

Schlussbericht vom 30.08.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 20619 N

Thema

Dauerhaftigkeitsnachweise chemisch beanspruchter Betone und Betonbauteile: Nachweise am Beton bei Angriff durch kalklösende Kohlensäure

Berichtszeitraum

01.03.2019 bis 29.02.2024

Forschungsvereinigung

VDZ Technology gGmbH

Forschungseinrichtungen

- 1) VDZ Technology gGmbH
- 2) Lehrstuhl für Baustoffkunde am Institut für Baustoffforschung, RWTH Aachen University (ibac)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1	Ziel des Forschungsvorhabens	4
2	Arbeitshypothese	5
3	Ausgangsstoffe und Betone (VDZ)	6
3.1	Analyse der Ausgangsstoffe	6
3.2	Betone	8
4	Lagerung in Kalklösender Kohlensäure und NMR-Messung (ibac)	14
4.1	Vorkonditionierung der Prüfkörper	14
4.2	Lagerung der Prüfkörper	14
4.2.1	Lagerungsbecken und das Messsystem	14
4.2.2	Prüfkörper	17
4.3	Abbürstversuche	18
4.4	Die einseitige ¹ H-Kernresonanzspektroskopie	24
4.4.1	Prinzip der einseitigen ¹ H-Kernresonanzspektroskopie – NMR-MOUSE	24
4.4.2	Modelle zur Beschreibung der Relaxation von Flüssigkeiten in porösen Medien	24
4.4.3	Porentausch und zweidimensionale Studien	26
4.5	Messung der Prüfkörper mit der NMR-MOUSE	27
4.5.1	Messungen der Prüfkörper	27
4.5.2	NMR-Ergebnisse des CEM I mit w/z = 0,40 und quarzitischer Gesteinskörnung	29
4.5.3	NMR-Ergebnisse des CEM III/B mit w/z = 0,40 und quarzitischer Gesteinskörnung	35
5	Validierungsuntersuchungen der NMR-MOUSE (VDZ)	41
5.1	Methoden	41
5.1.1	Dünnschliffpräparation	41
5.1.2	Lichtmikroskopie	41
5.1.3	Rasterelektronenmikroskopie	42
5.2	Ergebnisse und Interpretation	42
5.3	Auswertung der Betone mittels NRM-MOUSE	55
5.4	Vergleich der Ergebnisse mit der NRM-MOUSE	60
6	Zusammenfassung	61
7	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	62
8	Verwendung der Zuwendung, Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	63
9	Literatur	64
Anhang A – Tabellen		65
Anhang B - Bilder		120

1 Ziel des Forschungsvorhabens

Im Rahmen der derzeit gültigen Normen des Betonbaus wird die Dauerhaftigkeit deskriptiv sichergestellt. Das auf Erfahrungswerten basierende Konzept definiert in Abhängigkeit von standardisierten Randbedingungen Mindestanforderungen an die Zusammensetzung, die Herstellung, den Einbau und die Nachbehandlung von Beton. Dieses Konzept stößt an Grenzen, wenn z. B. durch den Einsatz neuer Baustoffe der gesicherte Erfahrungsbereich verlassen wird bzw. spezifische Anwendungsfälle durch die genormten Randbedingungen nicht erfasst werden.

Im Bereich des chemischen Betonangriffs (XA) durch kalklösende Kohlensäure wird der gesicherte Erfahrungsbereich zum Beispiel verlassen, wenn neue, klinkereffiziente Zemente ohne Langzeiterfahrung verwendet werden sollen. Hier besteht dann der Bedarf einer bauaufsichtlichen Zulassung. Ebenfalls normativ nicht vollständig abgebildet ist der Fall, wenn bei einem starken chemischen Angriff (XA3) Betone eingesetzt werden sollen, die aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit einen Verzicht auf die normativ geforderten „zusätzlichen Schutzmaßnahmen“ zulassen würden (Bedarf einer Gutachterlösung).

Für beide Fälle soll ein einheitliches Prüf- und Bewertungskonzept entwickelt werden, welches in Deutschland derzeit nicht existiert.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Erarbeitung der Eckpunkte eines solchen Konzepts. Damit könnte sich die gutachtliche Bewertung für die Expositionsklasse XA3 zukünftig auf einer vergleichbaren Basis abstützen bzw. neue Zemente, die zur Markteinführung einer Zulassung bedürfen, können gleichermaßen sicher wie praxisgerecht geprüft und bewertet werden.

Ausgangspunkt ist die Bestimmung des Schädigungsgrades durch den Angriff kalklösender Kohlensäure auf Betone, die für die Expositionsklasse XA2 zugelassen sind. Den Schädigungsgraden dieser Betone gegenüberzustellen sind die Schädigungsgrade von Betonen, die nicht zulässig sind. Hierzu soll eine zerstörungsfreie Messmethode verwendet werden. Aus den Ergebnissen soll ein Bewertungshintergrund abgeleitet werden. Dieser kann in Verbindung mit dem Prüfverfahren zukünftig z. B. im Rahmen von Zulassungsverfahren für neue Zemente Anwendung finden.

In einem zweiten Schritt werden die Angriffsbedingungen verstärkt (Performanceprüfverfahren XA3). Betone, die sich trotz des erhöhten Angriffsgrades in den XA2-Bewertungshintergrund der Schädigungsgrade einordnen lassen, könnten zukünftig ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen in der Expositionsklasse XA3 eingesetzt werden.

Hierdurch ergeben sich sowohl für Zementhersteller, die zwecks CO₂-Reduzierung die Markteinführung neuer, klinkereffizienter Zemente planen, als auch für die KMU-geprägte, bauausführende Industrie erhebliche Vorteile gegenüber der derzeitigen Praxis bzw. auch gegenüber anderen Lösungen am Bau (z. B. Verwendung einer Schutzschicht). Auch Gutachter und Ingenieurbüros würden vom beschriebenen Konzept profitieren. Alle genannten Kreise können sich in ihrem jeweiligen Tätigkeitsfeld auf ein einheitliches Prüf- und Bewertungskonzept abstützen. Dies erhöht die Planungssicherheit und damit ebenfalls die Wirtschaftlichkeit.

2 Arbeitshypothese

Für die Bewertung des Widerstandes gegenüber kalklösender Kohlensäure neuer Zemente und ggf. neuer Betone – z. B. in Zulassungsverfahren - ist ein Prüfverfahren in Verbindung mit einem geeigneten Bewertungshintergrund erforderlich. Für Betone, die in der Expositionsklasse XA3 eingesetzt werden sollen, sind gemäß DIN 1045-2, Kapitel 5.3.2 „bei chemischem Angriff XA3 oder stärker oder bei hoher Fließgeschwindigkeit ... Schutzmaßnahmen für den Beton erforderlich, wenn nicht ein Gutachter eine andere Lösung vorschlägt.“ Ein Prüf- und Bewertungskonzept für Betone in dieser Exposition ist ebenfalls bisher nicht verfügbar.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Erarbeitung der Eckpunkte eines solchen Prüf- und Bewertungskonzepts. Damit könnte sich die Bewertung des Widerstandes gegenüber kalklösender Kohlensäure neuer Zemente, Bindemittel und Betone, die zur Markteinführung einer bauaufsichtlichen Zulassung bedürfen, auf ein einheitlichen Prüf- und Bewertungskonzept abstützen und damit sicher geprüft und bewertet werden.

3 Ausgangsstoffe und Betone (VDZ)

3.1 Analyse der Ausgangsstoffe

Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Zemente wurde mit der Röntgenfluoreszenzanalyse sowie mittels IR-Spektroskopie gemäß DIN EN 196-2 ermittelt.

Die Ergebnisse sind in **Tabelle 1** zusammengestellt.

Die Korngrößenverteilung der verwendeten Zemente wurde mittels Lasergranulometrie ermittelt.

Die Ergebnisse sind in **Bild 1** zusammengestellt.

Tabelle 1 Chemische Zusammensetzung der Ausgangsstoffe

Messwerte	Einheit	CEM I	CEM II/A-LL	CEM II/B-LL	CEM III/A	CEM III/B	CEM II/B-M (S-LL)	CEM II/C-M (S-LL)
Kohlendioxid	%	1,26	7,13	13,93	1,32	0,80	4,95	8,61
Wasser		0,28	0,21	0,77	0,43	0,49	0,48	0,32
Glühverlust		1,54	7,34	14,70	1,75	1,29	5,43	8,93
Silizium(IV)-oxid		23,16	19,10	14,08	25,86	29,09	19,86	21,54
Aluminiumoxid		3,68	3,02	3,34	6,98	8,82	5,34	5,62
Titandioxid		0,20	0,16	0,23	0,45	0,66	0,32	0,32
Phosphor(V)-oxid		0,15	0,13	0,27	0,27	0,16	0,34	0,11
Eisen(III)-oxid		1,48	1,26	2,00	2,09	1,37	2,63	1,72
Mangan(III)-oxid		0,04	0,04	0,06	0,08	0,17	0,05	0,12
Magnesiumoxid		0,89	0,91	1,19	4,44	5,13	3,22	2,90
Calciumoxid		65,42	64,14	60,31	53,32	48,45	58,14	55,72
Sulfat als SO ₃		3,05	3,07	3,00	3,24	3,52	3,00	2,53
Kaliumoxid		0,55	0,60	0,51	0,84	0,77	0,81	0,53
Natriumoxid		0,17	0,19	0,12	0,24	0,26	0,20	0,18
Na ₂ O-Äquivalent		0,53	0,58	0,46	0,79	0,77	0,73	0,53

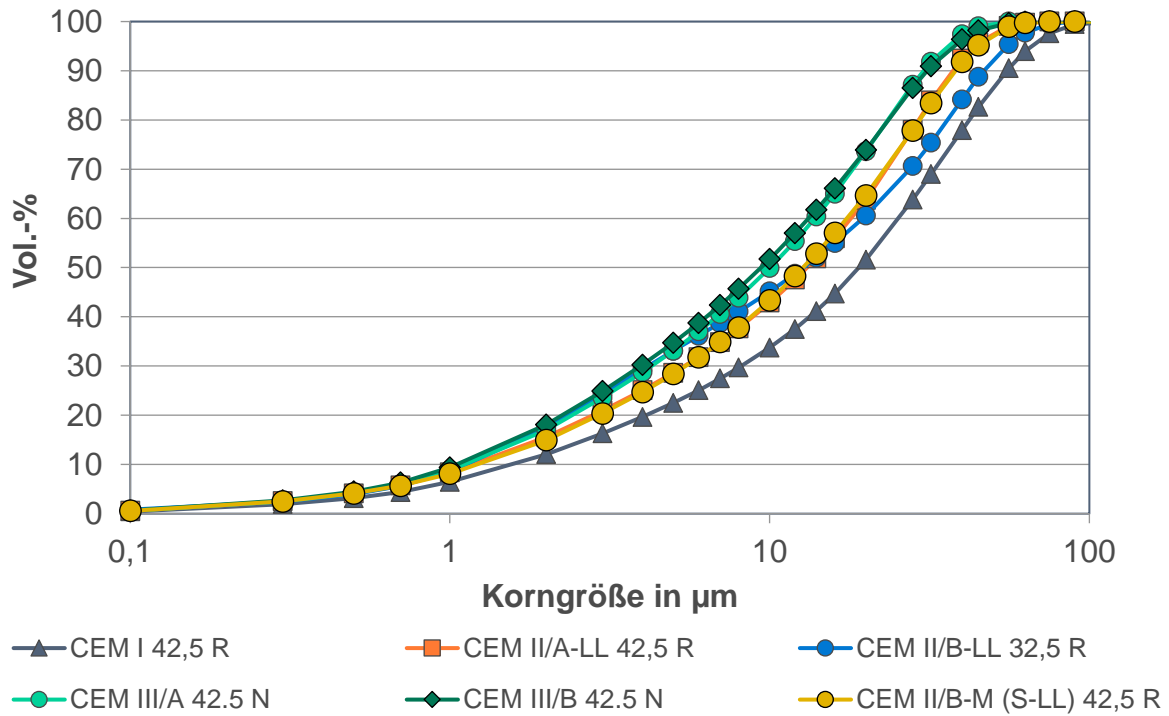


Bild 1 kumulierte Korngrößenverteilung der Zemente

Die Druckfestigkeiten der Zemente wurden gemäß DIN EN 196-1 im Alter von 2, 7 und 28 Tagen bestimmt. Die Mittelwerte sind in **Tabelle 2** zusammen mit weiteren Kennwerten angegeben.

Tabelle 2 Erstarrungszeiten, Raumbeständigkeit und Mörteldruckfestigkeit der Zemente

Prüfung	Einheit	CEM I	CEM II/A-LL	CEM II/B-LL	CEM III/A	CEM III/B	CEM II/B-M (S-LL)	CEM II/C-M (S-LL)
Erstarren - Beginn	min	190	215	200	185	320	175	170
Erstarren - Ende	min	225	250	235	240	370	225	215
Wasseranspruch	%	26,0	28,0	26,5	30,5	32,5	29,0	28,5
Raumbeständigkeit	mm	0	0	0	0	0	1	0
Druckfestigkeit, Mittelwert, 2 Tage	MPa	24,5	30,0	9,3	19,7	12,0	21,9	19,2
Druckfestigkeit, Mittelwert, 7 Tage		45,0	48,5	23,5	37,0	36,9	41,3	31,8
Druckfestigkeit, Mittelwert, 28 Tage		59,4	59,3	33,0	60,0	57,6	55,1	45,9

3.2 Betone

Zur Ableitung des Bewertungshintergrundes für XA2 wurden die in **Tabelle 3** dargestellten Betone geprüft.

Tabelle 3 Betone für die Ableitung des Bewertungshintergrundes

Zement	Wasserzementwert		Gesteinskörnung AB16	
	0,50	0,60	quarzitisch	carbonatisch*
CEM I 32,5 R	x	x	x	x
CEM I 32,5 R + 33 % FA	x	-	x	-
CEM II/A-LL 32,5 R	x	-	x	-
CEM II/B-LL 32,5 R	x	x	x	x
CEM III/A 42,5 N	x	-	x	-
CEM III/B 42,5 N	x	x	x	x
CEM II/B-M (S-LL)	x	-	x	-
CEM II/C-M (S-LL)	x	-	x	-

* nur mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,50$

Zur versuchstechnischen Darstellung eines Angriffs XA3 wurde die Konzentration der kalklösenden Kohlensäure auf 150 mg/l bzw. 200 mg/l erhöht. Zusätzlich wurde das angreifende Medium in Strömung (rd. 0,5 m/s) versetzt, was gemäß DIN 1045-2 auch bei Konzentrationen unterhalb von 100 mg/l bereits XA3 entspricht bzw. zusätzliche Schutzmaßnahmen erfordert. Es wurden im Wesentlichen Betone (**Tabelle 4**) mit einer XA3 – Zusammensetzung gemäß Tabelle F2.2 der DIN 1045-2 geprüft. Zur Überprüfung des Einflusses der Gesteinskörnungen kamen sowohl quarzitisches als auch carbonatisches Gesteinskörnungen zum Einsatz.

Tabelle 4 Betone für die Performanceprüfung

Zement	Wasserzementwert		Gesteinskörnung AB16		Konzentration CO ₂ in mg/L			Wasserbewegung	
	0,45	0,40	quarzitisch	carbonatisch*	100	150	200	strömend	ruhend
CEM I 32,5 R	x	x	x	x	x	x	x	x	x
CEM I 32,5 R + 33% FA	x	-	x	-	-	x	-	-	x
CEM II/A-LL 42,5 R	x	x	x	x	x	x	x	x	x
CEM III/A 42,5 N	x	-	x	-	-	x	-	-	x
CEM III/B 42,5 N	x	x	x	x	x	x	x	x	x
CEM II/B-M (S-LL)	x	-	x	-	-	x	-	-	x
CEM II/C-M (S-LL)	x	-	x	-	-	x	-	-	x

* nur mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,45$

Die Zusammensetzung der Betone ist in **Tabelle 5** angegeben.

Tabelle 5 Betone

Beton	Wassorzementwert	Zementgehalt in kg/m ³	Leimgehalt in l/m ³
B1	0,60	300	rd. 300
B2	0,50	320	rd. 285
B3	0,45	340	rd. 285
B4	0,40	370	rd. 285

An allen Betonen wurden die Frischbetoneigenschaften gemäß DIN EN 12350-5 und DIN EN 12350-7 (**Bild 2**) sowie die Druckfestigkeiten an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm im Alter von 28 Tagen gemäß DIN EN 12390-2 (**Bild 3**) geprüft. Aus Bruchstücken der Druckfestigkeitsprobekörper wurde die Porenradienverteilung mittels Quecksilberdruckporosimetrie nach ISO 15901-1 bestimmt (**Bild 4**). Die Einzelwerte sind in **Tabelle 6** bis **Tabelle 9** dargestellt.

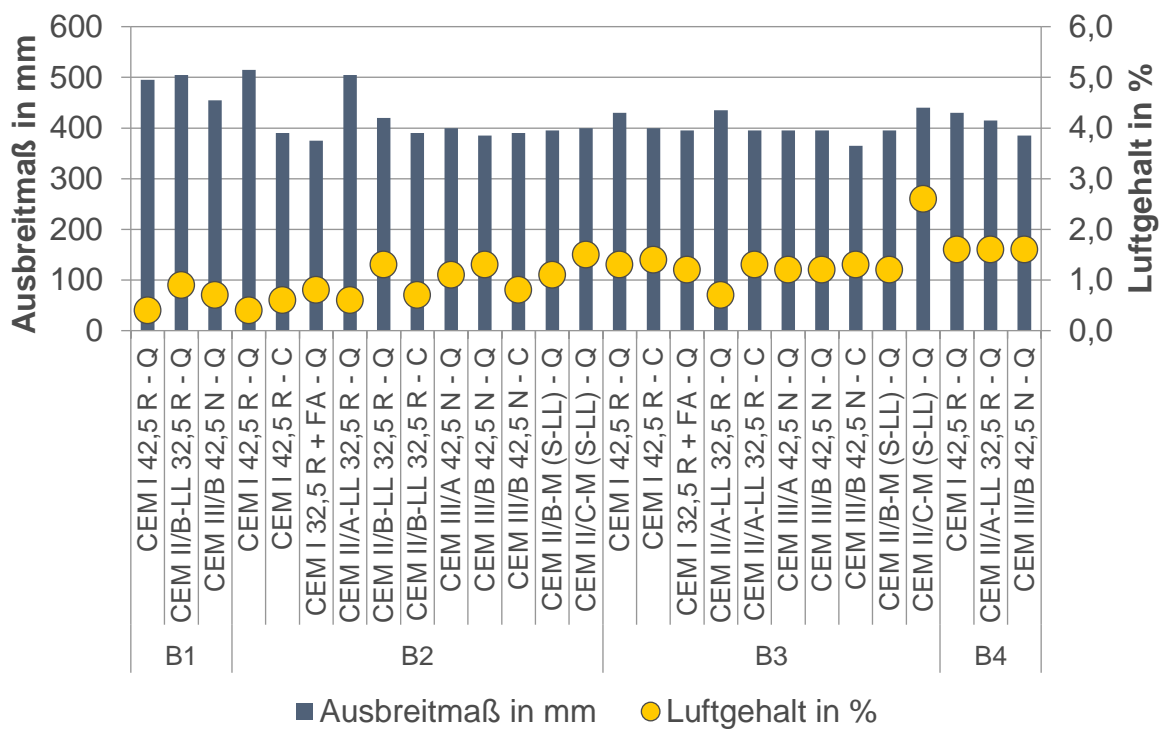


Bild 2 Ausbreitmaße und Luftgehalte der Betone

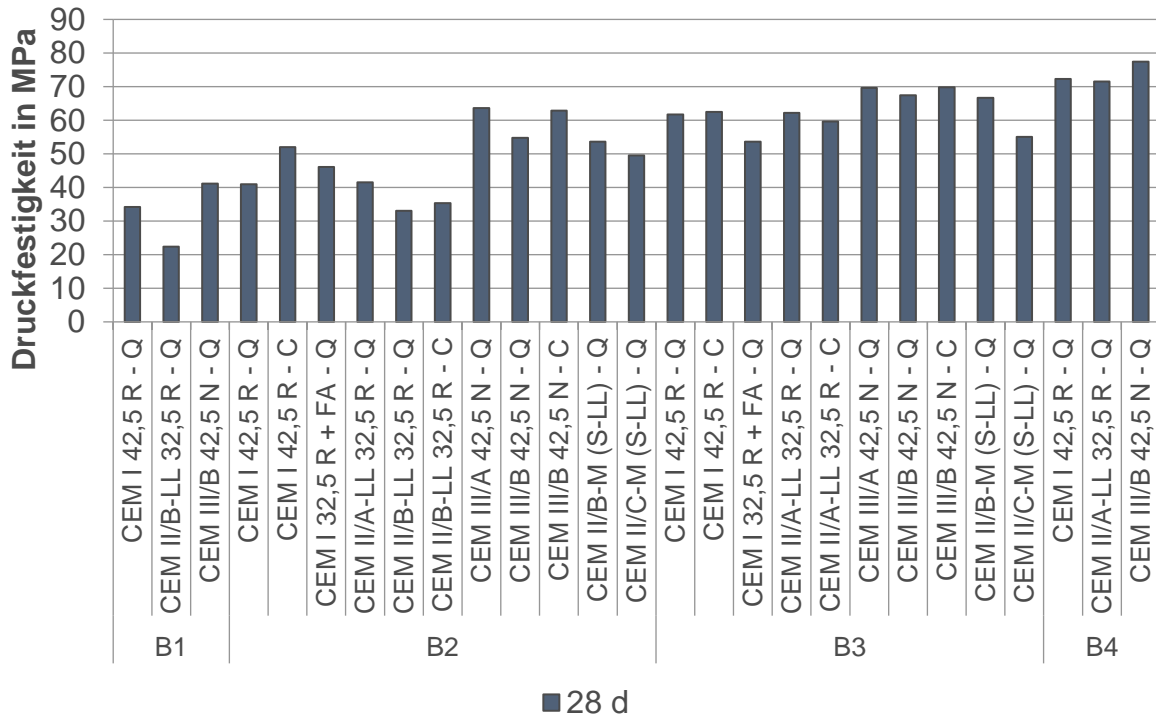


Bild 3 Druckfestigkeiten der Betone

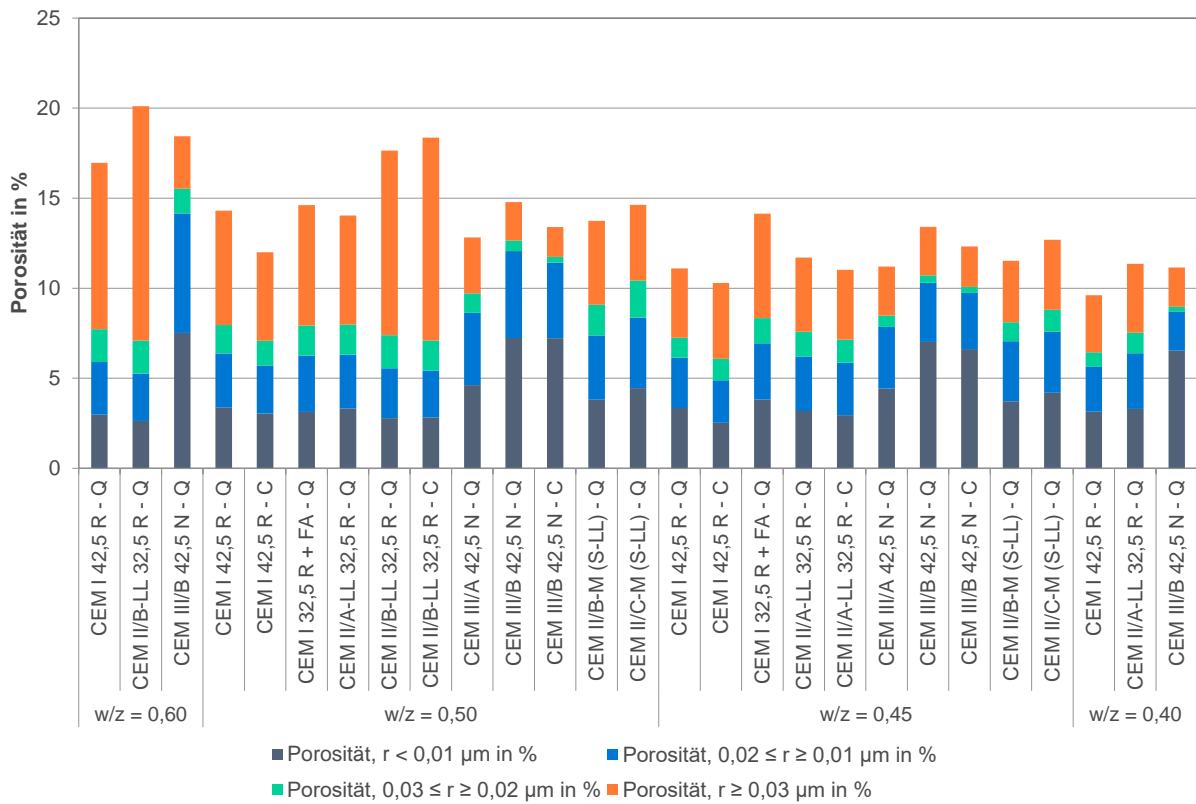


Bild 4 Porenradienverteilung der Betone

Tabelle 6 Druckfestigkeiten, Rohdichten und Porenradienverteilungen der Betone B1 und B2

Beton	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B2
Zement	CEM I 42,5 R - Q	CEM II/B-LL 32,5 R - Q	CEM III/B 42,5 N - Q	CEM I 42,5 R - Q	CEM I 42,5 R - C	CEM I 32,5 R + FA - Q	CEM II/A-LL 32,5 R - Q
28d Druckfestigkeit in MPa	35,0	22,0	40,9	41,4	52,5	45,6	41,6
	34,5	22,7	42,1	39,5	52,0	46,3	43,8
	32,9	22,3	40,4	41,9	51,4	46,3	39,2
Mittelwert	34,1	22,3	41,1	40,9	52,0	46,1	41,5
28d Rohdichte in g/cm ³	2,33	2,26	2,32	2,33	2,43	2,32	2,33
	2,32	2,26	2,32	2,33	2,41	2,32	2,32
	2,32	2,26	2,32	2,33	2,43	2,33	2,32
Mittelwert	2,32	2,26	2,32	2,33	2,42	2,33	2,33
Gesamtporosität in %	16,96	20,10	18,44	14,31	12,00	14,61	14,04
Porosität, r ≥ 0,01 µm in %	13,99	17,47	10,92	10,93	8,95	11,48	10,72
Porosität, r ≥ 0,02 µm in %	11,06	14,84	4,29	7,93	6,29	8,34	7,73
Porosität, r ≥ 0,03 µm in %	9,24	13,01	2,92	6,36	4,91	6,68	6,06
Porosität, r ≥ 0,04 µm in %	8,10	11,74	2,54	5,52	4,18	5,78	5,15
Porosität, r ≥ 0,05 µm in %	7,34	10,66	2,33	4,95	3,65	5,23	4,53

Tabelle 7 Druckfestigkeiten, Rohdichten und Porenradienverteilungen der Betone B2 (Fortsetzung)

