

Einfluss unterschiedlicher Karbonatphasen auf den Frost-Tausalz widerstand – Labor- und Praxisverhalten –

Von Eberhard Lang, Duisburg-Rheinhausen

1 Einleitung

In dem AIF-Forschungsvorhaben „Untersuchungen zur Erhöhung des Frost-Tausalz-Widerstands von HOZ-Betonen“ [1] wurde einigen eng miteinander verknüpften Aufgaben nachgegangen, wie der Klärung der Ursachen für die unterschiedlichen Abwitterungsverläufe bei Betonen mit Portland- und mit Hochofenzement, dem Aufzeigen von Möglichkeiten zur Beeinflussung des Verlaufs der Anfangsabwitterung sowie der Bedeutung des unterschiedlichen Abwitterungsverhaltens in der Anfangsphase von Frost-Tausalz-Prüfungen für die Dauerhaftigkeit. Außerdem wurden Untersuchungen zur Wirkung unterschiedlicher Luftporenbildner bei HOZ-Betonen in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt und der Art des eingesetzten Portlandzementklinkers unter besonderer Berücksichtigung der oberflächennahen Bereiche durchgeführt.

Untersucht wurden damals Betone, die unter Verwendung von je zwei PZ 35 F, HOZ 35 L und HOZ 45 L (heute CEM I 32,5 R, CEM III/A 32,5 N und CEM III/A 42,5 N) ohne LP-Bildner, mit einem synthetischen LP-Bildner, mit einem LP-Bildner auf Vinsolharzbasis und mit Mikrohohlkugeln hergestellt wurden.

Bei diesen Untersuchungen wurde unter anderem festgestellt, dass die Anfangsabwitterung des Betons der Dicke der karbonatisierten Schicht

entsprach. Bei den Betonen mit hüttensandreichen Hochofenzementen konnten hierfür zwei sich gegenseitig verstärkende Ursachen festgestellt werden:

- Das Mikrogefüge wird durch die Karbonatisierung vergrößert.
- Durch die Einwirkung von CO_2 unter verschärften Umgebungsbedingungen, d.h. Lagerung ($20\text{ °C}/65\text{ % r.F.}$) bei einem CO_2 -Gehalt von 1 % anstelle des üblichen Werts der Außenlagerung von 0,03 %, bilden sich in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt bei diesen Zementen neben stabilen Calcit die metastabilen Calciumkarbonat-Phasen Aragonit (bei $\text{HS} \geq 65\text{ %}$) und Vaterit (bei $\text{HS} \geq 55\text{ %}$), die durch die Chloride von 3 %iger NaCl-Lösung stärker angegriffen werden als Calcit.

In rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Randzone von HOZ-Betonen vor dem Frost-Tausalzangriff wurden neben trigonal ausgebildeten Calcitkristallen Aragonitnadeln und Vateritsphärolit identifiziert. Nach dem Frost-Tausalzangriff war fast nur noch Calcit nachweisbar. Die metastabilen CaCO_3 -Modifikationen Aragonit und Vaterit wurden fast vollständig abgebaut. Parallel dazu erfolgte eine Ausscheidung von Calcit in den Makroporen der Matrix. Bei den PZ-Betonen wurde nur Calcit nachgewiesen. Bei diesen Proben witterte in der Anfangsphase

der Frost-Tauwechsel zunächst nur Calcit ab, im Weiteren sind auch Monochlorid und C-S-H-Phasen nachweisbar.

Während der Frost-Tausalzwiderstand (FTSW) bisher stets als ein rein physikalisches Problem angesehen wurde [2, 3, 4, 5], ist aufgrund der Ergebnisse aus [1] offensichtlich auch ein chemisch bedingter Einfluss erkennbar. Über die Bedeutung, über den zeitlichen Ablauf und über die durch Karbonatisierung hervorgerufenen Änderungen im Zementstein- und Betongefüge und ihren Einfluss auf den Frostwiderstand wurde in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken e.V. und des Vereins Deutscher Zementwerke e.V. nachgegangen. Im nachfolgenden Beitrag wird über die Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen berichtet.

2 Literaturswertung

Ein Einfluss der Karbonatisierung auf den FTSW ist aus der Arbeit von Hilsdorf und Günther [6] ableitbar. In dieser Arbeit wird insbesondere deutlich, dass bei PZ-Betonen eine fehlende Austrocknung und damit fehlende Karbonatisierung zu einer erheblichen Verschlechterung des FTSW führt, während bei Beton mit hüttensandreicher Hochofenzement eine erhöhte Karbonatisierung größere Abwitterungen zur Folge hat.

Slegers und Rouxhet [7] fanden bei ihren Untersuchungen zur Karbonatisierung von C_3S , dem Hauptklinkermineral eines Portlandzementklinkers, die Entstehung von Vaterit und Aragonit in Abhängigkeit von der Zeit, wobei sich das Verhältnis im Verlauf der Hydratation immer mehr vom Aragonit zum Vaterit verschiebt. Da diese Untersuchungen an einem synthetischen C_3S in einer Suspension erfolgten, sind die Ergebnisse auf Zement und Beton

nicht unmittelbar übertragbar. Sie zeigen aber, dass einerseits eine Zeitabhängigkeit besteht und andererseits auch bei der CaO-reichsten Klinkerphase diese metastabilen Karbonatphasen entstehen können. Im Gegensatz dazu deutete sich in [1] eine verstärkte Aragonit- und Vateritbildung mit zunehmendem Hüttensandgehalt und somit mit abnehmendem Klinkeranteil und abnehmendem CaO-Gehalt an.

Nach Untersuchungen von Knöfel und Eßer [8] kommt es bei künstlich erhöhter CO₂-Konzentration von über 1 % bei HOZ- und PZ-Beton zusätzlich zur Calcit- auch zu einer Vateritbildung. Dies führte bei beiden Zementarten aber im Gegensatz zu normalen Karbonatisierungsbedingungen zu einer Erhöhung der Festigkeit, die auf eine Verdichtung des Porengefüges (Anstieg des Gelporen- und Abnahme des Kapillarporenanteils) im karbonatisierten Bereich bei etwa gleicher Gesamtporosität zurückgeführt wird. Diese Wirkung war jedoch bei den Untersuchungen in [1] an Betonen mit hüttensandreicherem Hochofenzement nicht festzustellen. Vielmehr trat eine Erhöhung des an sich sehr geringen Kapillarporenanteils in der karbonatisierten Randzone ein, die offenbar darauf zurückzuführen ist, dass die Untersuchungen mit CO₂-Konzentrationen von weniger als 1 % durchgeführt wurden. Manns und Wesche [9] stellten eine Festigkeitssteigerung nach einer beschleunigten Karbonatisierung von Beton aus Hochofenzement mit einem Hüttensandgehalt von 40 % und für Beton mit Portlandzement fest. Bei Verwendung von Hochofenzement mit einem sehr hohen Hüttensandgehalt von 82 M.-% lag die Druckfestigkeit nach der Karbonatisierung geringfügig unter der Ausgangsfestigkeit.

In vollständig karbonatisierten Mörteln aus PZ und HOZ, die mit einem hohen w/z-Wert von 0,76 hergestellt

worden waren, fand Smolczyk [10] röntgenografisch sowohl Calcit als auch Vaterit. In den PZ-Mörteln dominierte Calcit, in den HOZ-Mörteln hingegen Vaterit.

Im Zementsteingefüge liegen Calciumhydroxid und Calciumsilikathydrate nebeneinander vor. Nach Calleja [11] können beide zur Karbonatisierung beitragen. Koelliker [12] kommt unter Verwendung der Arbeiten von Locher [13] zu dem Schluss, dass trotz der beachtlichen Unterschiede an CaO- und SiO₂-Gehalten in den verschiedenen Zementen bei der Hydratation die gleichen Hydratphasen entstehen. Dies bedeutet, dass auch der Chemismus der Karbonatisierung als gleichartig betrachtet werden müsste. Letzteres ist aufgrund der neueren Erkenntnisse nicht mehr uneingeschränkt zu bestätigen und sollte daher ebenfalls in der vorliegenden Arbeit untersucht werden.

Ein weiterer Aspekt, der den Mechanismus der Phasenneubildung maßgeblich beeinflusst, ist die Zusammensetzung der Porenflüssigkeit im Zementstein. Die Ionenkonzentration in der Porenflüssigkeit wird im Wesentlichen von den Alkaliionen Na⁺ und K⁺ sowie den Hydroxyl- und Sulfationen bestimmt. Demgegenüber ist die Ionenkonzentration des Ca²⁺ außerordentlich niedrig. Aufgrund der Löslichkeitsgleichgewichte wird bei der Karbonatisierung solange Calciumcarbonat ausgefällt, solange Calciumhydroxid in der Porenlösung vorhanden ist. Kobayashi und Uno [14] untersuchten die Karbonatisierung von Portlandzementen in Abhängigkeit vom Alkaligehalt. Mit steigendem Alkaliäquivalent fanden sie trotz verminderter Ca(OH)₂-Konzentration in der Porenlösung eine zunehmende Karbonatisierung. Die Untersuchungen erfolgten jedoch wieder teilweise mit Hilfe einer Schnellkarbonatisierung durch eine Lagerung in 10%iger Hydrogenkarbonatlösung, die mit einer Lagerung

in CO₂-haltiger Luft nicht vergleichbar ist. Vergleichbare Untersuchungen an anderen Zementarten wurden nicht durchgeführt.

Da sich die in den Porenlösungen befindlichen Ionen im Gleichgewicht befinden und da in Hochofenzementen der Anteil löslicher Alkalien niedriger ist als in Portlandzementen, ist folglich die Calciumionenkonzentration in der Frühphase der Hydratation bei Hochofenzementen höher als bei Portlandzementen, wie die Untersuchungen von Gunkel [15] ausweisen. Die Ca²⁺-Konzentration in der Porenlösung lag bei einem CEM III/B 32,5 NW/HS etwa doppelt so hoch wie bei einem CEM I 32,5 R bzw. 42,5 R. Die Vaterit-Bildung soll durch eine höhere Alkalität in Gegenwart von C-S-H und Calciumhydroxid sowie durch ein dichteres Zementsteingefüge gefördert werden. Aragonit entsteht bevorzugt bei niedrigerer Alkalität, in Gegenwart von Aluminatferrit-Monosulfat (AFm-) und Aluminatferrit-Trisulfat (Aft-)Phasen und in porenreichem Zementstein [16].

Neuere Untersuchungen verknüpfen den Chemismus der Karbonatisierung mit dem der sekundären Ettringitbildung und schaffen damit einen noch wesentlich komplexeren Bezug zur Dauerhaftigkeit von Beton. Unter Dauerhaftigkeit sind dabei nicht mehr allein der Frost- und Frosttausalz widerstand, sondern auch ein Dehnungsverhalten durch sekundäre Ettringitbildung zu verstehen.

In der Arbeit von Nishikawa u.a. [17] wurde unter anderem die Entstehung von Vaterit/Aragonit bei der Karbonatisierung von synthetischem Ettringit festgestellt. Unter Einwirkung von atmosphärischem CO₂ und ausreichender Feuchtigkeit entstanden aus Ettringit die Reaktionsprodukte Gips, Aluminiumhydroxidgel und Calciumcarbonat. Die Reaktion ist sehr stark feuchtigkeitsabhängig. Unter trockenen Bedingungen entsteht zunächst Vaterit,

im weiteren Verlauf dominiert Aragonit. Ähnliche Ergebnisse beschreiben auch Stark und Ludwig [18] bei der Untersuchung von Betonen mit Portlandzement. Beim Frost-Tausalzangriff soll aber im Gegensatz zum Frostangriff (ohne Tausalz) ein Teil des Monosulfats unter Einwirkung des Chlorids in Friedelsches Salz umgesetzt werden. Das dabei frei werdende SO_3 kann sich mit verbliebenem Monosulfat zu sekundärem Ettringit umsetzen. Ein behindernder Einfluss durch CO_2 wurde bei dieser Reaktion bisher nicht beobachtet. Dies wird auf die geringe Löslichkeit von CO_2 in Chloridlösungen und die damit verbundene geringe Karbonatisierung zurückgeführt.

