246,41	176,04	150,78	57,29	58,39	49,14
T-30	105,74	92,13	120,21	136,37	101,92	122,89	37,70	57,58	50,39
T-100	87,89	97,74	112,45	87,29	91,61	113,91	34,36	56,64	49,85
N-0	160,21	145,19	181,58	217,40	212,52	255,65	59,60	63,85	48,90
N-30	122,18	95,56	110,94	221,34	94,79	111,86	33,57	52,92	43,02
N-100	82,54	95,04	102,31	146,76	93,41	112,61	33,22	53,57	43,38

Tabelle A 23: μ -Werte [-] der G3-Mörtel

LA	CL 90			N HL 2,0			N HL 5,0		
	90d	180d	360d	90d	180d	360d	90d	180d	360d
T-0	25,11	46,59	33,95	22,88	43,03	28,10	28,91	38,51	23,67
T-30	25,14	47,49	36,00	29,23	52,23	45,99	30,25	40,38	27,29
T-100	25,72	46,69	35,89	30,33	55,23	50,83	30,74	40,70	28,12
N-0	39,24	54,21	42,22	24,42	47,53	33,96	29,92	38,98	24,88
N-30	24,85	46,81	33,48	25,19	47,05	32,47	29,20	39,28	25,84
N-100	24,53	47,04	35,37	25,67	48,24	35,43	29,31	38,98	25,34

Tabelle A 24: Schwinden [mm] zwischen dem 28. und 180. Tag nach Probenherstellung aller Mörtel.

LA	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R-HS	CEM I 52,5 R, weiß	CEM II/B-S 32,5 R	CEM III/B 32,5	HGZ	CL 90	N HL 2,0	N HL 5,0
	180d	180d	180d	180d	180d	180d	180d	180d	180d
T-0	-1,19	-0,83	-0,87	-0,84	-1,04	-1,24	-0,15	-0,62	-1,07
T-30	-1,05	-0,75	-0,79	-0,86	-0,91	-0,66	-0,15	-0,95	-1,27
T-100	-1,14	-0,83	-0,76	-1,11	-1,00	-1,35	-0,24	-0,97	-1,41
N-0	-1,13	-0,68	-0,70	-0,83	-0,97	-0,71	-0,15	-0,97	-0,95
N-30	-0,98	-0,80	-0,72	-0,82	-0,86	-0,74	-0,23	-0,96	-1,29
N-100	-1,17	-0,84	-0,83	-0,93	-0,88	-1,28	-0,26	-0,91	-1,23

Tabelle A 25: Neutralisierungstiefen [mm] der G1-Mörtel

LA	CEM I 42,5 R				CEM I 42,5 R-HS				CEM I 52,5 R, weiß			
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d
T-0	0,00	2,00	3,00	4,00	0,00	2,00	4,00	3,50	0,00	1,00	0,00	4,00
T-30	2,33	7,00	7,00	9,00	3,55	3,00	6,00	7,50	1,67	4,00	3,00	5,00
T-100	4,77	10,00	11,00	17,50	5,06	6,00	9,00	16,00	2,42	5,00	6,00	11,00
N-0	0,78	2,00	3,00	4,50	0,65	2,00	3,00	3,50	0,43	1,00	2,00	4,00
N-30	2,79	5,00	4,00	6,00	3,85	4,00	4,00	6,50	2,29	3,00	2,00	4,00
N-100	2,98	10,00	11,00	10,00	3,72	7,00	7,00	11,00	2,64	5,00	6,00	7,00

Tabelle A 26: Neutralisierungstiefen [mm] der G2-Mörtel

LA	CEM II/B-S 32,5 R				CEM III/B 32,5				HGZ			
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d
T-0	0,00	2,00	5,00	9,00	1,57	4,00	8,00	9,50	10,39	13,00	v	v
T-30	6,19	9,00	15,00	18,00	8,56	14,00	18,00	v	v	v	v	v
T-100	10,31	18,00	v	v	15,09	v	v	v	v	v	v	v
N-0	1,59	4,00	5,00	7,50	3,67	4,00	7,00	9,50	8,02	13,00	v	v
N-30	5,78	9,00	10,00	11,50	7,66	14,00	11,00	16,00	v	v	v	v
N-100	9,42	14,00	v	v	10,24	v	v	v	v	v	v	v

v: vollständig neutralisiert (= 20 mm)

Tabelle A 27: Neutralisierungstiefen [mm] der G3-Mörtel

LA	CL 90				N HL 2,0				N HL 5,0			
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d
T-0	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	v	v	v	v
T-30	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	v	v	v	v
T-100	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	v	v	v	v
N-0	0,00	4,00	8,00	15,00	5,18	8,00	16,00	v	15,00	v	v	v
N-30	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
N-100	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v

v: vollständig neutralisiert (= 20 mm)

i: „inverse“ Neutralisierung**Tabelle A 28: Sulfatgehalte [ppm] der G1-Mörtel (100 ppm = 1 M.-%)**

LA	CEM I 42,5 R				CEM I 42,5 R-HS				CEM I 52,5 R,weiß				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	43,1	31,0	29,7	27,9	43,5	28,1	22,8	38,0	41,0	33,0	25,8	25,3
	2-5 mm	41,4	48,3	27,3	24,6	48,1	42,1	28,0	39,4	30,0	39,6	37,1	27,4
	5-8 mm			48,2	30,1			40,1	41,5			30,7	28,4
T-30	0-2 mm	64,6	41,2	59,6	66,4	48,9	46,7	72,5	74,3	31,5	65,1	43,6	47,2
	2-5 mm	53,6	29,8	34,3	33,0	44,5	33,6	37,3	36,0	39,6	24,8	26,5	24,7
	5-8 mm			33,3	30,4			44,0	37,8			33,8	37,4
T-100	0-2 mm	52,7	55,8	84,5	115,7	66,4	84,9	184,5	129,0	42,1	82,8	95,9	77,9
	2-5 mm	42,8	29,9	25,4	29,9	48,8	38,8	41,3	41,0	43,0	23,2	23,1	22,3
	5-8 mm			29,6	33,0			39,1	37,7			37,3	25,7
N-0	0-2 mm	50,8	28,7	31,0	25,2	44,7	25,3	21,3	20,2	41,8	23,2	27,2	19,2
	2-5 mm	41,1	51,1	45,7	42,3	52,6	45,1	40,6	44,0	31,7	39,5	41,5	36,9
	5-8 mm			47,7	30,0			41,8	42,1			35,9	31,6
N-30	0-2 mm	57,1	48,0	110,6	104,1	54,0	62,0	135,1	144,9	46,1	79,2	98,9	106,1
	2-5 mm	53,5	31,9	35,1	42,7	51,8	35,2	48,8	54,1	32,8	28,2	42,4	43,9
	5-8 mm			54,4	45,6			46,9	48,9			40,6	42,9
N-100	0-2 mm	69,7	59,0	140,3	175,2	95,6	76,8	151,5	193,0	65,6	94,1	158,8	129,0
	2-5 mm	53,7	35,2	37,4	48,7	48,2	41,5	52,0	62,3	38,7	29,6	34,6	35,5
	5-8 mm			37,1	47,6			42,8	55,2			44,7	41,3

Tabelle A 29: Sulfatgehalte [ppm] der G2-Mörtel (100 ppm = 1 M.-%)

LA	CEM II/B-S 32,5 R				CEM III/B 32,5				HGZ				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	44,4	35,5	32,9	40,2	32,6	35,7	43,6	42,4	105,2	103,9	101,8	124,0
	2-5 mm	47,6	41,9	31,3	39,5	47,9	40,5	43,5	44,2	118,2	124,5	115,3	137,4
	5-8 mm			40,0	41,7			36,3	43,0			116,3	161,9
T-30	0-2 mm	51,9	119,5	87,6	112,4	76,1	57,3	103,1	75,8	202,4	248,2	280,1	378,7
	2-5 mm	40,1	45,5	42,5	48,9	31,3	31,6	36,8	37,0	128,1	129,7	130,2	152,9
	5-8 mm			44,2	43,6			33,7	36,3			118,8	137,0
T-100	0-2 mm	60,0	188,0	194,3	181,3	92,5	122,7	155,0	202,3	249,1	263,1	373,8	424,7
	2-5 mm	40,3	47,4	41,5	45,8	30,3	34,2	41,7	45,6	141,2	137,8	148,6	163,3
	5-8 mm			47,9	49,2			37,0	42,2			133,5	155,4
N-0	0-2 mm	44,6	30,4	21,2	23,0	22,2	25,5	20,2	19,1	71,3	96,6	65,8	90,6
	2-5 mm	55,5	49,9	47,5	53,2	48,5	36,4	42,7	35,2	117,5	123,8	105,7	105,0
	5-8 mm			55,3	54,4			45,1	44,2			123,7	139,6
N-30	0-2 mm	60,6	118,9	124,5	153,3	59,4	54,2	99,7	136,2	149,2	161,7	222,0	268,9
	2-5 mm	41,7	46,1	43,7	54,5	31,0	28,4	39,6	49,1	122,7	118,3	110,2	103,6
	5-8 mm			44,3	54,3			39,6	52,4			113,7	114,2
N-100	0-2 mm	87,5	115,0	208,1	213,9	65,5	124,3	162,2	232,3	199,0	210,5	303,4	415,2
	2-5 mm	40,4	45,0	46,3	65,1	30,4	33,8	41,3	56,4	120,5	114,9	114,5	113,6
	5-8 mm			50,6	45,4			42,7	54,3			113,9	114,9

Tabelle A 30: Sulfatgehalte [ppm] der G3-Mörtel (100 ppm = 1 M.-%)