Beton	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2
Zement	CEM II/B-LL 32,5 R - Q	CEM II/B-LL 32,5 R - C	CEM III/A 42,5 N - Q	CEM III/B 42,5 N - Q	CEM III/B 42,5 N - C	CEM II/B-M (S-LL) - Q	CEM II/C-M (S-LL) - Q
28d Druckfestigkeit in MPa	33,0	34,9	64,5	55,5	63,7	52,5	48,8
	33,2	35,6	62,8	54,0	63,7	54,3	48,9
	33,1	35,4	63,6	54,7	61,2	53,9	50,8
Mittelwert	33,1	35,3	63,6	54,8	62,9	53,6	49,5
28d Rohdichte in g/cm ³	2,30	2,37	2,35	2,35	2,42	2,34	2,33
	2,30	2,37	2,36	2,34	2,41	2,35	2,32
	2,31	2,38	2,35	2,35	2,40	2,35	2,33
Mittelwert	2,30	2,37	2,35	2,35	2,41	2,35	2,32
Gesamtporosität in %	17,64	18,36	12,82	14,79	13,39	13,74	14,63
Porosität, r ≥ 0,01 µm in %	14,86	15,54	8,20	7,55	6,17	9,94	10,18
Porosität, r ≥ 0,02 µm in %	12,09	12,93	4,19	2,73	1,97	6,37	6,27
Porosität, r ≥ 0,03 µm in %	10,26	11,27	3,11	2,14	1,65	4,66	4,20
Porosität, r ≥ 0,04 µm in %	8,93	10,09	2,80	1,94	1,55	4,02	3,45
Porosität, r ≥ 0,05 µm in %	7,91	9,08	2,65	1,83	1,52	3,67	3,10

Tabelle 8 Druckfestigkeiten, Rohdichten und Porenradienverteilungen der Betone B3

Beton	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3
Zement	CEM I 42,5 R - Q	CEM I 42,5 R - C	CEM I 32,5 R + FA - Q	CEM II/A-LL 32,5 R - Q	CEM II/A-LL 32,5 R - C	CEM III/A 42,5 N - Q	CEM III/B 42,5 N - Q
28d Druckfestigkeit in MPa	60,8	62,4	53,7	61,1	59,4	70,0	68,8
	62,3	63,2	53,4	61,6	59,2	70,0	68,0
	62,2	61,8	53,8	63,7	60,2	68,9	65,3
Mittelwert	61,7	62,5	53,6	62,1	59,6	69,6	67,4
28d Rohdichte in g/cm ³	2,38	2,43	2,32	2,36	2,43	2,37	2,36
	2,37	2,43	2,32	2,36	2,43	2,37	2,35
	2,38	2,43	2,34	2,35	2,42	2,37	2,35
Mittelwert	2,38	2,43	2,33	2,36	2,43	2,37	2,35
Gesamtporosität in %	11,10	10,30	14,14	11,71	11,02	11,21	13,41
Porosität, r ≥ 0,01 µm in %	7,76	7,77	10,32	8,53	8,07	6,79	6,38
Porosität, r ≥ 0,02 µm in %	4,95	5,41	7,19	5,50	5,15	3,36	3,11
Porosität, r ≥ 0,03 µm in %	3,85	4,21	5,80	4,12	3,87	2,73	2,70
Porosität, r ≥ 0,04 µm in %	3,36	3,68	5,18	3,55	3,36	2,52	2,57
Porosität, r ≥ 0,05 µm in %	3,08	3,39	4,75	3,21	3,07	2,40	2,47

Tabelle 9 Druckfestigkeiten, Rohdichten und Porenradienverteilungen der Betone B3 (Fortsetzung) und B4

Beton	B3	B3	B3	B4	B4	B4
Zement	CEM III/B 42,5 N - C	CEM II/B-M (S-LL) - Q	CEM II/C-M (S-LL) - Q	CEM I 42,5 R - Q	CEM II/A-LL 32,5 R - Q	CEM III/B 42,5 N - Q
28d Druckfestigkeit in MPa	69,9	67,7	54,6	73,3	71,6	76,2
	71,6	66,5	55,4	71,9	70,8	77,6
	67,9	65,9	55,2	71,8	72,1	78,4
Mittelwert	69,8	66,7	55,1	72,3	71,5	77,4
28d Rohdichte in g/cm ³	2,44	2,37	2,33	2,38	2,37	2,36
	2,43	2,37	2,33	2,38	2,37	2,37
	2,43	2,37	2,33	2,38	2,37	2,36
Mittelwert	2,43	2,37	2,33	2,38	2,37	2,37
Gesamtporosität in %	12,31	11,52	12,69	9,61	11,36	11,15
Porosität, r ≥ 0,01 µm in %	5,69	7,81	8,50	6,46	8,06	4,62
Porosität, r ≥ 0,02 µm in %	2,58	4,47	5,11	3,95	4,97	2,44
Porosität, r ≥ 0,03 µm in %	2,24	3,41	3,89	3,17	3,82	2,18
Porosität, r ≥ 0,04 µm in %	2,13	3,08	3,48	2,88	3,45	2,06
Porosität, r ≥ 0,05 µm in %	2,08	2,91	3,26	2,70	3,21	1,97

Alle Proben für die Bestimmung der Diffusionskoeffizienten wurden als Scheiben mit „verlorener Schalung“ hergestellt (**Bild 5**). Diese wurden an den Projektpartner RWTH Aachen zur weiteren Prüfung übergeben.

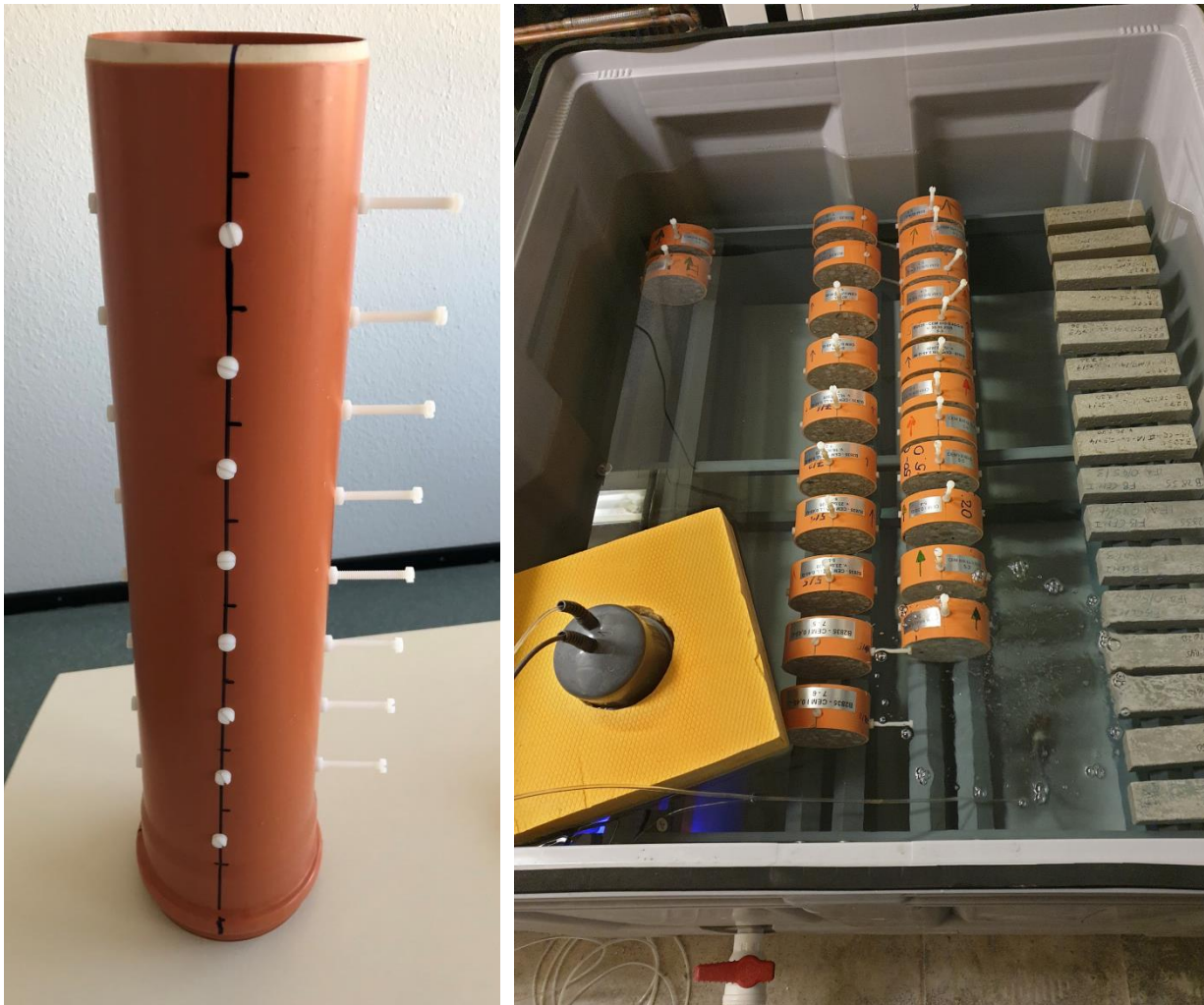


Bild 5 Schalung zur Herstellung der Proben und Einlagerung der präparierten Prüfkörper in kalklösende Kohlensäure beim Projektpartner RWTH Aachen

4 Lagerung in Kalklösender Kohlensäure und NMR-Messung (ibac)

4.1 Vorkonditionierung der Prüfkörper

Die angelieferten Prüfkörper, Normprismen mit den Maßen $40 \cdot 40 \cdot 160 \text{ mm}^3$ und gesägten runden Prüfkörper, wurden nach der Anlieferung in ein Becken mit Leitungswasser eingebracht, damit die Hydratation dieser Prüfkörper nicht beeinträchtigt wird. Das Becken mit einem Volumen von ca. 600 L wurde allerdings nur so weit befüllt, so dass die Prüfkörper mit Leitungswasser bedeckt waren. Somit sollte eine intensive Auslaugung der Prüfkörper vermieden werden. Die Prüfkörper wurden bis zu dem Alter von 28 Tagen in dem Wasserbad gelagert. Für die Versuche ist Einlagerung essentiell, damit die Poren der Prüfkörper für die Initialmessung vor der Einlagerung in die Lagerungsbecken mit kalklösender Kohlensäure wassergesättigt sind. Die Prüfkörper wurden danach in das jeweilige Lagerungsbecken eingebracht.

4.2 Lagerung der Prüfkörper

4.2.1 Lagerungsbecken und das Messsystem

Die Lagerung der Prüfkörper, sowohl für die Abbürstversuche als auch für die Untersuchungen mithilfe der NMR-MOUSE, wurde in sechs Lagerungsbecken mit einem Fassungsvermögen von etwa 600 L durchgeführt. Die sechs Lagerungsbecken stellen sechs unterschiedliche Lagerungsbedingungen dar. Jeweils zwei Becken hatten die gleiche Konzentration an gelöstem CO_2 , entweder 100 mg/l, 150 mg/L oder 200 mg/L. Zwei Becken gleicher CO_2 -Konzentration unterschieden sich in der angelegten Strömung im Becken. Der schematische Aufbau der ruhenden Lagerungsbecken ist in Bild 6 dargestellt.

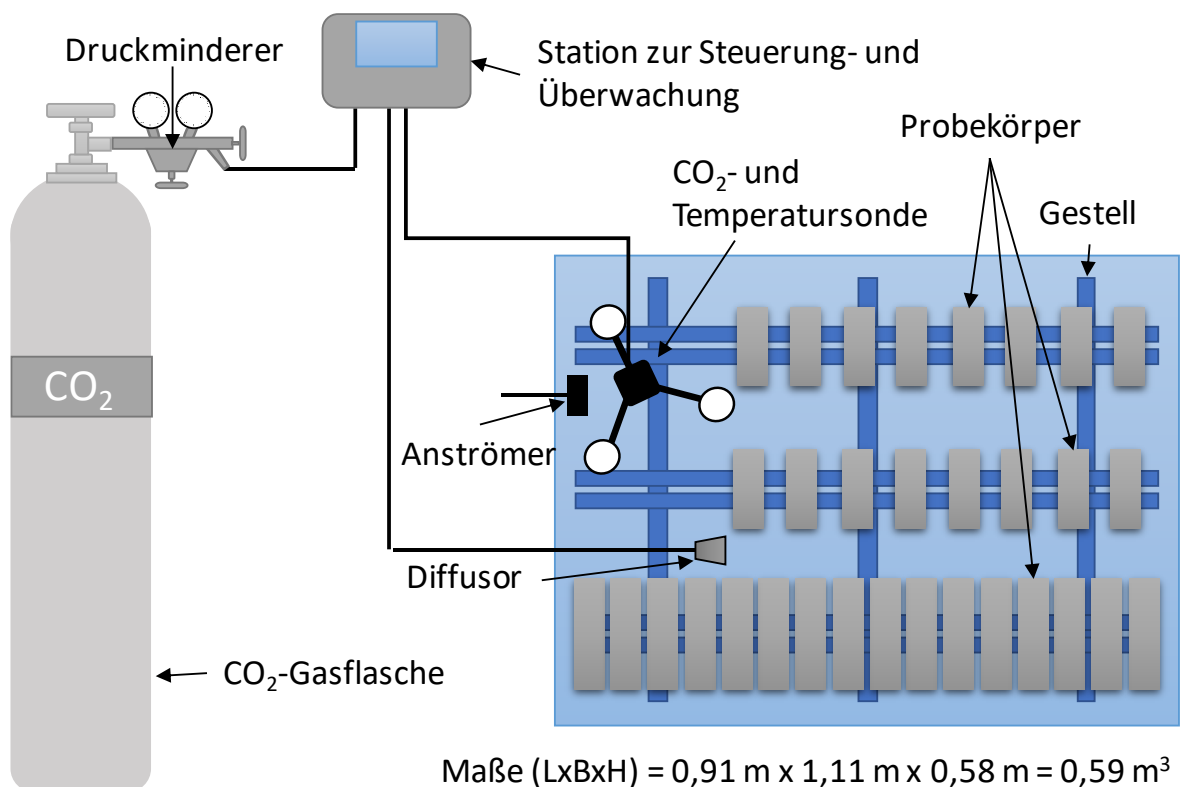


Bild 6: Schematischer Aufbau eines ruhenden Lagerungsbeckens

Die Prüfkörper in den ruhenden Becken sollten eine nicht von Strömung beeinflusste Gelschicht ausbilden können. Durch den Eintrag von CO₂ und einer kleinen Pumpe mit minimaler Strömung, welche jedoch essentiell für den optimalen Betrieb der Sonden zur Messung der CO₂-Konzentration war, war nur eine sehr geringe Strömung vorhanden.

In die anderen drei Becken wurden Strömungskanäle eingebracht, in denen die Prüfkörper mit der Prüffläche nach innen in den Kanal gerichtet waren. In den Strömungskanälen wurde jeweils eine Strömung mit einer Geschwindigkeit von 0,5 m/s mithilfe von Pumpen durchgeleitet. Vor der Inbetriebnahme der Strömungskanäle wurde mit einem mobilen Strömungsmessgerät der Firma Höntzsch sichergestellt, dass über die gesamte Höhe des Prüfkörpers in den Kanälen eine nahezu einheitliche Strömungsgeschwindigkeit vorliegt. Der schematische Aufbau der strömenden Lagerungsbecken ist in Bild 7 dargestellt.

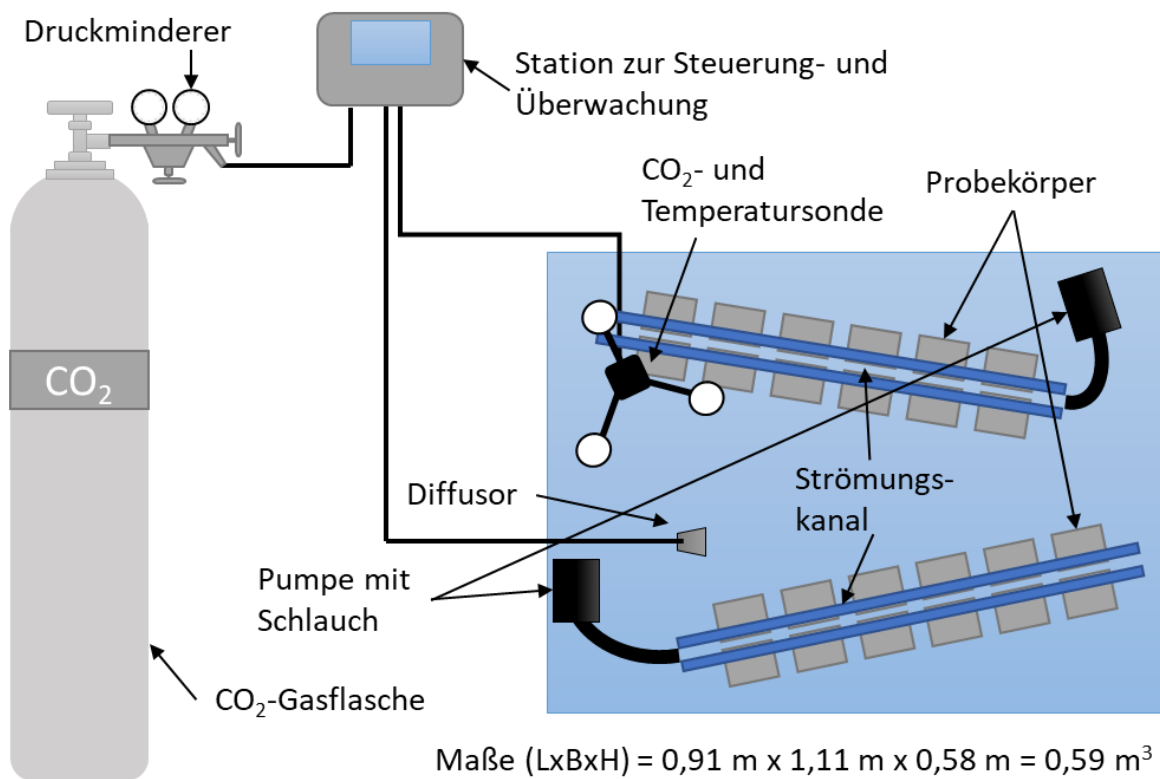


Bild 7: Schematischer Aufbau eines strömenden Lagerungsbeckens

Das CO₂ wurde mithilfe eines Druckminderers mit einem Druck von ca. 2 bar dem Wasser des jeweiligen Lagerungsbeckens zugeführt. Jedes Lagerungsbecken wurde jeweils von einer Gasflasche mit CO₂ versorgt, so dass der Wechsel einer Flasche nicht alle Becken beeinflusst hat. Um den CO₂-Strom zu regeln, wurden jeweils ein System zur Steuerung und Überwachung der CO₂-Konzentration im Wasser der jeweiligen Lagerungsbecken installiert. Zudem wurde die Temperatur durch die Sonde simultan geloggt. Ein Foto des Displays einer der Messstationen ist in Bild 8 dargestellt.



Bild 8: Messstation zur Steuerung der CO₂-Konzentration

Sank die Ist-Konzentration des CO₂ unter die Sollkonzentration, öffnete die Messstation ein Ventil, dass das CO₂ aus der Gasflasche in das Wasser des jeweiligen Beckens einströmen ließ. Am Ende der Leitung war ein Diffusor angebracht, wodurch kleine Gasbläschen in das Wasser einströmten, damit das Gas sich im Wasser besser lösen konnte. Wurde die Sollkonzentration erreicht bzw. überschritten, schloss die Messstation das Ventil, was eine weitere Zufuhr an CO₂ verhindern sollte. In dem Bild 9 sind Bilder der beiden Beckentyp dargestellt.

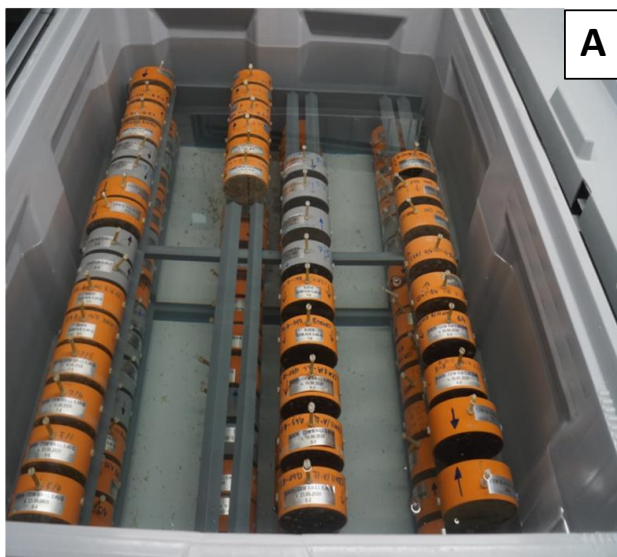


Bild 9: Bilder eines ruhenden Beckens (A) und eines strömenden Beckens (B)

Die Bilder der Sondentypen sind in Bild 10 dargestellt.

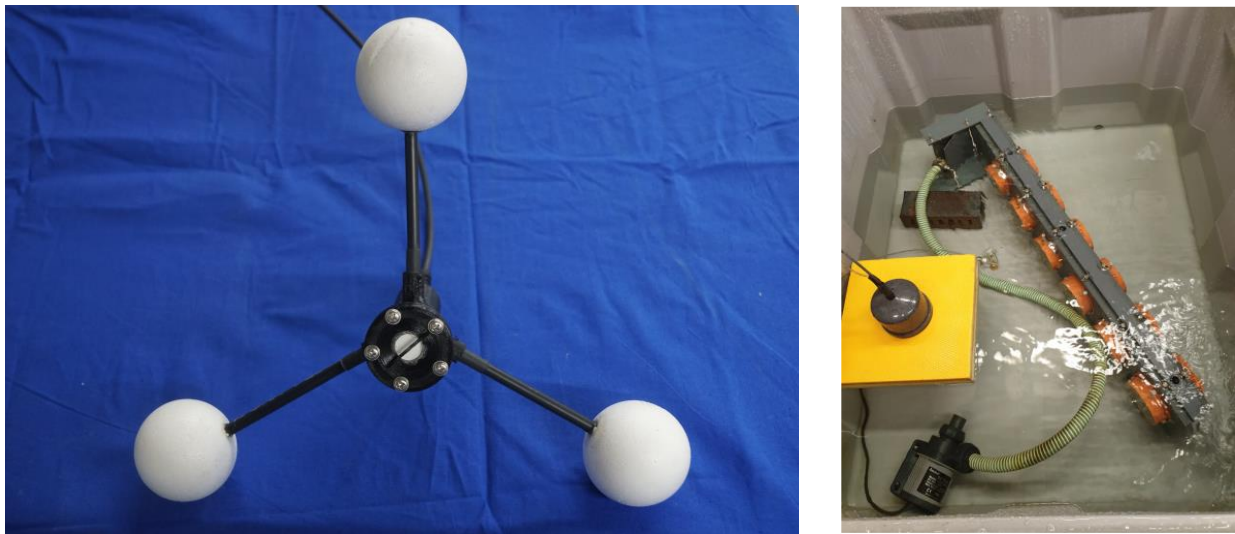


Bild 10: Neuer Sondentyp (links) und alter Sondentyp mit orangem Schwimmer (rechts)

Der Verlauf der CO₂-Konzentration und der Temperatur der jeweiligen Becken in Abhängigkeit der Zeit sind graphisch in den Bildern Bild B43 bis Bild B54 im Anhang, Seiten 141 bis 146, dargestellt.

Die Lagerungsbecken standen in einem nicht klimatisierten Labor. Es wurde darauf geachtet, dass die Prüfkörper der ruhenden Becken bei 22 ± 8 °C gelagert wurden. Die Prüfkörper der strömenden Becken wurden bei 26 ± 8 °C gelagert. Die höhere Temperatur in den strömenden Becken wurde durch die Pumpen verursacht, welche im Betrieb die erzeugte Abwärme an das Wasser der Lagerungsbecken abgegeben haben.

Mit zunehmender Lagerungsdauer bildeten sich Algen in den Becken, da durch die relativ warmen Temperaturen des Wassers in den Becken und der Zufuhr von CO₂ günstige Bedingungen für Wachstum gegeben waren. Somit mussten die Becken gereinigt werden. Dazu wurden die Prüfkörper entnommen und unter Wasser gelagert, damit die Gelschicht nicht austrocknet. Das Wasser mit den Algen wurde abgelassen, die Becken gründlich gereinigt. Dann wurden die Becken mit Leitungswasser wieder aufgefüllt und schließlich wurde das Biozid „Mikrobiozid 1850“ der Firma EFA Chemie GmbH dem Wasser hinzugegeben, um das Algenwachstum zu unterbinden. Die Prüfkörper wurden dann wieder in die gereinigten Becken eingebracht.

4.2.2 Prüfkörper

Die Normprismen für die Abbürstversuche wurden in den Becken auf dreieckigen Kunststoffleisten gelagert.

Die runden, gesägten Prüfkörper wurden mit zwei verschiedenen verlorenen Schalungsdurchmessern hergestellt. Zunächst wurden Prüfkörper mit einer verlorenen Schalung mit einem Innendurchmesser von 11,8 cm und einem Außendurchmesser von 12,5 cm dem ibac zur Verfügung gestellt. Daraufhin wurden die Aussparungen für diese Prüfkörper in den Strömungskanälen konzipiert.

Schließlich wurden Prüfkörper mit verlorener Schalung mit einem kleineren Innendurchmesser von 10,3 cm und somit einem kleineren Außendurchmesser von 11 cm ans ibac geliefert. Damit die Strömung in den Strömungskanälen aufrechterhalten werden konnte, wurde der Prüfkörper nachträglich in ein Rohr der entsprechenden Größe eingebettet und mithilfe einer Dichtung eingeklemmt. Eine schematische Zeichnung der beiden Prüfkörpergrößen der runden gesägten Prüfkörper ist in Bild 11 dargestellt.

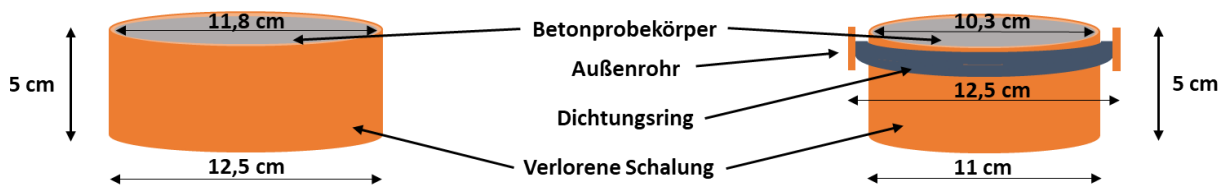


Bild 11: Schematische Zeichnung der runden, gesägten Prüfkörper

Diese Prüfkörper wurden in den ruhenden Becken auf der verlorenen Schalung gelagert, so dass die Prüfflächen keinen Kontakt mit dem dreieckigen Kunststoffleisten hatten. Die Prüfkörper hatten zueinander mindestens einen Abstand von 2 cm, damit möglichst eine homogene Beaufschlagung der Prüfflächen gewährleistet war.

In den strömenden Becken wurden die Prüfkörper in die Wandung des Strömungskanal eingesetzt und mit einer Schraube fixiert. Die Prüffläche der jeweiligen Prüfkörper war in Kontakt mit der Strömung innerhalb des Kanals.

Bei allen Becken wurde wöchentlich der pH-Wert und die Calciumkonzentration in der Lagerungslösung bestimmt. Die Bestimmung des pH-Werts ist wichtig, da sichergestellt werden sollte, dass ein deutliches Absinken des pH-Wert frühzeitig erkannt wird und somit nicht unmerkelt ein klassischer Säureangriff stattfindet. Durch Kontrolle der Calciumkonzentration sollte verhindert werden, dass die Sättigungskonzentration von 550 mg CaO/L im Wasser erreicht wird.