Insgesamt hat sich aus den Untersuchungen in [1] und aus der Sichtung des Stands der Technik zur Karbonatisierung und deren Einfluss auf Zement- und Betoneigenschaften, insbesondere des Frost-Tausalzwiderstands, eine Reihe von offenen Fragen ergeben. Die wichtigsten sind:

- Zeitlicher Verlauf der Karbonatphasenbildung
Die in [1] ermittelten Unterschiede bezüglich des Anteils an den verschiedenen $CaCO_3$ -Modifikationen in den untersuchten Betonen mit Portlandzement und Hochofenzement (mit unterschiedlichen Hüttensandgehalten) wurden jeweils nach einer Lagerungsdauer von 28 Tagen (entsprechend der Vorlagerungszeit zur Bestimmung des FTSW nach dem CDF-Test) festgestellt. Systematische Untersuchungen über die zeitabhängige Entwicklung der Karbonatphasen und ihre Stabilität im Zementstein bzw. Mörtel und Beton, insbesondere unter verschiedenen Lagerungsbedingungen, liegen bisher nicht vor. Es ist daher nach wie vor nicht geklärt, ob der chemische Einfluss auf den FTSW von Betonen zeit- und lagerungsabhängig ist und daher insbesondere unter den Prüfbedingungen

des CDF-Tests verstärkt in Erscheinung tritt.

- Chemischer Einfluss auf die Abwitterung
Es ist weiterhin unklar, wie groß der Anteil des chemischen Einflusses auf die Gesamtabwitterung eines Betons ist und welche bau-praktischen Konsequenzen sich daraus ergeben. Das betrifft sowohl Gefügeänderungen im Beton durch Karbonatisierung als auch eine mögliche Ausweitung der Bildung von sekundärem Ettringit auf die Dauerhaftigkeit, insbesondere von Betonen aus Hochofenzement mit unterschiedlichen Hüttensandgehalten.

3 Bildung von Karbonatphasen im Zementstein

3.1 Verwendete Zemente

Für die Untersuchungen an Zementstein und zur Herstellung der Laborbetone wurden fünf verschiedene Zemente verwendet und zwar ein Portlandzement (CEM I) und vier verschiedene Hochofenzemente (CEM III). Sowohl der CEM I als auch die vier CEM III enthielten Klinker eines Herstellers aus dem gleichen

Produktionszeitraum. Dies trifft auch auf den Hüttensand der Hochofenzemente zu.

Die Zemente unterschieden sich daher hauptsächlich im Hüttensandgehalt und in der Mahlfeinheit (Tafel 1).

Der CEM I hatte die geringste spezifische Oberfläche, der CEM III/B 42,5 N die größte spezifische Oberfläche und dementsprechend auch den größten Anteil feinerer Kornfraktionen. Die drei anderen Hochofenzemente wiesen eine etwa gleiche spezifische Oberfläche und Korngrößenverteilung auf.

Die physikalischen Eigenschaften der Zemente, wie Raumbeständigkeit, Wasseranspruch, Erstarrungsverhalten und Festigkeitsentwicklung nach DIN EN 196, das Ausbreitmaß sowie der dynamische E-Modul nach dem Grindosonic-Verfahren sind ebenfalls in Tafel 1 zusammengefasst. Die Zemente waren mit Dehnungen von 1 mm bis 2 mm (Grenzwert ≤ 10 mm) raumbeständig. Der Wasseranspruch der Hochofenzemente lag zwischen 30,5 % und 31,5 % und entsprach üblichen Werten für Hochofenzement. Das Ausbreitmaß lag zwischen 15,2 cm und 17,4 cm.

Tafel 1: Kennwerte der Zemente

Zement		CEM I 32,5 R	CEM III/A 32,5 N	CEM III/A 42,5 N	CEM III/B 32,5 N- NW/HS/NA	CEM III/B 42,5 N- NW/HS/NA
Hüttensandgehalt	M.-%	–	63	44	74	67
spez. Oberfläche	cm ² /g	3.100	3.910	4.040	4.040	4.630
Le Chatelier	mm	1,0	1,0	2,0	1,0	1,5
Wasseranspruch	%	28,0	30,5	31,5	30,5	31,5
Ausbreitmaß	cm	15,2	17,4	16,9	16,6	16,3
Erstarren Beginn Ende	h : min h : min	3 : 20 3 : 50	4 : 00 4 : 20	4 : 00 4 : 30	4 : 15 4 : 45	3 : 40 4 : 05
Druckfestigkeit						
2 d	N/mm ²	26,9	10,8	18,5	7,8	13,6
7 d	N/mm ²	40,4	28,9	34,9	26,7	34,8
28 d	N/mm ²	50,8	55,8	57,4	52,6	62,5
91 d	N/mm ²	58,9	64,5	66,8	61,9	71,3
Hydratationswärme nach 3 d	J/g	287	209	276	158	240

Der Portlandzement hatte mit 28,0 % zwar einen geringeren Wasseranspruch als die Hochofenzemente, unter Berücksichtigung seiner geringen spezifischen Oberfläche war dieser Wert jedoch relativ hoch. Dementsprechend war auch sein Ausbreitmaß gering. Die Erstarungszeiten der Zemente lagen zwischen drei und vier Stunden und wurden durch die Zusammensetzung und Feinheit beeinflusst. Auch die Festigkeiten entsprachen den bekannten Verläufen. Der größeren Anfangsfestigkeit des Portlandzements steht die Nacherhärtung der hüttensandhaltigen Zemente

gegenüber. Nach 28 Tagen hatte der Hochofenzement CEM III/B 32,5 N bereits eine etwas höhere Druckfestigkeit als der Portlandzement CEM I 32,5 R.

Die Entwicklung der Hydratationswärme wurde bis zu 72 Stunden mit einem Wärmeflusskalorimeter ermittelt. Dabei setzten der Portlandzement und der Hochofenzement mit der größeren Feinheit und dem geringeren Hüttensandanteil (CEM III/A 42,5 N) die höchsten Wärmemengen frei. Die Wärmeentwicklung ist in beiden Zementen sehr ähnlich. Mit deutlich geringerer Hydratationswärme folgen abgestuft die

Hochofenzemente CEM III/B 42,5 N, CEM III/A 32,5 N und CEM III/B 32,5 N.

3.2 Versuchsdurchführung

Für die Untersuchung der Karbonatphasenbildung in Abhängigkeit von der Zeit und der Zementart wurden Flachprismen 1 cm x 4 cm x 16 cm ohne Gesteinskörnung verwendet, um störende Einflüsse, insbesondere von Quarz, bei der Röntgenphasenanalyse zu vermeiden.

Die Herstellung der Flachprismen aus den fünf Zementen erfolgte mit dem bei der Bestimmung der Normsteife ermittelten Wasserbedarf. Die Lagerung erfolgte unter vier ver-

Tafel 2: Bildung von Karbonatphasen nach 28 und 360 Tagen in Abhängigkeit von der Lagerung

Zementart	28 Tage				360 Tage			
	Freilager	Labor	1 % CO ₂	3 % CO ₂	Freilager	Labor	1 % CO ₂	3 % CO ₂
CEM III/B 32,5 N								
Portlandit	X	X	X	X	(X)	(X)	*	*
Calcit	X	(X)	X	X	X	X	X	X
Vaterit	–	–	(X)	(X)	*	*	(X)	(X)
Aragonit	–	–	–	–	–	*	–	–
CEM III/B 42,5 N								
Portlandit	X	X	X	X	X	X	X	X
Calcit	(X)	(X)	X	X	X	X	X	X
Vaterit	–	–	*	*	*	*	*	*
Aragonit	–	–	–	–	–	–	–	–
CEM III/A 32,5 N								
Portlandit	X	X	X	X	X	X	X	(X)
Calcit	X	X	X	X	X	X	X	X
Vaterit	–	*	*	(X)	*	X	(X)	(X)
Aragonit	–	–	–	–	–	–	–	–
CEM III/A 42,5 N								
Portlandit	X	X	X	X	X	X	X	X
Calcit	(X)	(X)	X	X	X	(X)	(X)	X
Vaterit	*	*	*	(X)	*	*	(X)	*
Aragonit	–	–	–	–	–	–	–	–
CEM I 32,5 R								
Portlandit	X	X	X	X	X	X	X	X
Calcit	(X)	(X)	X	X	X	X	X	X
Vaterit	–	–	–	–	–	–	*	*
Aragonit	–	–	–	–	–	–	–	–

X = deutlich messbare Anteile, (X) = geringe Anteile, * = Spuren

schiedenen Bedingungen, und zwar bei

- 20 °C und 65 % r.F. im Laborklima
- 20 °C und 73 % r.F. mit CO₂-angereicherter Luft von 1 Vol.-%
- 0 °C und 73 % r.F. mit CO₂-angereicherter Luft von 3 Vol.-% und
- in frei bewitterter Umgebung (Freilager).

Um eine gleichmäßige relative Luftfeuchtigkeit bei konstantem CO₂-Gehalt sicherzustellen, wurden die Prüfkörper in abgeschlossenen Gasgefäßen in einem definierten Gasstrom gelagert. Der Gasstrom wurde befeuchtet und anschließend über ein Gemisch aus Ammoniumchlorid und Kaliumnitrat im Verhältnis von 1 : 1 geleitet. Dabei stellt sich eine relative Luftfeuchtigkeit von 73 % ein. Die CO₂-Konzentration von 1 Vol.-% bzw. 3 Vol.-% wurde durch Verwendung von geeichtem Prüfgas erreicht. Für die röntgendiffraktometrischen und rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen wurde nach 28, 56, 90, 180 und 360 Tagen sowie nach 720 Tagen jeweils ein Prisma entnommen und halbiert. An den anderen Prismenhälften wurde die Porengrößenverteilung ermittelt. Die Phasenzusammensetzung wurde zum einen an der Oberfläche der Proben mit einem STOE-Röntgendiffraktometer und zum anderen an Pulverpräparaten der karbonatisierten Schicht bestimmt.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Bildung der Karbonatphasen

Für die Karbonatisierung von Betonoberflächen ist normalerweise das Kohlenstoffdioxid der Luft verantwortlich. Der Grad der Karbonatisierung hängt wesentlich vom Feuchtigkeitszustand des Zementsteins ab. Relative Luftfeuchten der Umgebung etwa zwischen 50 % und 75 % begünstigen die Karbonatisierung. Unter 30 % wird sie vollständig verhindert, und bei

über 75 % läuft sie verzögert ab. Zunächst karbonatisiert das Ca(OH)₂, das bei der Hydratation der Calciumsilicate des Zements abgespalten wird. Später werden auch Ettringit und Calciumsilicathydrat karbonatisiert, so dass eine geschlossene Karbonatoberfläche entsteht.

Die Karbonatphasenbildung in Abhängigkeit von der Zeit und der Lagerungsart zeigt Tafel 2. Von den sechs Prüfterminen werden beispielhaft die Ergebnisse nach 28 und 360 Tagen wiedergegeben.

In allen Proben wird ausnahmslos bis zu 720 Tagen Calcit nachgewiesen. Vaterit wird in allen Hochofenzementen ab 90 Tage, bei höheren CO₂-Konzentrationen bereits nach 28 Tagen festgestellt, außerdem ab 28 Tagen bei Proben aus CEM III/A-Zementen, die im Labor und im Freilager. In Portlandzementprismen entsteht Vaterit dagegen erst nach 56 Tagen, und zwar nur bei Proben, die erhöhten CO₂-Konzentrationen ausgesetzt worden waren.