LA	CL 90				N HL 2,0				N HL 5,0				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	0,5	2,1	1,6	2,2	3,9	4,1	4,3	4,2	54,3	52,1	52,6	49,9
	2-5 mm	0,2	2,1	1,7	1,6	1,5	3,3	4,7	3,7	50,2	53,1	50,1	54,5
	5-8 mm			2,0	1,5			3,5	3,7			53,4	50,5
T-30	0-2 mm	30,8	75,1	159,5	50,1	29,5	88,0	56,0	61,2	141,6	222,0	222,9	330,7
	2-5 mm	0,6	3,1	5,6	4,4	3,1	4,6	4,9	8,6	55,8	59,7	52,5	55,6
	5-8 mm			5,8	6,7			5,9	18,0			54,2	57,6
T-100	0-2 mm	113,6	74,9	173,1	169,3	99,8	193,6	129,7	116,5	158,5	314,3	281,6	565,6
	2-5 mm	4,0	3,0	7,1	16,1	3,8	5,1	7,4	8,8	56,9	69,6	65,8	88,7
	5-8 mm			6,1	19,2			7,4	10,1			67,3	85,4
N-0	0-2 mm	0,4	2,4	2,4	2,2	2,4	4,1	4,3	5,8	20,2	67,0	32,2	31,0
	2-5 mm	0,3	2,4	2,6	1,8	2,3	3,8	4,0	3,6	25,5	50,6	12,0	14,6
	5-8 mm			2,3	1,7			4,3	3,3			17,3	21,2
N-30	0-2 mm	26,2	20,4	112,3	254,3	73,5	52,4	91,3	138,9	66,6	98,4	209,3	209,7
	2-5 mm	6,0	5,4	18,3	36,1	6,0	9,8	15,9	25,1	54,6	74,0	63,7	67,0
	5-8 mm			15,2	35,7			12,6	25,3			71,6	85,9
N-100	0-2 mm	65,5	74,9	353,6	529,2	156,2	195,8	205,1	412,0	141,3	218,1	326,4	583,6
	2-5 mm	6,5	6,2	23,1	54,1	9,0	22,0	15,2	40,3	47,6	74,3	76,1	115,7
	5-8 mm			26,4	62,1			14,4	42,9			75,9	103,1

Tabelle A 31: Nitritgehalte [ppm] der G1-Mörtel (100 ppm = 1 M.-%)

LA	CEM I 42,5 R				CEM I 42,5 R-HS				CEM I 52,5 R,weiß				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	0,18	0,31	0,33	0,31	0,17	0,32	0,50	0,36	0,00	0,28	0,33	0,39
	2-5 mm	0,00	0,17	0,25	0,20	0,00	0,10	0,25	0,00	0,00	0,10	0,09	0,00
	5-8 mm			0,18	0,00			0,20	0,00			0,40	0,00
T-30	0-2 mm	0,44	0,72	0,73	0,94	0,94	1,32	1,51	1,47	0,59	2,36	0,87	0,56
	2-5 mm	0,03	0,22	0,36	0,48	0,24	0,28	0,64	0,59	0,00	0,34	0,32	0,19
	5-8 mm			0,28	0,38			0,56	0,38			0,14	0,29
T-100	0-2 mm	0,37	0,77	1,02	1,60	0,40	1,52	1,34	2,19	0,48	1,52	0,90	1,10
	2-5 mm	0,18	0,28	0,48	0,79	0,21	0,38	0,72	1,05	0,00	0,32	0,36	0,41
	5-8 mm			0,30	0,48			0,57	0,60			0,36	0,38
N-0	0-2 mm	0,06	0,17	0,27	0,22	0,08	0,23	0,38	0,23	0,00	0,27	0,24	0,41
	2-5 mm	0,00	0,19	0,22	0,22	0,00	0,10	0,26	0,29	0,00	0,10	0,11	0,39
	5-8 mm			0,20	0,00			0,20	0,00			0,20	0,00
N-30	0-2 mm	0,27	0,55	0,68	0,59	0,50	0,89	0,61	0,73	0,56	1,17	0,86	0,89
	2-5 mm	0,21	0,32	0,43	0,53	0,11	0,43	0,75	0,82	0,00	0,49	0,90	1,34
	5-8 mm			0,37	0,88			1,21	1,24			0,60	1,09
N-100	0-2 mm	0,54	0,50	0,74	0,90	0,52	0,77	0,68	0,65	0,36	0,91	0,69	0,76
	2-5 mm	0,04	0,40	0,56	0,66	0,32	0,42	0,69	0,71	0,00	0,47	0,55	0,67
	5-8 mm			0,42	0,64			0,80	0,77			0,49	0,70

Tabelle A 32: Nitritgehalte [ppm] der G2-Mörtel (100 ppm = 1 M.-%)

LA	CEM II/B-S 32,5 R				CEM III/B 32,5				HGZ				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	0,12	0,39	0,35	0,33	0,18	0,31	0,32	0,24	0,26	0,34	0,25	0,17
	2-5 mm	0,00	0,22	0,18	0,24	0,11	0,17	0,22	0,00	0,04	0,25	0,16	0,00
	5-8 mm			0,29	0,28			0,14	0,02			0,25	0,00
T-30	0-2 mm	0,36	2,32	0,66	0,79	0,14	0,34	0,25	0,25	0,27	0,34	0,18	0,19
	2-5 mm	0,11	0,40	0,39	0,67	0,13	0,22	0,21	0,00	0,13	0,26	0,18	0,21
	5-8 mm			0,29	0,38			0,16	0,00			0,15	0,00
T-100	0-2 mm	0,32	0,98	0,59	0,91	0,06	0,24	0,26	0,20	0,18	0,21	0,18	0,15
	2-5 mm	0,14	0,42	0,36	0,47	0,05	0,21	0,22	0,00	0,03	0,28	0,16	0,16
	5-8 mm			0,40	0,41			0,20	0,00			0,21	0,16
N-0	0-2 mm	0,08	0,24	0,19	0,26	0,07	0,22	0,20	0,00	0,11	0,24	0,17	0,00
	2-5 mm	0,00	0,22	0,21	0,27	0,05	0,19	0,21	0,21	0,00	0,26	0,14	0,00
	5-8 mm			0,46	0,35			0,23	0,20			0,17	0,00
N-30	0-2 mm	0,21	0,50	0,47	0,41	0,18	0,22	0,31	0,26	0,15	0,37	0,15	0,23
	2-5 mm	0,22	0,39	0,48	0,45	0,07	0,25	0,30	0,25	0,13	0,28	0,17	0,28
	5-8 mm			0,51	0,55			0,21	0,26			0,21	0,22
N-100	0-2 mm	0,14	0,46	0,40	0,39	0,08	0,33	0,33	0,29	0,05	0,29	0,16	0,00
	2-5 mm	0,17	0,36	0,28	0,38	0,10	0,23	0,29	0,27	0,26	0,26	0,16	0,28
	5-8 mm			0,30	0,45			0,17	0,26			0,19	0,26

Tabelle A 33: Nitritgehalte [ppm] der G3-Mörtel (100 ppm = 1 M.-%)

LA	CL 90				N HL 2,0				N HL 5,0				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	0,13	0,05	0,12	0,19	0,23	0,56	0,72	0,82	0,13	0,31	0,31	0,40
	2-5 mm	0,16	0,62	0,20	0,00	0,06	0,12	0,48	0,34	0,11	0,20	0,25	0,34
	5-8 mm			0,42	0,00			0,16	0,26			0,18	0,29
T-30	0-2 mm	0,45	5,72	3,93	4,92	0,48	3,83	2,17	1,35	1,35	0,43	0,36	0,33
	2-5 mm	0,06	0,42	1,92	1,11	0,12	0,59	0,85	0,79	0,25	0,54	0,33	0,29
	5-8 mm			0,92	0,92			0,40	0,53			0,35	0,31
T-100	0-2 mm	1,12	4,30	8,96	9,37	1,24	3,78	2,10	2,33	1,45	0,71	0,53	0,74
	2-5 mm	0,10	0,27	2,01	3,22	0,14	0,92	0,97	1,22	0,41	0,37	0,29	0,40
	5-8 mm			0,55	1,51			0,54	0,66			0,27	0,42
N-0	0-2 mm	0,12	0,32	0,19	0,30	0,27	0,33	0,27	0,27	0,20	0,18	0,16	0,00
	2-5 mm	0,13	0,25	0,17	0,29	0,09	0,14	0,20	0,27	0,12	0,20	0,16	0,27
	5-8 mm			0,30	0,27			0,18	0,24			0,16	0,24
N-30	0-2 mm	0,36	0,77	0,76	0,52	0,81	0,66	0,33	0,24	0,67	0,31	0,23	0,23
	2-5 mm	0,15	0,32	0,79	0,42	0,17	0,28	0,33	0,30	0,19	0,36	0,25	0,23
	5-8 mm			0,72	0,41			0,24	0,33			0,26	0,27
N-100	0-2 mm	0,41	0,72	0,48	0,39	0,97	0,83	0,36	0,32	0,84	0,45	0,47	0,30
	2-5 mm	0,17	0,41	0,67	0,35	0,27	0,41	0,32	0,31	0,93	0,34	0,24	0,28
	5-8 mm			0,66	0,43			0,25	0,34			0,24	0,33

Tabelle A 34: Nitratgehalte [ppm] der G1-Mörtel (100 ppm = 1 M.-%)

LA	CEM I 42,5 R				CEM I 42,5 R-HS				CEM I 52,5 R,weiß				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	0,32	0,21	0,22	0,01	0,43	0,48	0,45	0,15	0,32	0,31	0,20	0,10
	2-5 mm	0,53	0,25	0,18	0,00	0,29	0,79	0,21	0,05	0,29	0,30	0,14	0,01
	5-8 mm			0,21	0,00			0,20	0,09			0,05	0,00
T-30	0-2 mm	1,17	0,41	0,72	1,08	0,70	0,59	1,17	1,51	0,77	0,87	0,63	1,00
	2-5 mm	0,49	0,15	0,34	0,91	0,43	0,19	0,40	0,46	0,28	0,24	0,19	0,26
	5-8 mm			0,22	0,49			0,33	0,22			0,95	0,19
T-100	0-2 mm	0,85	0,59	1,08	1,59	0,52	0,96	1,44	1,29	0,46	0,81	0,94	0,95
	2-5 mm	0,60	0,26	0,46	0,96	0,31	0,20	0,66	0,53	0,18	0,25	0,41	0,16
	5-8 mm			0,25	0,32			0,40	0,25			0,22	0,19
N-0	0-2 mm	0,59	0,23	0,32	0,00	0,46	0,52	0,34	0,09	0,45	0,30	0,27	0,13
	2-5 mm	0,36	0,21	0,25	0,02	0,37	0,16	0,33	0,18	0,28	0,85	0,25	0,14
	5-8 mm			0,23	0,20			0,27	0,00			0,15	0,12
N-30	0-2 mm	0,60	0,41	1,18	1,44	0,73	0,66	0,97	1,48	0,50	0,83	1,35	2,01
	2-5 mm	0,85	0,28	0,53	1,34	0,50	0,28	0,88	1,18	0,27	0,29	0,65	0,66
	5-8 mm			0,35	0,86			0,22	0,62			0,22	0,18
N-100	0-2 mm	0,64	0,60	1,38	2,28	0,72	0,70	1,21	1,72	0,54	1,22	1,48	3,05
	2-5 mm	0,48	0,39	0,80	1,01	0,60	0,30	1,09	1,46	0,34	0,51	0,92	1,04
	5-8 mm			0,58	0,94			0,96	1,10			0,42	0,26