4.3 Abbürstversuche

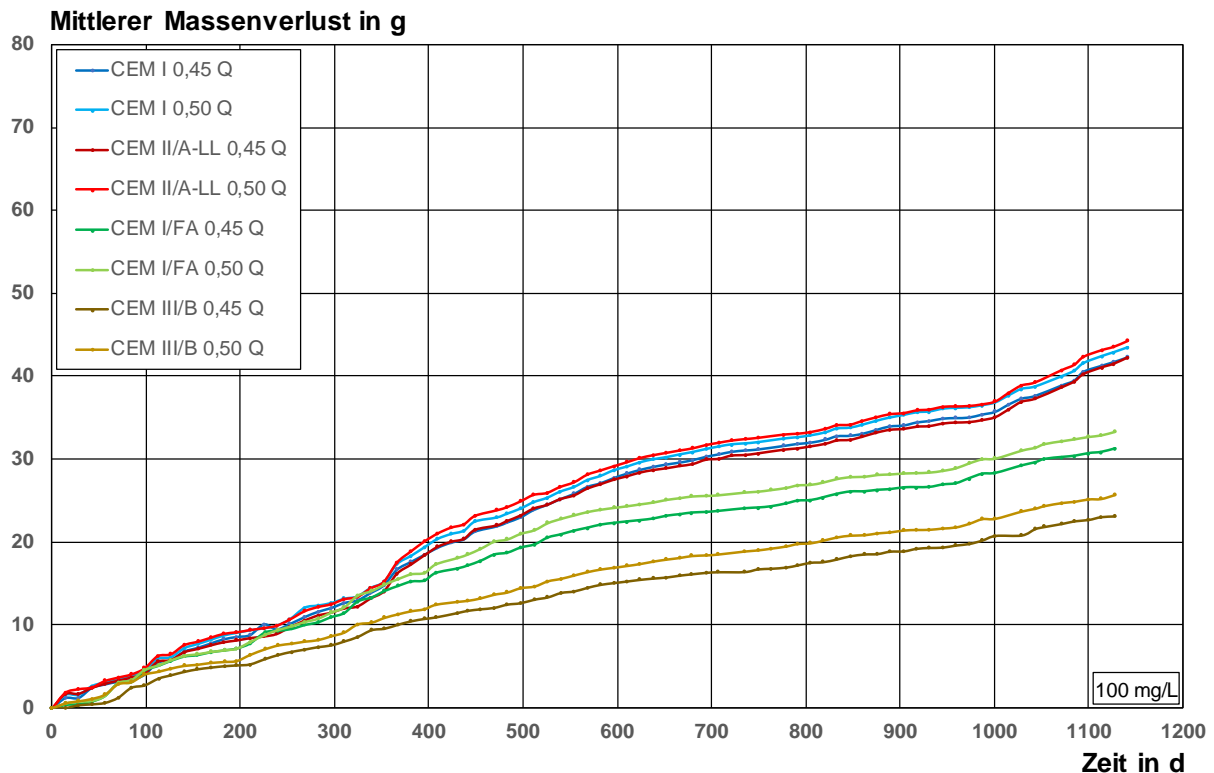
Für die Abbürstversuche wurden die jeweiligen Massen der wassergesättigten Normprismen der verschiedenen Mörtel vor der Einlagerung in den Lagerungsbecken bestimmt. Für jede Mörtelkombination wurden zwei Prismen jeweils in die ruhenden Becken eingelagert, um den Massenverlust durch den Angriff von kalklösender Kohlensäure in einer Doppelbestimmung zu ermitteln. Als Bindemittel wurden ein CEM I, ein CEM I mit 33 % Flugasche, CEM II/A-LL und ein CEM III/B für die Herstellung der Mörtelmischungen verwendet. Die Mörtelmischungen waren so konzipiert, dass das Volumen des Bindemittelleims $425 \pm 10 \text{ L/m}^2$ betrug. Die Mörtelmischungen der Normprismen für die Abbürstversuche wurden beim VDZ hergestellt und sind in **Tabelle 6** dargestellt.

Tabelle 6: Mörtelmischungen für die Herstellung der Normprismen für die Abbürstversuche

Zemente	w/z-Wert	Zement	Flugasche	Sand
		g		
Zemente ohne Flugasche	0,45	480	-	1350
	0,50	450	-	
CEM I + 33 % Flugasche	0,45	353	176	
	0,50	338	169	

In Abstand von 14 Tagen wurden die Prismen aus den Lagerungsbecken herausgeholt und bis zum Abbürstvorgang in einem Wasserbad gelagert. Die Seiten der Prüfkörper wurden mit möglichst wenig Druck von losem anhaftendem Material mit einer Bürste befreit. Die Prüfkörper wurden zudem mit Zellstoffüchern getrocknet. Nach dem Trocknungsvorgang wurde die Masse der jeweiligen Prüfkörper bestimmt. Nach der Wägung wurden die Prüfkörper zunächst wieder in das Wasserbad gesetzt, um eine Austrocknung zu verhindern. Nach den Wägungen wurden die Prüfkörper wieder in die entsprechenden Lagerungsbecken eingebracht.

Die Massenverluste in Abhängigkeit der Lagerungszeit der Prismen sind in den Bildern **Bild 12** bis **Bild 14** dargestellt. Die ermittelten Massen sind zudem in den Tabellen **Tabelle A2a** bis **Tabelle A25b** im Anhang, Seiten 65 bis 112, zusammengefasst.

**Bild 12:** Mittlerer Massenverlust der Normprismen in Abhängigkeit der Zeit bei 100 mg CO₂/L

In **Bild 12** sind die gemittelten Massenverluste der Normprismen in Abhängigkeit der Zeit nach Lagerung im ruhenden Becken 100 mg/L dargestellt. Von jeder Mörtelmischung wurden Prüfkörper mit einem w/z-Wert von 0,45 bzw. 0,50 hergestellt. Ein Vergleich der jeweiligen Kurven einer

Mörtelmischung mit den beiden w/z-Werten zeigt, dass der gemittelte Massenverlust bei $w/z = 0,45$ kleiner als bei $w/z = 0,50$. Dies wurde auch schon bei [1] berichtet. Der w/z-Wert beeinflusst das Porengefüge des Zementsteins. Je kleiner der w/z-Wert, desto dichter ist das Gefüge. Je dichter das Gefüge, desto langsamer ist der chemische Angriff.

Die Mörtelmischungen mit CEM III/B zeigen die geringsten Massenverluste verglichen mit den Mörtelmischungen der anderen drei Zemente. Mörtel mit einem CEM III bilden ein dichteres Gefüge als die anderen Mörtelmischungen aus, was den Widerstand gegen den Angriff von kalklösender Kohlensäure verbessert. Die Mörtelmischungen mit einer Kombination aus CEM I mit 33 % Flugasche zeigen verglichen mit den Mörtelmischungen aus CEM I bzw. CEM II/A-LL geringere Massenverluste. Die Flugasche verdichtet das Bindemittelgefüge, was ebenfalls zu einem höheren Widerstand gegen den Angriff von kalklösender Kohlensäure führt.

Die Massenverluste der Mörtelmischungen mit CEM I und CEM II/A-LL liegen in etwa der gleichen Größenordnung. Dies erscheint zunächst ungewöhnlich, da der CEM II/A-LL Kalksteinmehl enthält, welches bevorzugt durch kalklösende Kohlensäure als Calciumhydrogencarbonat gelöst werden sollte. Ein Vergleich der Daten der Quecksilberdruckporosimetrie zeigt, dass die Porosität der Gefüge der Mörtelmischungen mit CEM II/A-LL eine ähnliche Dichte wie der CEM I aufweist. Die Dichte des Gefüges führt zu Massenverlusten, welche mit denen des CEM I vergleichbar sind.

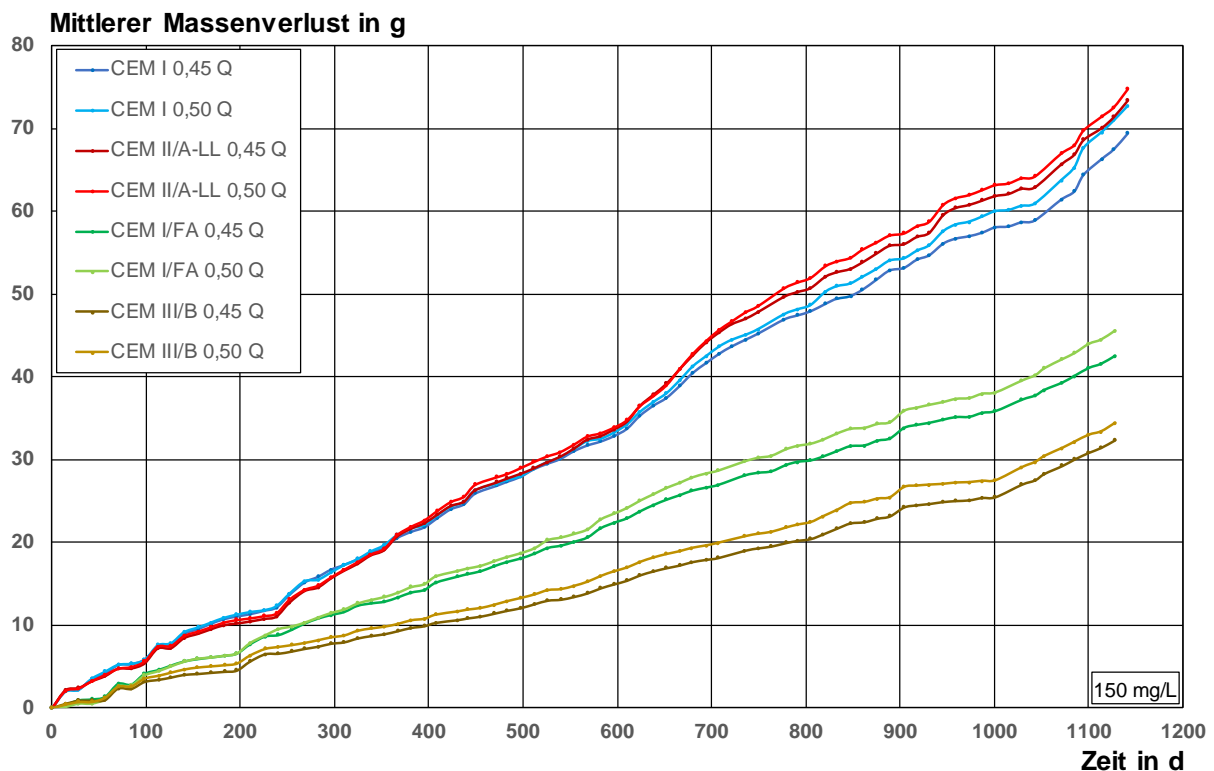


Bild 13: Mittlerer Massenverlust der Normprismen in Abhängigkeit der Zeit bei 150 mg CO₂/L

In Bild 13 sind die gemittelten Massenverluste der Normprismen in Abhängigkeit der Zeit nach Lagerung im ruhenden Becken 150 mg CO₂/L dargestellt. Grundsätzlich zeigen die mittleren Massenverluste nach Lagerung der Prüfkörper bei 150 mg CO₂/L einen ähnlichen Trend wie bei

der Lagerung bei 100 mg CO₂/L. Der Einfluss der w/z-Werte auf den Massenverlust ist deutlich erkennbar. Die Mörtelmischungen mit CEM III/B zeigen den geringsten Massenverlust und gefolgt von den Mischungen mit der Kombination aus CEM I mit 33 % Flugasche. Die Mischungen mit CEM I und CEM II/A-LL zeigen deutlich höhere Massenverluste als die Mischungen mit CEM III/B bzw. CEM I mit 33 % Flugaschen. Zudem zeigen die Mörtelmischungen mit CEM II/A-LL die höchsten Massenverluste. Bei höheren Konzentrationen kann das dichtere Gefüge das Lösen des Kalksteinmehls nur bedingt verzögern, so dass die Prüfkörper die höchsten Massenverluste zeigen. Die höhere Konzentration sorgt für die Verstärkung der Trends bei den gemittelten Massenverluste und stellt somit den Widerstand der jeweiligen Bindemittel gegen den Angriff von kalklösender Kohlensäure stärker heraus.

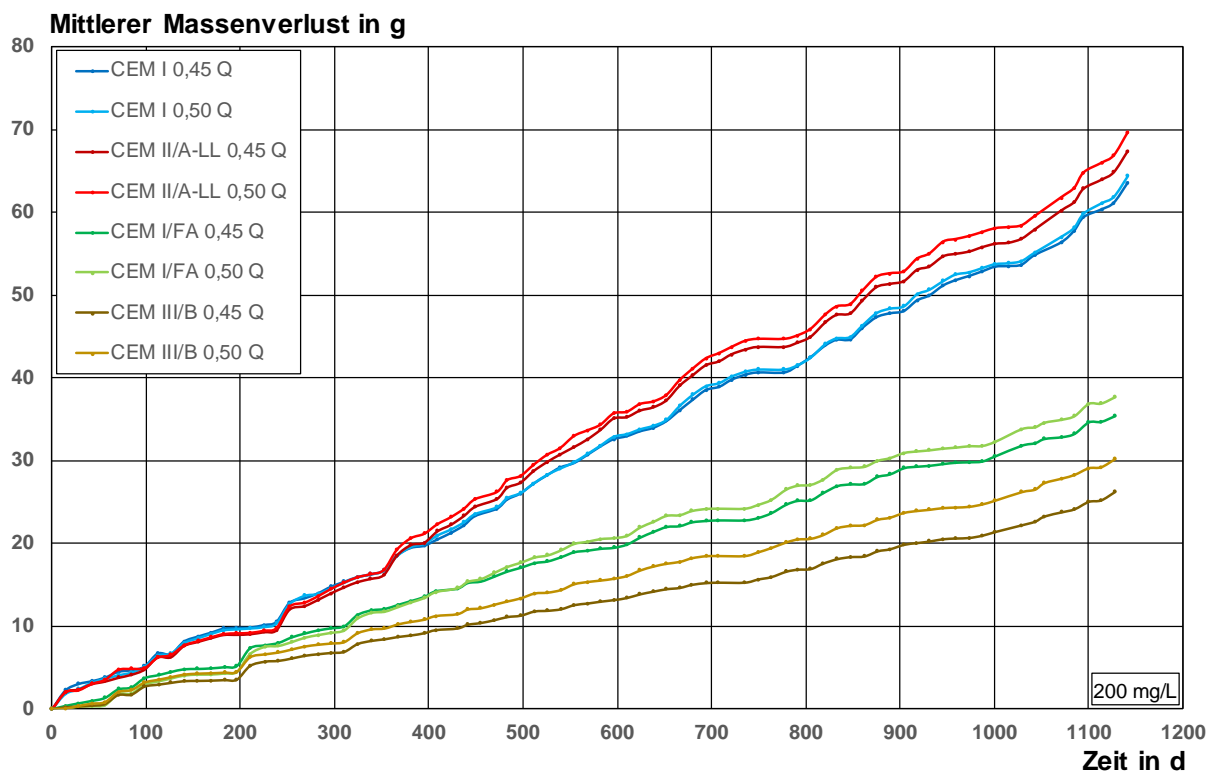


Bild 14: Mittlerer Massenverlust der Normprismen in Abhängigkeit der Zeit bei 200 mg CO₂/L

In Bild 14 sind die gemittelten Massenverluste der Normprismen in Abhängigkeit der Zeit nach Lagerung im ruhenden Becken 200 mg CO₂/L dargestellt. Grundsätzlich zeigen die mittleren Massenverluste nach Lagerung der Prüfkörper bei 200 mg CO₂/L einen ähnlichen Trend wie bei der Lagerung bei 150 mg CO₂/L. Der Einfluss der w/z-Werte auf den Massenverlust ist bei den meisten Mischungen erkennbar, wobei die beiden mittleren Massenverluste des CEM I fast gleich sind. Die Mörtelmischungen mit CEM III/B zeigen, wie bei den vorhergehenden Becken, den geringsten Massenverlust und gefolgt von den Mischungen mit der Kombination aus CEM I mit 33 % Flugasche. Die Mischungen mit CEM I und CEM II/A-LL zeigen deutlich höhere Massenverluste als die Mischungen mit CEM III/B bzw. CEM I mit 33 % Flugaschen. Zudem zeigen die Mörtelmischungen mit CEM II/A-LL die höchsten Massenverluste.

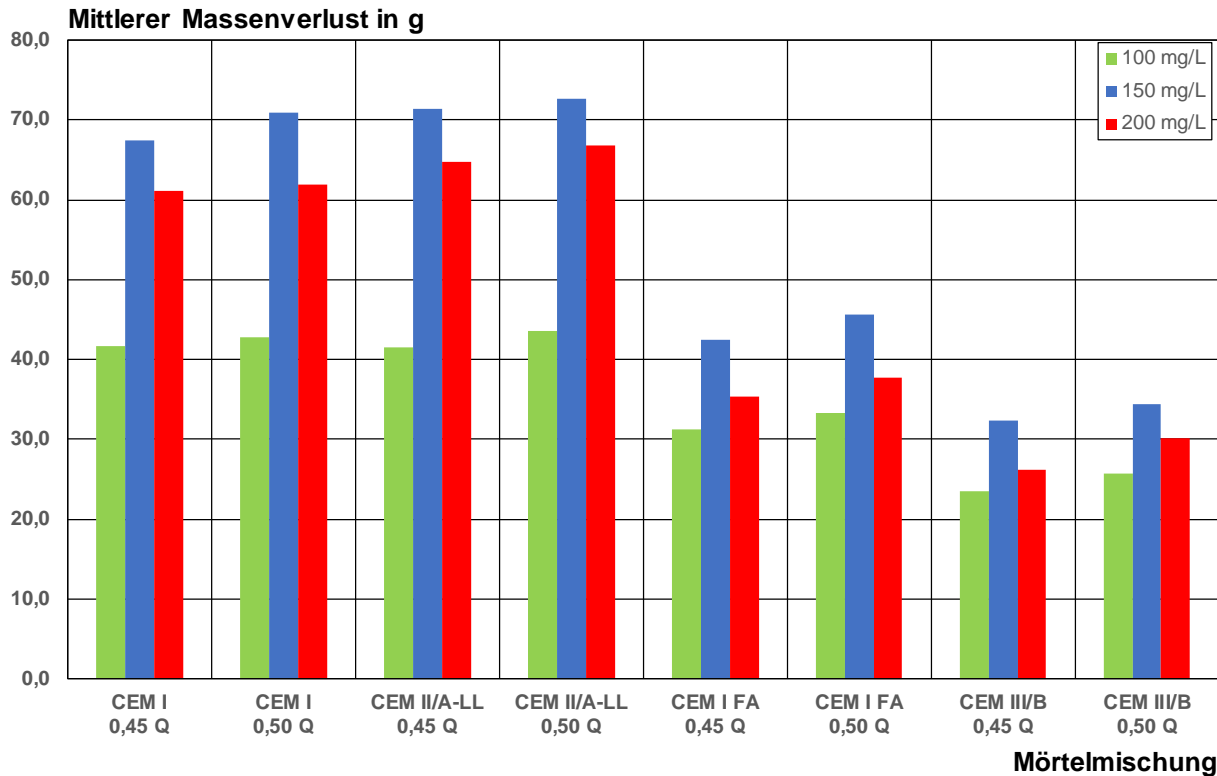


Bild 15: Vergleich der gemittelten Massenverluste der Mörtelmischung in Abhängigkeit der Lagerungskonzentration im Alter 1128 Tagen

Das Bild 15 zeigt die mittleren Massenverluste der Normprismen der verschiedenen Mörtelmischungen bei 100 mg CO₂/L, 150 mg CO₂/L bzw. 200 mg CO₂/L. Hierbei ist überraschend, dass die Normprismen, welche bei einer CO₂-Konzentration von 150 mg/L eingelagert waren, im Vergleich mit den jeweiligen Mörtelmischungen der anderen Lagerungsbecken durchgängig den höchsten Massenverlust zeigen. Bei Betrachtung der gemessenen CO₂-Konzentrationen der ruhenden Becken fallen bei den Lagerungsbecken mit 150 mg CO₂/L viele Ausreißer zu höheren Konzentrationen auf. Hier hat die Sonde zeitweise die Zufuhr von gasförmigen CO₂ unzureichend geregelt. Zeitweise kam es somit zu einem stärkeren Angriff, da die vorliegende Konzentration im Becken deutlich über 150 mg CO₂/L lag. Dies kann zu höheren Massenverlust und zu höheren Abtragstiefen geführt haben.

Ein Vergleich der Massenverluste der Bindemittel CEM III/B bzw. CEM I mit 33 % Flugasche zeigt, dass die Unterschiede der Massenverluste der jeweiligen Mörtelmischungen bei den drei CO₂-Konzentrationen deutlich geringer ist als bei den Mörtelmischungen mit CEM I bzw. CEM II/A-LL. Das dichte Gefüge und somit die geringeren Eindringtiefen der kalklösenden Kohlensäure sorgen für eine deutlich geringere Abtragstiefe der Bindemittelmatrix. Um eine Anbindung an die Beurteilung des Angriffs von kalklösender Kohlensäure zu haben, wurden aus den Massenverlusten Abtragstiefen berechnet. Diese Werte sind in **Tabelle 7** dargestellt.

Tabelle 7: Berechnete Abtragstiefen aus den gemittelten Massenverluste der Normprismen nach 1128 Tagen

Mörtel	Abtragstiefe in mm		
	$c(\text{CO}_2) = 100 \text{ mg/L}$	$c(\text{CO}_2) = 150 \text{ mg/L}$	$c(\text{CO}_2) = 200 \text{ mg/L}$
CEM I 0,45 Q	0,60	0,97	0,87
CEM I 0,50 Q	0,61	1,02	0,88
CEM II/A-LL 0,45 Q	0,60	1,04	0,95
CEM II/A-LL 0,50 Q	0,64	1,06	0,97
CEM I FA 0,45 Q	0,45	0,62	0,52
CEM I FA 0,50 Q	0,49	0,66	0,55
CEM III/B 0,45 Q	0,35	0,47	0,38
CEM III/B 0,50 Q	0,38	0,50	0,44

Die berechneten Abtragstiefen zeigen, dass es sich bei dem Angriff von kalklösender Kohlensäure um einen chemischen Angriff handelt, welcher relativ langsam verläuft. Bei einer Lagerungsdauer von ca. 3 Jahren beträgt die maximale berechnete Abtragstiefe 1,06 mm. Dies bedeutet, dass nach ca. 30 Jahren eine Abtragstiefe von 1 cm vorliegt. Der CEM III/B zeigte die geringsten Massenverluste und somit bei der jeweiligen Konzentration auch die geringsten Abtragstiefen. Der CEM I und CEM II/A-LL zeigen ähnliche Abtragstiefen und verglichen mit dem CEM III/B und CEM I + 33 % Flugasche die höchsten. Bezogen auf die Abtragstiefen des CEM I bzw. des CEM II/A-LL liegen die relativen prozentualen Abtragstiefen des CEM III/B bei 100 mg CO_2/L bei ca. 66 %, bei 150 mg CO_2/L bei etwa 50 % und bei 200 mg CO_2/L bei ca. 44 %. Bei dem Bindemittel aus CEM I mit 33 % Flugasche liegen die relativen prozentualen Abtragstiefen bezogen auf die Abtragstiefen des CEM I bzw. CEM II/A-LL bei 100 mg CO_2/L bei ca. 83 %, bei 150 mg CO_2/L bei etwa 60 % und bei 200 mg CO_2/L bei ca. 56 %.

Bei der Betrachtung dieser Ergebnisse sollte immer berücksichtigt werden, dass die schützende Gelschicht an dem Prüfkörper bei jedem Termin zur Ermittlung des Massenverlusts entfernt wurde. Somit kann dieses Szenario als worst-case-Angriff betrachtet werden. Zudem zeigen die Loggerdaten der Konzentrationen der Becken, dass die Konzentrationen nicht immer von der Mess- und Steuerungsanlage korrekt geregelt wurden und in den jeweiligen Lagerungsbecken durchaus höhere aber auch niedrigere Konzentrationen vorlagen. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei gleichwertigen Betonen in der Praxis eine niedrigere Abtragstiefe bezogen auf die berechneten Werte zu erwarten ist, da eine Gelschicht die Diffusionsgeschwindigkeit der kalklösenden Kohlensäure negativ beeinflusst.

Es ist noch einmal herauszustellen, dass die theoretische Abtragstiefe durch dieses Verfahren berechnet werden kann. Die Abtragstiefe ist nicht die Schädigungstiefe. Das bedeutet, dass das Gefüge und die Porenstruktur auch in größeren Tiefen geschädigt sein können, allerdings noch nicht erkannt wurde, da noch kein Masseabtrag stattgefunden hat.

4.4 Die einseitige ¹H-Kernresonanzspektroskopie

4.4.1 Prinzip der einseitigen ¹H-Kernresonanzspektroskopie – NMR-MOUSE

Die einseitige ¹H-Kernresonanzspektroskopie (¹H-NMR) ist eine Analysetechnik, die besonders nützlich für die Untersuchung von zementgebundenen Baustoffen ist. Diese Methode ermöglicht es, die Wasserverteilung in der Porenstruktur des Zementsteins und Beton in-situ zu analysieren.

Grundsätzlich basiert die magnetische Kernresonanz auf der Tatsache, dass Atomkerne mit einem ungeraden Spin, wie z. B. ¹H, ¹³C und ²⁹Si, sich in einem Magnetfeld ausrichten. Diese Ausrichtung kann durch einen gezielten Radiofrequenzpuls gestört werden. Hier werden die Kernspins durch gezielte Pulsabfolgen gezielt ausgerichtet. Nach den Pulsabfolgen kehren die Kernspins in die ursprüngliche Orientierung zurück, die Kernspins relaxieren.

Grundsätzlich gibt es bei der Kernspinresonanzspektroskopie zwei Relaxationsprozesse, einmal die T1- bzw. Längsrelaxation und zum anderen die T2-bzw. Querrelaxation.

Die T1-Relaxation ist definiert als die Zeit, die die Kernspins benötigen, um in ihre ursprüngliche Ausrichtung im Magnetfeld zurückzukehren. Sie gibt Aufschluss über die Wechselwirkungen der Wasserstoffkerne mit ihrer Umgebung.

Die T2-Relaxation ist die Zeit, die die Kernspins benötigen, um ihre Phasenkohärenz zu verlieren. Sie hängt von den Interaktionen zwischen den Atomkernen ab und ist abhängig von der Porenstruktur und der Mobilität der Moleküle.

In der Baustoffforschung wird die einseitige ¹H-NMR für die Bestimmung der Porengrößenverteilung und der Porengeometrie in zementgebundenen Materialien verwendet. Zudem kann der Fortschritt der Hydratation von zementgebundenen Baustoffen in-situ zerstörungsfrei untersucht werden. Verschiedene Hydratationsprodukte und deren Entwicklung können identifiziert werden.

Auf Baustellen wird die einseitige ¹H-NMR vereinzelt verwendet, um den Wassergehalt des Baustoffs bzw. des Bauteils zu untersuchen. Dies ermöglicht die Bestimmung der Wasserverteilung und der Beweglichkeit des Wassers, was für die Beurteilung der Trocknung und der Wasserdiffusion entscheidend ist.

Zusammenfassend kann mithilfe der einseitigen ¹H-NMR die Mikrostruktur von zementgebundenen Baustoffen untersucht werden. Hier können Poren ab einer Größe von ca. 3 nm bis etwa 50 nm untersucht werden.

4.4.2 Modelle zur Beschreibung der Relaxation von Flüssigkeiten in porösen Medien

In einem NMR-Experiment wird mit jedem Impuls eine Vielzahl von Kernspins angeregt. Spins in einer ähnlichen Umgebung reagieren ähnlich. Wenn in einem Prüfkörper Spinpopulationen mit sehr unterschiedlicher Umgebung vorhanden sind, erhält man unterschiedliche Signale. Das gemessene Signal ist die Summe bzw. Überlagerung aller Signale der angeregten Spins mit zusätzlichem Rauschen. Die Auftrennung des Summensignals in seine ursprünglichen Komponenten ist ein kritischer Punkt bei NMR-Untersuchungen.

Wasser, das sich in den Poren eines Mörtels bzw. eines Betons befindet, steht in starker Wechselwirkung mit der umgebenden Porenstruktur. Das Modell von Brownstein und Tarr [3] des

Relaxationsverhaltens einer eingeschlossenen Flüssigkeit in einer porösen Struktur findet häufig Anwendung. Das Modell basiert auf der Annahme, dass die Relaxation eine gewichtete Kombination der Bulk-Relaxation des Wassers im Zentrum einer Pore und der Oberflächenrelaxation in einer einzelnen Wasserschicht in unmittelbarer Nähe zur Porenwandoberfläche ist. Es werden generell drei Fälle unterschieden:

- Schnelldiffusion-Regime, in dem die Oberflächenrelaxation dominiert,
- das intermediäre Regime, in dem sowohl die Oberflächenrelaxation als auch die Massen- bzw. diffusive Relaxation beide einen deutlichen Einfluss haben
- das Regime der langsamen Diffusion, in dem die Bulk- oder diffusive Relaxation vorherrscht.