Allgemein kann festgestellt werden, dass mit erhöhter CO₂-Konzentration der Anteil an Vaterit tendenziell zunimmt. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu Untersuchungen, bei denen in Hochofenzementen bei

Lagerung in 1%iger CO₂-Atmosphäre nur Aragonit und kein Vaterit nachgewiesen wurde [19]. Aragonit ist bei den im Freien gelagerten Proben nicht nachweisbar. Geringe Mengen konnten nur in einzelnen Proben nach längerer Lagerung im Laborklima oder bei höheren CO₂-Konzentrationen bei Hochofenzementen der Festigkeitsklasse 32,5 festgestellt werden.

3.3.2 Kapillarporosität

Gleichzeitig zur Bestimmung der Karbonatphasen wurde die Veränderung der Porosität und der Porengrößenverteilung gemessen. Es zeigte sich der bekannte Zusammenhang, dass Zementstein aus hütten-sandhaltigen Zementen im Vergleich zu Zementstein aus Portlandzement eine deutlich niedrigere Kapillarporosität aufweist (Bild 1). Der Porenanteil über 30 nm nahm mit steigendem Hütten sandgehalt deutlich ab. Während Prismen aus Portlandzement im Freilager zwischen 28 und 180 Tagen nur einen Rückgang der Kapillarporosität von etwa 7 % aufwiesen, betrug der Rückgang bei den Prüfkörpern aus den Hochofenzementen zwischen 16 % und 21 %. Die absoluten Porenanteile über 30 nm lagen bei den Prismen aus Portlandzement im Ausgangszu-

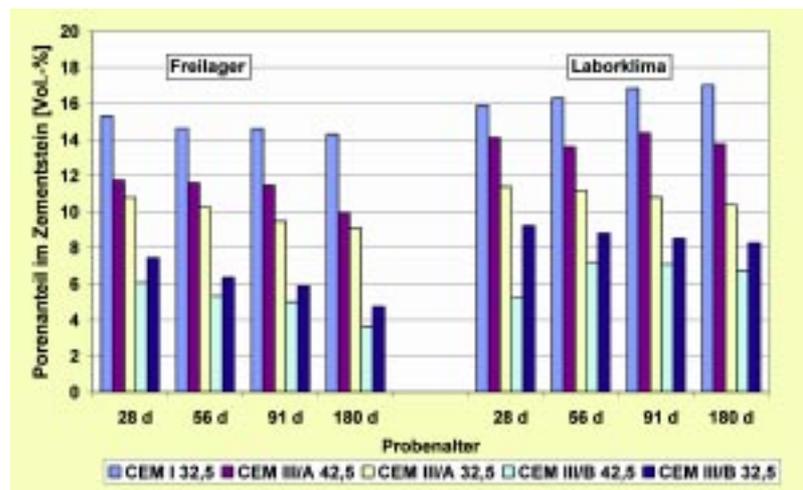


Bild 1: Porenanteile > 30 nm in Abhängigkeit von Zementart, Alter und Lagerung

stand von 28 Tagen bei etwas über 15 Vol.-%. Bei Proben, die im Labor-klima lagerten, lag die Kapillarporosität in allen Proben über der von im Freien gelagerten Proben. In den Proben aus Portlandzement stieg sie sogar bis zu 360 Tagen weiter an, bei den hüttensandhaltigen Zementen blieb sie dagegen nahezu unverändert oder nahm geringfügig ab.

Die Proben, die in CO₂-angereicherter Atmosphäre lagerten, zeigten bei den verschiedenen Lagerungsbedingungen und zu den unterschiedlichen Prüfterminen stets die geringste Kapillarporosität. Sie lag zwischen 4 Vol.-% und 10 Vol.-%.

4. Karbonatphasen im Beton und Frost-Tausalz-widerstand

4.1 Herstellung und Eigenschaften der Betone

Für die Betonherstellung wurden die gleichen Zemente wie zur Herstellung der Zementsteinprismen verwendet. Der Zementgehalt betrug einheitlich 340 kg/m³, der w/z-Wert = 0,50. Die Gesteinskörnung bestand aus Rheinsand/-kies der Sieblinie A/B 16. Alle Betone enthielten Luftporenbildner.

Die Frischbetonkennwerte (Tafel 3) wurden nach DIN 1048 [20] bestimmt.

Die Prüfung der Festbetoneigenschaften wurde nach DIN 1048-5 [21] durchgeführt. Die Ergebnisse der Rohdichte und der Druckfestigkeiten nach 2, 7 und 28 Tagen sind in Tafel 4 zusammengestellt. Die für die Expositions-kategorie XF4 geforderte Mindestfestigkeitsklasse C 30/37 wird mit Ausnahme von Beton mit dem Hochofenzement CEM III/B 32,5 N von allen Betonen erreicht.

Die Karbonatisierungstiefe wurde an Betonbalken mit den Maßen 10 cm x 10 cm x 50 cm gemessen (Tafel 5). Die Untersuchungen bestätigten, dass im Laborklima (LK) im Vergleich

Tafel 3: Frischbetonkennwerte

Zement		CEM I 32,5 R	CEM III/A 42,5 N	CEM III/A 32,5 N	CEM III/B 42,5 N-NW/HS/NA	CEM III/B 32,5 N-NW/HS/NA
Ausbreitmaß	cm	46	39	41	42	35
Konsistenz		KR	KP	KP	KR	KP
Rohdichte	kg/dm ³	2,329	2,276	2,260	2,337	2,293
Luftgehalt	Vol.-%	4,3	5,8	5,8	4,3	5,6

Tafel 4: Festbetonroh-dichte und Druckfestigkeit

Zement		CEM I 32,5 R	CEM III/A 42,5 N	CEM III/A 32,5 N	CEM III/B 42,5 N-NW/HS/NA	CEM III/B 32,5 N-NW/HS/NA
Rohdichte	kg/dm ³	2,340	2,321	2,289	2,276	2,280
Druckfestigkeit						
2 d	N/mm ²	24,7	16,9	9,5	10,3	7,8
7 d	N/mm ²	33,1	31,5	32,0	30,5	21,9
28 d	N/mm ²	47,3	48,8	39,4	51,6	35,4

Tafel 5: Karbonatisierungstiefen der Betone in Abhängigkeit von Zementart, Alter und Lagerung

Zement		CEM I 32,5 R		CEM III/A 42,5 N		CEM III/A 32,5 N		CEM III/B 42,5 N-NW/HS/NA		CEM III/B 32,5 N-NW/HS/NA	
Alter		LK	FL	LK	FL	LK	FL	LK	FL	LK	FL
28 d	mm	0,8	0	–	–	2,0	0	0,8	< 0,5	2,0	1,0
90 d	mm	1,5	0,3	1,8	0,3	3,1	0,8	1,2	0,2	2,4	1,2
180 d	mm	2,2	0,5	2,0	0,5	4,1	2,0	1,6	0,2	4,9	1,8
360 d	mm	3,5	1,7	3,8	2,4	7,4	2,8	–	–	6,8	2,9

LK = Klimaraum, FL = freie Bewitterung

zur praxisnahen Lagerung im Freien (FL) die Karbonatisierung wesentlich schneller voranschreitet. Aufgrund der höheren Feinheit des Zements und der besonders niedrigen Kapillarporosität des Betons stieg mit zunehmendem Hütten sandgehalt die Karbonatisierungstiefe tendenziell an, mit Ausnahme des Betons mit dem CEM III/B 42,5 N-NW/HS/NA.

4.2 Frost-Tausalz widerstand

Die Betone wurden sowohl nach CDF-Prüfvorschrift [22] gelagert als auch ein Jahr im Freilager der Witte rung ausgesetzt. Die Abwitterungen der Laborbetone sind in Bild 2 wieder gegeben. Der Beton aus dem Portlandzement CEM I hatte nach 28 Frost-Tauwechseln die größte Abwitterung. Bei Eignungsprüfungen mit diesem Zement für eine Großbaustelle wurden ebenfalls hohe Abwitterungen gemessen. Dieses Verhalten ist sicherlich nicht typisch für diese Zementart, bestätigte sich aber in diesem Fall auch bei einer Wiederholungsmessung.

Für die Hochofenzemente wurde der gleiche Klinker wie für den Portlandzement verwendet. Augenfällig erscheint das ungünstigere Abwitterungsverhalten des Betons mit Hochofenzement CEM III/A 32,5 N im Vergleich zu dem Beton mit Hochofenzement CEM III/B 32,5 N. Beide Betone hatten nach 28 Tagen Lagerung im Laborklima die gleiche Karbonatisierungstiefe von 2,0 mm (Tafel 5), die etwa einer Abwitte-

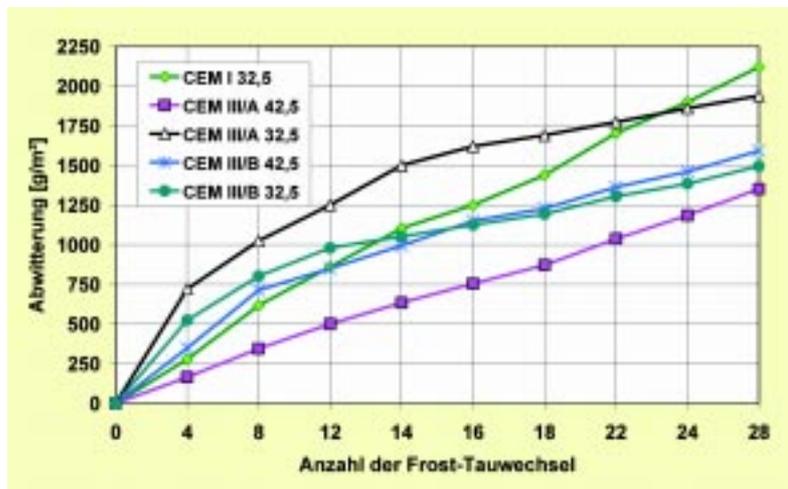


Bild 2: Abwitterungen bei den Laborbetonen (CDF-Verfahren)

rungsmenge von 4.500 g/m² entsprechen. Sowohl der Beton mit dem CEM III/B 32,5 N mit 1.500 g/m² als auch der Beton mit dem CEM II/A 32,5 N mit 1.900 g/m² (Bild 2) liegen deutlich unterhalb dieses Wertes, was bedeutet, dass der karbonatisierte Bereich nicht vollständig abgewittert ist.

Das große Angebot an Ca(OH)₂ führte bei dem Portlandzement auch zu einem hohen Gehalt an Calciumkarbonat CaCO₃ in der karbonatisierten Schicht. Diese Schicht war nach 28 Tagen Lagerung im Klimaraum mit 0,8 mm (Tafel 5) zwar sehr dünn und entsprach einer Abwitterungsmenge von etwa 1.500 g/m², die tatsächliche Abwitterung betrug dagegen jedoch etwa 2.150 g/m² (Bild 2).

Aus Tafel 6 geht hervor, dass die Menge an CO₂ im abgewitterten Bereich mit dem Hütten sandgehalt und der Anzahl der Frost-Tauwechsel (FTW) sinkt. Je höher der Hütten sandgehalt im Zement ist, desto weniger Ca(OH)₂ steht für die Karbonatisierung zur Verfügung und umso geringer ist auch der Gehalt an CO₂ in der Anfangsphase der Abwitterung. Mit steigender Anzahl der FTW und somit fortschreitender Abwitterung werden Schichten im Beton freigelegt, die noch nicht vollständig karbonatisiert sind. Im Fall des CEM I geht die Abwitterung sogar bis in den nicht karbonatisierten Bereich hinein (vgl. auch Abschnitt 2, [6]). Dadurch gleichen sich die Werte mit zunehmender Anzahl an FTW immer mehr an. Geringe Mengen an CO₂ sind immer vorhanden.