Tabelle A 35: Nitratgehalte [ppm] der G2-Mörtel (100 ppm = 1 M.-%)

LA	CEM II/B-S 32,5 R				CEM III/B 32,5				HGZ				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	0,24	0,25	0,26	0,24	0,29	0,10	0,24	0,16	0,51	0,29	0,24	0,14
	2-5 mm	0,36	0,15	0,19	0,07	0,19	0,01	0,18	0,12	0,99	0,18	0,17	0,00
	5-8 mm			0,17	0,04			0,16	0,09			0,28	0,00
T-30	0-2 mm	0,46	0,86	0,55	0,78	0,45	0,18	0,49	0,30	1,69	0,63	0,37	0,49
	2-5 mm	0,22	0,22	0,43	0,45	0,27	0,17	0,57	0,22	0,47	0,56	0,49	0,60
	5-8 mm			0,49	0,24			0,33	0,26			0,38	0,38
T-100	0-2 mm	0,48	1,14	0,66	0,80	0,40	0,17	0,59	0,99	1,98	0,61	0,66	0,52
	2-5 mm	0,21	0,46	0,56	0,49	0,28	0,22	0,65	0,55	0,62	0,52	0,59	0,89
	5-8 mm			0,23	0,44			0,32	0,30			0,89	0,67
N-0	0-2 mm	0,33	0,27	0,19	0,09	0,27	0,05	0,14	0,07	0,48	0,22	0,43	0,25
	2-5 mm	0,21	0,24	0,34	0,36	0,30	0,07	0,18	0,02	0,35	0,17	0,13	0,13
	5-8 mm			0,19	0,29			0,31	0,06			0,24	0,08
N-30	0-2 mm	0,30	0,63	0,55	0,52	0,29	0,13	0,38	0,43	0,49	0,40	0,33	0,34
	2-5 mm	0,83	0,35	0,38	0,45	0,23	0,03	0,31	0,31	0,48	0,22	0,35	0,37
	5-8 mm			0,46	0,53			0,28	0,30			0,41	0,16
N-100	0-2 mm	0,44	0,84	0,74	1,24	0,27	0,53	0,60	0,56	0,92	0,46	0,55	0,44
	2-5 mm	0,39	0,39	0,49	0,85	0,19	0,20	0,45	0,72	0,48	0,44	0,57	0,53
	5-8 mm			0,33	0,69			0,34	0,43			0,43	0,53

Tabelle A 36: Nitratgehalte [ppm] der G3-Mörtel (100 ppm = 1 M.-%)

LA	CL 90				N HL 2,0				N HL 5,0				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	0,13	0,20	0,12	0,14	0,23	0,13	0,14	0,07	0,13	0,18	0,18	0,05
	2-5 mm	0,16	0,21	0,09	0,35	0,06	1,37	0,16	0,00	0,11	0,15	0,32	0,01
	5-8 mm			0,03	0,36			0,12	0,00			0,13	0,00
T-30	0-2 mm	0,45	1,09	1,60	1,08	0,48	1,33	0,62	0,84	1,35	1,99	1,18	1,98
	2-5 mm	0,06	0,23	0,31	0,10	0,12	1,06	0,25	0,42	0,25	0,79	0,84	1,31
	5-8 mm			0,19	0,14			0,22	0,51			0,43	0,84
T-100	0-2 mm	1,12	0,91	2,50	2,70	1,24	1,64	1,17	1,08	1,45	2,38	1,85	3,46
	2-5 mm	0,10	0,20	0,32	0,37	0,14	0,96	0,39	0,42	0,41	0,94	1,00	1,89
	5-8 mm			0,21	0,31			0,24	0,14			0,73	1,30
N-0	0-2 mm	0,12	0,27	0,19	0,33	0,27	0,23	0,41	0,44	0,20	0,33	0,53	0,60
	2-5 mm	0,13	0,26	0,22	0,07	0,09	2,35	0,16	0,26	0,12	0,15	0,09	0,16
	5-8 mm			0,18	0,10			0,17	0,09			0,06	0,05
N-30	0-2 mm	0,36	0,49	0,78	0,86	0,81	0,90	0,91	1,51	0,67	0,81	2,38	1,50
	2-5 mm	0,15	0,05	0,55	0,48	0,17	0,38	0,46	0,86	0,19	0,42	0,32	0,80
	5-8 mm			0,38	0,34			0,39	0,63			0,49	0,44
N-100	0-2 mm	0,41	0,47	1,26	1,25	0,97	1,55	1,61	1,94	0,84	1,96	1,94	2,14
	2-5 mm	0,17	0,22	0,81	1,01	0,27	0,78	0,82	1,78	0,93	0,63	0,69	1,21
	5-8 mm			0,60	0,78			0,62	1,18			0,59	0,76

Tabelle A 37: Carbonatgehalte [M.-%] der G1-Mörtel

LA	CEM I 42,5 R				CEM I 42,5 R-HS				CEM I 52,5 R,weiß				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	6,93	9,32	9,14	9,42	6,59	8,99	8,12	10,20	5,74	9,23	9,08	10,08
	2-5 mm	1,69	4,15	7,71	8,42	0,96	3,50	7,07	3,80	1,24	4,07	5,79	7,61
	5-8 mm			2,93	4,17			2,44	1,96			2,09	3,86
T-30	0-2 mm	11,55	12,56	12,70	13,01	11,03	11,56	10,49	11,59	11,24	11,76	13,24	13,14
	2-5 mm	6,38	11,84	12,73	12,85	9,11	11,44	10,69	11,85	3,89	10,26	10,37	12,10
	5-8 mm			11,52	11,82			6,60	8,96			3,50	8,70
T-100	0-2 mm	12,35	11,94	11,24	11,77	7,29	11,02	10,44	12,13	13,06	12,23	12,18	12,34
	2-5 mm	8,35	12,39	11,45	12,16	7,84	12,38	11,33	12,86	5,67	12,46	12,47	11,25
	5-8 mm			11,97	13,27			11,02	12,07			8,62	12,71
N-0	0-2 mm	7,92	10,43	9,87	11,36	6,73	10,50	9,61	11,62	6,01	10,75	9,28	11,64
	2-5 mm	1,52	4,04	3,58	7,24	1,08	3,79	5,18	9,69	1,66	3,74	3,43	7,91
	5-8 mm			1,83	2,01			2,03	2,69			2,03	3,05
N-30	0-2 mm	11,77	12,35	10,41	10,88	11,03	11,48	11,02	10,16	10,11	12,06	11,24	10,62
	2-5 mm	6,02	11,55	10,82	11,51	3,31	10,37	11,66	11,44	2,76	10,69	8,47	8,17
	5-8 mm			5,78	7,01			7,34	8,23			3,59	3,67
N-100	0-2 mm	10,37	12,04	10,54	10,72	10,90	11,50	10,19	10,23	10,38	12,94	11,03	10,99
	2-5 mm	6,77	12,47	12,08	11,99	9,19	12,15	11,69	11,73	3,96	13,10	11,19	11,77
	5-8 mm			12,16	11,88			9,66	11,46			7,80	10,17

Tabelle A 38: Carbonatgehalte [M.-%] der G2-Mörtel

LA	CEM II/B-S 32,5 R				CEM III/B 32,5				HGZ				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	6,76	7,42	7,39	8,32	5,17	5,38	5,73	6,13	2,72	2,69	2,74	3,10
	2-5 mm	2,01	6,72	6,76	8,61	2,91	4,83	5,57	6,24	2,80	2,93	2,86	3,58
	5-8 mm			4,80	7,23			5,23	6,38			3,10	3,65
T-30	0-2 mm	9,70	9,51	9,84	9,70	6,33	6,33	6,55	6,95	2,71	2,28	2,41	2,05
	2-5 mm	9,65	10,19	10,23	11,12	6,99	7,23	7,04	7,29	3,46	3,59	3,33	3,55
	5-8 mm			10,10	10,10			7,00	7,38			3,37	3,81
T-100	0-2 mm	9,47	9,02	8,78	8,83	6,43	6,09	5,67	5,82	2,47	2,27	1,96	2,07
	2-5 mm	10,08	10,25	9,94	9,16	7,25	7,14	6,92	8,16	3,58	3,65	3,36	3,83
	5-8 mm			10,06	11,00			7,21	8,23			3,44	3,79
N-0	0-2 mm	6,67	8,86	9,51	9,09	5,45	5,43	6,17	6,43	2,75	2,76	3,10	3,30
	2-5 mm	1,68	6,63	8,72	10,20	5,81	5,14	6,45	6,52	3,00	3,36	3,15	3,50
	5-8 mm			4,03	6,94			4,55	6,58			3,36	3,76
N-30	0-2 mm	10,03	9,33	8,40	8,25	6,47	6,48	5,41	5,34	2,89	2,69	1,73	2,04
	2-5 mm	9,55	10,39	9,75	10,24	7,25	7,17	6,53	7,17	3,62	3,74	3,40	4,08
	5-8 mm			10,01	11,16			7,15	7,40			3,61	3,93
N-100	0-2 mm	9,42	8,91	7,99	7,67	6,37	5,85	6,19	5,01	2,77	2,64	2,01	1,16
	2-5 mm	9,50	10,15	9,92	10,57	7,29	7,03	7,39	7,38	3,78	3,78	3,54	3,82
	5-8 mm			10,14	11,20			7,62	7,56			3,69	4,32

