

Realkalisierungspotenzial von zementgebundenen Werkstoffen im Trinkwasserbereich

Dem Fachbereich Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEURIN (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

von

Melanie Merkel, M. Eng.

aus Bad Homburg

Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Hamid Sadegh-Azar
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. habil. Christos Vrettos
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach
3. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Manfred Breitbach
Tag der mündlichen Prüfung:	15.07.2021

Kaiserslautern 2021

(D 386)

Melanie Merkel

**Realkalisierungspotenzial von zementgebundenen
Werkstoffen im Trinkwasserbereich**

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen der Technischen Universität Kaiserslautern.

Während dieser Tätigkeit bestand die Möglichkeit, ein Forschungsprojekt rund um die Thematik meiner Dissertation bearbeiten zu können. Beim Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) möchte ich mich für die finanzielle Förderung des Forschungsprojektes und für die Möglichkeit, an der spannenden Thematik arbeiten zu dürfen, bedanken. Da es sich bei dem Forschungsprojekt um eine Kooperation mit der RWTH Aachen handelte, möchte ich auch hier meinen Dank aussprechen, da auch die zahlreichen Diskussionen mit meinem Projektpartner zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit, der diese Arbeit durch seine Förderung und Unterstützung erst ermöglicht hat. Seine vielfältigen Anregungen, die zahlreichen Diskussionen sowie das entgegengebrachte Vertrauen und die Freiräume haben maßgeblich diese Arbeit beeinflusst. Darüber hinaus wurde mir während der Zeit am Fachgebiet ermöglicht, abseits von der Thematik dieser Dissertation, einen breit gefächerten Erfahrungsschatz zu erarbeiten, der für meine weitere berufliche Zukunft von besonderer Bedeutung ist.

Für die Übernahme des Korreferats, die interessanten und aufschlussreichen Diskussionen während des Forschungsprojektes und der Entstehung dieser Arbeit danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach und Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Breitbach.

Die vorliegende Arbeit war mit einem hohen Versuchsaufwand verbunden. Hierbei haben mich meine studentischen Hilfskräfte mit großem persönlichen Einsatz, den ich sehr zu schätzen weiß, unterstützt.

Mein besonderer Dank gilt auch allen Mitarbeitern des Fachgebiets, die mich in meiner Arbeit tatkräftig unterstützt und zur rechten Zeit für Ablenkung gesorgt haben. Das angenehme Arbeitsklima, die kollegiale Zusammenarbeit und die zahlreichen Diskussionen waren stets eine große Stütze.

Bad Homburg, im Juli 2021

Melanie Merkel

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	iv
Abstract	v
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	vi
Begriffsdefinitionen	xi
1 Einführung	13
1.1 Veranlassung	13
1.2 Aktuelle Regelwerke und daraus resultierende Problemstellungen	13
1.3 Zielsetzung der Arbeit	18
1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	18
2 Grundlagen	21
2.1 Eigenschaften zementgebundener Werkstoffe	21
2.1.1 Allgemeines	21
2.1.2 Eigenschaften des Zementsteins	21
2.1.3 Gefüge zementgebundener Werkstoffe	23
2.1.4 Zusammensetzung der Porenlösung zementgebundener Werkstoffe	24
2.1.5 Sorptionsverhalten und Feuchtespeicherung	26
2.1.6 Feuchtetransport bei mineralischen Werkstoffen	28
2.1.6.1 Allgemeines	28
2.1.6.2 Inbetriebnahme	32
2.1.6.3 Betriebszustand	34
2.1.6.4 Außerbetriebnahme	36
2.2 Auslaugung und Carbonatisierung des Zementsteins	37
2.2.1 Allgemeines	37
2.2.2 Auslaugung	37
2.2.3 Carbonatisierung	40
2.3 Realkalisierung zementgebundener Werkstoffe	42
2.3.1 Allgemeines	42
2.3.2 Mechanismus der Realkalisierung	42
2.3.3 Einflussfaktoren der Realkalisierung	43
2.3.4 Beständigkeit der Realkalisierung	46
2.3.5 Alkalientransport bei mineralischen Werkstoffen	47
2.3.5.1 Allgemeines	47
2.3.5.2 Konvektion	47
2.3.5.3 Diffusion	48