Tafel 6: Gehalt an CO₂ im Salzsäure(HCl)-Löslichen der Betonabwitterung (Masseanteile in %)

FTW	CEM I 32,5 R	CEM III/A 42,5 N	CEM III/A 32,5 N	CEM III/B 42,5 N	CEM III/B 32,5 N
4	30,0	19,6	13,1	14,8	10,1
8	11,3	11,5	8,6	9,6	7,7
14	9,6	7,3	6,2	7,3	6,5
18	8,5	7,9	5,6	6,0	5,8
22	8,8	7,0	5,9	5,1	6,0
28	4,3	6,8	5,7	5,2	5,0
HS-Gehalt	-	44	63	67	74

Tafel 7: Betonzusammensetzungen für die Kläranlage „Emschermündung“

Bauteil		Vorklärbecken Belebungsbecken Voreindicker	Nachklärbecken
Betonfestigkeits- klasse besondere Eigenschaften Konsistenz		B 300 Wasserundurch- lässigkeit KP	B 300 Wasserundurch- lässigkeit KP
Zementart und Festigkeitsklasse Zementgehalt	kg/m ³	HOZ 275 300	HOZ 350 300
Wassergehalt w/z-Wert	kg/m ³	137 0,46	135 0,45
Gesteinskörnung Sieblinie		U 30	A/B 32
Sand 0/3	kg/m ³	725	
Kies 7/30	kg/m ³	1.215	
Sand 0/2	kg/m ³		650
Kies 8/16	kg/m ³		765
Kies 16/32	kg/m ³		495
Gehalt	kg/m ³	1.940	1.910
Zusatzstoff Art Gehalt	kg/m ³	Steinkohlen- flugasche 20	Steinkohlen- flugasche 50
Zusatzmittel Art Gehalt	l/m ³	–	BV 0,30

Die etwas höheren Werte in der Anfangsphase der Befrostung beim Hochofenzement CEM III/B 42,5 N sind wahrscheinlich auf den höheren Hydratationsfortschritt des sehr feinen CEM III/B 42,5 N gegenüber dem CEM III/B 32,5 N zurückzuführen.

4.3 Karbonatphasen in der Betonrandzone

Von der Betonoberfläche wurde – soweit möglich – die karbonatisierte Oberfläche abgetragen und auf ihrer Phasenbestand röntgendiffraktometrisch untersucht. Die Probenkörper lagerten sowohl im Klima-

raum als auch im Freien unter Dach. Aragonit wurde zu keinem Zeitpunkt bei den verschiedenen Lagerungsarten nachgewiesen. Vaterit konnte dagegen in allen Betonen, unabhängig von der Zementart, also auch im Beton mit Portlandzement, mit zunehmendem Alter in zunehmendem Maße nachgewiesen werden.

5 Untersuchungen an Bauwerksbetonen

5.1 Alte Bauwerke

5.1.1 Kläranlage „Emschermündung“

Die Grundsteinlegung zur größten Kläranlage Europas an der Emschermündung bei Dinslaken erfolgte am 1. Dezember 1966. Ab 1974 waren wesentliche Teile der Anlage in Betrieb, so dass der Beton zum Zeitpunkt der Probenahme etwa 25 Jahre unter Praxisbedingungen betrieblich belastet war. Hinzu kommen für verschiedene Bauabschnitte noch einige Jahre „natürlicher Beanspruchung“ (Frost-Tauwechsel, Karbonatisierung) durch Bewitterung ohne Beaufschlagung durch Abwässer. Für den überwiegenden Teil der Betone, die als wasserundurchlässige Betone ausgeschrieben waren (auch für die Vorklärbecken und Voreindicker), wurde die Zusammensetzung I, für die später errichteten Nachklärbecken die Zusammensetzung II verwendet [23, 24] (Tafel 7).

Für die Untersuchungen wurden Bohrkern (150 mm Ø) entnommen

Tafel 8: Ergebnisse der Prüfung 25 Jahre alter Betone der Kläranlage Emschermündung

Bauwerk		Vorklärbecken	Voreindicker, über Wasser	Voreindicker, unter Wasser
Karbonatisierungstiefe	mm	8,6	7,6	1,2
Abwitterung nach 28 FTW	g/m ²	4.350	5.350	2.120
Abwitterung nach 56 FTW	g/m ²	8.200	7.770	2.490
abgewitterte Schichtdicke nach 28 FTW	mm	2,0	2,5	1,0
abgewitterte Schichtdicke nach 56 FTW	mm	3,8	3,6	1,2
Lösungsaufnahme beim kapillaren Saugen				
Spannweite	g	21-34	32-39	9-11
Mittelwert	g	27	35	10

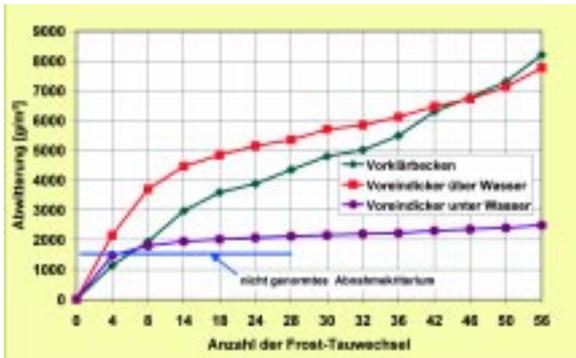


Bild 3: Abwitterungsverlauf von Bohrkernen von 25 Jahre alten Betonen der Kläranlage Emschermündung (CDF-Verfahren)

und zwar aus dem Vorklärbecken über Wasser (Übergangsbereich zur Wasser-Wechsel-Zone) und aus dem Voreindicker sowohl unter Wasser als auch über Wasser. Der Voreindicker war zum Zeitpunkt der Probenahme bereits seit einiger Zeit außer Betrieb, so dass dieser nachträglich karbonatisieren konnte. **Tafel 8** enthält eine Zusammenstellung unterschiedlicher Prüfergebnisse. Die nach CDF-Prüfvorschrift festgelegten 28 FTW zur Bestimmung des Frost-Tausalz widerstands wurden auf 56 FTW ausgedehnt. Die Bohrkern aus dem Voreindicker, der sich während der Betriebszeit meist unter Wasser befand, wiesen mit 1,2 mm nach 25 Jahren eine sehr geringe Karbonatisierungstiefe auf. Die aus dem Überwasserbereich des Vorklärbeckens und des Voreindickers entnommenen Bohrkern wiesen nach 25 Jahren mit etwa 8 mm eine Karbonatisierungstiefe auf, die bei den in Abschnitt 4 beschriebenen Betonen bereits nach einem Jahr Lagerung im Klimaraum gemessen wurden!

Die abgewitterte Schichtdicke der Bohrkern „Voreindicker unter Wasser“ entspricht der karbonatisierten Schicht. Der Abwitterungsverlauf (**Bild 3**) entspricht den Erfahrungen an Laborbetonen, d.h., bei Verwendung hüttensandreicher Zemente wittert innerhalb weniger FTW die karbonatisierte Schicht ab. Danach

zeigte der Beton mit hüttensandreichem Zement nur noch eine sehr geringe Abwitterung. Bei den beiden anderen Prüfreiheiten ist dies nicht der Fall. Nach 28 FTW ist nur etwa $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ der karbonatisierten Schicht abgewittert, demzufolge blieb die Abwitterungsrate bis zum Ende der Prüfung nach 56 FTW hoch. Der Beton aus dem Bereich des Voreindickers über Wasser wies trotzdem eine stärkere Anfangsabwitterung auf. Selbst nach 56 FTW, also der doppelten Anzahl gegenüber der Regelanforderung, war nur etwa die Hälfte der karbonatisierten Schicht abgewittert.

Im abgewitterten Beton wurden zu jedem Prüftermin der Gehalt an CO_2 und der unlösliche Rückstand bestimmt, da mit zunehmender Abwitterung der Anteil an HCl-Unlöslichem durch das Herauslösen von Zuschlägen zunimmt. Der CO_2 -Gehalt wurde auf den löslichen HCl-Gehalt bezogen, um eine ein-

heitliche Bezugsbasis zu besitzen (**Tafel 9**).

Das Verhalten der Betone dieser drei Prüfserien bezüglich der inneren Schädigung zeigt **Bild 4**. Nach 28 FTW liegt der mittlere Abfall des dynamischen E-Moduls für die drei Prüfserien bei etwa -2 % und somit deutlich unterhalb des in der ZTV-W [25] festgelegten Grenzwerts von -25 %.

Bei längerer Prüfdauer findet zwar eine Differenzierung zwischen den drei Betonen statt, aber selbst nach einer Verdopplung der Prüfdauer wird der genannte Grenzwert nicht überschritten. Bemerkenswert ist insbesondere das unterschiedliche Verhalten der Proben aus dem Voreindicker über und unter Wasser etwa ab dem 36. FTW. Dies deutet darauf hin, dass die innere Schädigung bei gleicher Betonzusammensetzung offensichtlich erheblich durch die Vorlagerung beeinflusst wird.

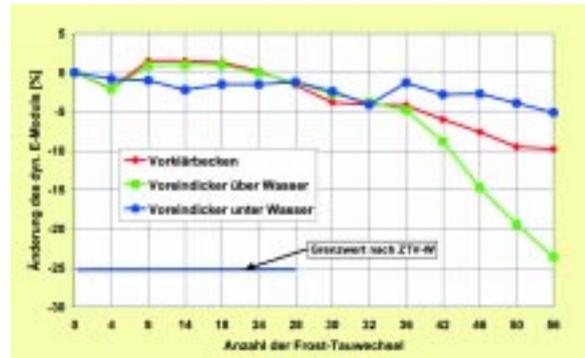


Bild 4: Abnahme des dynamischen Elastizitätsmoduls im Verlauf der Frost-Tauwechsel

Tafel 9: CO_2 -Gehalt im Salzsäure(HCl)-Löslichen im abgewitterten Beton (Masseanteile in %)

Anzahl der Frost-Tauwechsel	Vorklärbecken	Voreindicker, über Wasser	Voreindicker, unter Wasser
4	12,3	11,9	13,1
14	11,8	11,0	11,4
28	9,7	7,6	6,4
56	6,2	5,3	5,8

Tafel 10: Betonzusammensetzung für die Kläranlage „Alte Emscher“

Betonfestigkeitsklasse besondere Eigenschaften Konsistenz		B 25 Wasserundurchlässigkeit KP
Zementart und Festigkeitsklasse Zementgehalt	kg/m ³	HOZ 35L 300
Wassergehalt w/z-Wert	kg/m ³	135 0,45
Gesteinskörnung Sieblinie		A/B 32
Sand 0/3	kg/m ³	694
Kies 7/30	kg/m ³	773
Kies 16/32	kg/m ³	463
Gehalt	kg/m ³	1.930
Zusatzstoff Art		Steinkohlen- flugasche
Gehalt	kg/m ³	50
Zusatzmittel Art		BV
Gehalt	l/m ³	1,2

Tafel 11: Ergebnisse der Prüfung von Betonbohrkernen aus der Kläranlage „Alte Emscher“

		Belebungsbecken
Karbonatisierungstiefe	mm	8,6
Abwitterung nach 28 FTW	g/m ²	8.050
abgewitterte Schichtdicke nach 28 FTW	mm	3,7
Lösungsaufnahme beim kapillaren Saugen		
Spannweite	g	21-28
Mittelwert	g	25

5.1.2 Kläranlage „Alte Emscher“

Mit dem Bau der Kläranlage „Alte Emscher“ in Duisburg wurde im November 1983, mit dem Probebetrieb im September 1988 begon-

nen [26]. Die Betonzusammensetzung (Tafel 10), entspricht im Wesentlichen der bereits beim Bau der Kläranlage Emschermündung und anderen Kläranlagenbauten der

Emschergenossenschaft seit über 20 Jahren bewährten Zusammensetzung mit 300 kg Hochofenzement und einer Sieblinie mit Ausfallkörnung, wodurch der Zementleimgehalt bei gleich bleibend guter Verarbeitbarkeit des Frischbetons deutlich verringert werden kann. Der Mörtelanteil bis 2 mm (Zement + Wasser + Zusatzstoff + Sand 0/2) war auf 520 l/m³ Beton begrenzt. Die Druckfestigkeit nach 28 Tagen betrug 43 N/mm².

Aus einem der drei Belebungsbecken wurden nach über 10-jährigem Betrieb Bohrkerne mit einem Durchmesser von 150 mm gezogen und wie die Proben in Abschnitt 5.1.1 geprüft. Einige Ergebnisse zeigt Tafel 11.