Tabelle A 39: Carbonatgehalte [M.-%] der G3-Mörtel

LA	CL 90				N HL 2,0				N HL 5,0				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	11,83	11,32	12,46	12,28	8,97	9,10	9,81	10,54	6,81	6,45	6,67	6,48
	2-5 mm	11,06	11,22	9,92	11,90	8,03	9,29	9,21	10,74	6,59	6,39	6,77	6,51
	5-8 mm			10,41	11,61			9,43	10,63			6,74	7,01
T-30	0-2 mm	13,99	12,20	14,07	14,31	13,31	8,79	11,04	12,70	7,03	6,61	5,72	5,12
	2-5 mm	13,64	11,92	13,21	14,06	12,08	9,13	10,71	12,00	7,49	6,96	6,77	7,24
	5-8 mm			13,50	16,43			11,59	15,42			7,42	7,43
T-100	0-2 mm	12,61	12,62	13,80	12,67	11,04	8,42	12,27	11,19	6,95	5,52	5,38	4,15
	2-5 mm	13,09	13,00	14,16	13,78	11,38	12,83	12,56	10,99	7,20	7,03	6,80	7,26
	5-8 mm			14,10	14,59			13,18	10,31			6,68	8,25
N-0	0-2 mm	14,97	15,26	16,06	15,81	12,58	12,85	13,90	12,94	7,00	6,46	6,44	7,00
	2-5 mm	11,29	14,52	16,04	16,06	11,01	13,31	13,43	14,92	7,12	6,91	6,58	7,20
	5-8 mm			15,21	16,30			12,95	16,75			6,39	7,13
N-30	0-2 mm	15,43	15,86	14,35	12,21	12,26	12,14	12,49	10,76	7,16	5,31	5,02	4,60
	2-5 mm	16,86	15,63	16,35	15,24	12,89	13,22	13,98	12,28	7,45	7,50	7,14	7,40
	5-8 mm			16,13	16,01			13,78	13,70			7,20	7,48
N-100	0-2 mm	15,71	15,73	13,33	11,05	11,75	10,08	11,18	8,43	6,75	5,57	3,38	2,26
	2-5 mm	16,27	15,82	16,45	15,60	13,00	12,58	13,70	12,83	7,43	6,68	6,79	7,55
	5-8 mm			16,08	15,64			13,57	13,32			6,80	7,45

Tabelle A 40: Gesamtporositäten [Vol.-%] der G1-Mörtel

LA	CEM I 42,5 R				CEM I 42,5 R-HS				CEM I 52,5 R,weiß				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	18,76	17,84	18,70	18,96	18,01	17,35	17,89	17,56	16,76	17,79	17,19	17,75
	2-5 mm	18,76	18,76	18,60	18,01	18,46	16,83	16,50	16,63	16,61	17,64	16,50	16,60
	5-8 mm			20,20	18,77			18,19	18,88			17,88	18,73
T-30	0-2 mm	15,79	14,88	15,51	15,78	14,98	15,94	14,02	15,47	15,49	14,83	14,11	14,10
	2-5 mm	17,40	15,67	14,57	15,44	16,73	15,52	14,06	14,32	16,44	14,84	14,30	14,65
	5-8 mm			15,57	15,34			15,07	16,45			15,76	13,38
T-100	0-2 mm	15,45	15,63	16,44	15,29	14,48	15,08	14,55	14,91	14,67	14,47	13,55	14,84
	2-5 mm	15,91	14,55	14,83	14,92	15,21	13,69	14,29	14,24	14,90	13,35	13,63	13,79
	5-8 mm			14,73	15,11			13,92	15,04			15,05	14,13
N-0	0-2 mm	17,59	17,23	19,62	17,52	17,37	16,57	16,55	17,38	17,95	16,88	15,98	16,33
	2-5 mm	17,28	18,07	17,99	16,38	18,13		16,94	16,48	17,63	17,69	16,56	16,43
	5-8 mm			16,92	18,50			18,45	18,84			16,54	17,38
N-30	0-2 mm	15,63	15,26	16,10	17,18	15,30	15,38	15,93	15,46	14,82	14,42	15,49	15,35
	2-5 mm	16,85	15,00	14,49	15,75	17,12	14,78	13,63	15,46	16,60	14,03	15,21	16,21
	5-8 mm			16,25	16,59			16,25	16,79			17,89	17,42
N-100	0-2 mm	15,72	16,13	15,34	16,65	15,38	15,89	15,79	16,52	14,68	14,03	16,77	13,83
	2-5 mm	16,72	14,90	14,82	14,76	14,75	14,69	13,42	14,70	15,94	13,10	15,07	14,29
	5-8 mm			15,55	15,10			13,60	14,86			15,72	15,15

Tabelle A 41: Gesamtporositäten [Vol.-%] der G2-Mörtel

LA	CEM II/B-S 32,5 R				CEM III/B 32,5				HGZ				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	20,93	21,17	21,57	20,48		23,04	21,99	21,42		26,98	25,26	25,14
	2-5 mm	20,61	19,24	20,15	19,27		21,28	20,17	19,07		24,33	24,72	23,41
	5-8 mm			20,51	19,81			19,68	19,15			23,69	23,47
T-30	0-2 mm	17,95	17,83	18,51	19,49		20,59	20,16	21,35		24,78	23,06	21,98
	2-5 mm	16,86	17,13	17,63	19,36		19,18	19,59	18,77		24,91	24,22	23,21
	5-8 mm			17,62	18,82			19,21	19,28			23,56	23,84
T-100	0-2 mm	16,06	17,33	18,29	19,24		19,85	21,24	19,91		22,42	21,83	21,48
	2-5 mm	15,35	16,33	17,62	17,48		19,82	20,27	18,92		22,78	22,43	23,77
	5-8 mm			17,70	17,72			19,48	18,82			22,51	23,78
N-0	0-2 mm	19,83	18,89	21,72	21,35		21,02	23,66	23,30		25,34	24,87	26,51
	2-5 mm	18,55	17,03	19,21	18,03		20,42	19,19	19,49		23,50	23,66	25,23
	5-8 mm			19,71	18,53			18,47	18,49			22,55	24,15
N-30	0-2 mm	18,61	18,18	19,00	19,57		21,01	21,52	20,31		24,86	23,30	23,85
	2-5 mm	16,74	17,44	17,35	17,90		19,54	19,21	17,95		24,16	23,54	23,60
	5-8 mm			16,31	17,70			18,72	17,19			22,86	23,08
N-100	0-2 mm	16,60	17,96	20,69	18,52		20,69	22,22	20,92		23,81	22,92	22,68
	2-5 mm	16,68	16,09	18,65	17,25		19,95	19,57	19,53		22,91	23,38	23,70
	5-8 mm			18,15	16,90			18,76	19,29			22,56	22,84

Tabelle A 42: Gesamtporositäten [Vol.-%] der G3-Mörtel

LA	CL 90				N HL 2,0				N HL 5,0				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	30,69	32,93	34,92	20,76	28,83	31,27	29,65	14,66	36,63	35,91	27,00	36,99
	2-5 mm	31,24	33,53	31,94	31,74	30,64	20,06	19,98	17,03	39,36	23,97	29,16	38,48
	5-8 mm			24,70	20,98			31,52	30,92			43,60	28,76
T-30	0-2 mm	29,06	29,61	16,77	28,30	27,79	29,44	28,73	28,37	36,83	43,06	33,14	34,16
	2-5 mm	31,07	32,62	31,26	32,05	28,30	16,32	30,32	29,09	37,08	37,09	36,07	37,96
	5-8 mm			22,00	23,19			30,35	16,77			37,04	37,13
T-100	0-2 mm	29,10	30,34	17,50	20,48	27,45	26,12	26,63	14,45	35,05	20,76	19,61	23,50
	2-5 mm	30,23	32,85	34,74	32,94	28,78	29,40	26,24	30,54	39,29	35,60	24,30	37,83
	5-8 mm			32,09	29,98			29,59	16,66			21,50	37,77
N-0	0-2 mm	29,42	34,12	34,94	21,78	26,82	26,90	25,29	28,24	36,71	36,63	34,49	36,48
	2-5 mm	30,96	33,25	36,08	31,29	28,64	14,34	28,39	28,51	38,99	35,93	36,55	38,96
	5-8 mm			25,75	31,68			28,36	29,53			26,01	39,09
N-30	0-2 mm	29,51	31,23	19,84	31,08	26,43	26,70	29,51	28,11	36,76	39,46	36,34	35,58
	2-5 mm	30,06	30,11	31,25	30,90	26,89	14,05	27,93	28,03	37,10	36,29	37,66	37,70
	5-8 mm			21,06	30,51			28,75	27,31			37,33	39,43
N-100	0-2 mm	28,95	33,59	19,82	27,76	25,95	26,49	26,34	26,93	34,29	22,90	23,03	33,36
	2-5 mm	29,79	33,48	33,92	18,33	27,14	27,56	28,54	14,68	36,30	35,46	33,83	36,64
	5-8 mm			21,96	29,26			28,39	30,80			35,58	36,78

Tabelle A 43: Luftporengehalt [Vol.-%] der G1-Mörtel

LA	CEM I 42,5 R				CEM I 42,5 R-HS				CEM I 52,5 R,weiß				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	3,50	3,45	3,64	4,16	3,48	3,70	3,49	3,23	2,95	3,33	3,50	3,41
	2-5 mm	3,30	3,69	3,51	3,19	3,17	3,33	3,16	3,41	2,73	2,99	3,02	2,85
	5-8 mm			3,90	3,29			3,82	3,58			3,17	3,42
T-30	0-2 mm	3,29	3,48	3,76	3,59	2,69	3,30	2,77	3,60	3,14	3,04	3,05	2,67
	2-5 mm	2,93	3,61	3,12	3,43	2,73	3,15	2,59	2,81	2,96	2,72	2,72	2,89
	5-8 mm			2,96	3,22			2,97	3,63			3,03	2,77
T-100	0-2 mm	3,40	3,43	3,96	3,53	3,17	3,43	3,40	3,25	2,90	2,95	2,80	3,41
	2-5 mm	2,99	3,43	3,11	2,70	2,71	2,69	3,18	2,74	2,43	2,76	2,78	2,41
	5-8 mm			3,07	2,77			2,83	3,30			3,02	2,53
N-0	0-2 mm	3,55	3,49	4,06	3,61	3,53	3,52	3,42	3,38	3,08	3,57	3,52	3,43
	2-5 mm	3,34	3,13	3,22	3,32	3,25		3,84	3,20	2,80	3,41	3,39	3,21
	5-8 mm			3,74	3,15			4,08	3,17			3,23	3,30
N-30	0-2 mm	3,55	3,43	4,05	3,59	3,52	3,00	3,30	2,90	2,82	3,13	2,98	2,92
	2-5 mm	2,73	3,17	2,85	3,34	3,21	3,01	2,87	2,75	2,90	2,83	2,97	3,37
	5-8 mm			3,01	3,00			3,05	2,75			3,22	3,22
N-100	0-2 mm	3,52	3,62	3,09	3,82	3,50	3,40	3,88	3,77	2,71	2,93	3,45	2,84
	2-5 mm	3,28	3,33	2,66	3,17	2,82	2,65	2,84	2,99	2,93	2,39	2,95	2,74
	5-8 mm			3,06	2,89			2,83	3,04			2,83	2,69