In dem Schnelldiffusions-Regime befinden sich die Wassermoleküle in einem schnellen Austausch zwischen Porenmitte und den Oberflächen der Porenwänden im Zeitrahmen eines Impulsexperiments, so dass ein einziges Relaxationssignal empfangen wird. Das Schnelldiffusion-Regime wird meist verwendet, um das komplexe Relaxationsverhalten poröser Systeme zu beschreiben und ist in **Gleichung 1** dargestellt.

$$\frac{1}{T_{1,2}} = \frac{1}{T_{1,2}^{bulk}} + \frac{S}{V} \frac{\varepsilon}{T_{1,2}^{surf}} = \frac{1}{T_{1,2}^{bulk}} + \frac{S}{V} \lambda_{1,2} \quad \text{(Gleichung 1)}$$

wobei $T_{1,2}$ die gemessene T_1 - oder T_2 -Relaxationszeit, $T_{1,2}^{Bulk}$ die Relaxationszeit der Bulkflüssigkeit ist, V das flüssigkeitsgefüllte Porenvolumen, S die Porenoberfläche in Kontakt mit der Flüssigkeit, ε ist die Dicke einer monomolekularen Wasserschicht (0,28 nm), $T_{1,2}^{surf}$ ist die Relaxationszeit der Protonen im direkten Kontakt mit der Oberfläche. Der Quotient aus ε und $T_{1,2}^{surf}$ ist definiert als die Oberflächenrelaxivität $\lambda_{1,2}$ für die Spin-Gitter- (1) oder Spin-Spin- (2) Relaxation in einem porösen Material. Wird der Einfluss der Bulk-Relaxation vernachlässigt, so kann **Gleichung 1** zu **Gleichung 2** umformuliert werden.

$$d_{pore} = kT_{1,2}\lambda_{1,2} \quad \text{(Gleichung 2)}$$

Dabei ist d_{pore} der Durchmesser einer Pore, $T_{1,2}$ ist die gemessene T_1 - oder T_2 -Relaxationszeit, $\lambda_{1,2}$ ist die entsprechende Oberflächenrelaxivität und k ist ein Formfaktor der Porenform. Angesichts der einfachen geometrischen Herleitung ist k gleich 2, 4 oder 6 für eine schlitzförmige, zylindrische oder kugelförmige Porenform [4].

Somit ermöglicht das Brownstein-Tarr-Schnelldiffusionsmodell die einfache Berechnung von Porengrößen auf der Grundlage der Relaxationszeit. Dies wurde in der bestehenden Literatur bereits häufig angewendet und ist zu einem Standardverfahren, z. B. in der geophysikalischen Exploration, geworden.

Die Oberflächenrelaxivität ist ein entscheidender Faktor für die Quantifizierung der Porengröße. Diese kann experimentell bestimmt werden, indem ein poröses Material bis zu dem Punkt getrocknet wird, an dem nur noch eine einzige molekulare Wasserschicht die Porenwand bedeckt und die entsprechende Relaxationszeit bestimmt. Diese Monoschicht aus Wasser soll eine Dicke

von nur 0,28 nm aufweisen, so dass das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen in **Gleichung 1** bekannt ist und die Oberflächenrelaxivität somit direkt berechnet werden kann [5, 6, 7].

4.4.3 Porentausch und zweidimensionale Studien

Die BPP-Theorie [53] besagt, dass Relaxationsphänomene nicht voneinander losgelöst sind. Die T_2 -Relaxation hat mindestens die gleiche bzw. eine höhere Geschwindigkeit als die entsprechende T_1 -Relaxation für viele Anwendungen. Die Messung eines Relaxationsparameters ist oft ausreichend, um die gewünschten Informationen über ein Material zu erhalten. In einigen Fällen können zusätzliche Informationen gewonnen werden, wenn T_1 -, T_2 - oder Diffusionsrelaxation mit so genannten zweidimensionalen Studien kombiniert werden. Bei der ^1H -NMR an porösen Medien handelt es sich meist um T_1 - T_2 [8, 9, 10, 11], T_2 - T_2 [8, 11, 12, 13, 14], oder D- T_2 Messungen [15, 16]. Mit Pulssequenzen und -auswertungen lassen sich Informationen über den Austausch von Wasser zwischen Poren unterschiedlicher Größe [17] oder die Trennung über sonst überlappenden Signalkomponenten gesammelt werden [18].

4.5 Messung der Prüfkörper mit der NMR-MOUSE

4.5.1 Messungen der Prüfkörper

Die runden gesägten Prüfkörper wurden für die Messungen an der NMR-MOUSE vorsichtig aus den Lagerungsbecken herausgeholt und in eine Dose aus Polyethylen mit einer dünnen Wandung mit der zur prüfenden Fläche auf den Boden dieser Messdose gelegt. Damit es keine Artefaktbildung aufgrund von Trocknungsprozessen gibt, wurden die Prüfkörper mit Wasser bedeckt. Damit möglichst bei den verschiedenen Messtagen die gleiche Stelle untersucht wird, wurden Markierungen an der Messdose angebracht. An jedem Prüfkörper war eine Plastikschraube für eine leichtere Entnahme aus den Lagerungsbecken einbetoniert, welche auch hilfreich bei einer eindeutigen Orientierung des Prüfkörpers in der Dose war. Zusätzlich wurde auch Markierungen auf dem Tisch der NMR-MOUSE angebracht. Ein Bild eines wasserbedeckten Prüfkörpers in der Messdose für die Messung an der NMR-MOUSE ist in **Bild 16** dargestellt.



Bild 16: Messdosen mit Prüfkörper

Für die Messungen der NMR-Prüfkörper wurde die PM25 der Firma Magritek GmbH verwendet. Abhängig von dem Setup der Abstandshalter kann diese NMR-MOUSE Messungen bis zu einer Tiefe von 25 mm durchführen. Das **Bild 15** zeigt eine schematische Skizze und ein Foto der NMR-MOUSE.

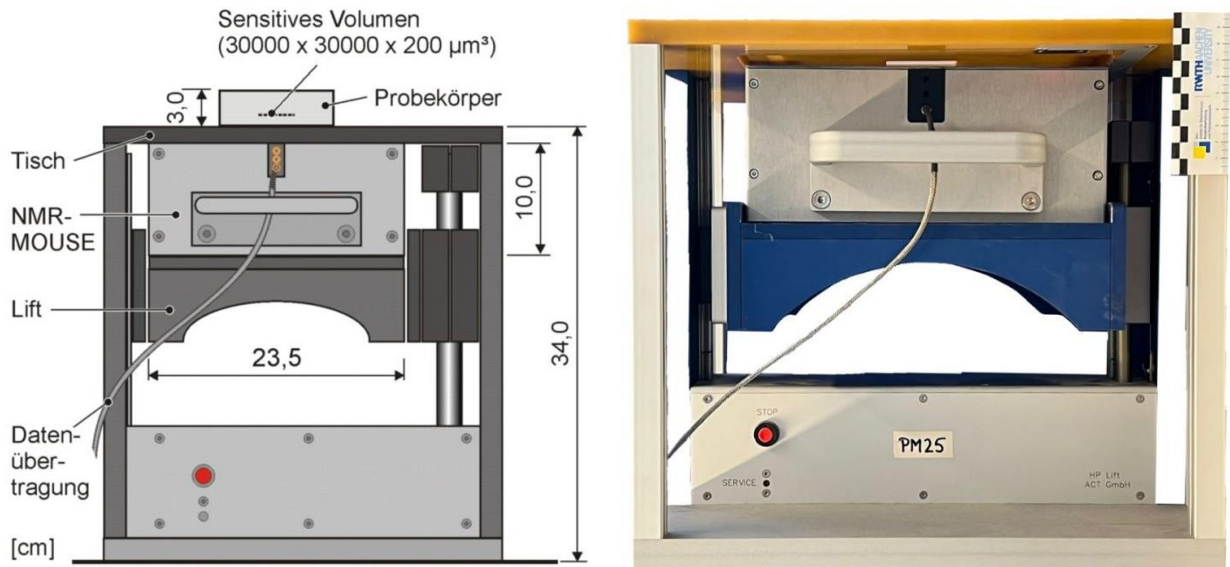


Bild 15: Schematische Skizze [2] (links) und ein Foto der PM25 (rechts)

Der Vorteil der NMR-MOUSE ist die zerstörungsfreie Messmethode, was erlaubt, den gleichen Prüfkörper zu verschiedenen Messzeitpunkten zu untersuchen.

Die besten Messeinstellung wurden in Vorversuchen ermittelt. Diese Messeinstellungen an der NMR-MOUSE sind in **Tabelle 8** zusammengefasst.

Tabelle 8: Messeinstellungen an der PM25

Parameter	Einheit	Wert
Resolution	µm	200
Repetition time	ms	500
Number of scans	-	64
Number of echoes	-	200
ProbeHead	mm	15
Maximal depth	µm	10700
Normalization	-	197
Contrast 1	-	1,3
Contrast 2	-	1,5
Contrast 3	-	5,1
Amplitude initial	-	1,5
Amplitude final	-	5,1
Initial depth	µm	0
Final depth	µm	10700
Step size	µm	200
Number of experiments	-	1
Delay	s	0

Die Prüfkörper für die Bestimmungen der Anteile der Porenarten bestehen aus Betonen mit einer Sieblinie A/B 16. Dies bedeutet, dass bei einem Höhenprofil der Gehalt an Bindemittel bzw. Gesteinskörnung auf einer waagerechten Höhenlinie variiert und somit auch die entsprechenden Anteile der Poren.

4.5.2 NMR-Ergebnisse des CEM I mit $w/z = 0,40$ und quarzitischer Gesteinskörnung

Für die Messung an der NMR-MOUSE wurden immer wieder die gleichen Prüfkörper verwendet, was den Vorteil hat, dass bei guter Orientierung des Prüfkörpers eine ähnliche Stelle des Prüfkörpers vermessen wird. Um die Veränderungen durch den Angriff von kalklösender Kohlensäure identifizieren zu können, wurde die initiale Porenstruktur der wassergesättigten Prüfkörper vor der Einlagerung in kalklösender Kohlensäure bestimmt. Diese Initialmessung des Betons mit CEM I, w/z -Wert = 0,40 und quarzitischer Gesteinskörnung (A/B 16) ist in **Bild 16** dargestellt.

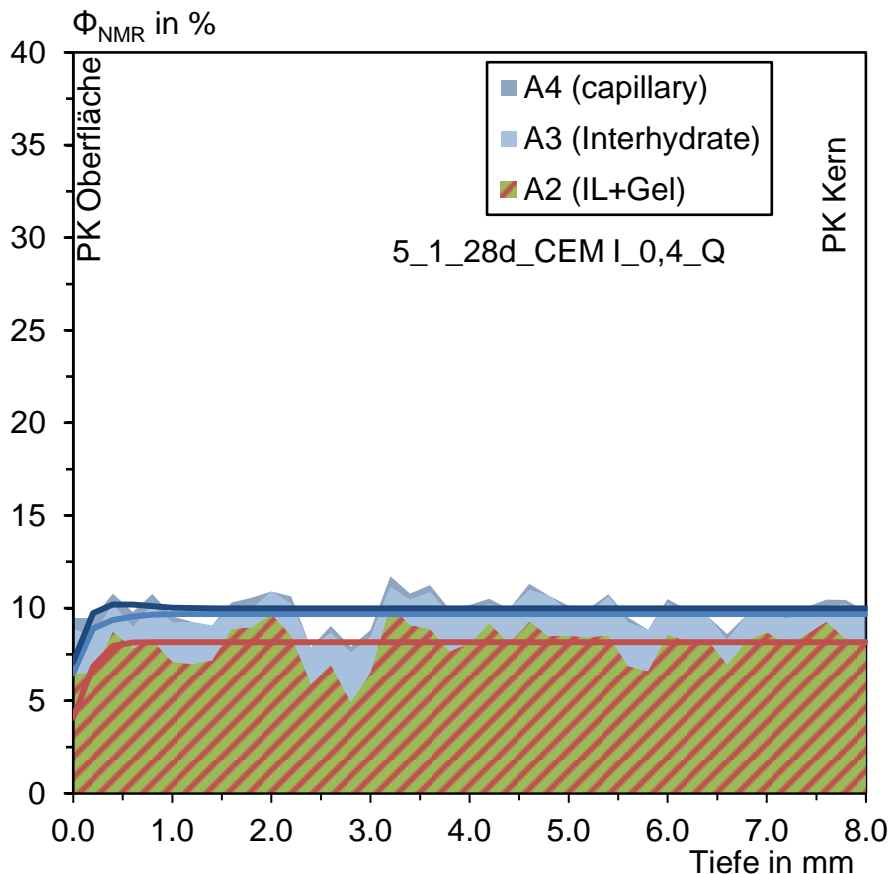


Bild 16: NMR-Spektrum des Betons CEM I 0,40 Q im Alter von 28 Tagen vor der Einlagerung

Der Anteil der verschiedenen Porenarten variiert initial bereits, was jedoch höchstwahrscheinlich stark durch die Gesteinskörnung beeinflusst ist. Es ist jedoch festzuhalten, dass keiner der drei Porenkategorien einen außergewöhnlich hohen bzw. niedrigen Anteil im Vergleich zu anderen Kategorien aufweist.

In **Bild 17** sind die Ergebnisse der NMR-Messungen nach 90-tägiger Lagerungsdauer bei 200 mg CO₂/L in strömenden Becken dargestellt.

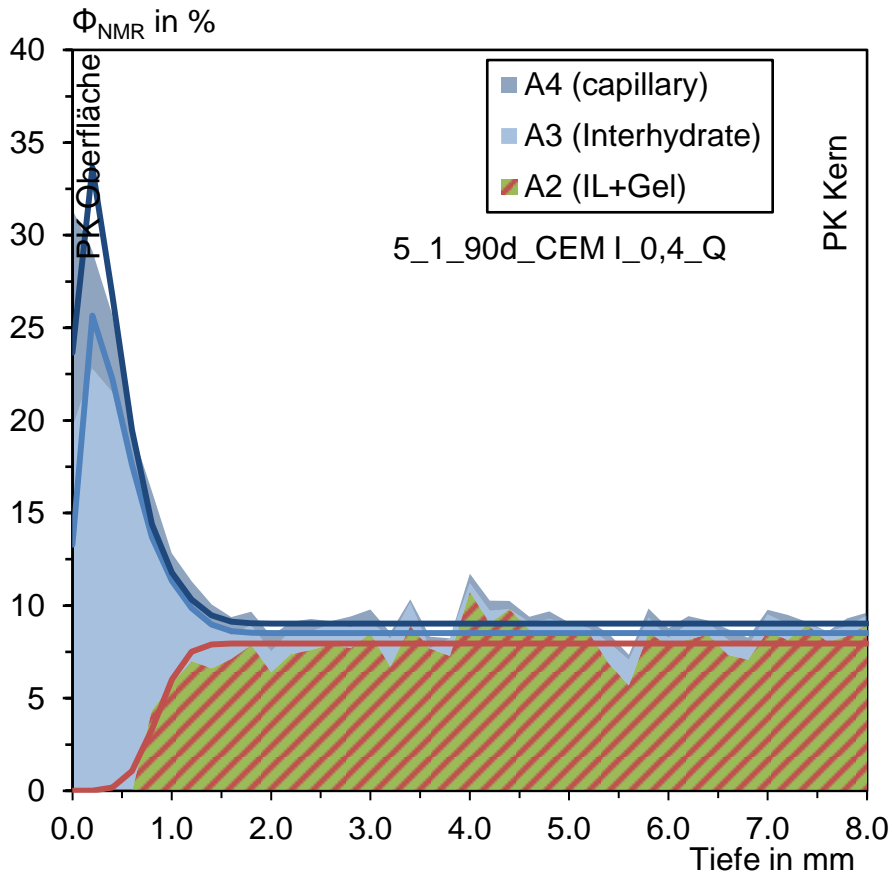


Bild 17: NMR-Spektrum des Betons CEM I 0,4 Q nach 90 Tagen Lagerung bei 200 mg CO₂/L im strömenden Becken

Das NMR-Spektrum zeigt, dass bis zu einer Tiefe von ca. 0,5 mm keine Gel- und Interlayerporen mehr vorhanden sind. Bis zu einer Tiefe von ca. 1 mm steigt der Anteil an Gel- und Interlayerporen stark an und der Anteil an Interhydrat- und Kapillarporen sinkt simultan. Noch gibt es keinen Hinweis auf Materialverlust an der Oberfläche, da noch Poren im Nanometerbereich vorliegen, was ein Hinweis ist, dass noch Bindemittelmatrix vorhanden ist. Das bedeutet, dass es noch keinen signifikanten Materialverlust und somit Abtrag gibt, aber die Porenstruktur gröber wird, was auf eine Schädigung hinweist. Somit kann eine Schädigungstiefe bestimmt werden, welche bei ca. 1 mm liegt.

Die nächste Messung an dem selbem Prüfkörper wurde nach 365-tägiger Lagerungsdauer bei 200 mg CO₂/L im strömenden Becken durchgeführt. Das Spektrum ist in **Bild 18** dargestellt.

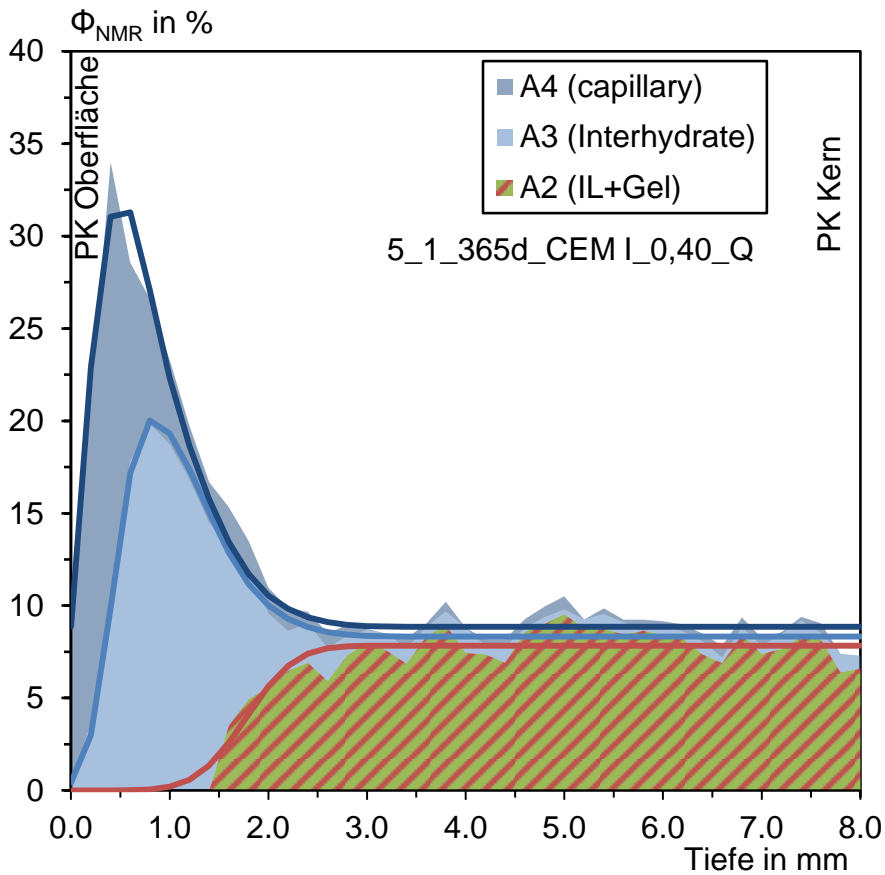


Bild 18: NMR-Spektrum des Betons CEM I 0,40 Q nach 365 Tagen Lagerung bei 200 mg CO₂/L im strömenden Becken

An der Oberfläche des Prüfkörper, Tiefe 0 mm, sind nahezu nur noch Kapillarporen vorhanden. Zudem zeigt sich, dass in dieser Tiefe auch der Anteil an den Kapillarporen abgenommen hat. Dies weist auf einen Massenabtrag bis zu einer Tiefe von etwa 0,2 mm hin. Bis zu einer Tiefe von ca. 1,4 mm sind keine Gel- und Interlayerporen vorhanden. Der Anteil an Gel- und Interlayerporen steigt stark bis zu einer Tiefe von ca. 2,2 mm (Schädigungstiefe).

Eine weitere Messung an dem selbem Prüfkörper wurde nach 545-tägiger Lagerungsdauer bei 200 mg CO₂/L im strömenden Becken durchgeführt. Das Spektrum ist in **Bild 19** dargestellt.

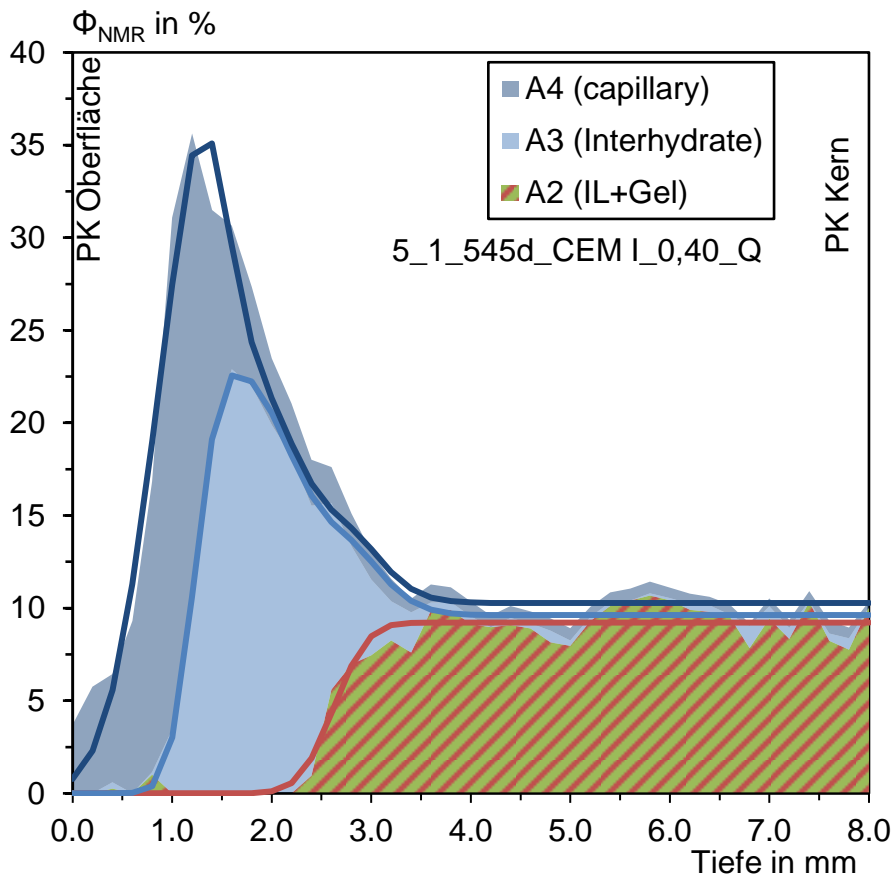


Bild 19: NMR-Spektrum des Betons CEM I 0,40 Q nach 545 Tagen Lagerung bei 200 mg CO₂/L im strömenden Becken

Nach 545 Tagen Lagerung hat der Abtrag und die Schädigung weiter zugenommen. Bis zu einer Tiefe von etwa 0,5 mm ist die maximale Abtragstiefe angewachsen. Bis zu einer Tiefe von ca. 0,6 mm sind lediglich Kapillarporen vorhanden, aber auch dieser Anteil ist stark gesunken. Gel- bzw. Interlayerporen gibt es bis zu einer Tiefe von etwa 2,2 mm nahezu nicht mehr. Der Anteil an diesen beiden Porenarten steigt bis zu einer Tiefe von ca. 2,8 mm an. Damit ist hier die Schädigungstiefe im Vergleich zur Abtragstiefe um etwa den Faktor 7,5 höher.

Die nächste Messung an dem selbem Prüfkörper wurde nach 730-tägiger Lagerungsdauer bei 200 mg CO₂/L im strömenden Becken durchgeführt. Das Spektrum ist in **Bild 20** dargestellt.

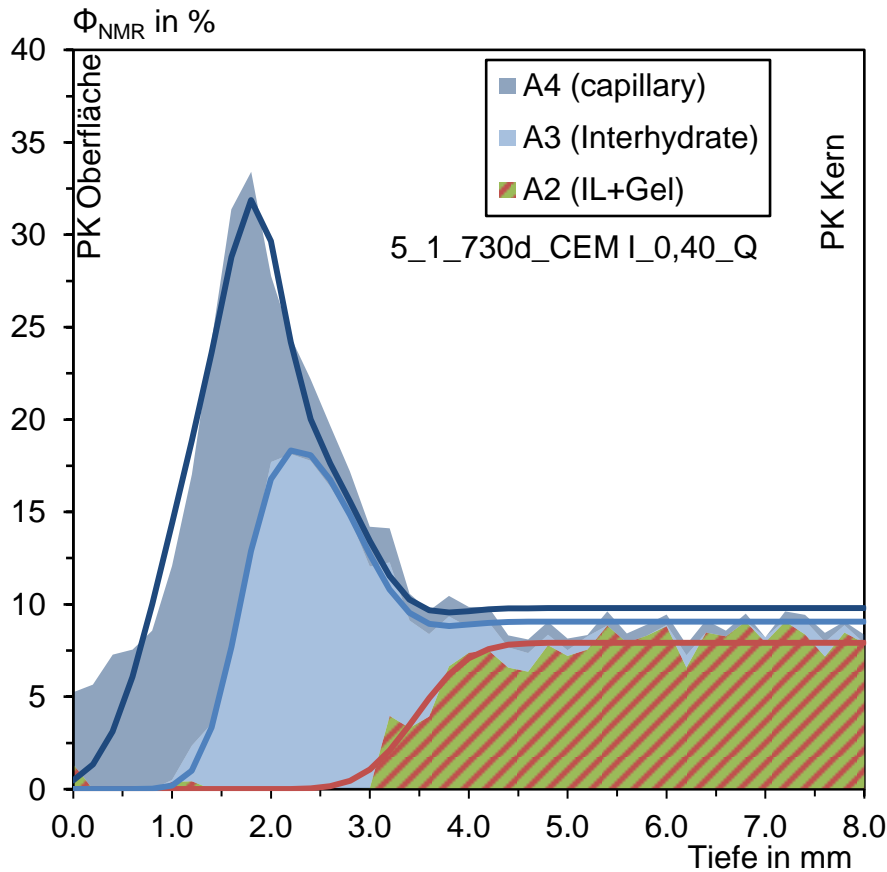


Bild 20: NMR-Spektrum des Betons CEM I 0,40 Q nach 730 Tagen Lagerung bei 200 mg CO₂/L im strömenden Becken

Nach 730 Tagen liegt die Schädigungstiefe bei ca. 3,7 mm. Bis zu einer Tiefe von etwa 3,0 mm sind keine Gel- bzw. Interlayerporen vorhanden. Die Porenradien haben sich vergrößert. Die Interhydratporen treten erst ab einer Tiefe von etwa 1,0 mm auf. Bis zu dieser Tiefe wurde die Bindemittelmatrix teilweise abgetragen, so dass dies die Abtragstiefe ist. In **Tabelle 9** sind die Tiefen noch einmal zusammengefasst. Damit ist nach 730 Tagen Lagerung die Schädigungstiefe im Vergleich zur Abtragstiefe um etwa den Faktor 3,7 höher.

Tabelle 9: Abtrags- und Schädigungstiefen der Mischung CEM I 0,40 Q in Abhängigkeit der Zeit

Lagerungsdauer	Abtragstiefe	Schädigungstiefe
Tag	mm	
0	0	0
90	0	1
365	0,2	2,2
545	0,5	2,8
730	1,0	3,7

In **Bild 21** ist der Beginn der Zementsteinauflösung, also die Vergrößerung der Porenstruktur, bei den verschiedenen Prüfkörpern der Mischung CEM I 0,40 Q bei den verschiedenen Lagerungsbedingungen in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Hier zeigt sich, dass die Variation der Lagerungsbedingungen keinen eindeutigen Trend wiedergeben.