Wie bei den vorangegangenen Betonprüfungen wurde der CO₂-Gehalt bestimmt und ebenfalls auf den Anteil an HCl-Löslichem bezogen. Bei 4 FTW betrug der CO₂-Gehalt 6,25 %, bei 28 FTW immer noch 4,7 %. Damit bestätigte sich auch bei diesen Prüfungen, dass nach 28 FTW die karbonatisierte Schicht noch nicht abgewittert war. Das erklärt auch den relativ kontinuierlichen Anstieg der Abwitterung in Bild 5. Während bei den Laborbetonen mit hüttensandreicherem Zement die karbonatisierte Schicht innerhalb weniger FTW abwitterte, zeigte sich dies bei den aus älteren Bauwerken entnommenen Proben nicht in gleicher Weise.

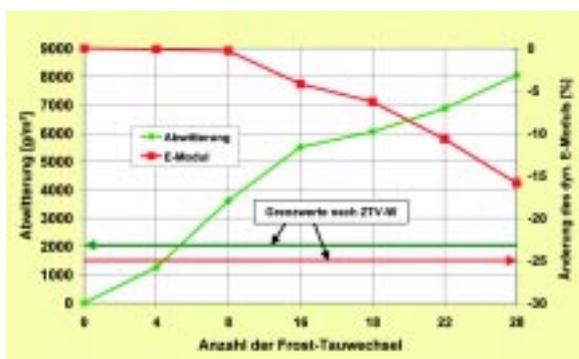


Bild 5: Abwitterung und Änderung des dynamischen E-Moduls im Verlauf von 28 FTW (CDF-Verfahren)

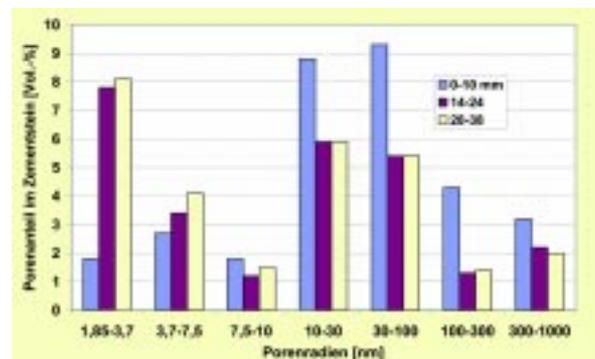


Bild 6: Porengrößenverteilung im „Altbeton“ der Kläranlage „Alte Emscher“

Der Rückgang des dynamischen E-Moduls beträgt etwa 15 %.

Mittels Quecksilberdruckporosimetrie wurde die Porengrößenverteilung im Randbereich (bis 10 mm von der Betonoberfläche) sowie in den Bereichen 14 mm bis 24 mm und 28 mm bis 38 mm von der Betonoberfläche bestimmt (Bild 6). Der im Wesentlichen karbonatisierte Randbereich (Karbonatisierungstiefe 8,6 mm) hatte im Vergleich zum nicht karbonatisierten Bereich eine deutlich höhere Kapillarporosität. Unberücksichtigt blieb dabei, ob es bereits nach dem Betoneinbau eine unterschiedliche Porengrößenverteilung zwischen Rand- und Kernbeton aufgrund von Schalungs-, Verdichtungs- oder Nachbehandlungseinflüssen gegeben hat. Dies ist im Nachhinein nicht mehr feststellbar. Die beiden tiefer liegenden Schichten zeigten praktisch keine Unterschiede der Porengrößenverteilung.

Bemerkenswert ist, dass diese Porengrößenverteilung in etwa derjenigen

der neuen Kläranlagenbetone (siehe 5.2.1) nach 360 Tagen Lagerung im Freien entspricht. Die Karbonatisierungstiefe dieser Betone beträgt nur etwa 2 mm. Wenn mit der Karbonatisierung der HOZ-Betone eine Vergrößerung der Porenstruktur verbunden ist, dann lässt sich aus den Ergebnissen schlussfolgern, dass der alte Kläranlagenbeton eine kapillarporenärmere Randschicht besessen hat als die hier untersuchten neuen Kläranlagenbetone.

5.2 Neue Bauwerke

Beim Bau zweier neuer Kläranlagen wurden während des Betoneinbaus zusätzliche Betonwürfel und -balken hergestellt. Die Probekörper blieben 2 Tage in der Form und wurden anschließend 5 Tage unter Wasser nach DIN 1048-1 gelagert. Ein Teil der Probekörper wurde bis zum 28. Tag im Klimaraum bei 20 °C/65 % r.F. bei einer mittleren Verdunstungsrate von 47 g/h·m² gelagert und anschließend gemäß CDF-Prüfvorschrift weiterbehandelt und der

Frost-Tausalzwiderstand geprüft. Die übrigen Probekörper wurden ein Jahr gemäß den nachfolgend angegebenen vier verschiedenen Arten gelagert:

- im Labor bei 20 °C unter Wasser
- im Klimaraum bei 20 °C/65 % r.F.
- im Freien unter Dach
- im Freien bewittert

Nach 28, 90, 180 und 360 Tagen wurden das chemisch gebundene Wasser und die Karbonatisierungstiefe sowie nach 2, 7, 28, 56 und 91 Tagen die Druckfestigkeit bestimmt.

5.2.1 Kläranlage A

Beim Bau des Nachklärbeckens dieser Kläranlage wurde Beton sowohl beim Betonieren des Boden- (Sohl-) als auch des Wandbereichs entnommen. Die Herstellung der Bodenplatte erfolgte im Juni, die der Wand im August. Die wesentlichen Anforderungen an diesen Beton und seine Zusammensetzung enthält **Tafel 12**. Anforderungen in Zusammenhang mit hohem oder sehr hohem Frost-Tausalzwiderstand gemäß DIN 1045 wurden an diesen Beton nicht gestellt. Trotzdem wurde die Prüfung dieser Eigenschaften in die Untersuchungen einbezogen, da die Zusammensetzung den Anforderungen der Kläranlagennorm DIN 19569 weitgehend entspricht. Ähnliche Betonzusammensetzungen wurden bereits für Kläranlagen verwendet, allerdings mit niedrigeren w/z-Werten (etwa 0,45 ohne Flugasche bzw. wenn mit Flugasche, dann mit deutlich geringeren Zugaben) [27].

Tafel 12: Betonzusammensetzung für ein Nachklärbecken in Kläranlage A

Betonfestigkeitsklasse besondere Eigenschaften		„B 35“ ¹⁾ Wasserundurchlässigkeit hoher Frostwiderstand hoher Widerstand gegen starken chemischen Angriff KR
Konsistenz		
Zementart und Festigkeitsklasse Zementgehalt z	kg/m ³	CEM III/B 32,5 N-NW/HS 330
Wassergehalt w/z-Wert w/(z+0,4f)-Wert	kg/m ³	170 0,52 0,48
Gesteinskörnung Vorkommen Sieblinie Gehalt Feinstkorngehalt (< 0,125 mm)	kg/m ³ kg/m ³	Rheinsand/-kies A/B 32 1.789 18
Zusatzstoff Art Gehalt	kg/m ³	Steinkohlenflugasche 60
Zusatzmittel Art Gehalt	in % v.z	BV 0,30

¹⁾ nach 56 Tagen in der Eignungsprüfung 45 N/mm² nachzuweisen

Tafel 13: Frisch- und Festbetoneigenschaften

Betontemperatur	°C	17
Ausbreitmaß	cm	48
Frischbetonrohddichte	kg/dm ³	2,37
Druckfestigkeit		
2 d	N/mm ²	7
7 d	N/mm ²	18
28 d	N/mm ²	36
91 d	N/mm ²	46

Tafel 14: Karbonatisierungstiefe von Beton A in Abhängigkeit von der Lagerungsart (in mm)

Lagerungsart	28 d	90 d	180 d	360 d
Klimaraum	2,1	4,4	7,3	9,1
im Freien unter Dach	0,6	1,6	2,0	4,6
frei bewittert	0,6	1,0	1,0	1,8

Tafel 15: Relative Karbonatisierungstiefe, mittlere relative Gewichtszunahme nach dem kapillaren Saugen und relative Abwitterungsmenge des Betons A im Alter von 1 Jahr in Abhängigkeit von der Lagerungsart (frei bewittert = 1)

Parameter	Klimaraum	im Freien unter Dach	frei bewittert
relative Karbonatisierungstiefe	5,1	2,6	1
relative Gewichtszunahme	5,2	2,5	1
relative Abwitterung nach 14 FTW	8,3	2,5	1

Die wichtigsten Frisch- und Festbetonkennwerte des Betons enthält Tafel 13.

Die Karbonatisierungstiefen in Abhängigkeit von Lagerungsdauer und Lagerungsart zeigt Tafel 14. Auch diese Ergebnisse belegen die sehr starke Karbonatisierung im Labor-klima im Vergleich zu den frei bewitterten Betonen oder auch denen, die im Freien unter Dach vor unmittelbarem Feuchtigkeitseinfluss geschützt lagerten.

Wird die Karbonatisierungstiefe der frei bewitterten Betonbalken gleich 1 gesetzt, so ergeben sich nach einem Jahr Lagerung die folgenden relativen Karbonatisierungswerte:

$$x_{\text{ungeschützt}} : x_{\text{geschützt}} : x_{\text{Labor}} = 1 : 2,1 : 4,3$$

Nach Wierig und Locher gelten für ein Jahr gelagerte Betone:

$$x_{\text{ungeschützt}} : x_{\text{geschützt}} : x_{\text{Labor}} = 1 : 1,6 : 2$$

(Wierig)

$$x_{\text{ungeschützt}} : x_{\text{geschützt}} : x_{\text{Labor}} = 1 : 3,5 : 5$$

(Locher)

Die eigenen Messwerte liegen zwischen den von Wierig und Locher angegebenen Werten. Die Ergebnisse sind in starkem Maß vom w/z-Wert abhängig. Prüfungen an Hochleistungsbetonen mit CEM III zeigten nach einer dreijährigen Lagerung Karbonatisierungstiefen, die maximal 0,4 mm erreichten [28].

Die Porengrößenverteilung wird bereits nach nur 28 tägiger Lagerung erheblich von der Lagerungsart beeinflusst (Bild 7). Die Doppelbestimmungen in der Betonrandzone (bis 10 mm von der Betonoberfläche) zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der Messergebnisse für die drei Lagerungsarten. Die erhöhte Karbonatisierung im Klimaraum findet in den Werten der Porengrößenverteilung ihren Niederschlag. Bei der Außenlagerung, wenn die Proben direkt der Witterung ausgesetzt sind, beträgt die Kapillarporosität (30 bis 100 nm) nur etwa 9 %, nach Lagerung im Klimaraum über 14 %.

Im Bild 8 sind die Veränderungen der Porengrößenverteilungen, abhängig von Alter und Lagerungsart, zusammengefasst. Für die Beurteilung des Frost-Tausalzwidehrstands nach dem CDF-Verfahren ist die Lagerung nach 28 Tagen im Klimaraum maßgebend. Im Vergleich zur Lagerung im Freien haben die Probekörper aus dem Klimaraum eine etwa 5 % höhere Kapillarporosität im Randbereich.