Tabelle A 44: Luftporengehalt [Vol.-%] der G2-Mörtel

LA	CEM II/B-S 32,5 R				CEM III/B 32,5				HGZ				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	3,65	4,21	4,24	4,22		4,36	4,05	3,65		5,51	4,18	3,98
	2-5 mm	3,11	3,32	3,34	3,29		3,60	3,54	2,59		4,28	4,27	3,17
	5-8 mm			3,31	3,21			3,30	3,12			4,12	3,64
T-30	0-2 mm	3,28	4,20	3,67	4,02		3,27	3,68	3,89		4,24	4,19	4,10
	2-5 mm	2,78	3,67	3,23	4,36		3,37	3,43	2,93		4,01	4,10	3,51
	5-8 mm			2,93	3,81			3,13	3,29			3,88	3,73
T-100	0-2 mm	1,52	4,15	3,80	4,02		3,85	4,02	3,93		4,38	4,24	4,07
	2-5 mm	1,07	3,49	3,16	3,05		3,95	3,62	3,18		4,09	3,76	3,79
	5-8 mm			3,43	3,34			2,89	3,15			3,47	3,66
N-0	0-2 mm	3,67	3,74	4,11	3,99		3,94	4,36	4,04		4,62	3,96	4,78
	2-5 mm	3,19	3,31	3,50	3,01		4,07	2,85	3,22		3,93	3,44	3,94
	5-8 mm			3,90	2,98			3,26	2,74			3,41	3,42
N-30	0-2 mm	3,23	3,54	3,79	3,72		3,98	3,72	3,81		4,54	4,08	5,20
	2-5 mm	2,73	3,69	3,56	3,08		3,41	3,14	2,87		3,98	3,96	3,97
	5-8 mm			3,24	2,83			3,15	2,77			3,73	3,58
N-100	0-2 mm	1,39	3,59	4,43	4,04		4,34	4,01	3,88		4,63	4,74	4,53
	2-5 mm	2,81	3,31	3,61	3,53		3,87	3,08	3,23		3,58	4,07	4,14
	5-8 mm			3,45	3,23			2,75	2,98			3,53	3,61

Tabelle A 45: Luftporengehalt [Vol.-%] der G3-Mörtel

LA	CL 90				N HL 2,0				N HL 5,0				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	6,09	4,18	12,18	7,92	4,99	8,60	4,47	5,02	10,39	13,77	15,72	11,82
	2-5 mm	6,76	11,08	8,29	7,72	4,63	8,33	7,70	5,34	10,15	12,19	15,16	12,59
	5-8 mm			10,90	7,92			4,42	5,59			30,01	12,56
T-30	0-2 mm	6,18	7,89	7,03	5,87	4,37	2,77	6,16	5,02	10,50	11,25	9,97	11,91
	2-5 mm	6,61	10,07	9,77	8,18	3,53	5,98	5,34	4,84	10,03	13,84	13,26	12,50
	5-8 mm			10,60	9,84			4,89	5,37			13,93	12,50
T-100	0-2 mm	5,58	9,49	8,32	8,41	4,74	4,91	4,96	5,27	9,84	10,04	10,95	12,44
	2-5 mm	6,16	10,74	10,69	9,92	4,09	2,19	4,38	5,42	10,61	12,62	12,43	13,87
	5-8 mm			8,46	6,83			6,64	5,37			11,28	12,95
N-0	0-2 mm	6,10	10,95	12,93	8,45	3,96	4,68	4,19	6,16	9,90	12,93	12,42	11,30
	2-5 mm	6,56	8,82	12,60	7,68	3,92	4,80	2,10	4,21	9,91	12,37	13,66	14,06
	5-8 mm			12,19	8,87			4,51	5,17			13,45	12,71
N-30	0-2 mm	6,62	9,16	10,92	9,29	3,52	5,55	2,32	6,12	9,81	14,68	10,62	10,56
	2-5 mm	6,43	6,62	8,02	6,34	3,32	4,19	3,55	4,47	10,21	11,92	13,37	12,64
	5-8 mm			8,14	6,79			4,49	4,04			13,16	14,01
N-100	0-2 mm	6,28	10,61	9,46	6,91	4,08	5,49	4,98	5,82	9,54	13,18	11,74	10,47
	2-5 mm	6,37	8,68	9,95	6,27	3,78	5,22	4,24	4,59	10,66	12,26	6,55	13,09
	5-8 mm			6,63	5,97			4,05	6,25			9,79	11,09

Tabelle A 46: Kapillarporengehalt [Vol.-%] der G1-Mörtel

LA	CEM I 42,5 R				CEM I 42,5 R-HS				CEM I 52,5 R, weiß				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	10,10	8,42	9,11	8,10	9,58	7,87	8,24	7,89	9,26	8,31	8,54	8,19
	2-5 mm	11,45	11,38	10,21	9,36	10,95	10,02	8,90	8,64	9,96	10,04	10,35	9,09
	5-8 mm			13,07	12,45			11,68	12,52			11,95	12,57
T-30	0-2 mm	6,05	5,53	6,32	5,43	6,65	6,53	4,92	5,06	6,13	5,88	4,55	4,69
	2-5 mm	8,71	5,88	5,16	5,55	8,13	6,05	5,79	5,42	8,28	6,75	6,20	5,88
	5-8 mm			6,93	6,24			7,63	8,43			8,76	5,06
T-100	0-2 mm	5,68	6,69	6,95	5,62	5,11	6,15	5,09	5,18	5,83	5,88	4,34	4,66
	2-5 mm	6,76	5,33	5,45	5,29	6,60	5,07	4,82	4,95	7,20	5,04	4,50	4,88
	5-8 mm			4,95	5,29			4,98	5,28			7,09	5,34
N-0	0-2 mm	9,16	8,73	12,79	6,91	8,21	7,58	6,48	6,97	9,63	7,95	7,48	6,40
	2-5 mm	9,46	11,27	11,56	8,68	10,41	10,07	10,06	9,13	10,08	10,37	9,77	9,38
	5-8 mm			7,94	12,56			11,25	12,96			10,14	10,83
N-30	0-2 mm	6,14	5,89	5,89	6,58	5,93	5,98	5,21	5,72	5,84	5,21	5,31	5,03
	2-5 mm	8,78	5,59	5,39	5,80	8,56	5,43	4,56	7,06	8,78	5,54	7,08	7,46
	5-8 mm			8,70	7,76			8,00	9,46			10,43	10,32
N-100	0-2 mm	5,78	6,87	5,77	6,26	5,45	6,71	4,92	5,27	5,43	5,54	5,95	4,60
	2-5 mm	7,37	5,57	5,12	4,63	5,63	5,78	4,16	4,89	8,03	4,68	4,77	6,22
	5-8 mm			5,23	5,01			4,89	5,34			6,81	8,07

Tabelle A 47: Kapillarporengehalt [Vol.-%] der G2-Mörtel

LA	CEM II/B-S 32,5 R				CEM III/B 32,5				HGZ				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	10,68	10,45	10,50	8,50		8,41	8,91	8,40		15,54	15,66	15,75
	2-5 mm	11,57	9,85	10,31	8,03		8,01	7,39	6,66		13,56	14,67	13,81
	5-8 mm			12,37	10,28			7,84	7,02			13,61	13,30
T-30	0-2 mm	8,69	7,50	9,01	8,72		10,19	9,83	10,84		14,31	14,40	12,96
	2-5 mm	7,90	7,22	8,17	8,00		8,35	9,40	8,99		15,34	15,14	15,20
	5-8 mm			8,24	7,91			8,65	8,71			14,39	15,32
T-100	0-2 mm	8,74	7,69	8,61	8,53		9,27	10,64	9,79		12,39	13,23	12,63
	2-5 mm	8,11	7,06	8,34	7,31		9,03	9,98	9,01		14,30	14,94	16,11
	5-8 mm			7,90	7,27			9,22	8,68			15,22	16,18
N-0	0-2 mm	10,12	8,76	11,02	10,39		8,99	11,89	11,20		15,52	16,42	16,63
	2-5 mm	9,38	8,19	9,60	9,21		7,67	8,35	8,42		13,81	15,45	15,50
	5-8 mm			10,49	10,88			6,79	7,84			13,83	15,48
N-30	0-2 mm	9,07	8,42	8,75	8,83		9,75	11,13	10,09		14,47	14,63	13,83
	2-5 mm	7,42	7,50	7,74	7,69		8,81	9,30	8,41		14,68	14,94	15,24
	5-8 mm			6,99	7,63			8,18	7,63			14,34	14,88
N-100	0-2 mm	9,23	8,45	10,01	8,21		9,49	11,68	10,68		14,09	14,17	13,31
	2-5 mm	7,86	6,96	9,03	7,21		9,31	9,70	9,61		15,28	15,33	15,45
	5-8 mm			8,52	7,08			8,81	9,36			15,03	14,86

Tabelle A 48: Kapillarporengehalt [Vol.-%] der G3-Mörtel

LA	CL 90				N HL 2,0				N HL 5,0				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	22,72	27,83	21,27	12,04	21,17	19,80	22,02	8,84	21,54	17,80	8,87	21,13
	2-5 mm	22,55	21,16	21,79	22,08	22,96	10,13	10,46	10,10	24,99	10,28	11,23	22,09
	5-8 mm			12,87	12,24			23,94	22,45			10,53	13,33
T-30	0-2 mm	20,68	20,68	9,36	19,67	21,10	23,99	19,71	20,04	21,52	19,41	19,31	18,72
	2-5 mm	22,33	20,93	20,20	21,08	22,35	9,14	22,01	21,36	23,49	19,91	19,71	22,23
	5-8 mm			11,18	11,84			22,74	10,22			20,05	21,46
T-100	0-2 mm	20,95	19,21	8,46	10,75	19,73	17,88	18,78	8,16	21,79	9,33	7,64	9,12
	2-5 mm	22,24	20,87	21,57	20,82	21,53	24,51	21,01	21,46	25,50	19,42	10,75	20,65
	5-8 mm			21,38	20,96			20,62	9,61			9,45	21,58
N-0	0-2 mm	21,14	21,79	19,97	12,44	19,07	18,57	19,68	17,73	22,54	19,43	18,06	20,85
	2-5 mm	22,22	23,48	21,72	21,48	20,82	8,22	22,29	20,20	25,24	20,04	18,94	20,76
	5-8 mm			12,72	20,58			20,16	20,08			10,10	21,78
N-30	0-2 mm	20,28	20,39	8,42	19,93	19,64	19,01	23,11	18,17	22,72	18,45	20,92	21,09
	2-5 mm	21,33	22,11	21,35	23,10	20,52	8,58	19,81	20,36	23,07	20,92	21,18	22,01
	5-8 mm			12,31	22,08			19,77	20,44			20,94	22,07
N-100	0-2 mm	20,69	21,24	9,55	18,63	18,20	17,86	17,86	16,57	20,84	8,12	9,34	18,68
	2-5 mm	21,67	23,23	22,12	11,56	20,71	19,18	20,07	8,21	22,12	19,64	24,41	20,27
	5-8 mm			13,75	21,11			20,09	20,29			22,00	22,20