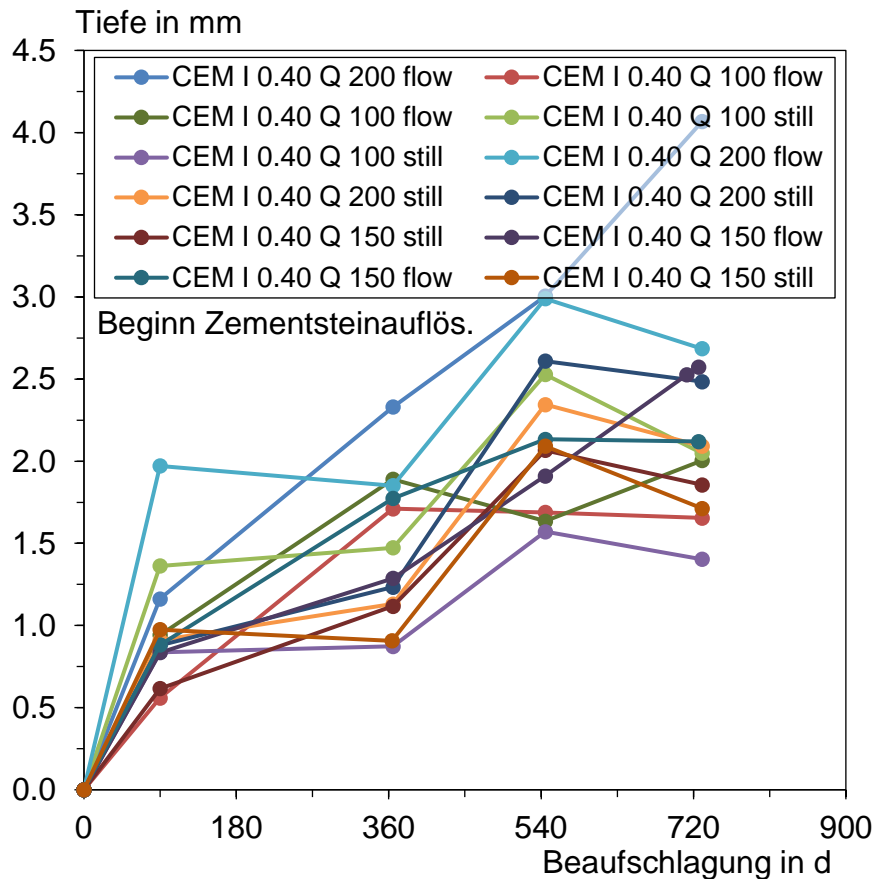


Bild 21: Vergleich der Zementsteinauflösung in Abhängigkeit der Zeit beim Beton CEM I 0,4 Q bei den verschiedenen Lagerungsarten

Gemäß Theorie sollte bei Vorhandensein einer Gelschicht der Verlauf der Abtragstiefen einer Wurzel-t-Funktion folgen. Es ist jedoch zu erwarten, dass bei idealen Prüfkörpern die Auflösung der Zementsteinmatrix auch durch die Gelschicht beeinflusst wird, da die Diffusionsgeschwindigkeit den Transport von Edukten und Produkten beeinflusst.

Die Auflösung des Zementsteins findet in größeren Tiefen als der Abtrag statt, was u. a. durch verschiedene Parameter beeinflusst werden kann. Die Faktoren sind:

- Verteilung der inerten Gesteinskörnung
- Porosität des Gefüges
- Schalung

Quarzitische Gesteinskörnung ist inert gegen den Angriff von kalklösender Kohlensäure. Die größeren Fraktionen der inerten quarzitären Gesteinskörnung können die darunterliegende Bindemittelmatrix schützen. Bei unterschiedlichen Anteilen dieser Fraktionen der Sieblinie an

der Oberfläche der gesägten Prüfkörper kann somit auch der Anteil an löslicher Bindemittelmatrix variieren.

Die Porosität des Betons wird u. a. auch von der Verdichtungsenergie nach dem Befüllen der Kunststoffschalung beeinflusst. Die Schalung war ein Kunststoffrohr mit nachträglich eingesetzten Schrauben, welche in dem Beton einbetoniert waren.

Die Kunststoffschalung war relativ groß, was den Verdichtungsprozess erschwert hat. Teilweise waren an den gesägten Oberflächen der Prüfkörper deutlich Verdichtungsporen zu erkennen. So wurde bei der Auswahl der Prüfkörper darauf geachtet, dass die Prüfkörper mit den wenigstens Poren an der Oberfläche ausgewählt wurden.

4.5.3 NMR-Ergebnisse des CEM III/B mit $w/z = 0,40$ und quarzitischer Gesteinskörnung

Das **Bild 22** zeigt das NMR-Spektrum der wassergesättigten Prüfkörper des CEM III 0,40 Q im Alter von 28 Tagen vor Einlagerung in die Becken mit kalklösender Kohlensäure

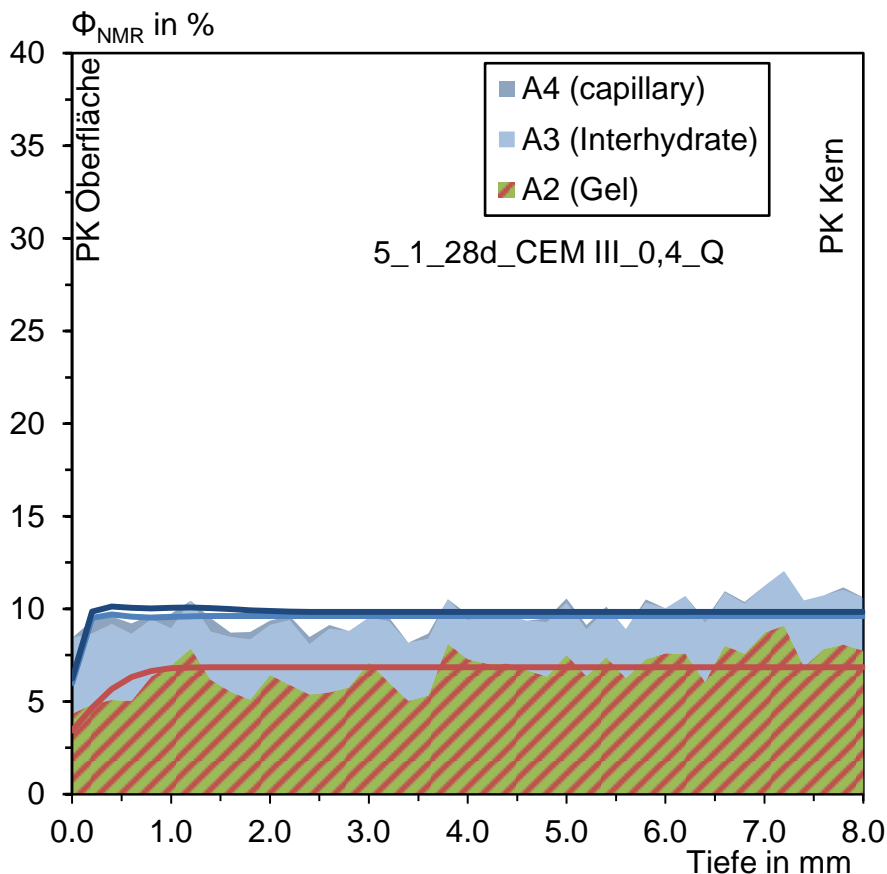


Bild 22: NMR-Spektrum des Betons CEM III 0,40 Q im Alter von 28 Tagen vor der Einlagerung

Analog zum CEM I variiert initial der Anteil der verschiedenen Porenarten, was ebenfalls höchstwahrscheinlich stark durch die Gesteinskörnung beeinflusst ist. Es ist auch hier festzuhalten,

dass keiner der drei Porenkategorien einen außergewöhnlich hohen bzw. niedrigen Anteil im Vergleich zu anderen Kategorien aufweist.

In **Bild 23** sind die Ergebnisse der NMR-Messungen nach 182-tägiger Lagerungsdauer bei 200 mg CO₂/L in strömenden Becken dargestellt.

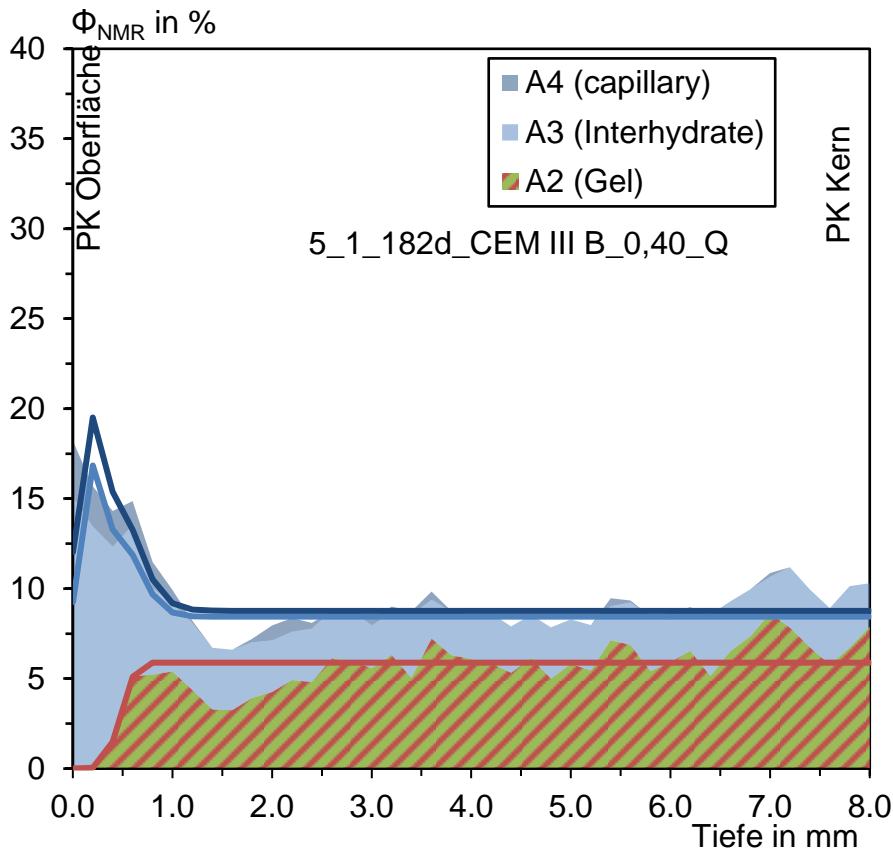


Bild 23: NMR-Spektrum des Beton sCEM III 0,40 Q nach 182 Tagen Lagerung bei 200 mg CO₂/L im strömenden Becken

Das NMR-Spektrum zeigt, dass bis zu einer Tiefe von ca. 0,25 mm keine Gel- und Interlayerporen mehr vorhanden sind. Der Anteil an Interhydrat- und Kapillarporen ist jedoch stark angestiegen. Bis zu einer Tiefe von ca. 0,4 mm steigt der Anteil an Gel- und Interlayerporen stark an und der Anteil an Interhydrat- und Kapillarporen sinkt simultan. Es ist noch kein Materialverlust an der Oberfläche zu erkennen, da noch Poren im Nanometerbereich vorliegen, was ein Hinweis ist, dass noch Bindemittelmatrix vorhanden ist. Das bedeutet, es gibt noch keinen signifikanten Materialverlust und somit Abtrag, aber die Porenstruktur wird gröber, was auf eine Schädigung hinweist. Somit kann eine Schädigungstiefe bestimmt werden, welche bei ca. 0,4 mm liegt.

Die nächste Messung an dem selbem Prüfkörper wurde nach 364-tägiger Lagerungsdauer bei 200 mg CO₂/L im strömenden Becken durchgeführt. Das Spektrum ist in **Bild 24** dargestellt.

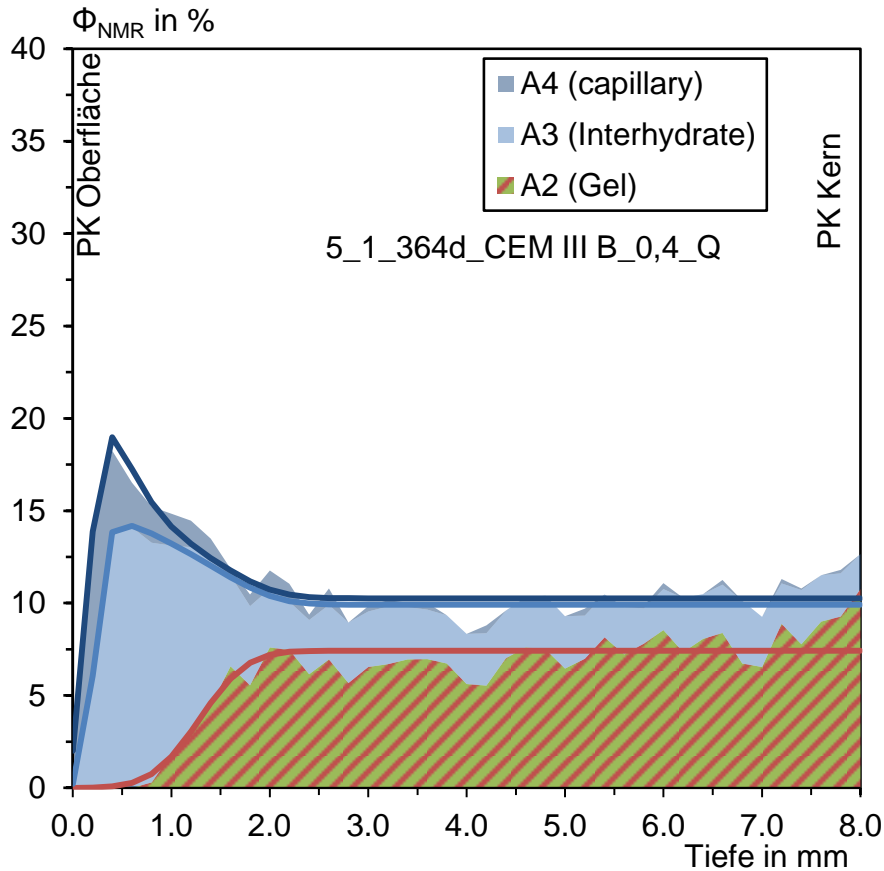


Bild 24: NMR-Spektrum des Betons CEM III 0,40 Q nach 364 Tagen Lagerung bei 200 mg CO₂/L im strömenden Becken

An der Oberfläche des Prüfkörper sind nahezu nur noch Kapillarporen vorhanden. Es zeigt sich jedoch, dass in dieser Tiefe auch der Anteil an den Kapillarporen auch abgenommen hat. Dies weist auf einen Massenabtrag bis zu einer Tiefe von etwa 0,2 mm hin. Bis zu einer Tiefe von ca. 0,8 mm sind keine Gel- und Interlayerporen vorhanden. Der Anteil an Gel- und Interlayerporen steigt stark bis zu einer Tiefe von ca. 0,7 mm an, was somit die Schädigungstiefe ist. Somit ist die Schädigungstiefe in etwa um den Faktor 3,5 höher.

Eine weitere Messung an dem selbem Prüfkörper wurde nach 545-tägiger Lagerungsdauer bei 200 mg CO₂/L im strömenden Becken durchgeführt. Das Spektrum ist in **Bild 25** dargestellt.

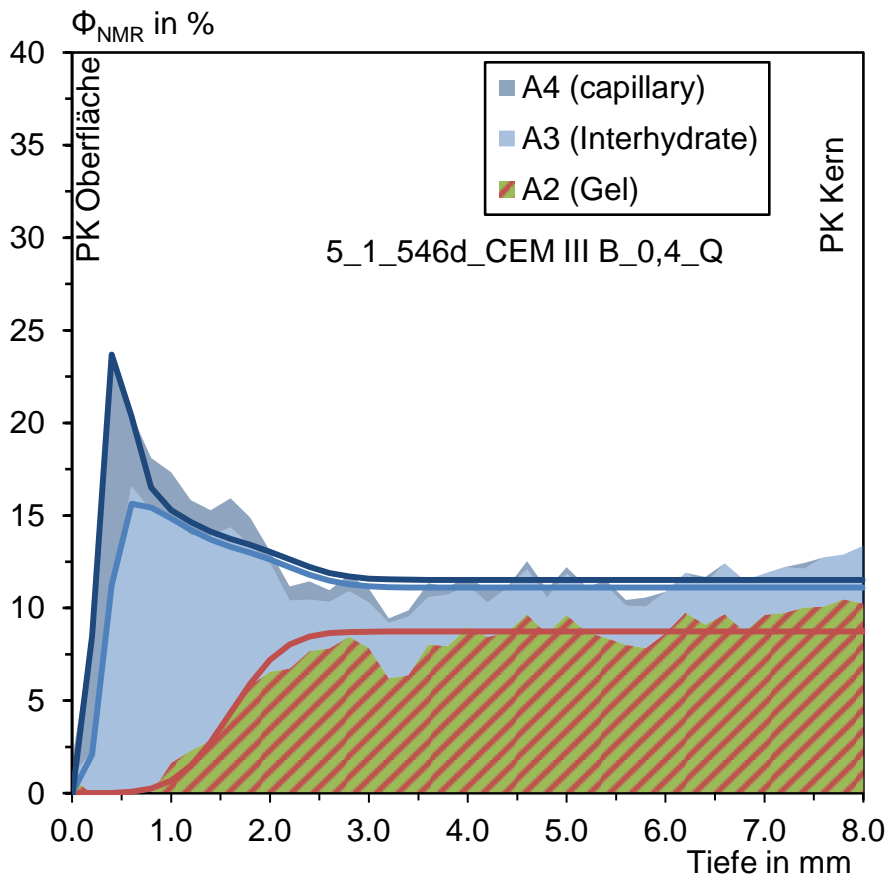


Bild 25: NMR-Spektrum des Betons CEM III 0,40 Q nach 546 Tagen Lagerung bei 200 mg CO₂/L im strömenden Becken

Nach 546 Tagen Lagerung hat die Abtrags- und die Schädigungstiefe weiter zugenommen. Bis zu einer Tiefe von etwa 0,3 mm ist die maximale Abtragtiefe angewachsen. Im Gegensatz zu dem CEM I sind liegen Interlayer -und Kapillarporen weitgehend zusammen vor. Der Lösungsprozess der kalklösenden Kohlensäure scheint keine so starke Vergrößerung der Porenradien verursachen. Gel- bzw. Interlayerporen gibt es nahezu nicht bis zu einer Tiefe von etwa 0,8 mm. Der Anteil an diesen beiden Porenarten steigt bis zu einer Tiefe von ca. 1,7 mm an. Damit ist hier die Schädigungstiefe im Vergleich zur Abtragtiefe um etwa den Faktor 6 höher.

Die nächste Messung an dem selbem Prüfkörper wurde nach 730-tägiger Lagerungsdauer bei 200 mg CO₂/L im strömenden Becken durchgeführt. Das Spektrum ist in **Bild 26** dargestellt.

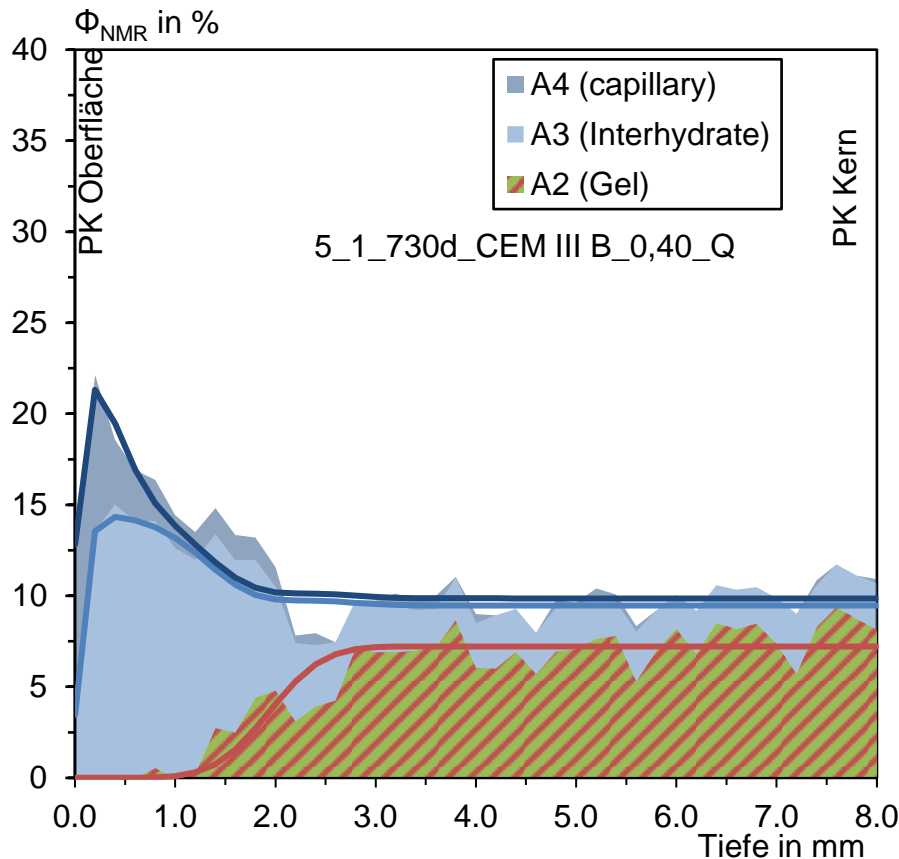


Bild 26: NMR-Spektrum des Betons CEM III 0,40 Q nach 730 Tagen Lagerung bei 200 mg CO₂/L im strömenden Becken

Nach 730 Tagen liegt die Schädigungstiefe bei ca. 2,6 mm. Bis zu einer Tiefe von etwa 1,1 mm sind keine Gel- bzw. Interlayerporen vorhanden. Die Porenradien haben sich vergrößert. Die Interhydratporen sind immer noch nah an der Oberfläche zu finden. Die Anzahl an Kapillarporen ist im Vergleich zur 546-tägigen Lagerung geringer geworden, was auf einen Abtrag hinweist. Somit liegt die Abtragstiefe bei ca. 0,4 mm. Damit ist nach 730 Tagen Lagerung die Schädigungstiefe im Vergleich zur Abtragstiefe um etwa den Faktor 6,5 höher.

In **Tabelle 10** sind die Tiefen noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 10: Abtrags- und Schädigungstiefen der Mischung CEM III 0,40 Q in Abhängigkeit der Zeit

Lagerungsdauer	Abtragstiefe	Schädigungstiefe
Tag	mm	mm
0	0	0
182	0	0,4
365	0,2	0,7
545	0,3	1,7
730	0,4	2,6

In **Bild 27** sind die Ergebnisse der Zementsteinauslösung in Abhängigkeit der Zeit bei der Mischung CEM III/B mit w/z-Wert = 0,40 und quarzitischer Gesteinskörnung bei den verschiedenen Lagerungsbedingungen gegenübergestellt.

Auch bei dem CEM III/B ist schwierig einen Trend zu erkennen und zeigen zudem auch die Variation bei den Prüfkörpern der gleichen Lagerungsart. Auch hier zeigt sich, dass die Positionierung der Prüfkörper nicht optimal war, da bei den Messungen bei ca. 730 Tagen die Tiefe der Lösung der Zementsteinphasen sinkt. Grundsätzlich gelten für die Prüfkörper des CEM III/B alle Faktoren, welche auch die Ergebnisse der NMR-Spektren beim CEM I beeinflussen.

Die Auswertung weiterer Betone folgt im Kapitel 5 sowie in weiteren Veröffentlichungen.

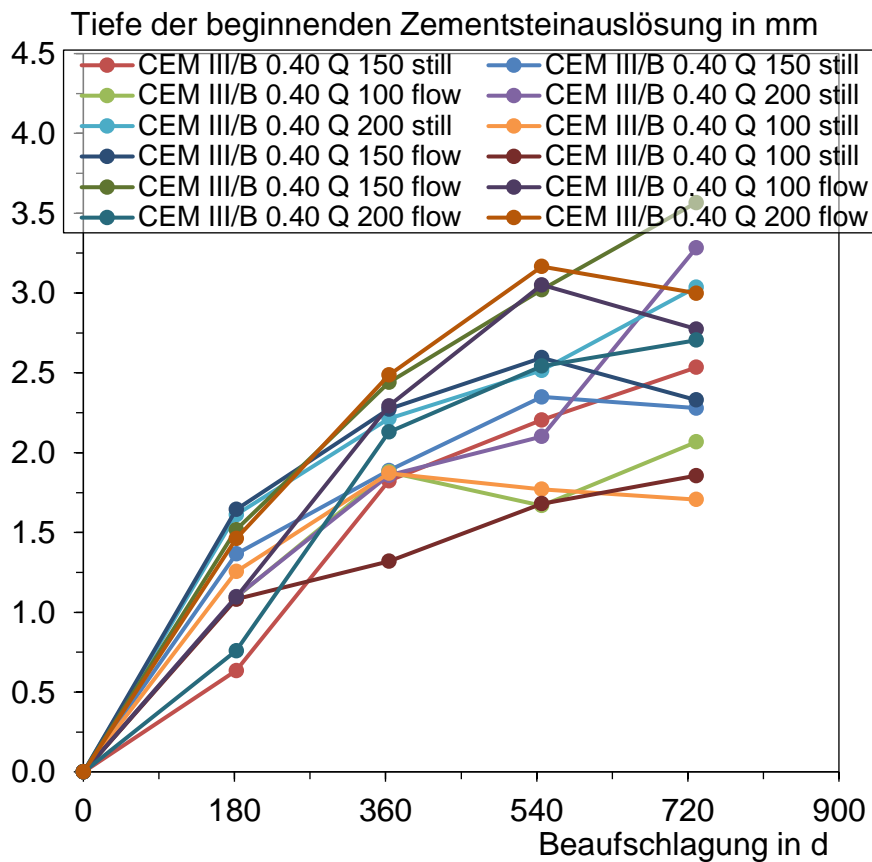


Bild 27: Vergleich der Zementsteinauflösung in Abhängigkeit der Zeit beim Beton CEM III/B 0,40 Q bei den verschiedenen Lagerungsarten

5 Validierungsuntersuchungen der NMR-MOUSE (VDZ)

Da die Technik der einseitigen ^1H -Kernresonanzspektroskopie relativ neu im Bereich Baustoffe eingesetzt wird, gibt es wenig Erfahrung in Hinsicht auf die Genauigkeit der Ergebnisse. Zudem ist die Auswertung der Relaxationszeiten nicht trivial und muss für verschiedene Anwendungen optimiert werden. Zur Validierung der NMR-Ergebnisse wurden zusätzlich Prüfkörper am ibac für 365 Tage bei 200 mg CO_2/L im strömenden Becken. Dann wurden die Prüfkörper mit der NMR-MOUSE gemessen und schließlich dem VDZ übergeben. Da es bei den NMR-Untersuchungen um ein zerstörungsfreies Verfahren handelt, können ohne Probleme die Prüfkörper nachträglich präpariert und analysiert werden. Von demselben Prüfkörper wurden Dünnschliffe angefertigt, welche mithilfe des Licht- und Rasterelektronenmikroskops untersucht worden sind. Im Folgenden sind die Ergebnisse dargestellt.