Neben einer größeren Karbonatisierungstiefe führt die praxisfremde Lagerung im Labor auch zu einer ungünstigeren Porenstruktur, die zu einem verstärkten Frost-Tausalzangriff und somit zu höheren Abwitterungen beiträgt. Diese Unterschiede erklären auch das widersprüchliche Verhalten zwischen dem ungünstigen Performance-Verhalten

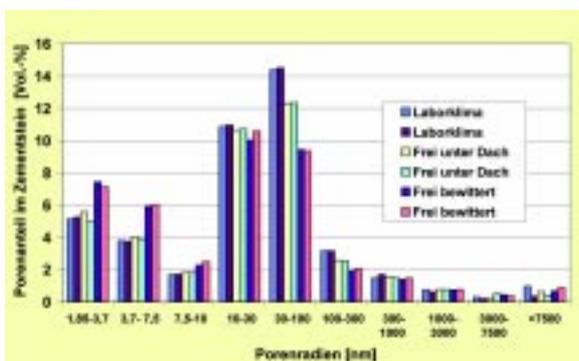


Bild 7: Porengrößenverteilung in Kläranlagenbeton A im Alter von 28 Tagen in Abhängigkeit von der Lagerungsart

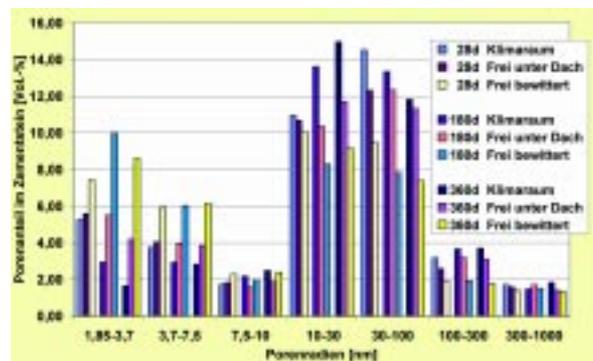


Bild 8: Änderung der Porengrößenverteilung in Kläranlagenbeton A in Abhängigkeit von Alter und Lagerungsart

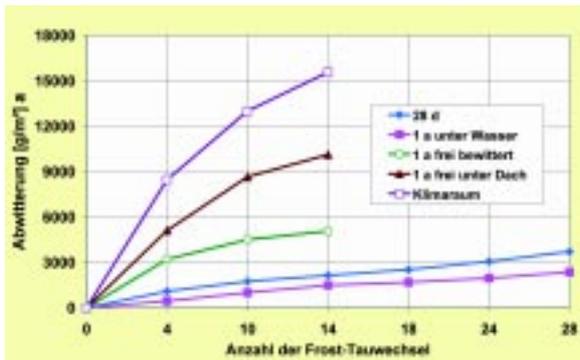


Bild 9: Abwitterungen von 1 Jahr alten, unterschiedlich gelagerten Proben von Beton A im Vergleich zum Beton, gelagert gemäß CDF-Prüfvorschrift

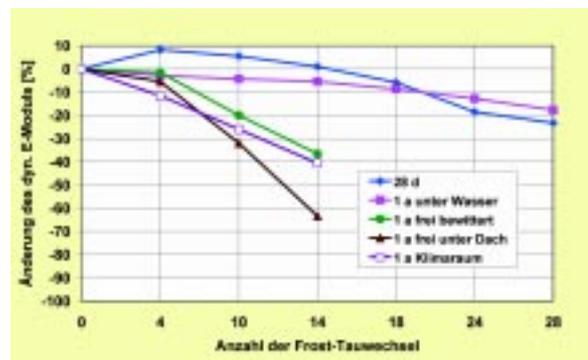


Bild 10: Änderung des dynamischen E-Moduls von 1 Jahr alten, unterschiedlich gelagerten Proben von Beton A im Vergleich zum Beton, gelagert gemäß CDF-Prüfvorschrift

im Laborversuch und den positiven Erfahrungen in der Praxis.

Wie bereits bei der Untersuchung an Zementstein konnte auch in der Randzone der Betone kein Aragonit nachgewiesen werden. Im Beton der Bodenplatte wurden höhere Gehalte an Vaterit als im Beton aus der Wand festgestellt, obwohl beide Betone mit gleicher Zusammensetzung und mit gleichen Ausgangsstoffen hergestellt worden waren. Die Lagerung im Klimaraum begünstigt die Vateritbildung im Vergleich zur Lagerung im Freien.

In Tafel 15 sind für die verschiedenen Lagerungsarten die relativen Karbonatisierungstiefen, die relativen Gewichtszunahmen während des kapillaren Saugens sowie die relativen Abwitterungsmengen aufgeführt, bezogen auf die nach einjähriger Lagerung im Freien ermittelten Werte. Dabei zeigte sich, dass die relativen Werte für die drei Parameter sehr ähnlich sind. Im Rahmen dieser Untersuchungen folgt daraus, dass, unabhängig vom jeweils gemessenen Parameter in Tafel 15, das Verhältnis zwischen freier Bewitterung und jeweils anderer Lagerungsart für alle Parameter in etwa gleich ist.

Die Abwitterung der Betone hängt in sehr starkem Maß von der Lagerungsart ab. In Bild 9 sind den Abwitterungswerten der gemäß

CDF-Prüfvorschrift gelagerten Probekörper (28 Tage) die Abwitterungswerte der ein Jahr gelagerten Probekörper gegenübergestellt. Erwartungsgemäß verminderte sich aufgrund höherer Hydratationsgrade und kaum messbarer Karbonatisierung die Abwitterungsrate der unter Wasser gelagerten Probekörper. Für die übrigen drei Lagerungsarten steigt die Abwitterung stark an, so dass nach 14 FTW die Untersuchungen abgebrochen wurden. Die frei bewitterten Probekörper wiesen aber gegenüber der Klimaraumlagerung nur etwa 30 % der Abwitterungsmenge auf. Außerdem war bei den frei bewitterten Proben die erhöhte Anfangsabwitterung abgeschlossen, d.h., der weitere Anstieg der Abwitterung verläuft parallel zu den 28 Tage alten Proben bzw. zu den ein Jahr unter Wasser gelagerten Proben.

Die Änderungen des E-Moduls der unterschiedlich gelagerten Probekörper aus dem Beton der Sohlplatte zeigt Bild 10. Die 28 Tage im Klimaraum und die ein Jahr unter Wasser gelagerten Probekörper zeigen mit 25 % nur einen mäßigen Abfall des dynamischen E-Moduls. Die übrigen Probekörper weisen bereits nach wenigen Frost-Tauwechseln einen sehr starken Abfall des E-Moduls auf.

Das Verhalten dieses Betons bezüglich der inneren Schädigung ist vergleichbar mit dem Beton aus dem

Voreindicker der Kläranlage „Em-schermündung“. Die Proben unter Wasser zeigen nur geringe E-Moduländerungen, während die Proben über Wasser bzw. die relativ trocken gelagerten Proben einen starken Abfall des E-Moduls zeigen.

Der Zeitpunkt des Auftretens einer starken inneren Schädigung beruht auf dem Erreichen des kritischen Sättigungspunkts. Aus den im Bild 10 dargestellten Ergebnissen folgt, dass die „trocken“ gelagerten Proben viel früher den kritischen Sättigungsgrad erreichen als z.B. die ein Jahr unter Wasser gelagerten Probekörper. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die wassergelagerten Proben eine so niedrige Kapillarporosität haben, dass der mit jedem Frost-Tauwechsel auftretende Pumpeffekt nur begrenzt zur Wirkung kommt. Durch die höhere Kapillarporosität der anderen Probekörper besteht die Möglichkeit, durch eine relativ geringe Anzahl von Frost-Tauwechseln eine große Menge an Tausalzlösung in den Beton zu pumpen. Allerdings steht dem das ungünstige Verhalten der ein Jahr im Freien gelagerten Proben gegenüber.

Die Ergebnisse zeigen aber die Schwierigkeit, die Leistungsfähigkeit eines Betons unter Frost- oder Frost-Tausalzangriff dem dynamischen E-Modul zu beschreiben.

Tafel 16: Betonzusammensetzung für ein Nachklärbecken in Kläranlage B, Wandbereich

Betonfestigkeitsklasse		B 35
besondere Eigenschaften		Wasserundurchlässigkeit hoher Frostwiderstand hoher Widerstand gegen chemischen Angriff KP
Konsistenz		
Zementart und Festigkeitsklasse		CEM III/B 32,5 N-NW/HS
Zementgehalt	kg/m ³	340
Wassergehalt	kg/m ³	135
w/z-Wert		0,45
w/(z+0,4f)-Wert		0,48
Gesteinskörnung		Rheinsand/-kies
Vorkommen		A/B 16
Sieblinie		1.750
Gehalt	kg/m ³	
Zusatzstoff		Steinkohlen- flugasche
Art		60
Gehalt	kg/m ³	
Zusatzmittel		BV
Art		30
Gehalt	l/m ³	

Tafel 17: Karbonatisierungstiefe von Beton B in Abhängigkeit von der Lagerungsart (in mm)

Lagerungsdauer	Klimaraum	Freilagerung unter Dach	Freilagerung bewittert
28 d	1,3	0,1	< 0,1
90 d	2,0	0,1	< 0,1
180 d	4,7	1,7	0,6
360 d	6,1	2,9	1,4

Tafel 18: Relative Karbonatisierungstiefe, mittlere absolute und relative Gewichtszunahme nach dem kapillaren Saugen und relative Abwitterungsmenge des Betons B im Alter von 1 Jahr in Abhängigkeit von der Lagerungsart (frei bewittert = 1)

	nach 28 d	nach 1 Jahr		
	Klimaraum	Klimaraum	im Freien unter Dach	frei bewittert
relative Karbonatisierungstiefe	-	4,4	2,1	1
absolute Gewichtszunahme	20	39	21	9
relative Gewichtszunahme	-	4,3	2,3	1
relative Abwitterungsmenge nach 14 FTW	-	5,8	2,0	1

5.2.2 Kläranlage B

Für die Erweiterung einer Kläranlage war u.a. der Bau eines Nachklärbeckens notwendig. Die dafür gestellten Anforderungen und die verwendete Zementart entsprechen denen des vorstehend beschriebenen Betons. Die Zusammensetzung ist sehr ähnlich, die wesentlichen Unterschiede sind ein um 10 kg/m³ erhöhter Zementgehalt und ein Größtkorn der Gesteinskörnung von 16 mm statt 32 mm (Tafel 16). Die Probekörperherstellung erfolgte im Oktober, ihre Lagerung und Prüfung erfolgte wie unter 5.2.1 beschrieben.

Probekörper dieses Kläranlagenbetons wurden ebenfalls im Klimaraum, im Freien unter Dach, im Freien bei natürlicher Bewitterung sowie unter Wasser gelagert. Die Karbonatisierungstiefen der „an Luft“ gelagerten Betonproben zeigt Tafel 17.

Bei der Bestimmung der Karbonatphasen in der Randzone des Betons der Kläranlage B wurde nach 28 Tagen kein Vaterit festgestellt. Ab 90 Tage wurde Vaterit in den Proben im Klimaraum und im Freien unter Dach, ab 360 Tage auch in den frei bewitterten Proben in sehr geringen Mengen nachgewiesen. Aragonit trat in Spuren nach 180 Tagen Lagerung im Klimaraum auf. In den im Freien und im Freien unter Dach gelagerten Proben war auch nach einem Jahr kein Aragonit nachweisbar.