Tabelle A 49: Gelporengehalt [Vol.-%] der G1-Mörtel

LA	CEM I 42,5 R				CEM I 42,5 R-HS				CEM I 52,5 R,weiß				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	5,16	5,97	5,95	6,69	4,95	5,78	6,16	6,44	4,56	6,15	5,16	6,15
	2-5 mm	4,01	3,69	4,88	5,46	4,35	3,47	4,43	4,58	3,92	4,60	3,13	4,66
	5-8 mm			3,23	3,03			2,68	2,78			2,76	2,75
T-30	0-2 mm	6,45	5,89	5,42	6,77	5,64	6,10	6,32	6,82	6,22	5,92	6,51	6,75
	2-5 mm	5,76	6,18	6,29	6,46	5,87	6,33	5,66	6,08	5,20	5,36	5,39	5,88
	5-8 mm			5,68	5,88			4,47	4,39			3,96	5,54
T-100	0-2 mm	6,36	5,52	5,51	6,14	6,20	5,52	6,06	6,48	5,94	5,64	6,42	6,76
	2-5 mm	6,15	5,79	6,27	6,93	5,90	5,95	6,30	6,56	5,27	5,54	6,33	6,50
	5-8 mm			6,72	7,05			6,11	6,46			4,93	6,28
N-0	0-2 mm	4,89	5,01	2,76	7,00	5,63	5,46	6,65	7,04	5,24	5,37	4,97	6,48
	2-5 mm	4,48	3,68	3,22	4,37	4,48	3,50	3,05	4,15	4,75	3,90	3,39	3,83
	5-8 mm			5,24	2,78			3,12	2,72			3,17	3,25
N-30	0-2 mm	5,95	5,95	6,15	7,02	5,85	6,39	7,40	6,84	6,16	6,07	7,19	7,38
	2-5 mm	5,34	6,24	6,25	6,60	5,35	6,34	6,21	5,65	4,92	5,67	5,15	5,37
	5-8 mm			4,53	5,85			5,20	4,59			4,25	3,87
N-100	0-2 mm	6,42	5,63	6,49	6,57	6,42	5,78	6,99	7,48	6,54	5,56	7,36	6,38
	2-5 mm	6,08	6,00	7,05	6,96	6,30	6,26	6,41	6,82	4,97	6,04	7,34	5,34
	5-8 mm			7,26	7,19			5,89	6,47			6,08	4,37

Tabelle A 50: Gelporengehalt [Vol.-%] der G2-Mörtel

LA	CEM II/B-S 32,5 R				CEM III/B 32,5				HGZ				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	6,60	6,53	6,84	7,76		10,28	9,03	9,37		5,94	5,43	5,41
	2-5 mm	5,93	6,06	6,50	7,95		9,66	9,24	9,82		6,48	5,79	6,43
	5-8 mm			4,82	6,31			8,56	9,02			5,95	6,54
T-30	0-2 mm	5,98	6,14	5,83	6,75		7,12	6,65	6,62		6,23	4,47	4,92
	2-5 mm	6,17	6,23	6,24	6,99		7,44	6,77	6,85		5,56	4,98	4,50
	5-8 mm			6,46	7,10			7,44	7,28			5,29	4,78
T-100	0-2 mm	5,80	5,48	5,87	6,68		6,74	6,58	6,18		5,64	4,36	4,78
	2-5 mm	6,17	5,78	6,13	7,12		6,82	6,67	6,73		4,39	3,72	3,87
	5-8 mm			6,36	7,10			7,36	7,00			3,83	3,94
N-0	0-2 mm	6,04	6,40	6,59	6,96		8,10	7,41	8,05		5,20	4,49	5,10
	2-5 mm	5,98	5,52	6,12	5,82		8,68	8,00	7,85		5,77	4,79	5,80
	5-8 mm			5,31	4,66			8,41	7,92			5,30	5,24
N-30	0-2 mm	6,31	6,21	6,47	7,02		7,28	6,66	6,40		5,85	4,60	4,83
	2-5 mm	6,60	6,26	6,04	7,14		7,33	6,77	6,67		5,51	4,64	4,39
	5-8 mm			6,09	7,25			7,38	6,80			4,79	4,63
N-100	0-2 mm	5,98	5,92	6,25	6,26		6,87	6,52	6,37		5,09	4,02	4,85
	2-5 mm	6,02	5,82	6,02	6,51		6,79	6,79	6,69		4,06	3,99	4,12
	5-8 mm			6,18	6,59			7,19	6,95			3,99	4,36

Tabelle A 51: Gelporengehalt [Vol.-%] der G3-Mörtel

LA	CL 90				N HL 2,0				N HL 5,0				
	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	90d	180d	360d	720d	
T-0	0-2 mm	1,89	0,92	1,46	0,80	2,68	2,86	3,17	0,80	4,70	4,33	2,42	4,03
	2-5 mm	1,93	1,30	1,86	1,95	3,06	1,60	1,82	1,60	4,23	1,51	2,78	3,80
	5-8 mm			0,93	0,82			3,15	2,87			3,07	2,87
T-30	0-2 mm	2,20	1,04	0,38	2,76	2,33	2,68	2,87	3,32	4,81	12,41	3,86	3,54
	2-5 mm	2,13	1,63	1,28	2,78	2,42	1,20	2,98	2,89	3,55	3,35	3,10	3,23
	5-8 mm			0,22	1,51			2,72	1,18			3,07	3,18
T-100	0-2 mm	2,57	1,64	0,73	1,32	2,99	3,33	2,88	1,03	3,42	1,40	1,02	1,94
	2-5 mm	1,84	1,24	2,48	2,21	3,17	2,70	0,85	3,66	3,19	3,57	1,13	3,30
	5-8 mm			2,24	2,19			2,32	1,68			0,77	3,25
N-0	0-2 mm	2,18	1,37	2,05	0,89	3,79	3,65	1,43	4,35	4,27	4,27	4,01	4,34
	2-5 mm	2,19	0,95	1,75	2,13	3,90	1,32	4,01	4,11	3,85	3,53	3,95	4,15
	5-8 mm			0,85	2,23			3,68	4,29			2,46	4,60
N-30	0-2 mm	2,61	1,67	0,50	1,86	3,26	2,15	4,06	3,82	4,23	6,33	4,80	3,93
	2-5 mm	2,31	1,37	1,87	1,47	3,04	1,30	4,56	3,19	3,82	3,46	3,10	3,05
	5-8 mm			0,61	1,64			4,49	2,84			3,23	3,35
N-100	0-2 mm	1,98	1,73	0,81	2,21	3,67	3,14	3,51	4,53	3,91	1,59	1,95	4,21
	2-5 mm	1,74	1,59	1,85	0,50	2,65	3,16	4,24	1,88	3,51	3,56	2,87	3,29
	5-8 mm			1,58	2,18			4,24	4,26			3,79	3,48