5.1 Methoden

5.1.1 Dünnschliffpräparation

Zur licht- und rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung der Betone wurden Dünnschliffe folgender Proben hergestellt:

- CEM II/A-LL, Q, w/z=0,50, 200 mg/l CO_2 strömend
- CEM I, Q, w/z=0,50, 100 mg/l CO_2 ruhend
- CEM I, Q, w/z=0,50, 200 mg/l CO_2 strömend
- CEM I + FA, Q, w/z=0,50, 100 mg/l CO_2 ruhend
- CEM III/B, Q, w/z=0,50, 200 mg/l CO_2 strömend

Zunächst wurden Scheiben aus den Probekörpern gesägt. Die Proben wurden im Vakuum mit einem unter UV-Licht fluoreszierenden Gießharz getränkt, auf eine Schichtdicke von 30 μm geschliffen und poliert. Die Schliffe wurden so aus den Probekörpern präpariert, dass die abgedeckte Fläche (ca. 40 x 40 mm^2) senkrecht zu der Oberfläche des Betons lag, die dem kohlen-sauren Angriff ausgesetzt war. Das umhüllende Kunststoffrohr wurde mitpräpariert. Die Sägefläche des Kunststoffrohrs sollte als Referenzhöhe dienen, um zu bestimmen, bis in welche Tiefe der Zementstein durch den kohlen-sauren Angriff abgetragen war oder in welcher Tiefe Reaktionsfronten verliefen. Bei der Präparation löste sich der Kunststoff jedoch teilweise vom Beton und die Verwendung als Bezugspunkt war nicht möglich. Die Bezugsfläche im Beton ließ sich jedoch leicht an der gesägten Oberfläche größerer Gesteinskörner erkennen.

5.1.2 Lichtmikroskopie

Die Dünnschliffe wurden an einem Lichtmikroskop (LM, Zeiss Axio Imager KMAT mit motorisiertem Tisch) mit linear polarisiertem Licht, bei gekreuzten Polarisatoren und unter UV-Auflicht untersucht. Die untersuchten Bereiche wurden in den verschiedenen Modi bei hoher Vergrößerung vollständig abfotografiert. Die Einzelbilder wurden durch die Mikroskopiesoftware automatisch zusammengesetzt.

An den untersuchten Betonoberflächen konnten der Abtrag durch den kohlen-sauren Angriff sowie verschiedene Reaktionsfronten beobachtet werden. Die Tiefe der Reaktionsfronten unter der Bezugsfläche (Oberfläche des Betons vor dem kohlen-sauren Angriff) wurden durch Serien von

Einzelmessungen entlang der vom Dünnschliff abgedeckten Oberfläche bestimmt. Die Messungen wurden nur dort durchgeführt, wo die Grenze zwischen zwei Schichten im Zementstein erkennbar war. Wenn zwei oder mehr Schichten durch Gesteinskörner getrennt wurden, wurde hier keine Messung durchgeführt.

5.1.3 Rasterelektronenmikroskopie

Die Dünnschliffe wurden in einem Rasterelektronenmikroskop (REM, Zeiss GeminiSEM 300) mit Detektoren für Sekundärelektronen und Rückstreuielektronen sowie einem Detektor für energie-dispersive Röntgenspektroskopie (EDX, EDAX Octane Elite SDD) untersucht. Die Proben wurden vor der Untersuchung mit Kohlenstoff besputtert. Die Untersuchung der Präparate erfolgte im Hochvakuum.

An den durch kohlen-sauren Angriff veränderten Betonoberflächen wurden in repräsentativen Bereichen mittels EDX Elementverteilungsbilder des Zementsteins so aufgenommen, dass die verschiedenen Reaktionsfronten abgedeckt wurden. Im folgenden Abschnitt wird nur auf die Ergebnisse der Verteilung von Ca und Si eingegangen.

5.2 Ergebnisse und Interpretation

Die bei den licht- und rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen beobachteten Gefügeveränderungen durch den kohlen-sauren Angriff stimmten in den verschiedenen Proben im Wesentlichen überein. Die jeweiligen licht- und elektronenmikroskopischen Beobachtungen sind, zusammen mit der jeweiligen Interpretation, in **Tabelle 10** zusammengefasst.

Tabelle 10 Nummerierung der Schichten, der mikroskopischen Beobachtungen und ihrer Interpretation; Schicht 2 fehlt bei Probe „CEM II/A-LL, Q, w/z=0,50, 200 mg/l CO₂ strömend“ vollständig und bei Probe „CEM I, Q, w/z=0,50, 100 mg/l CO₂ ruhend“ teilweise

Schicht	mikroskopische Beobachtungen	Interpretation
1	-	Abtrag; Zementstein vollständig entfestigt und abgelöst
2	LM: Schicht enthält kaum Calcit, sondern v.a. amorphes Material; bei CEM III: Schicht enthält unhydratisierte Hüttensandkörner REM/EDX: Schicht enthält Si, aber kaum Ca	Calcium in dieser Schicht praktisch vollständig aufgelöst, SiO ₂ aus ehemaligen CSH-Phasen liegt in amorpher Form vor; bei CEM III: unhydratisierte Hüttensandkörner sind erhalten
3	LM: Schicht enthält hohen Anteil an feinen Calcitkristallen, Porosität hoch REM/EDX: hoher Ca-Gehalt, körnig verteilt; bei Probe „CEM II/A-LL, Q, w/z=0,50, 200 mg/l CO ₂ strömend“: Schicht unterteilt, oberer Teil frei von Si	CSH-Phasen sind in Calcit und vermutlich amorphes SiO ₂ umgewandelt, Calcit vermutlich teilweise schon wieder aufgelöst, dadurch erhöhte Porosität; Ursache für fehlendes Si im oberen Teil bei Probe „CEM II/A-LL, Q, w/z=0,50, 200 mg/l CO ₂ strömend“ unklar
4	LM: viel Calcit, sehr geringe Porosität REM/EDX: sehr hoher Ca-Gehalt, geringer Si-Gehalt	Carbonatisierungsfront, CSH-Phasen sind in Calcit und vermutlich amorphes SiO ₂ umgewandelt; Calcium aus Schicht 5 eingewandert und als Calcit auskristallisiert; SiO ₂ vermutlich durch Calcitkristallisation in angrenzende Schichten verdrängt
5	LM: kein oder verringerter Gehalt an Portlandit REM/EDX: im Vergleich zu Schicht 6 verringerter Gehalt an Ca	beginnende Lösung von Portlandit durch verringerten pH-Wert, Diffusion von gelöstem Ca in Richtung Carbonatisierungsfront
6	LM und REM/EDX: keine Auffälligkeiten	unveränderter Zementstein

Die gemessenen Tiefen des Abtrags an der Oberfläche bzw. der Lage der Grenzflächen zwischen benachbarten Schichten sind im Anhang in Tabelle 28a bis 28e zusammengestellt. Als Ergebnisse werden jeweils Minimal- und Maximalwerte sowie Median, Mittelwert, Standardabweichung und Anzahl der Einzelmessungen angegeben. Die Grenzflächen zwischen den Schichten verliefen meist nicht horizontal. Häufig ist dies auf die Lage von Gesteinskörnern zurückzuführen. Der unregelmäßige Verlauf der Grenzflächen führt zu sehr großen Standardabweichungen.

Bild 17 stellt die jeweiligen Medianwerte der Messungen bei den verschiedenen Proben graphisch dar.

Typische Bereiche aller untersuchten Proben sind in Bildern aus den mikroskopischen Untersuchungen im Anhang dargestellt. Je Probe wurden 6 Bilder in zwei Abbildungen zusammengestellt. In der jeweils ersten Abbildung sind ein Bild bei gekreuzten Polarisatoren und dasselbe Bild teilweise überlagert mit Elementverteilungsbildern von Ca und Si zusammengestellt (**Bild 18, Bild 20, Bild 22, Bild 24, Bild 26**). In der jeweils zweiten Abbildung ist noch einmal das Bild bei gekreuzten Polarisatoren sowie die entsprechenden Bilder bei polarisiertem Licht und unter UV-Licht zusammengestellt (**Bild 19, Bild 21, Bild 23, Bild 25, Bild 27**).

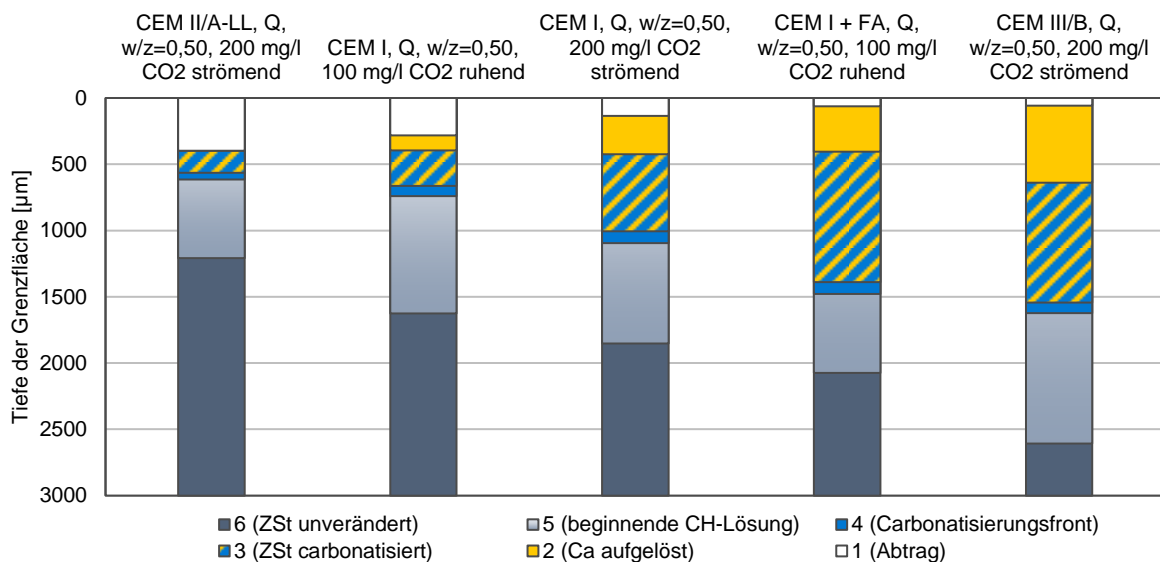


Bild 17 Mediane der Tiefen der Grenzflächen zwischen den verschiedenen Schichten in den untersuchten Proben

Die Ergebnisse weisen auf den folgenden Reaktionsablauf beim kohlen-sauren Angriff hin:

- beginnende Auflösung von Portlandit (CH) durch die mit Kohlensäure angereicherte Lösung, Transport von Ca in Richtung der angegriffenen Oberfläche
- Carbonatisierung der CSH-Phasen, Ausfällung von Ca aus tiefer liegendem Zementstein als Calcit, Ausbildung einer dichten Carbonatisierungsfront, Verdrängung von Si
- beginnende Auflösung von Calcit bei niedrigen pH-Werten, Ausbildung einer hohen Porosität
- vollständige Auflösung von Calcit, Entfestigung des Zementsteingefüges
- Abtrag

Bei der Probe mit CEM II/A-LL wurde Schicht 2 (vollständige Auflösung von Calcit) nicht beobachtet. Dies geht vermutlich auf den aus dem Zement stammenden hohen Anteil an Calcit im Zementstein zurück, der den Angriff der kohlen-sauren Lösung stärker abpufferte als die Zementsteine anderer Proben. Entsprechend lagen die Grenzflächen zwischen den unteren Schichten, einschließlich der Carbonatisierungsfront, flacher als in den anderen Proben. Die Probe zeigte jedoch den stärksten Abtrag. Dies steht möglicherweise mit einer anderen Beobachtung Schicht 3 in Zusammenhang. Im Elementverteilungsbild von Si zeigte sich, dass die Schicht im oberen Drittel kein Si aufwies (**Bild 18**). Lichtmikroskopisch war dies jedoch oft nicht eindeutig erkennbar und wurde daher nicht vermessen. Der Verlust von Si könnte mit dem geringeren Anteil an CSH-Phasen im Zementstein und der geringeren Verknüpfung des bei der Carbonatisierung freigesetzten SiO_2 in Zusammenhang stehen.

Bei der Probe mit CEM III/B lagen alle beobachteten Grenzflächen tiefer als bei den anderen Proben. Dies geht vermutlich auf den hier besonders geringen Gehalt an Portlandit und damit auf das besonders schwach ausgeprägte Puffersystem gegen eine Carbonatisierung zurück. Der Abtrag war hier dagegen am geringsten. Dies ist möglicherweise mit einem höheren Gehalt an CSH-Phasen im Zementstein und einer stärkeren Verknüpfung des bei der Carbonatisierung freigesetzten SiO_2 in Zusammenhang stehen. Auch unhydratisierte Hüttensandkörner sind in der entsprechenden Schicht 2 erhalten. Ähnliches könnte für die Probe mit CEM I + FA gelten.

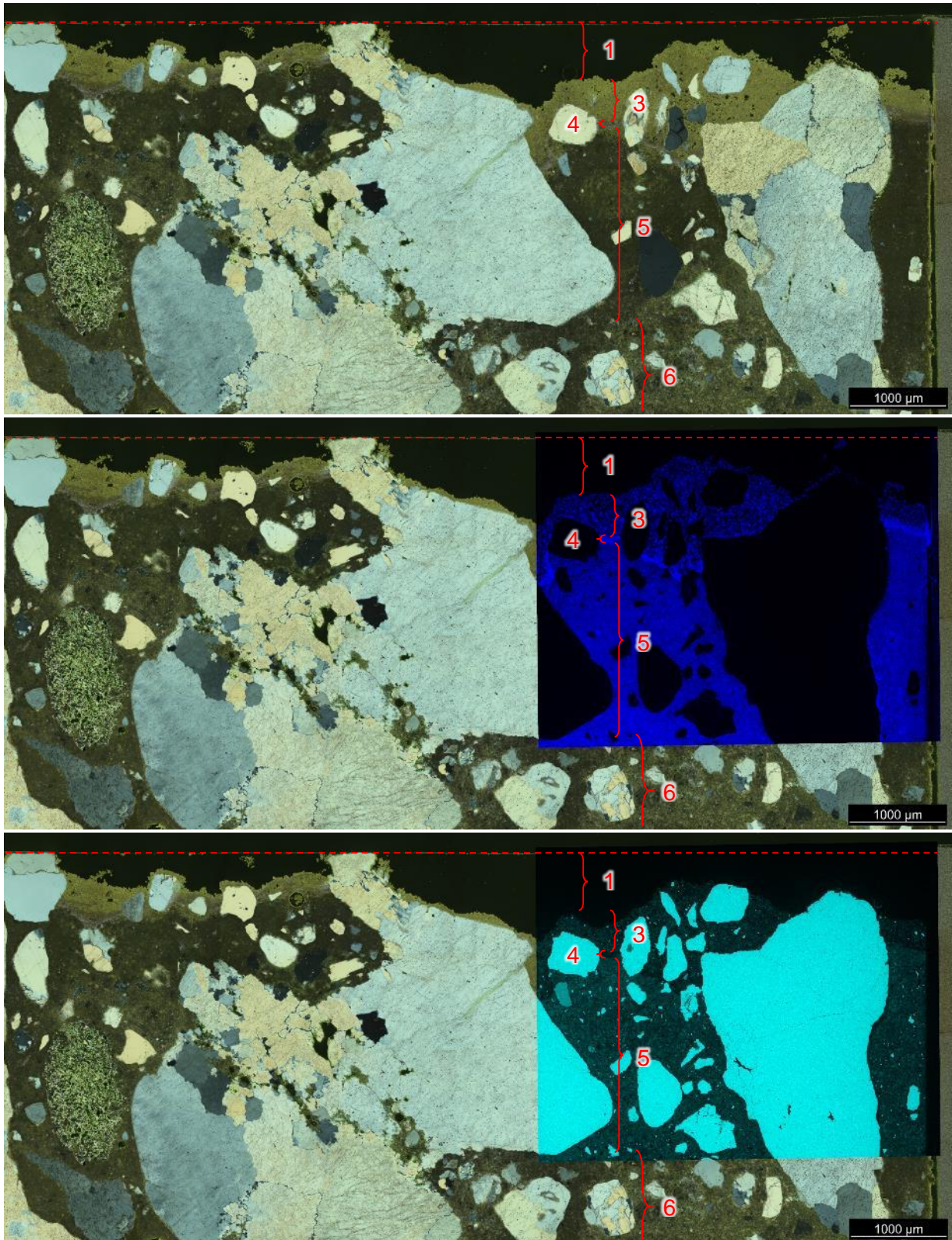


Bild 18 CEM II/A-LL, Q, w/z=0,50, 200 mg/l CO₂ strömend; oben: Aufnahme bei gekreuzten Polarisatoren (zirkulare Polarisation); Mitte: gleiches Bild überlagert mit Elementverteilungskarte Ca; unten: gleiches Bild überlagert mit Elementverteilungskarte Si; Referenzhöhe (gestrichelte Linie) und Schichtaufbau eingezeichnet; Schicht 2 fehlt in der Probe; Schicht 3 im oberen Teil ohne Si; Kunststoffrohr rechts mit angeschnitten

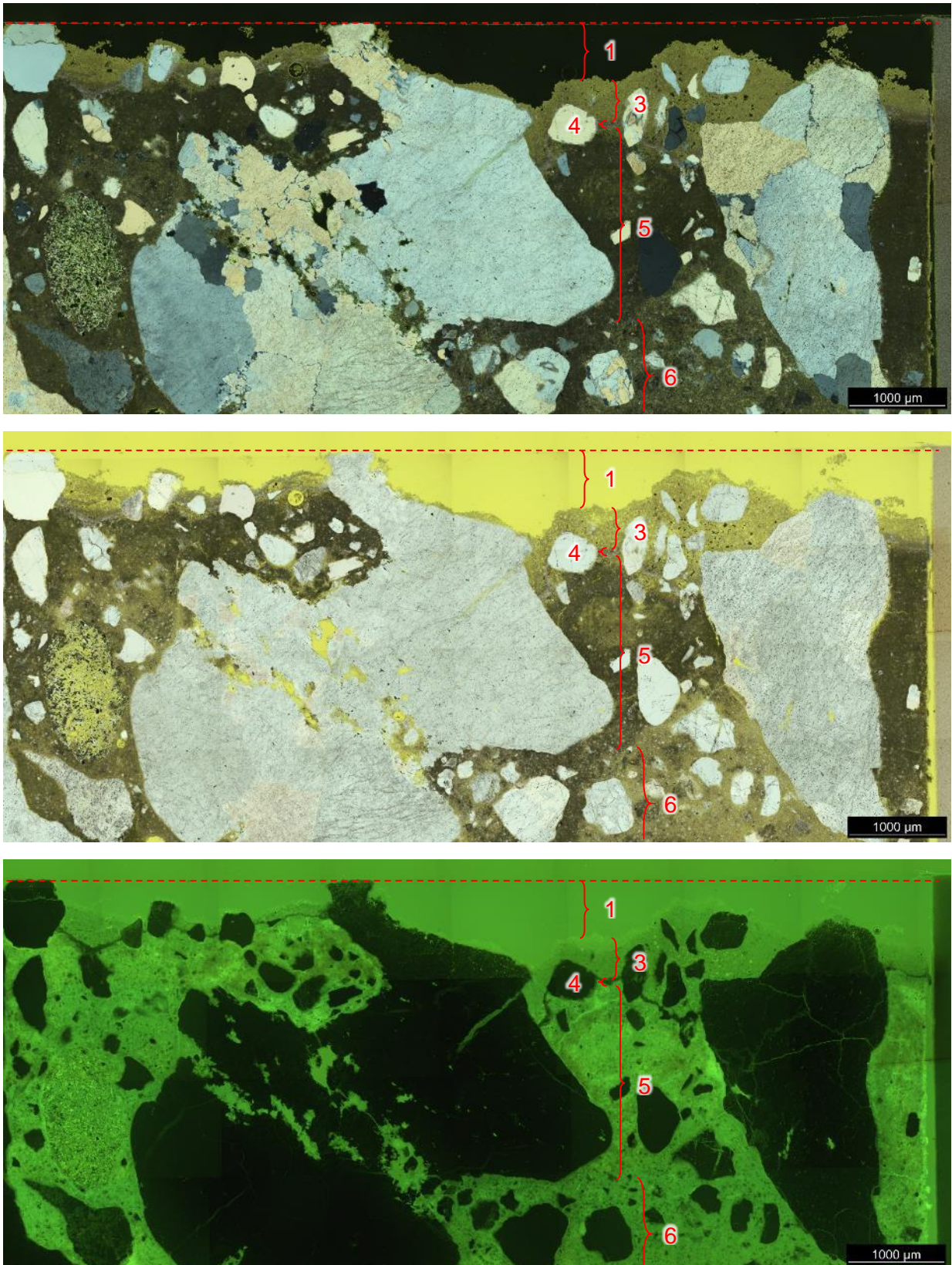


Bild 19 CEM II/A-LL, Q, w/z=0,50, 200 mg/l CO₂ strömend; oben: Aufnahme bei gekreuzten Polarisatoren (zirkulare Polarisation); Mitte: gleicher Ausschnitt bei polarisiertem Licht; unten: gleicher Ausschnitt unter UV-Licht; Referenzhöhe (gestrichelte Linie) und Schichtaufbau eingezeichnet; Schicht 2 fehlt in der Probe; Schicht 3 im oberen Teil ohne Si; Kunststoffrohr rechts mit angeschnitten

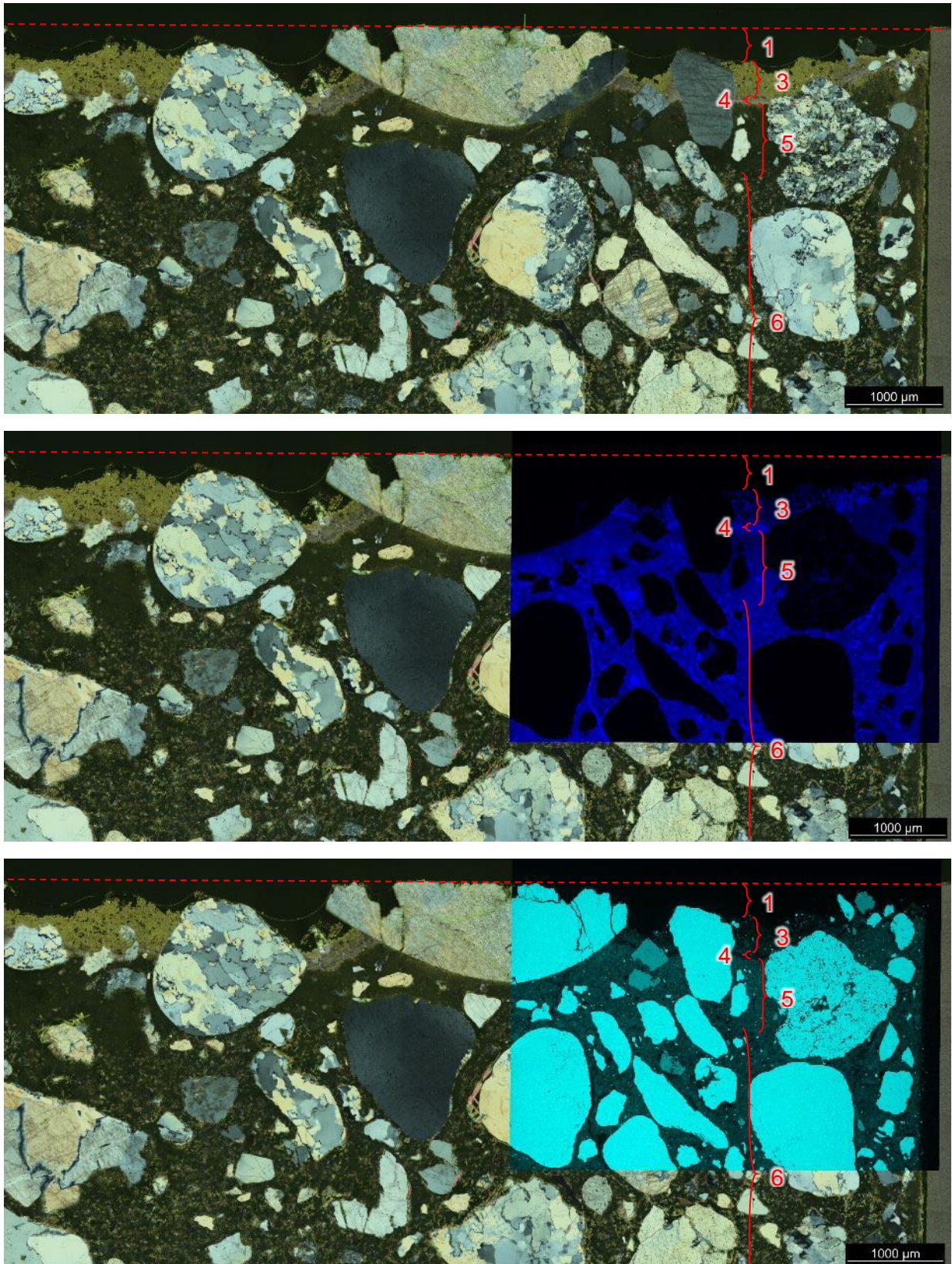


Bild 20 CEM I, Q, w/z=0,50, 100 mg/l CO₂ ruhend; oben: Aufnahme bei gekreuzten Polarisatoren (zirkulare Polarisierung); Mitte: gleiches Bild überlagert mit Elementverteilungskarte Ca; unten: gleiches Bild überlagert mit Elementverteilungskarte Ca; Referenzhöhe (gestrichelte Linie) und Schichtaufbau eingezeichnet; Schicht 2 fehlt im Bildausschnitt; Kunststoffrohr rechts mit angeschnitten

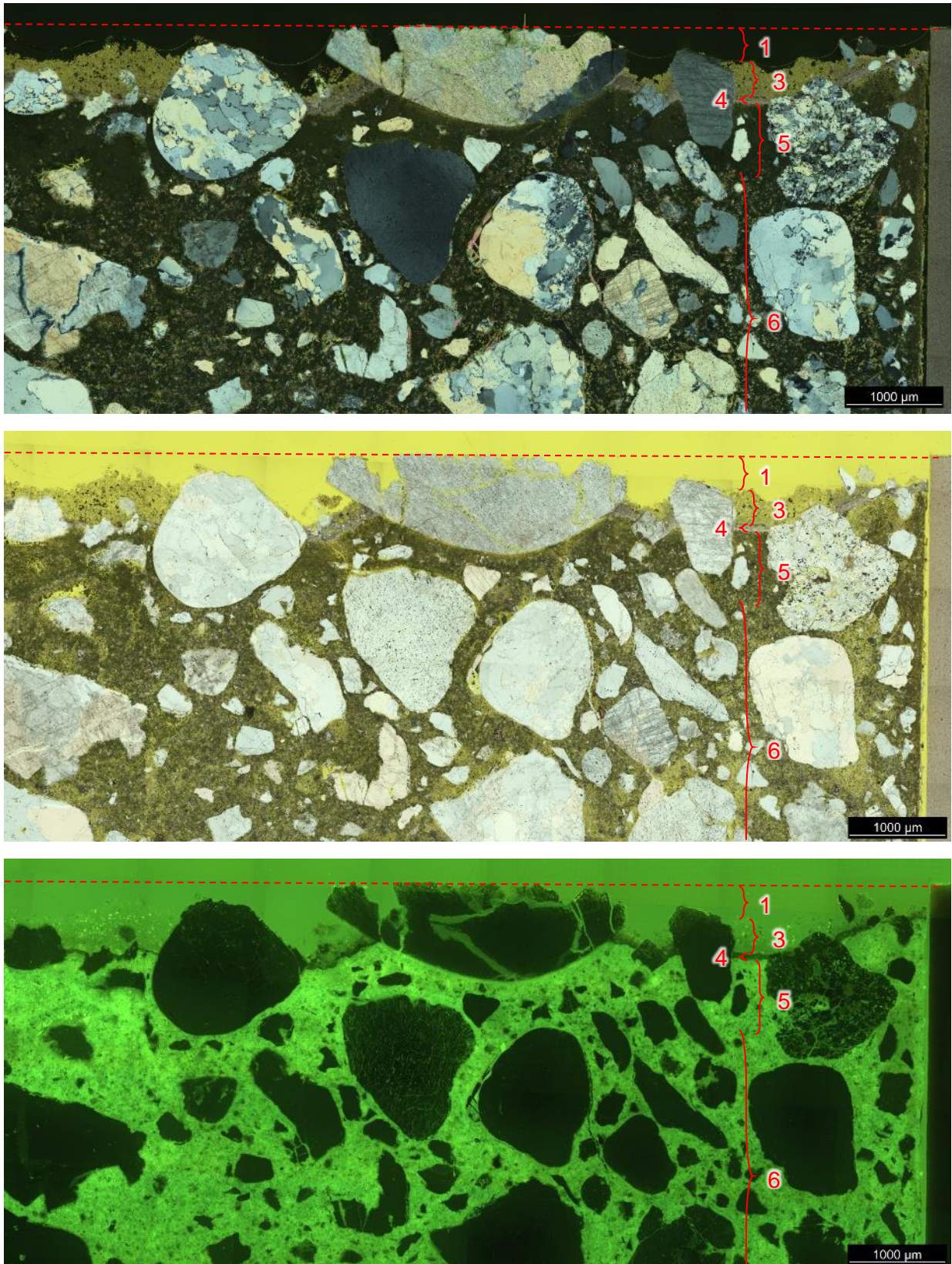


Bild 21 CEM I, Q, w/z=0,50, 100 mg/l CO₂ ruhend; oben: Aufnahme bei gekreuzten Polarisatoren (zirkulare Polarisierung); Mitte: gleicher Ausschnitt bei polarisiertem Licht; unten: gleicher Ausschnitt unter UV-Licht; Referenzhöhe (gestrichelte Linie) und Schichtaufbau eingezeichnet; Schicht 2 fehlt im Bildausschnitt; Kunststoffrohr rechts mit angeschnitten