Aus Tafel 18 geht hervor, dass zwischen der relativen Karbonatisierungstiefe, der relativen Gewichtszunahme während des kapillaren Saugens und der relativen Abwitterungsmenge unter Berücksichtigung der jeweiligen Prüfstreuungen für die untersuchten Lagerungsarten ein Zusammenhang besteht (s.a. Tafel 15). Nach einjähriger Lagerung im Klimaraum betrug die relative Karbonatisierungstiefe etwa das 4,5fache, bei einjähriger Lagerung im Freien unter Dach etwa das Dop-

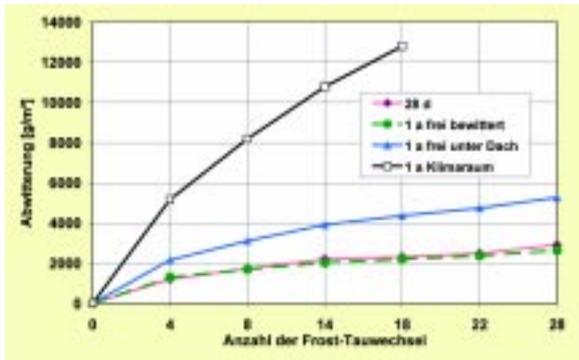


Bild 11: Abwitterungen von 1 Jahr alten, unterschiedlich gelagerten Proben von Beton B im Vergleich zum Beton, gelagert gemäß CDF-Prüfvorschrift

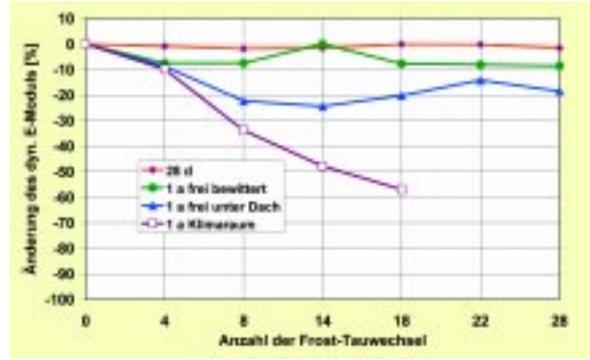


Bild 12: Änderung des dynamischen E-Moduls von 1 Jahr alten, unterschiedlich gelagerten Proben von Beton B im Vergleich zum Beton, gelagert nach CIF-Prüfvorschrift

pelte gegenüber der Lagerung „frei bewittert“. Die absolute Gewichtszunahme während des kapillaren Saugens kann nach bisheriger Kenntnis nur bei Betonen gleicher Zusammensetzung und gleichen Alters als Indikator für den Frost-Tausalz-widerstand herangezogen werden. Die absolute Gewichtszunahme der 28 Tage im Klimaraum und der ein Jahr im Freien unter Dach gelagerten Proben betragen gleichermaßen etwa 20 g (Tafel 18), die Abwitterungsmenge der ein Jahr gelagerten Proben war aber deutlich größer (Bild 11).

Die ein Jahr im Freien gelagerten Proben wiesen in der Laborprüfung nahezu den gleichen Abwitterungsverlauf wie die nach CDF-Prüfvorschrift gelagerten Proben auf. Dieses Ergebnis deckt sich wiederum mit den Karbonatisierungstiefen (Tafel 17). Nach 28 Tagen Lagerung im Klimaraum wurden 1,3 mm gemessen, nach einem Jahr Lagerung im Freien bewittert 1,4 mm. Somit bestätigten auch diese Ergebnisse die Feststellung, dass beim CDF-Verfahren bei Betonen mit hüttensandhaltigen Zementen die karbonatisierte Schicht abwittert. Dieses Verhalten in der Laborprüfung ist aber dennoch nicht gleichzusetzen mit dem Verhalten in der Praxis, denn die ausgelagerten Proben zeigen bisher keinerlei Abwitterung.

Die Änderungen des dynamischen E-Moduls in Abhängigkeit von der Lagerungsart zeigt Bild 12. Analog zum Abwitterungsverhalten zeigen die 28 Tage im Laborklima und die ein Jahr im Freien gelagerten Probekörper keinen oder keinen nennenswerten Abfall des E-Moduls. Die ein Jahr im Freien unter Dach gelagerten Proben haben außer der etwas größeren Abwitterung auch einen geringfügig größeren Abfall des E-Moduls. Die ein Jahr im Klimaraum gelagerten Probekörper wiesen neben der extrem großen Abwitterung auch eine starke Störung des Gefüges auf. Im Gegensatz zu dem sehr ähnlichen Beton der Kläranlage A trat bei dem Beton der Kläranlage B nur bei den im Klimaraum gelagerten Proben ein sehr großer Abfall des dynamischen E-Moduls auf.

Die CO_2 -Gehalte im Abgewitterten in Abhängigkeit von der Lagerungs-

art und der Befrostungsdauer sind in Tafel 19 zusammengefasst. Bereits nach 4 Frost-Tauwechslern zeigten sich große Unterschiede im Gehalt an HCl-Löslichem zwischen den drei Lagerungsarten. Der im Klimaraum gelagerte Beton witterte sehr stark ab. Dadurch wurde neben Zementstein auch ein erheblicher Anteil an (feiner) Gesteinskörnung von der Betonoberfläche abgelöst. Bei den frei bewitterten Probekörpern war die Abwitterungsmenge wesentlich geringer. Demzufolge witterte überwiegend nur die Zementhaut ab, der Anteil an Gesteinskörnung ist gering und der Anteil an HCl-Löslichem, das überwiegend aus Calciumkarbonat besteht, deutlich größer.

5.3 Nachgestellte Eignungsprüfungen

Von vier in der Praxis bewährten Bauteilen, deren Betonzusammen-

Tafel 19: Salzsäure(HCl)-löslicher Anteil und CO_2 -Gehalt in den Betonabwitterungen in Abhängigkeit von Lagerungsart und Anzahl FTW

Frost-Tauwechsel	Klimaraum		Freilagerung unter Dach		Freilagerung bewittert	
	HCl-Lösl.	CO_2	HCl-Lösl.	CO_2	HCl-Lösl.	CO_2
4	36,5	14,9	45,8	15,5	50,1	16,7
8	31,0	13,9	36,5	14,4	39,5	12,7
14	27,9	12,5	34,5	13,1	35,7	12,5
18	30,6	11,9	30,6	12,4	35,4	10,9
22	-	-	28,2	11,5	34,4	9,9
28	-	-	29,6	10,8	33,7	9,8

Tafel 20: Betonzusammensetzungen der nachgestellten Eignungsprüfungen

Beton		1	2	3	4	5
Quelle		Werte der Eigenüberwachung	[31]	[32]	[33]	wie 4, jedoch niedrigerer w/z-Wert
Bauwerk		Kläranlage Bottrop	Kläranlage Duisburg „Alte Emscher“	Kläranlage Duisburg-Kaßlerfeld	Kappen Rheinbrücke A42	
Zementart und Festigkeitsklasse ¹⁾		CEM III/A 32,5 N	CEM III/A 32,5 N	CEM III/B 32,5 N-NW/HS	CEM III/A 32,5 N	CEM III/A 32,5 N
Zementgehalt	kg/m ³	300	300	360	370	370
Wassergehalt	kg/m ³	141	135	162	174	141
w/z-Wert		0,47	0,45	0,45	0,47	0,38
Gesteinskörnung						
Sieblinie						
Sand 0/2	kg/m ³	685	579	516	544	590
Kies 2/8	kg/m ³	-	386	374	649	704
Kies 8/16	kg/m ³	590	386	374	561	609
Kies 16/32	kg/m ³	610	579	579	-	-
Gehalt	kg/m ³	1.885	1.930	1.843	1.754	1.903
Zusatzstoff						
Art		Steinkohlenflugasche	Steinkohlenflugasche			
Gehalt	kg/m ³	60	50	-	-	-
Zusatzmittel						
Art		BV FM	BV FM	-	LP	BV
Gehalt	kg/m ³	1,2 3,0	1,2 1,0	-	1,8	1,3

¹⁾ nach DIN 1164-1 (Okt. 1994)

setzung bekannt war, wurden im Labor die Eignungsprüfungen bezüglich des Frost-Tausalzwidestands nachgestellt. Eine dieser Zusammensetzungen wurde im Ori-

ginal (Beton 4) und in einer Variante (Beton 5) verwendet. Dabei wurde anstelle eines Luftporenbildners ein Fließmittel eingesetzt, wodurch der w/z-Wert von 0,47 auf 0,38 gesenkt

werden konnte. Die Zusammensetzung der Betone und damit hergestellter Bauteile enthält **Tafel 20**.

Die Frisch- und Festbetonprüfungen der fünf Betone sind in **Tafel 21** zusammengefasst. Beim Vergleich der Betone fallen die großen Unterschiede der Konsistenz auf. Der Einsatz des Luftporenbildners führte zu erheblich geringeren Festigkeiten als bei den anderen Betonen und insbesondere gegenüber Beton 5, der bei sonst gleicher Zusammensetzung anstelle des LP-Bildners das Fließmittel enthielt (allerdings bei steiferer Konsistenz).

Die Ergebnisse der CDF-Prüfung zeigt **Bild 13**. Die Betone 1 und 3 würden bei Anwendung des CDF-Tests als Performance-Prüfung und

Tafel 21: Frisch- und Festbetoneigenschaften der Betone 1 bis 5

Beton		1	2	3	4	5
Ausbreitmaß	cm	60	33	34	40	33
Konsistenz		KF	KS	KS	KP	KS
Frischbetonrohddichte	kg/dm ³	2,37	2,37	2,35	2,22	2,39
Luftgehalt	Vol.-%	0,5	1,1	0,8	4,9	1,8
Druckfestigkeit						
2 d	N/mm ²	15	19	16	13	27
7 d	N/mm ²	37	36	29	22	42
28 d	N/mm ²	51	53	41	33	57

unter Zugrundelegung des Abnahmekriteriums von 1.500 g/m² als ungeeignet für die Expositionsklasse XF4 eingestuft. Die Zusammensetzung von Beton 1 entspricht weitgehend der Zusammensetzung für die Nachklärbecken des Klärwerks „Emschermündung“. Die mit dieser Zusammensetzung ausgeführten Bauwerke zeigen bisher keine Schäden. Im Fall des Klärwerks „Emschermündung“ beträgt die Nutzungsdauer bereits über 25 Jahre.

Die Betone 2, 4 und 5 liegen deutlich unter dem Abnahmekriterium. Unerklärlich ist das sehr unterschiedliche Abwitterungsverhalten der Betone 1 und 2. Der Hauptunterschied in der Zusammensetzung liegt in der Sieblinie der Gesteinskörnung und der unterschiedlichen Fließmittelmenge, die zu sehr unterschiedlichen Konsistenzen führen. Der Austausch des Luftporenbildners durch ein Fließmittel bei gleichzeitiger Absenkung des w/z-Werts führt zu einer Verminderung der Abwitterung.

6 Schlussfolgerungen

Die im Rahmen dieses Forschungsauftrags durchgeführten Untersuchungen führten zu nachstehenden Ergebnissen und Schlussfolgerungen:

- Die metastabile Karbonatphase Aragonit wurde nur in Spuren oder allenfalls in wenigen Proben in sehr geringen Anteilen festgestellt. Dabei handelte es sich ausnahmslos um Proben, die entweder im Laborklima oder bei höheren CO₂-Konzentrationen gelagert wurden. Bei den Proben, die im Freien lagerten (Flachprismen aus Zementstein und Betone), wurde in keinem Fall Aragonit nachgewiesen. Für den Frost-Tausalzwiderstand hat diese Karbonatphase somit keine Bedeutung.
- Vaterit wurde in Spuren oder als Nebenbestandteil in der Mehrzahl der Flachprismen aus Zementstein

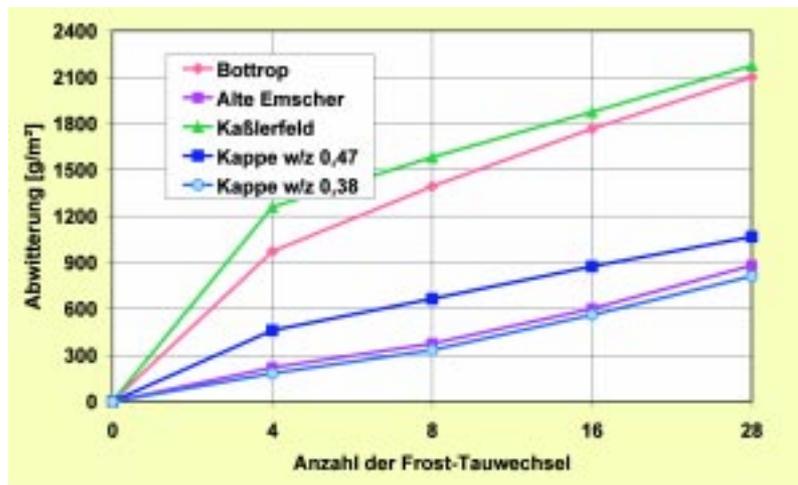


Bild 13: Abwitterungen der Betone 1 bis 5 (CDF-Verfahren)

und in Betonen nachgewiesen. Die Lagerung im Laborklima oder bei erhöhten CO₂-Konzentrationen begünstigte die Bildung von Vaterit.