10.2 Abbildungsanhang

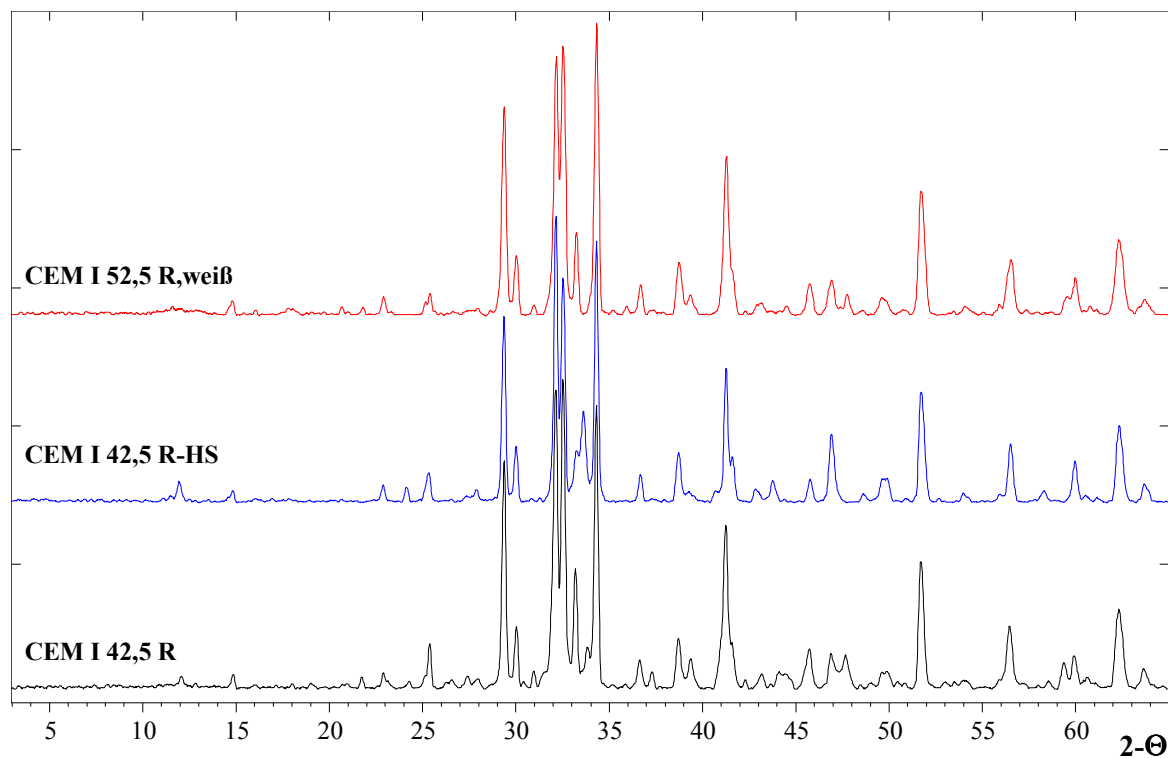


Abbildung A 1: Röntgendiffraktogramme der G1-Bindemittel

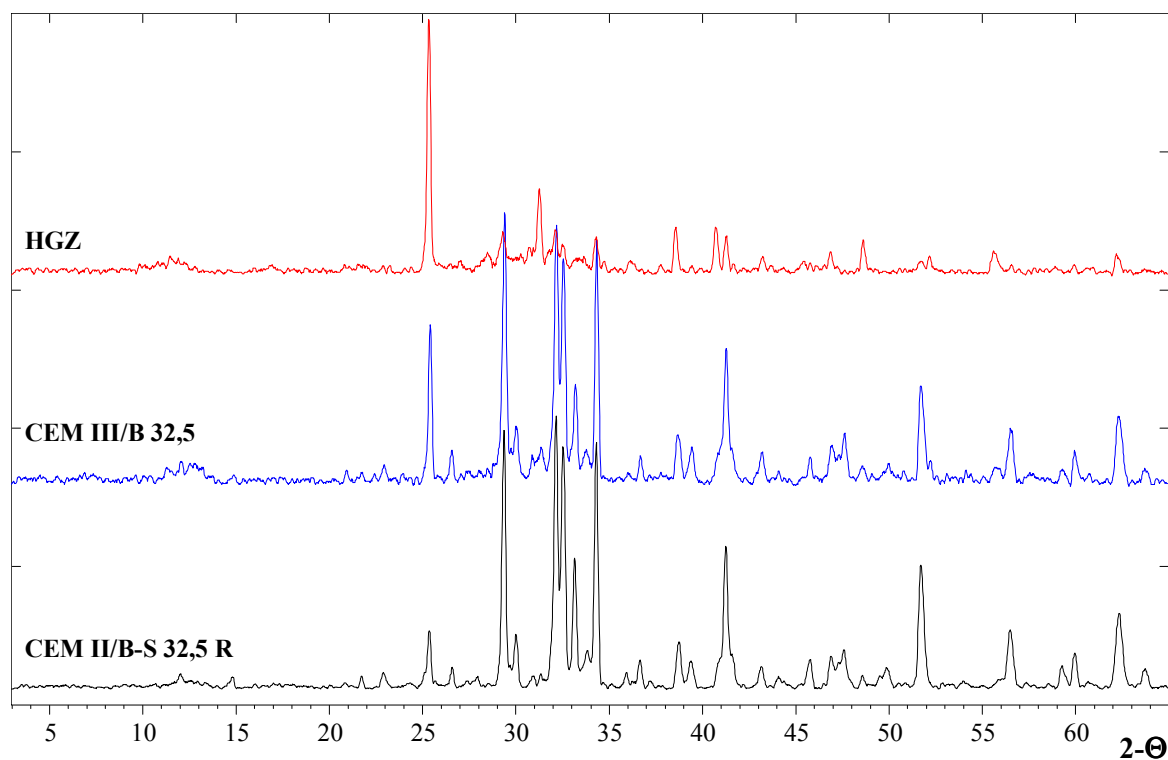


Abbildung A 2: Röntgendiffraktogramme der G2-Bindemittel

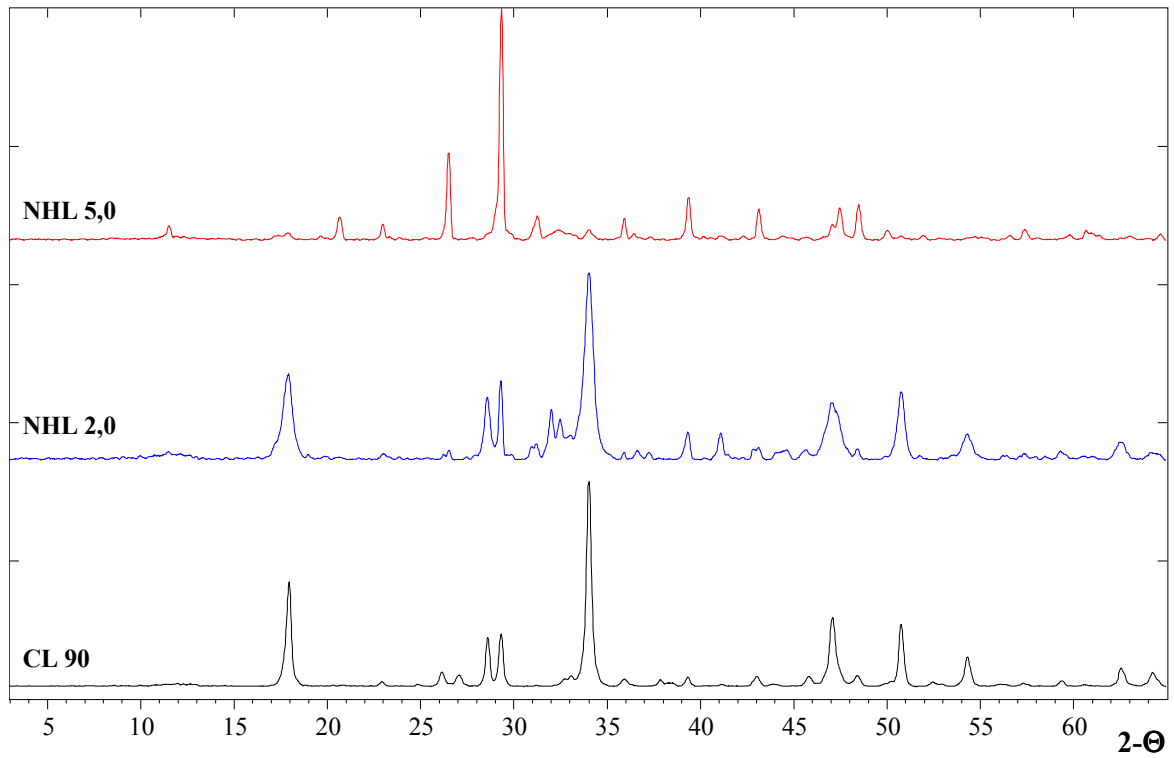


Abbildung A 3: Röntgendiffraktogramme der G3-Bindemittel

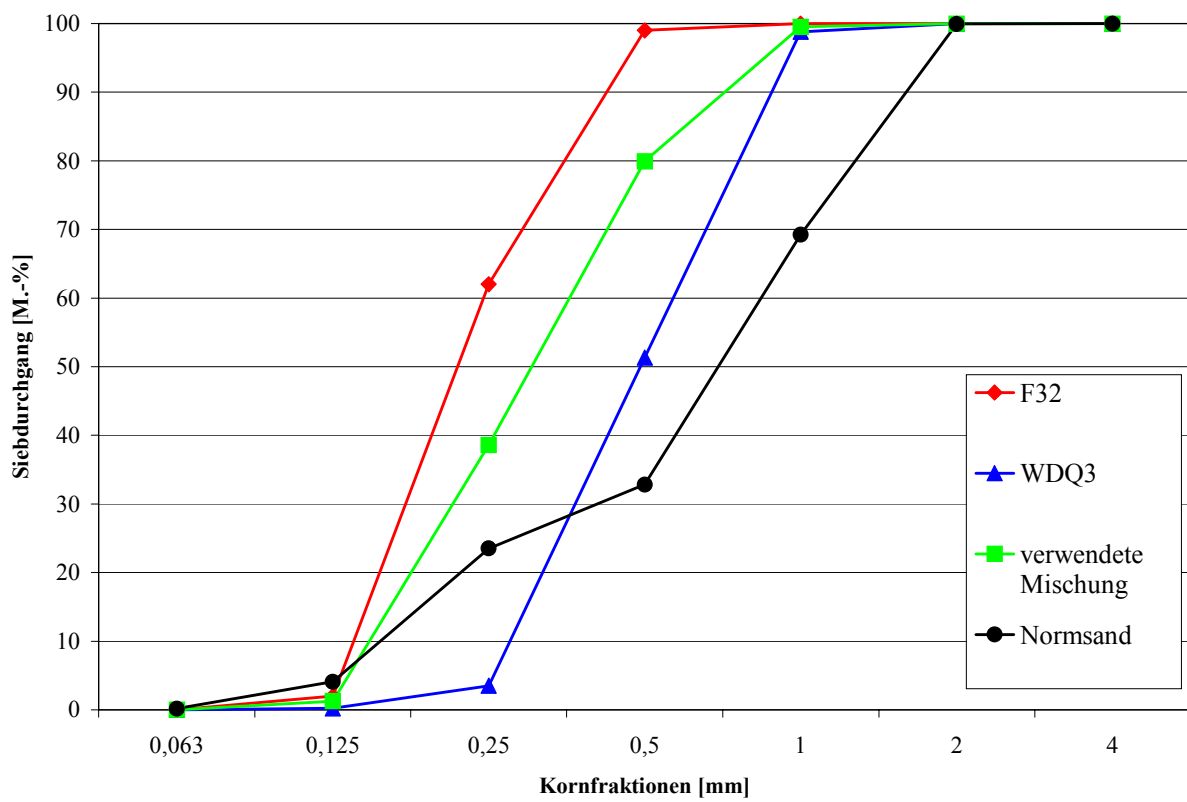


Abbildung A 4: Sieblinien