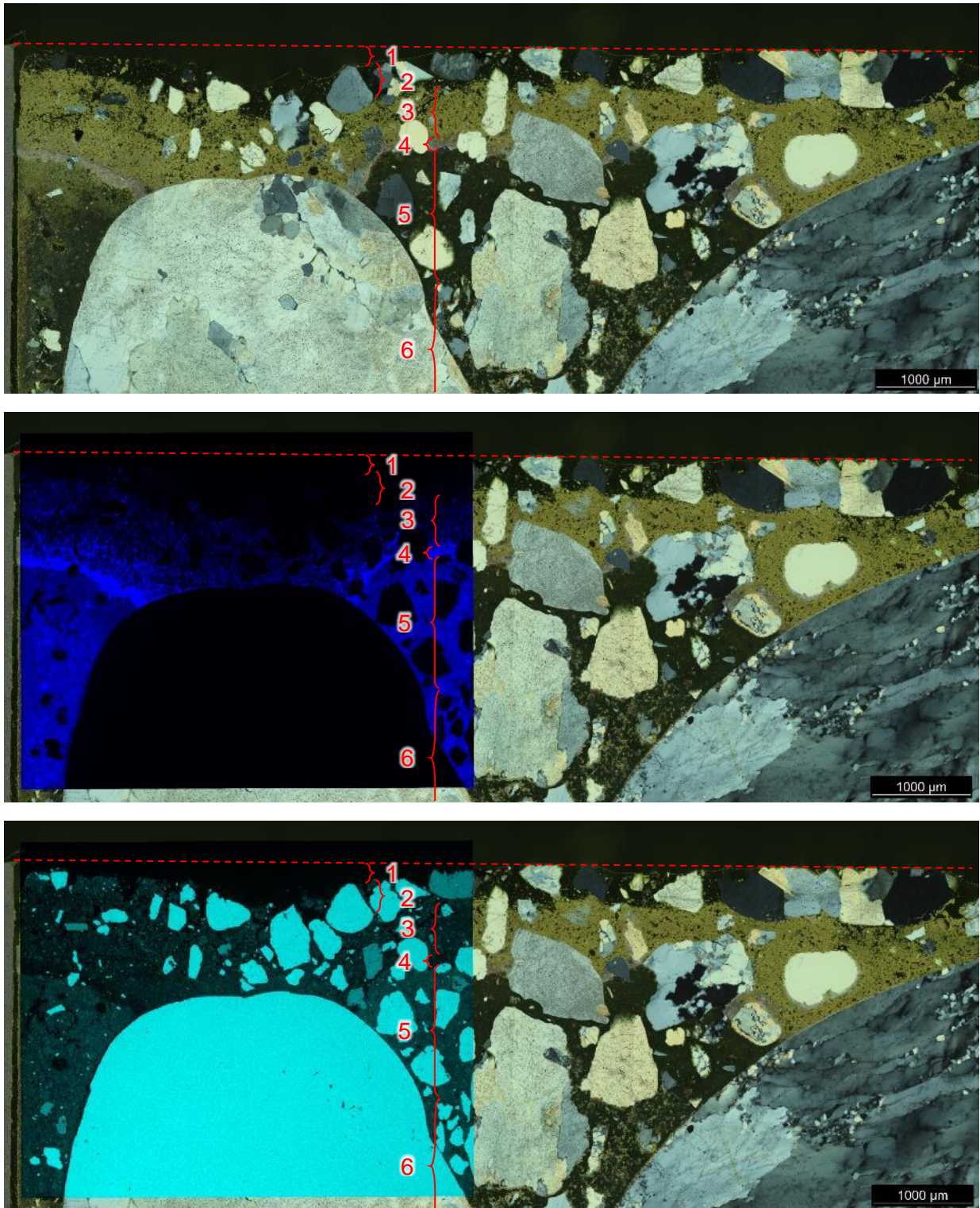


Bild 22 CEM I, Q, w/z=0,50, 200 mg/l CO₂ strömend; oben: Aufnahme bei gekreuzten Polarisatoren (zirkulare Polarisation); Mitte: gleiches Bild überlagert mit Elementverteilungskarte Ca; unten: gleiches Bild überlagert mit Elementverteilungskarte Ca Referenzhöhe (gestrichelte Linie) und Schichtaufbau eingezeichnet; Kunststoffrohr links mit angeschnitten

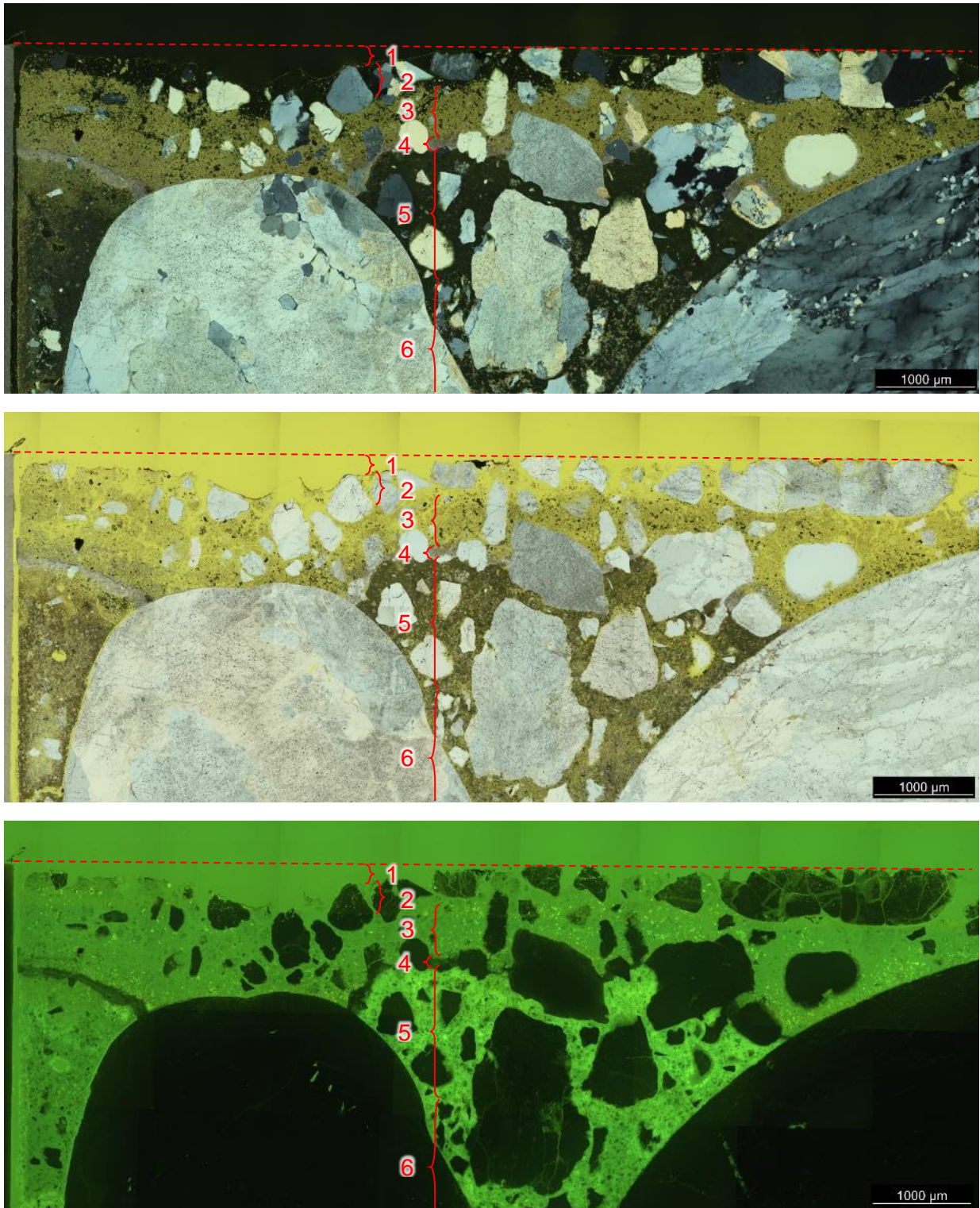


Bild 23 CEM I, Q, w/z=0,50, 200 mg/l CO₂ strömend; oben: Aufnahme bei gekreuzten Polarisatoren (zirkulare Polarisation); Mitte: gleicher Ausschnitt bei polarisiertem Licht; unten: gleicher Ausschnitt unter UV-Licht; Referenzhöhe (gestrichelte Linie) und Schichtaufbau eingezeichnet; Kunststoffrohr links mit angeschnitten

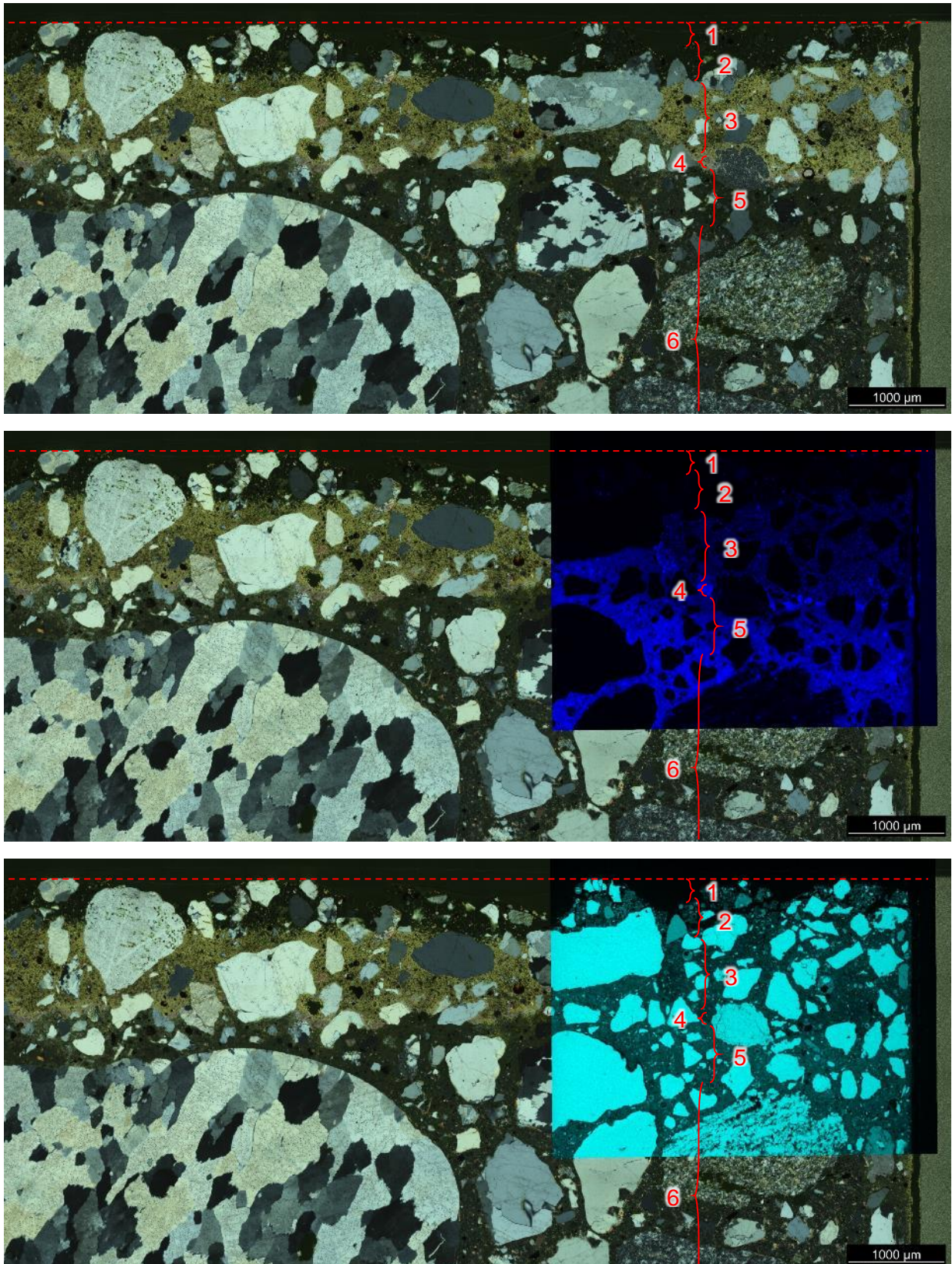


Bild 24 CEM I + FA, Q, w/z=0,50, 100 mg/l CO₂ ruhend; oben: Aufnahme bei gekreuzten Polarisatoren (zirkulare Polarisierung); Mitte: gleiches Bild überlagert mit Elementverteilungskarte Ca; unten: gleiches Bild überlagert mit Elementverteilungskarte Ca; Referenzhöhe (gestrichelte Linie) und Schichtaufbau eingezeichnet; Kunststoffrohr rechts mit angeschnitten

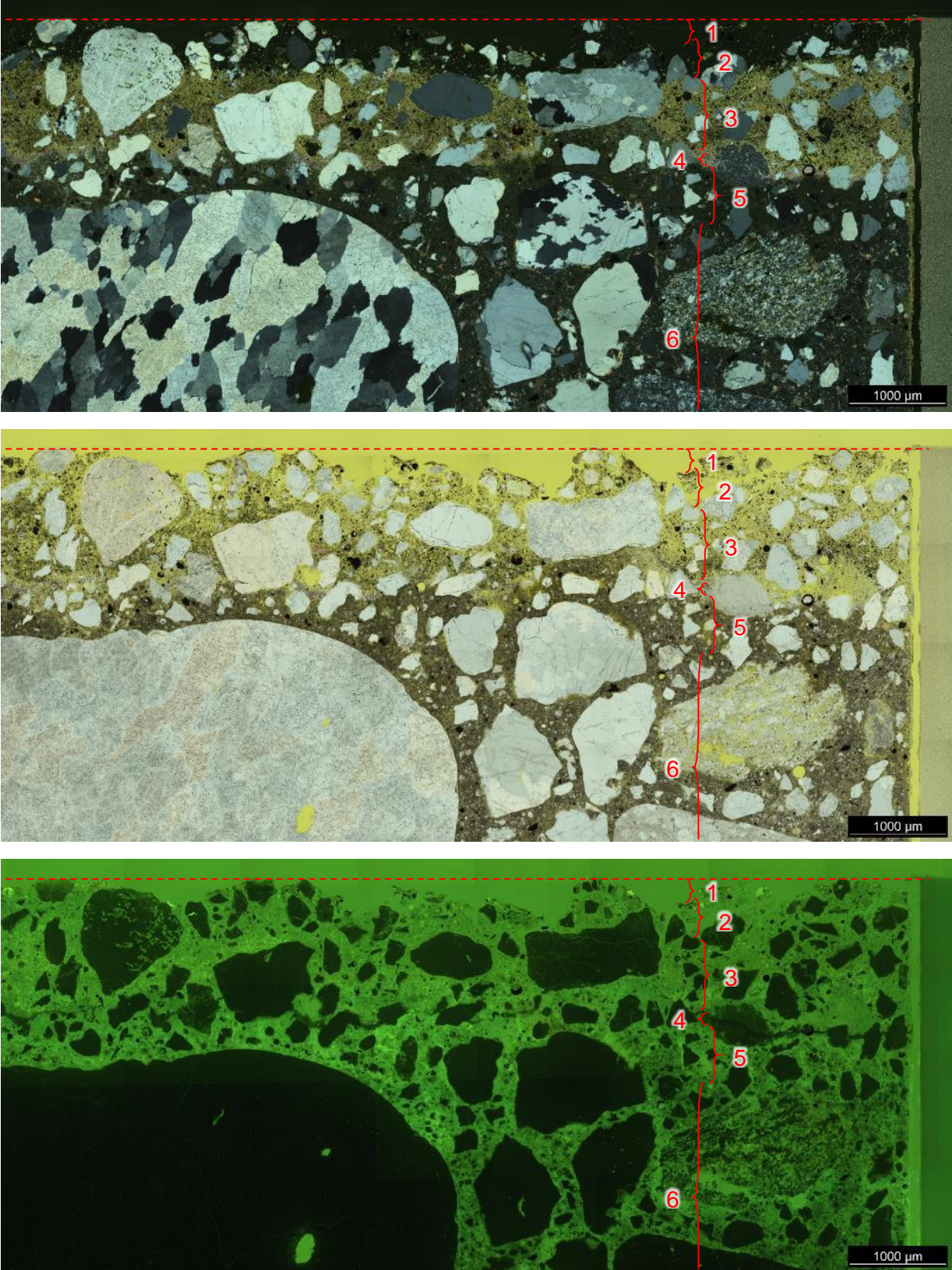


Bild 25 CEM I + FA, Q, w/z=0,50, 100 mg/l CO₂ ruhend; oben: Aufnahme bei gekreuzten Polarisatoren (zirkulare Polarisierung); Mitte: gleicher Ausschnitt bei polarisiertem Licht; unten: gleicher Ausschnitt unter UV-Licht; Referenzhöhe (gestrichelte Linie) und Schichtaufbau eingezeichnet; Kunststoffrohr rechts mit angeschnitten

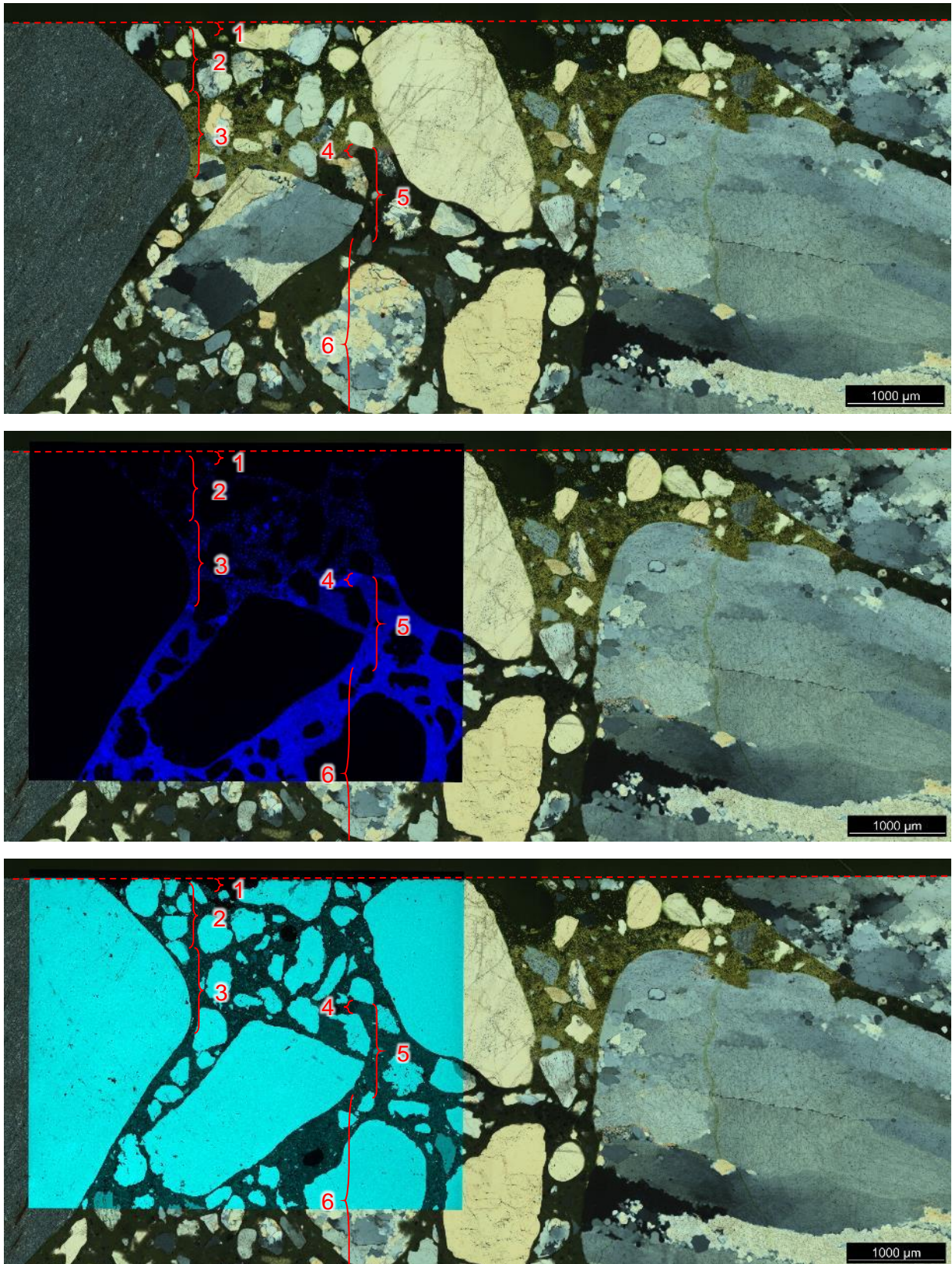


Bild 26 CEM III/B, Q, w/z=0,50, 200 mg/l CO₂ strömend; oben: Aufnahme bei gekreuzten Polarisatoren (zirkulare Polarisation); Mitte: gleiches Bild überlagert mit Elementverteilungskarte Ca; unten: gleiches Bild überlagert mit Elementverteilungskarte Ca; Referenzhöhe (gestrichelte Linie) und Schichtaufbau eingezeichnet; Kunststoffrohr nicht mit angeschnitten

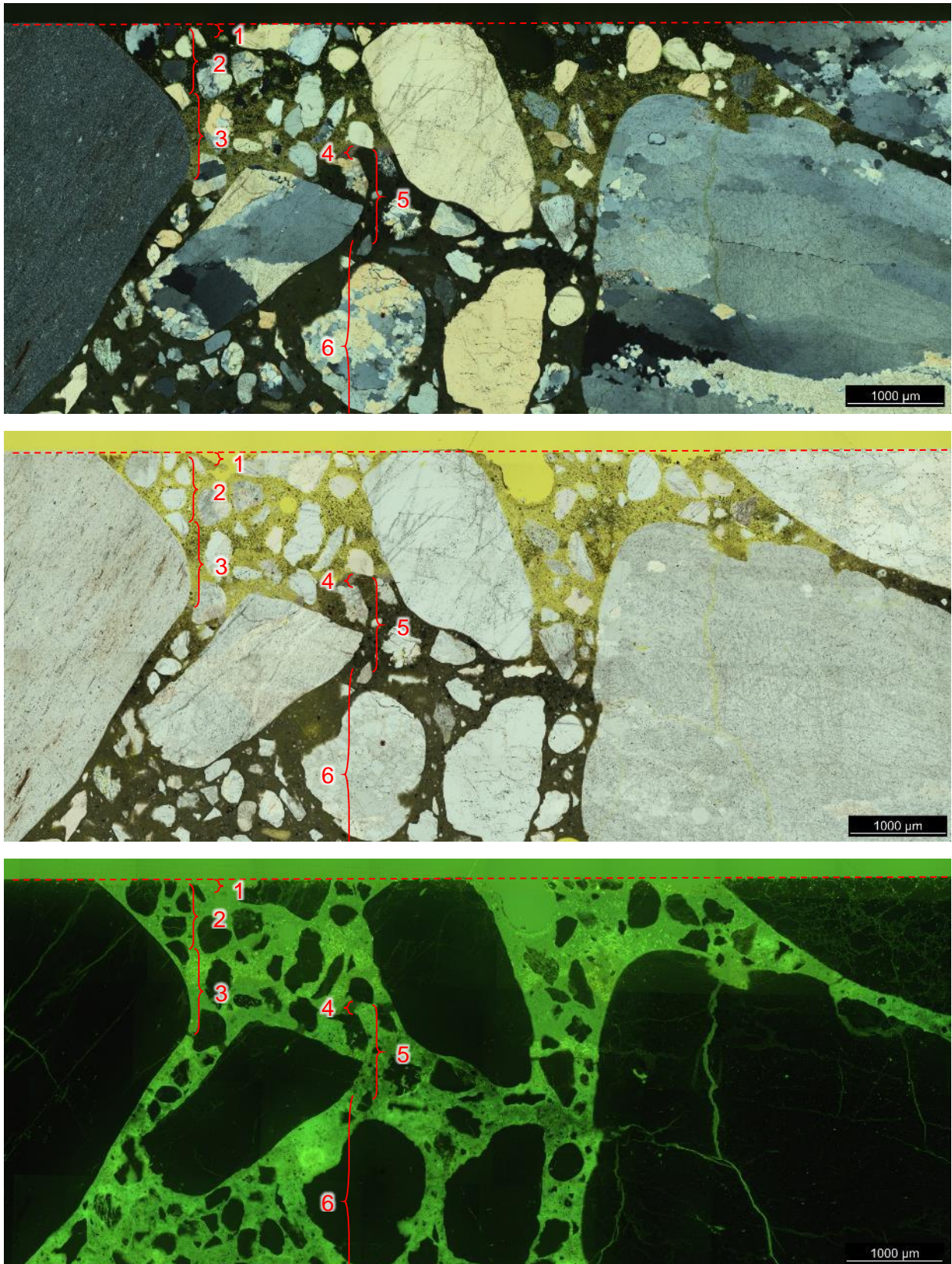


Bild 27 CEM III/B, Q, w/z=0,50, 200 mg/l CO₂ strömend; oben: Aufnahme bei gekreuzten Polarisatoren (zirkulare Polarisation); Mitte: gleicher Ausschnitt bei polarisiertem Licht; unten: gleicher Ausschnitt unter UV-Licht; Referenzhöhe (gestrichelte Linie) und Schichtaufbau eingezeichnet Kunststoffrohr nicht mit angeschnitten

5.3 Auswertung der Betone mittels NMR-MOUSE

In **Bild 28** ist das Spektrum des Betons mit CEM II/A-LL, w/z = 0,50 und quarzitischer Gesteinskörnung nach 365-tägiger Lagerung bei 200 mg CO₂/L in einem strömenden Becken dargestellt.