- In 28 Tage alten Betonen wurde nur in einem Fall (CEM III/A 32,5 N) bei Lagerung im Laborklima Vaterit festgestellt. In höherem Probenalter war in allen Betonen, auch bei Betonen mit Portlandzement, Vaterit in der karbonatisierten Randzone enthalten.
- Bei der Bestimmung des Frost-Tausalzwiderstands von Betonen mit Hochofenzementen mit dem CDF-Verfahren witterte bei den nach Prüfvorschrift hergestellten und gelagerten Probekörpern die karbonatisierte Randzone des Betons ab (progressive Anfangsabwitterung). Zu diesem Zeitpunkt wurde Aragonit überhaupt nicht, Vaterit nur in einer einzigen Probe in Spuren nachgewiesen.
- Für die Bestimmung des Frost-Tausalzwiderstands mit dem CDF-Verfahren sind die metastabilen Karbonatphasen Aragonit und Vaterit folglich ohne praktische Bedeutung, da sie einerseits zu diesem Zeitpunkt noch nicht oder nur in sehr geringen Anteilen vorhanden sind und andererseits die karbonatisierte Schicht unabhän-

gig von den gebildeten Karbonaten abwittert. Dies geschieht auch, wenn in dieser Schicht ausschließlich stabiler Calcit enthalten ist.

- Ursache für die Abwitterung der karbonatisierten Schicht in Betonen mit Hochofenzement ist das infolge Karbonatisierung vergrößerte Porengefüge. Durch die erhöhte Kapillarporosität in der Randzone wird Tausalzlösung sehr leicht aufgenommen.
- Die Lagerung im Freien führt zu einer deutlich geringeren Karbonatisierungstiefe im Vergleich zur Lagerung im Klimaraum oder zur Lagerung unter erhöhten CO₂-Konzentrationen. Bauteile, die einem Frost-Tausalzangriff ausgesetzt sind, wie beispielsweise Straßen, Brücken oder Räumlerlaufbahnen, sind frei der Witterung ausgesetzt und erfahren daher eine geringere Karbonatisierung, nur eine geringe Vergrößerung der Porenstruktur in der Randzone und somit auch nur eine deutlich verminderte Abwitterung im Vergleich zu unter Laborbedingungen gelagertem Beton.
- Die nachträgliche Prüfung des Frost-Tausalzwiderstands an älteren Bauwerken, die sich in der Praxis bewährt haben, zeigte bei

Prüfung nach dem CDF-Verfahren sehr große Abwitterungen, die überwiegend weit über dem vorgeschlagenen Abnahmekriterium lagen. Im Gegensatz zu den neu (nach CDF-Prüfvorschrift) hergestellten Probekörpern witterte bei den aus älteren Bauwerken entnommenen Proben selbst bei einer Verdopplung der Prüfdauer auf 56 FTW nur ein Teil der karbonatisierten Schicht ab. Die Beurteilung des Frost-Tausalzwide-stands von älteren Bauwerken anhand daraus entnommener Proben erscheint nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand nicht möglich, zumindest fehlen dafür Beurteilungskriterien. Die Menge des abgewitterten Betons steht nicht im Verhältnis zur Dauerhaftigkeit des Betons unter natürlicher Beanspruchung.

- Die Messung der inneren Schädigung der Betone im Verlauf der CDF-Prüfung führte zu sehr widersprüchlichen Ergebnissen. Als weitgehend gesichert kann gelten, dass bei Betonen mit künstlichen Luftporen keine innere Schädigung gemessen wird und dass die innere Schädigung lagerungsabhängig ist. Eine Lagerung im Klimaraum führte im Gegensatz zur Lagerung im Freien oder unter Wasser zu wesentlich größeren inneren Schädigungen.
- Die innere Schädigung wird durch zurzeit nicht eindeutig erklärbare Ursachen hervorgerufen. Eine der möglichen Ursachen ist ein unterschiedlicher Mikroluftporengehalt. Daher sind die Ergebnisse bei Wiederholungsmessungen an Betonen mit gleicher Zusammensetzung und gleichen Ausgangsstoffen nicht immer reproduzierbar, vereinzelt werden sogar widersprüchliche Ergebnisse gemessen. Die Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Beton gegenüber Frost- oder Frost-Tausalzangriff durch Messung der inneren Schädigung mit

dem CIF-Verfahren kann aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nicht befürwortet werden.

- Die nachgestellten Eignungsprüfungen von Betonen für Bauwerke, die in der Praxis ihre Bewährung bestanden haben, bestätigten, dass die Laborprüfung von Betonen mit hüttensandreichen Zementen das Praxisverhalten nicht in ausreichendem Maß widerspiegelt. Ursache ist vor allem die während der Laborprüfung auftretende übermäßige Karbonatisierung.
- Für eine praxisgerechte Beurteilung von Betonen mit hütten-sandhaltigen Zementen (oder auch anderen langsam erhärtenden Zementen) sollten entweder in dem Prüfverfahren der Praxis angenäherte Lagerungsbedingungen eingeführt oder die Grenzwerte differenziert werden. Einer praxisgerechten Vorlagerung wird dabei der Vorzug gegeben. Prüfbedingungen und/oder Abnahmekriterien, die für Betone mit Portlandzement entwickelt wurden, können nicht auf Betone mit anderen Zementarten übertragen werden. So werden beispielsweise zu Recht für langsamer erhärtende Betone längere Nachbehandlungszeiten gefordert. Bei den zzt. angewandten Prüfungen des Frost-Tausalzwide-stands wird aber weder dem unterschiedlichen Hydratationsgrad noch dem unterschiedlichen Karbonatisierungsverhalten Rechnung getragen.

Diese Arbeit wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF-Nr. 11767N) gefördert, wofür an dieser Stelle gedankt sei.

7 Literatur

- [1] Geiseler, J.; Setzer, M. J.; Stark, J.; Auberg, R.; Lang, E.; Ludwig, M.: Untersuchungen zur Erhöhung des Frost-Tausalz-Widerstands von HOZ-Betonen. Abschlußbericht des Forschungsvorhabens AiF-FV 9429 B. Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken Duisburg-Rheinhausen, HAB Weimar, Universität GH Essen (1995).
- [2] Bonzel, J.; Siebel, E.: Neuere Untersuchungen über den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. Beton 27 (1977) H. 4, S. 153-157, H. 5, S. 205-211, und H. 6, S. 237-244.
- [3] Int. Kolloquium „Frostbeständigkeit von Beton“, Wien 1980, Generalberichte der Sitzung 1: Grundlagen und Mechanismus des Frostangriffs, Einflüsse der Taumittel. Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut des Vereins der Österreichischen Zementfabrikanten, Heft 33.
- [4] Grübl, P.; Erbaydar, S.: Untersuchungen über den Zerstörungsmechanismus von Beton bei Frost- und Tausalz-Beanspruchung. Abschlußbericht zum Forschungsauftrag Nr. 8038 G 77 A des Bundesministers für Verkehr. TU München (1981).
- [5] Setzer, M. J.: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Betonwaren. Universität GH Essen, Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen Nr. 49 (1990).
- [6] Hilsdorf, H. K.; Günther, M.: Einfluß der Nachbehandlung und Zementart auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. Beton- und Stahlbetonbau 81 (1986) H. 3, S. 57-62.
- [7] Slegers, P. A.; Rouxhet, P.G.: Carbonation of the Hydration Products of Tricalcium Silicate. Cement and Concrete Research

- Vol. 6 (1976), S. 381-388.
- [8] Knöfel, D.; Eßer, G.: Einfluß unterschiedlicher Kohlendioxidkonzentrationen auf Zementmörtel. Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Teil 3, Kontakt und Studium, Expert-Verlag, Band 420.
- [9] Manns, W.; Wesche, K.: Variation in Strength of Mortars made of Different Cements Due to Carbonation. Supplementary Paper III-16. Proceedings of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokio (1968), S. 385-393.
- [10] Smolczyk, H.G.: Written discussion to session III-3 „Carbonation of Concrete“. Proceedings of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, Vol. 3, Cement Association of Japan, Tokio (1968), S. 369-382.
- [11] Calleja, J.: 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Principal Reports, Vol. I, Sub-Theme VII-2 „Durability“, Paris (1980).
- [12] Koelliker, E.: Die Carbonatisierung von Stahlbeton - ein Überblick. Beton- und Stahlbetonbau 85 (1990) H. 6, S. 148-153.
- [13] Locher, F.W.: Zementtaschenbuch 48 (1984), Bauverlag GmbH Wiesbaden – Berlin.
- [14] Kobayashi, K.; Uno, Y.: Influence of Alkali on Carbonation of Concrete; Part 1, Preliminary Tests with Mortar Specimens; Part 2, Influence of Alkali in Cement on Rate of Carbonation of Concrete. Cement and Concrete Research Vol. 19 (1989), S. 821-826 und Vol. 20 (1990), S. 619-622.
- [15] Gunkel, P.: Die Zusammensetzung der flüssigen Phase erstarrender und erhärtender Zemente. Beton-Informationen 23 (1983) H. 1, S. 3-8.
- [16] Knöfel, D.; Wang, J.-F.: Die Carbonatisierung der Schnellzemente und die Bildung der drei CaCO_3 -Modifikationen Calcit, Vaterit und Aragonit. Wiss. Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen, Weimar 39 (1993) H. 3, S. 225-229.
- [17] Nishikawa, T. u.a.: Decomposition of synthesized Ettringite by Carbonation. Cement and Concrete Research Vol. 22 (1992), S. 6-14.
- [18] Stark, J.; Ludwig, H.-M.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton - ein rein physikalisches Problem? Wiss. Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, 40 (1994) H. 5/6/7, S. 95-104.
- [19] Wowra, O. u.a.: Über die metastabilen Calciumcarbonatphasen bei Frost- und Frost-Tausalzbelastung. 14. ibausil, Weimar, 20.-23.09.2000, Tagungsbericht Band 2, S. 0709-0718.
- [20] DIN 1048-1: Prüfverfahren für Beton - Frischbeton. Ausgabe Juni 1991.
- [21] DIN 1048-5: Prüfverfahren für Beton - Festbeton gesondert hergestellter Probekörper. Ausgabe Juni 1991.
- [22] RILEM Draft recommendation for test method for the freeze-thaw resistance of concrete. Tests with water (CF) or with sodium chloride solution (CDF). Materials and Structures (1995) H. 28, S. 175-182.
- [23] Radcke, D.: Klärwerk Emschermündung – Planung und Arbeiten für die erste Ausbaustufe. Beton-Informationen 8 (1968) H. 5, S. 77-87.
- [24] Klammer, R.; Dartsch, B.: HOZ-Beton für den Umweltschutz – Klärwerk Emschermündung stellte vielfältige Bauaufgaben. Beton-Informationen 17 (1977) H. 6, S. 63-77.
- [25] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W) für Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219), Ausgabe 1997, Herausgeber Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Binnenschifffahrt und Wasserstraßen.
- [26] Schulz, A; Fischer, K.-D.: Klärwerk Duisburg – Alte Emscher. Beton-Informationen 29 (1989) H. 6, S. 63-64.
- [27] Rendchen, K. (Hrsg): Kläranlagen. Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf (1995).
- [28] Lang, E.: Hochleistungsbeton mit Hochofenzement. Beton-Informationen 38 (1998) H. 1, S. 11-23.
- [29] Lohmann, R.: Bau der Belebungsbecken im Klärwerk „Alte Emscher“. Beton-Informationen 29 (1989) H. 6, S. 65-66.
- [30] Ritter, H.: Klärwerk Duisburg-Kaßlenfeld. Beton-Informationen 33 (1993) H. 3, S. 30-35.
- [31] Sandmann, H.: Vorlandbrücken der Rheinbrücke A 42. Beton-Informationen 28 (1988) H. 6, S. 63-69.