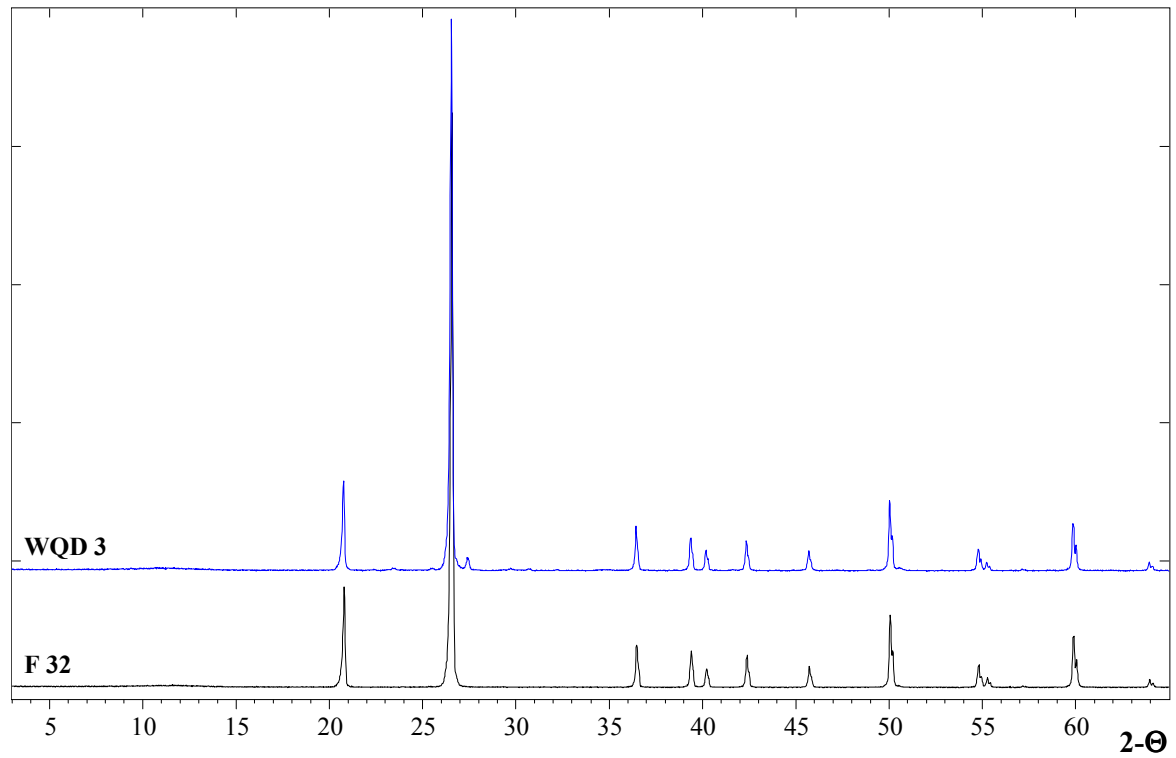


Abbildung A 5: Röntgendiffraktogramme der verwendeten Sande

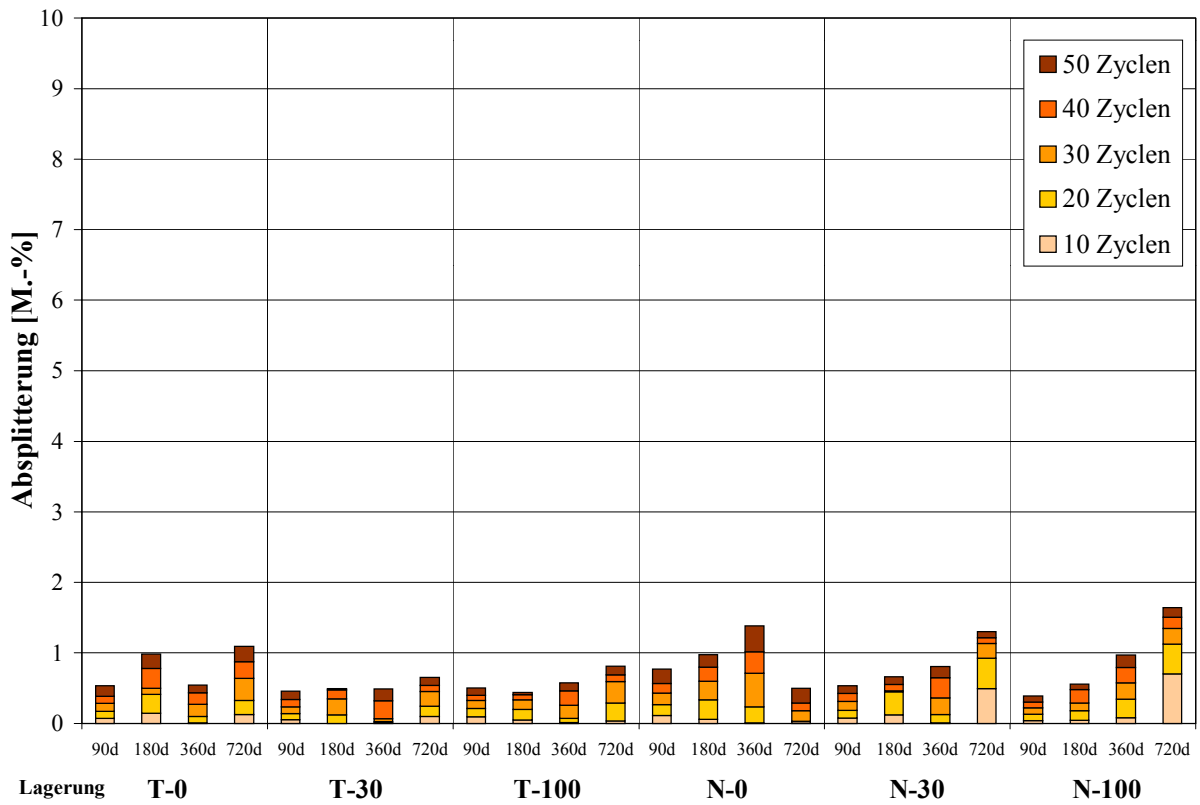


Abbildung A 6: FTW-Absplitterungen [M.-%] des CEM I, weiß

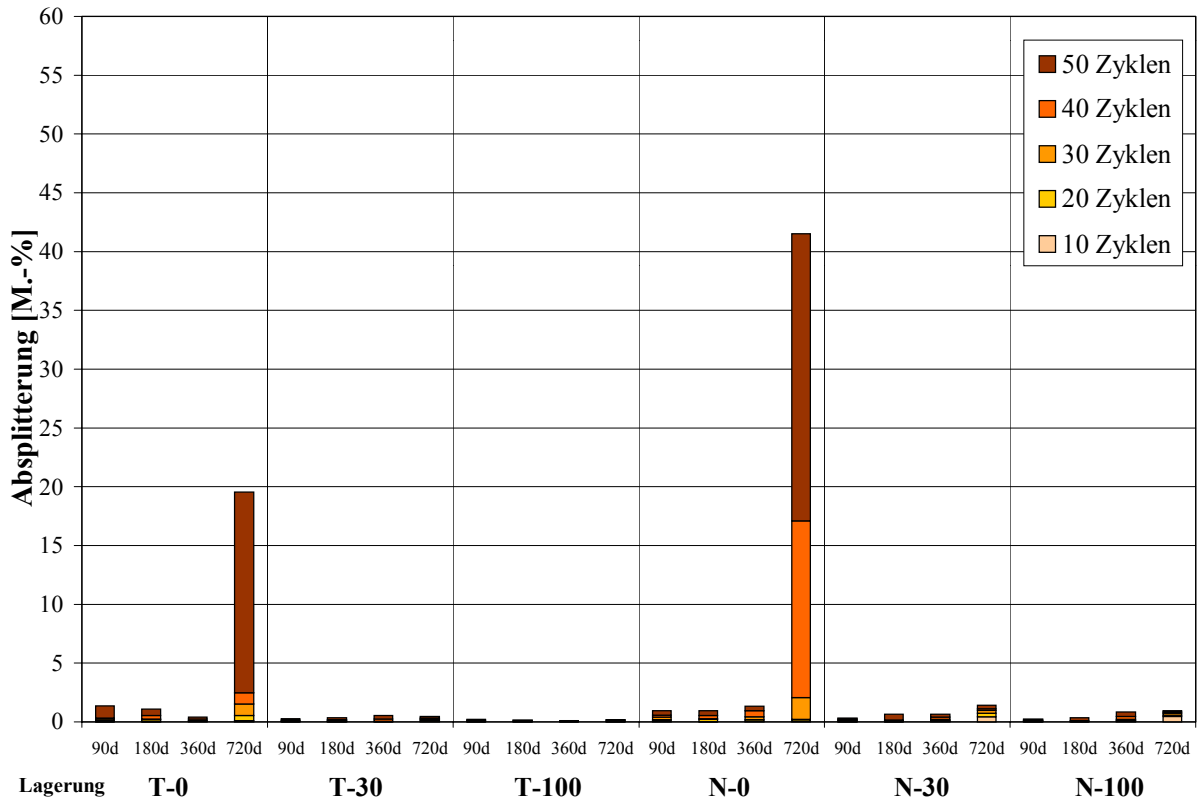


Abbildung A 7: FTW-Absplitterungen [M.-%] des CEM I

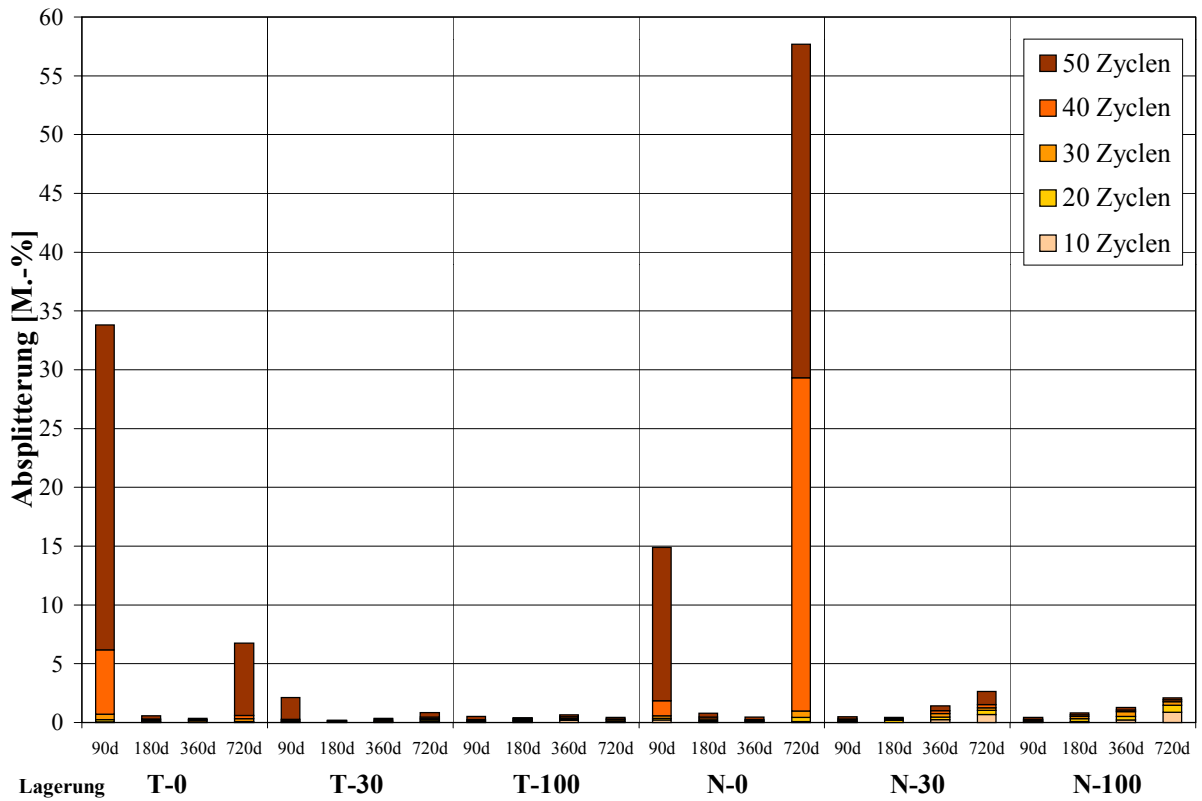


Abbildung A 8: FTW-Absplitterungen [M.-%] des CEM I HS