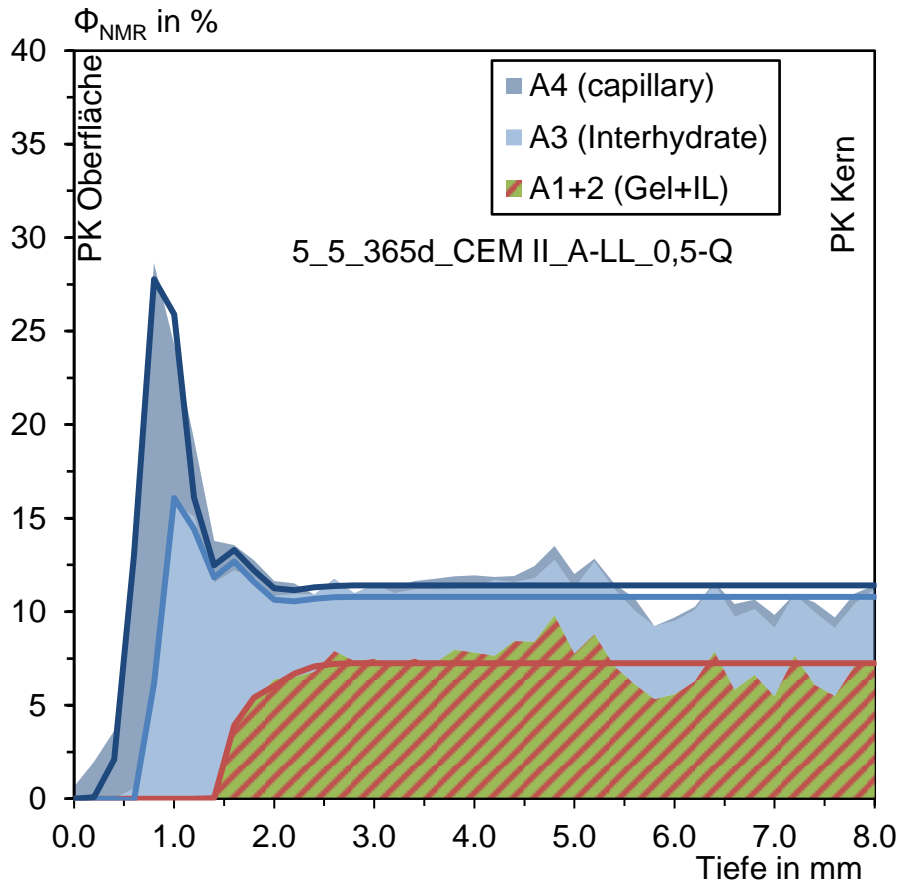


Bild 28: NMR-Spektrum des Betons CEM II/A-LL 0,50 Q nach 365 Tagen Lagerung bei 200 mg CO₂/L im strömenden Becken

Im Spektrum des Betons CEM II/A-LL 0,50 Q ist ein Abtrag bis zu einer Tiefe von ca. 0,5 mm zu sehen. Die Schicht 2 konnte im NMR-Spektrum nicht identifiziert werden. Die Gel- bzw. Interlayerporen beginnen im NMR-Spektrum bei einer Tiefe von etwa 1,4 mm, was auf die Schicht 5 hindeutet. Bei einer Tiefe von ca. 1,6 mm sind wieder Gel- und Interlayerporen eines nahezu intakten Gefüges zu erkennen. Die Schicht 4 liegt im NMR-Spektrum bei ca. 0,6 mm. Hier sind Interhydratporen wieder zu finden, was auf eine höhere Porosität zurückgeführt werden kann. Im NMR-Spektrum ist der Bereich 3 bei ca. 0,56 mm zu finden, hier liegt in etwa das Maximum an Kapillarporen ohne Interhydrat- und Gel- bzw. Interlayerporen vor.

In Bild 29 ist das Spektrum des CEM I mit $w/z = 0,50$ und quarzitischer Gesteinskörnung nach 365-tägiger Lagerung bei $200 \text{ mg CO}_2/\text{L}$ in einem ruhenden Becken dargestellt. Auf Grund eines Software-Wechsels weicht die grafische Darstellung von den vorhergehenden Bildern ab. Inhaltlich sind die verwendeten Berechnungsmethoden jedoch identisch.

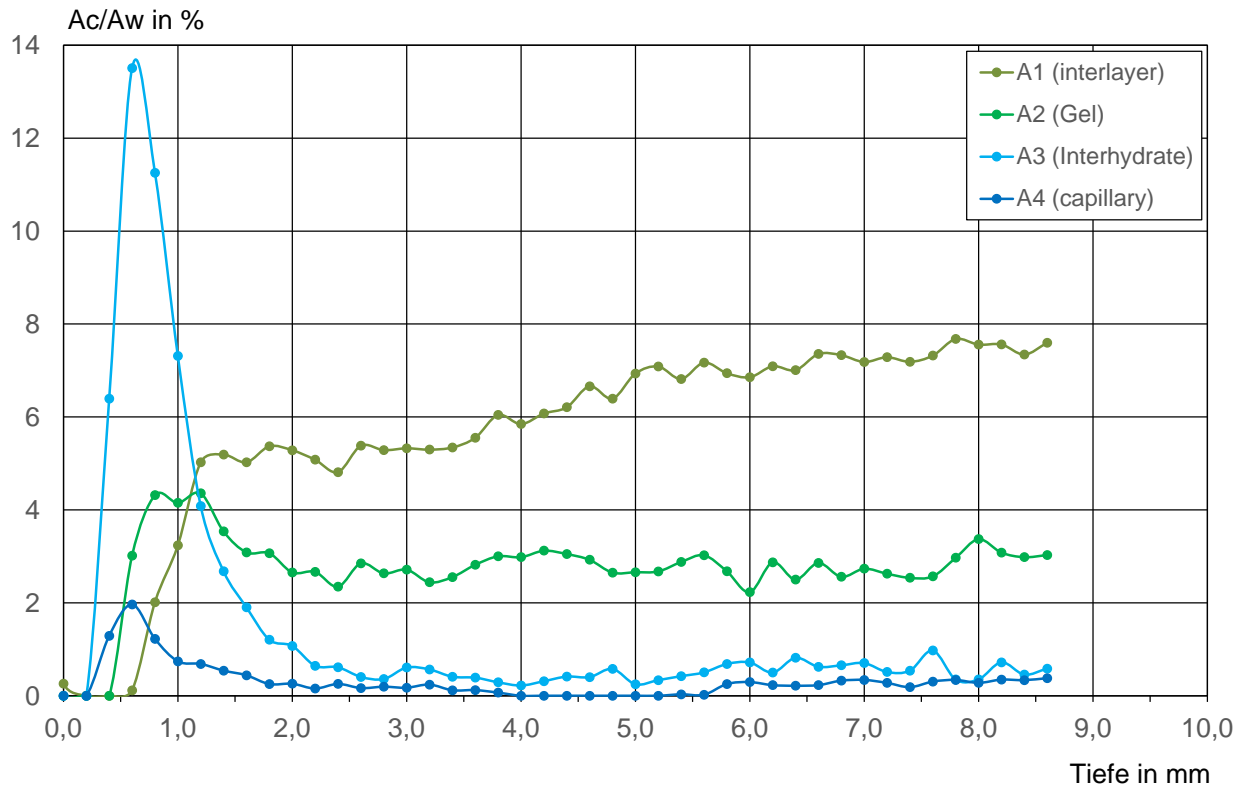


Bild 29: NMR-Spektrum des Betons CEM I 0,50 Q nach 365 Tagen Lagerung bei $100 \text{ mg CO}_2/\text{L}$ im ruhenden Becken

Im Spektrum des CEM I 0,50 Q bei $100 \text{ mg CO}_2/\text{L}$ im ruhenden Becken ist ein Abtrag bis zu einer Tiefe von ca. 0,3 mm zu sehen. Bei ca. 0,4 mm ist der Anteil an Kapillarporen hoch und im Verhältnis der Anteil an Interhydratporen niedrig, was auf ein poröses Gefüge der Schicht 2 hinweist. Bei einer Tiefe von etwa 0,62 mm ist der Anteil an Kapillarporen fast und der Anteil an Interhydratporen maximal, was auf ein poröses Gefüge der Schicht 3 hindeutet. Ab einer Tiefe von ca. 0,75 mm steigen die Anteile an Interlayer- und Gelporen, wohingegen die Anteile an Kapillar- und Interhydratporen sinken. Dies weist auf eine weitere Verdichtung der Schicht 4 hin. Ab einer Tiefe von 1,8 mm haben die Kapillar- und die Interhydratporen nahezu den Anteil des nicht geschädigten Gefüges. Der Anteil an Gelporen bleibt auf einem Niveau mit steigender Tiefe während der Anteil an Interhydratporen wächst.

In Bild 30 ist das Spektrum des CEM I mit $w/z = 0,50$ und quarzitischer Gesteinskörnung nach 365-tägiger Lagerung bei $200 \text{ mg CO}_2/\text{L}$ in einem strömenden Becken dargestellt.

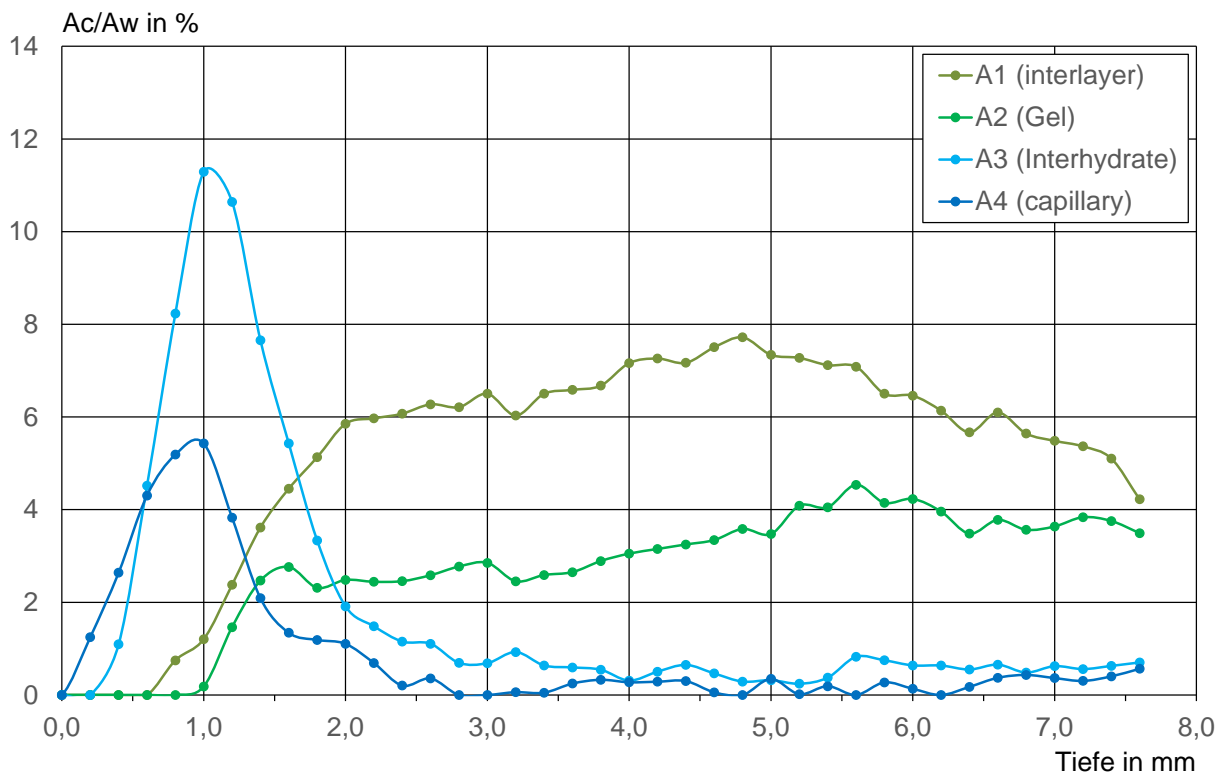


Bild 30: NMR-Spektrum des Betons CEM I 0,50 Q nach 365 Tagen Lagerung bei $200 \text{ mg CO}_2/\text{L}$ im strömenden Becken

Im Spektrum des CEM I 0,50 Q bei $200 \text{ mg CO}_2/\text{L}$ im strömenden Lagerungsbecken ist ein Abtrag bis zu einer Tiefe von ca. 0,3 mm zu sehen. Bei ca. 0,6 mm ist der Anteil an Kapillarporen hoch und im Verhältnis der Anteil an Interhydratporen niedrig, was auf ein poröses Gefüge der Schicht 2 hinweist. Bei einer Tiefe von etwa 0,95 mm ist der Anteil an Kapillar- und der Anteil an Interhydratporen nahezu maximal, was auf ein poröses Gefüge der Schicht 3 hindeutet. Ab einer Tiefe von ca. 1,0 mm steigen die Anteile an Interlayer- und Gelporen während die Anteile an Kapillar- und Interhydratporen sinken. Dies weist auf eine weitere Verdichtung der Schicht 4 hin. Ab einer Tiefe von 2,0 mm haben die Kapillar- und die Interhydratporen den Anteil des nicht geschädigten Gefüges. Der Anteil an Gelporen sinkt mit steigender Tiefe während der Anteil an Interhydratporen wächst.

In Bild 31 ist das Spektrum des CEM I mit 33% Flugasche mit $w/z = 0,50$ und quarzitischer Gesteinskörnung nach 365-tägiger Lagerung bei $200 \text{ mg CO}_2/\text{L}$ in einem strömenden Becken dargestellt.

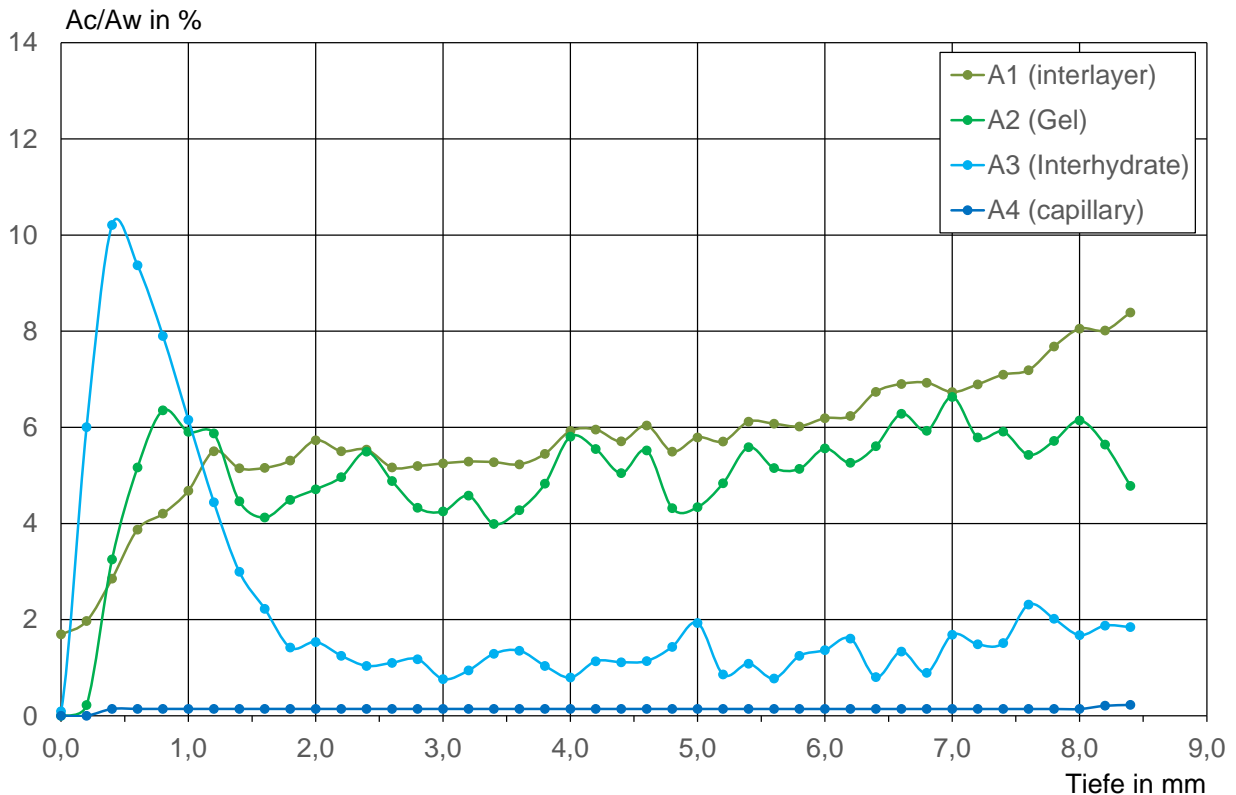


Bild 31: NMR-Spektrum des Betons CEM I + FA 0,50 Q nach 365 Tagen Lagerung bei $100 \text{ mg CO}_2/\text{L}$ im ruhenden Becken

Im Spektrum des CEM I + FA 0,50 Q ist ein Abtrag bis zu einer Tiefe von ca. 0,1 mm zu sehen. Auffallend ist der geringe Anteil an Kapillarporen, welcher sich nahezu nicht ändert. Bei ca. 0,42 mm ist der Anteil an Interhydratporen hoch, was auf ein poröses Gefüge der Schicht 2 hinweist. Bei einer Tiefe von etwa 1,0 mm sind die Anteile an Kapillarporen und Interhydratporen relativ hoch, der Anteil an Gel- und Interlayer erreicht das erste Maximum. Dies deutet auf eine relativ dichte Schicht 3 hin. Ab einer Tiefe von ca. 1,2 mm erreichen Interlayer- und Gelporen das zweite Maximum, wohingegen der Anteil an Interhydratporen stetig sinkt. Dies weist auf eine weitere Verdichtung der Schicht 4 hin. Ab einer Tiefe von 2,0 mm haben die Interhydratporen nahezu den Anteil des nicht geschädigten Gefüges. Der Anteil an Gelporen bleibt auf einem Niveau mit steigender Tiefe während der Anteil an Interhydratporen wächst.

In Bild 32 ist das Spektrum des CEM III/B mit $w/z = 0,50$ und quarzitischer Gesteinskörnung nach 365-tägiger Lagerung bei $200 \text{ mg CO}_2/\text{L}$ in einem strömenden Becken dargestellt.

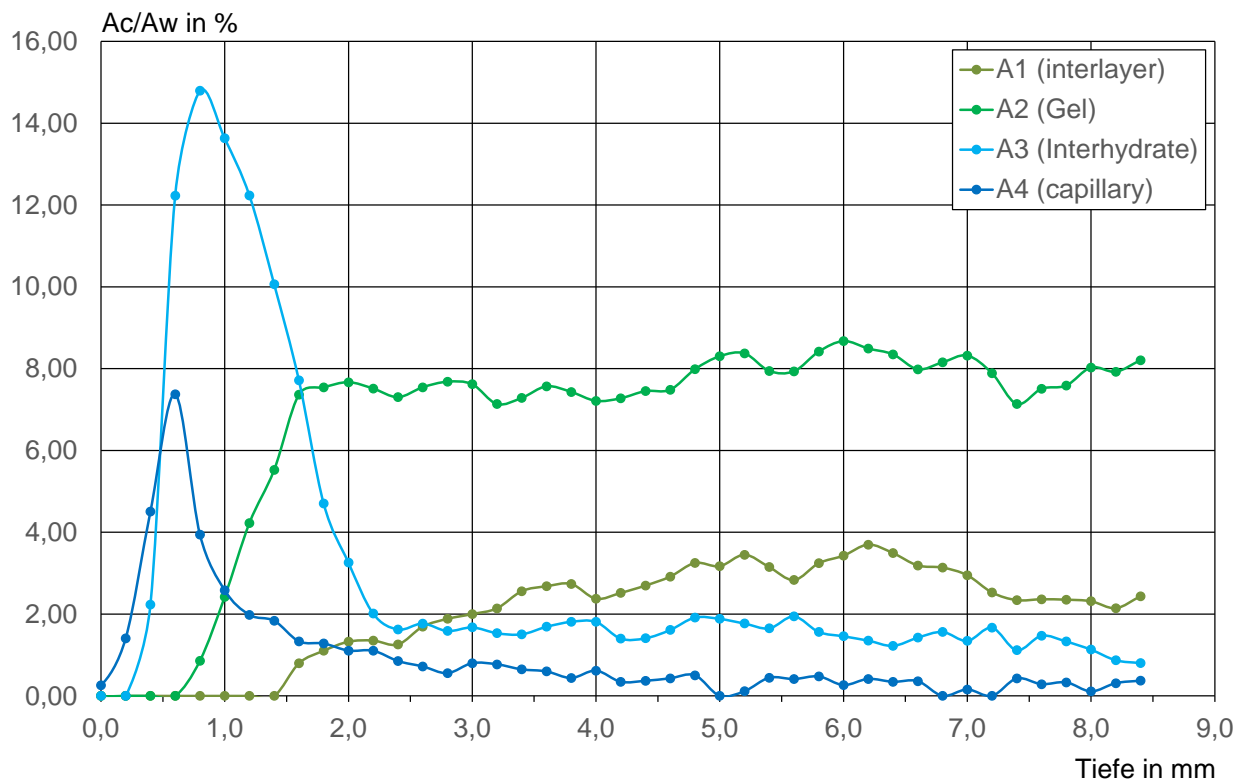


Bild 32: NMR-Spektrum des Betons CEM III 0,50 Q nach 365 Tagen Lagerung bei $200 \text{ mg CO}_2/\text{L}$ im strömenden Becken

Im Spektrum des CEM III 0,50 Q bei $200 \text{ mg CO}_2/\text{L}$ im strömenden Becken ist ein Abtrag bis zu einer Tiefe von ca. $0,2 \text{ mm}$ zu sehen. Bei ca. $0,5 \text{ mm}$ ist der Anteil an Kapillarporen hoch und im Verhältnis der Anteil an Interhydratporen niedrig, was auf ein poröses Gefüge der Schicht 2 hinweist. Bei einer Tiefe von etwa $0,8 \text{ mm}$ ist der Anteil an Kapillar- hoch und der Anteil an Interhydratporen nahezu maximal. Zusätzlich treten die ersten Gelporen auf, was auf eine Verdichtung des Gefüges hinweist. Bei einer Tiefe von $1,5 \text{ mm}$ treten neben einem hohen Anteil an Gelporen die ersten Interlayerporen auf, was auf eine weitere Verdichtung hinweist. Da noch geringe Anteile an Kapillarporen vorhanden sind, aber vor allem der Anteil an Interlayerporen noch relativ hoch ist, weist dies auf ein poröses Gefüge der Schicht 3 hin. Ab einer Tiefe von ca. $1,7 \text{ mm}$ erreicht der Anteil der Gelporen nahezu das Maximum, während der Anteil an Interlayerporen weiter anwächst. Die Anteile an Kapillar- und Interhydratporen sinken stetig. Dies weist auf eine weitere Verdichtung der Schicht 4 hin. Ab einer Tiefe von etwa $2,6 \text{ mm}$ haben die Kapillar- und die Interhydratporen jeweils den Anteil des nicht geschädigten Gefüges.

5.4 Vergleich der Ergebnisse mit der NRM-MOUSE

In **Tabelle 11** sind die mit den mikroskopischen Verfahren ermittelten mittleren Abtrags- und Schädigungstiefen den mittels NMR-MOUSE ermittelten Daten gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt, dass die Messungen der NMR-MOUSE weitgehend mit den Messungen der Licht-bzw. Rasterelektronenmikroskopie übereinstimmen.

Daraus kann geschlossen werden, dass die zerstörungsfreie Messung mittels NMR-MOUSE eine geeignete Methode ist, um den Angriff kalklösender Kohensäure auf Beton zu quantifizieren. Diese Methode kann zukünftig zur Bewertung neuer sowie von Bestandsbetonen in XA-Expositionen verwendet werden.

Tabelle 11 Abtrags- und Schädigungstiefe im Vergleich der Messverfahren; alle Angaben in μm

untere Grenzfläche von Schicht	REM	MOUSE	REM	MOUSE	REM	MOUSE	REM	MOUSE	REM	MOUSE
	CEM II/A-LL, Q, w/z=0,50, 200 mg/l CO ₂ strömend		CEM I, Q, w/z=0,50, 100 mg/l CO ₂ ruhend		CEM I, Q, w/z=0,50, 200 mg/l CO ₂ strömend		CEM I + FA, Q, w/z=0,50, 100 mg/l CO ₂ ruhend		CEM III/B, Q, w/z=0,50, 200 mg/l CO ₂ strömend	
1	475	500	320	300	213	300	95	100	87	200
2	*	*	454	400	490	500	415	420	631	500
3	726	564	692	620	953	950	1362	1000	1535	1500
4	763	600	767	800	1059	1000	1438	1200	1606	1700
5	1409	1400	1755	1800	1815	2000	2088	2000	2600	2600

*: Schicht nicht beobachtet

6 Zusammenfassung

Die Kontrolle der Konzentration der kalklösenden Kohlensäure hat sich als sehr schwierig herausgestellt. Insbesondere die hohen Konzentrationen haben sich als sehr herausfordernd für die Sonden herausgestellt, so dass es immer wieder zu deutlichen Überschreitungen der Sollkonzentrationen in den Lagerungsbecken kam. Zudem erschwerten schwankende Temperaturen, welche teilweise durch Abwärme der Pumpen verursacht wurden, eine konstante Lagerung. Zudem war durch Algenwachstum die Zugabe eines Biozids notwendig.

Die nicht konstanten Lagerungsbedingungen hatten auch einen Einfluss auf den Angriff auf die Prüfkörper. So zeigen die Prüfkörper, welche in den Lagerungsbecken mit 150 mg CO₂/L gelagert wurden, systematisch einen stärkeren Abtrag bzw. eine höhere Schädigungstiefe als die Probekörper der anderen Lagerungsbedingungen. Theoretisch sollten die Prüfkörper bei 200 mgCO₂/L den höchsten Abtrag bzw. die höchste Schädigungstiefe zeigen. Somit sind die Abtrags- und Schädigungstiefen sicherlich nicht repräsentativ für den Angriff bei einer entsprechenden Konzentration.

Diese Erkenntnisse sollten sowohl in weiteren Forschungsvorhaben als auch insbesondere bei der Prüfung von Betonen für den praktischen Einsatz in XA-Umgebung berücksichtigt werden.

Die NMR-MOUSE als Methode zur Bestimmung der Abtrags- bzw. Schädigungstiefe hat sich als eine valide Messmethode herausgestellt. Der Vorteil dieser Messtechnik ist die zerstörungsfreie Messung der Proben. Allerdings ist die Auswertung der Messergebnisse nicht trivial, so dass die Auswertung eines erfahrenen Prüfers bedarf. Um eine breitere Nutzung dieser Messmethode zu ermöglichen, muss die Auswertung weiter automatisiert werden.

Gesicherte Erkenntnisse zum Einfluss der Zementart, des Wasser-Zement-Wertes, der Konzentration der angreifenden Kohlensäure und der Strömungsverhältnisse im angreifenden Medium lagen bisher nicht vor. Im Forschungsvorhaben konnte gezeigt werden, dass beim Angriff durch kalklösende Kohlensäure zwischen Abtrag- und Schädigungstiefe differenziert werden muss. Betone mit CEM III-Zementen oder mit der Kombination aus CEM I und Flugasche weisen vergleichsweise hohe innere Beeinträchtigungen des Gefüges auf, was auf verringerte Gehalte an Calciumhydroxid zurückgeführt werden kann. Dies beeinflusst die für ein Bauwerk relevante Abtragstiefe aber nicht negativ. Solche Betone erscheinen gut geeignet, um in entsprechenden Expositionen eingesetzt zu werden.

Mit der Messung sowohl der Schädigungs- wie auch der Abtragstiefe im zerstörungsfreien NMR-MOUSE-Verfahren konnte eine Versuchsmethodik entwickelt werden, die geeignet erscheint, Praxisbetone zukünftig reproduzierbar bewerten zu können. Die Schädigungs- bzw. Abtragsgeschwindigkeit folgt dabei einem funktionalen Zusammenhang (siehe z.B. **Bild 21**), so dass ggf. bereits nach einer Versuchsdauer von rd. einem Jahr langfristige Abtragstiefen extrapoliert werden können. Ein solches Messverfahren zur praxisgerechten Messung und Bewertung eines Angriffs kalklösender Kohlensäure auf Beton existierte bisher nicht.

Dies stellt gegenüber dem bisherigen Wissensstand einen deutlichen Fortschritt dar und ermöglicht den mittelständisch geprägten Branchen der Planer, Bauausführenden und Betonhersteller, Bauwerke in XA-Exposition beim Angriff kalklösender Kohlensäure sicherer als bisher zu planen und auszuführen.