3	Experimentelle Untersuchungen	50
3.1	Einleitung	50
3.2	Untersuchungen zur Alkalienabgabe von Instandsetzungsmörteln	50
3.2.1	Zielsetzung und Versuchsprogramm	50
3.2.2	Herstellung und Lagerung	52
3.2.3	Charakterisierung der verwendeten Mörtel	55
3.2.3.1	Labortechnische Untersuchungen	55
3.2.3.2	Charakterisierung	55
3.2.4	Labortechnische Untersuchungen zur Alkalienabgabe	60
3.2.4.1	Anlagentechnik	60
3.2.4.2	Messung der elektrischen Leitfähigkeit	63
3.2.4.3	Messung der Auslaugungstiefe	64
3.2.4.4	Gefügestruktur und Elementverteilung	64
3.2.5	Ergebnisse der Untersuchungen	65
3.2.5.1	Allgemeine Erkenntnisse zur Alkalienabgabe und Beständigkeit mineralischer Beschichtungen	65
3.2.5.2	Einfluss des Mörteltyps	70
3.2.5.3	Einfluss der Zementart	74
3.2.5.4	Einfluss der Oberflächenbearbeitung	78
3.2.6	Diskussion der Ergebnisse	80
3.3	Untersuchungen zum Realkalisierungspotenzial	85
3.3.1	Eingangsparameter, Zielsetzung und Versuchsprogramm	85
3.3.2	Herstellung und Lagerung	89
3.3.3	Charakterisierung der verwendeten Betone	92
3.3.4	Labortechnische Untersuchungen	95
3.3.5	Ergebnisse der Untersuchungen	95
3.3.5.1	Einfluss der Umgebungfeuchte	95
3.3.5.2	Einfluss des Untergrundbetons	100
3.3.5.3	Einfluss des Instandsetzungsmörtels	102
3.3.5.4	Einfluss der Vorschädigung des Untergrundbetons	105
3.3.5.5	Verarbeitungsbedingte Einflussgrößen	107
3.3.5.6	Kontakt- und diffusionsgesteuerte Realkalisierung	108
3.3.5.7	Überprüfung der Alkalität	111
3.3.5.8	Beständigkeit des realkalisierten Bereichs	114
3.3.6	Diskussion der Ergebnisse	115
4	Modellbildung zur Beschreibung der Realkalisierung	121
4.1	Eingangsparameter und Zielsetzung	121
4.2	Verlauf der diffusionsgesteuerten Realkalisierung	124
4.3	Numerische Modellierung des Alkalientransports	129

4.4	Diskussion der Ergebnisse	136
5	Mögliche Regelwerksanpassungen im Trinkwasserbereich	139
5.1	Zielsetzung	139
5.2	Anpassungen der Auskleidungsprinzipien	139
6	Zusammenfassung und Ausblick	149
6.1	Zusammenfassung	149
6.2	Ausblick	155
7	Literaturverzeichnis	158
8	Liste der verwendeten Technischen Regelwerke	172
9	Lebenslauf der Verfasserin	176
Anhang		177
A	Anhang A – Messwerte Alkalitätsgrenze	177
B	Anhang B – Messwerte zur Porosität	183
C	Anhang C – Abhängigkeit von Porosität zu Auslaugungstiefe	187
D	Anhang D – Verfahrensbeschreibung Porosität und Porenradienverteilung	189

Kurzfassung

Die realkalisierende Wirkung von mineralischen Mörteln ist aus der Instandsetzung von carbonatisierten Betonen im Hochbau bekannt. Die Anwendungsgrenzen beziehen sich dabei entsprechend der DAfStb-Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ auf die Verwendung eines Portlandzement basierten (CEM I) Instandsetzungsmaterials sowie darauf, dass die mittlere Carbonatisierungstiefe um nicht mehr als 20 mm hinter die Bewehrung vorgedrungen ist. Bei der Instandsetzung von Trinkwasserbehältern wird die Realkalisierung von mineralischen Beschichtungen ebenfalls bei der Anwendung der Auskleidungsprinzipien unter Berücksichtigung zusätzlicher technischer und hygienischer Randbedingungen zugrunde gelegt.

Für die Anwendung in Trinkwasserbehältern wird das Realkalisierungsdepot mineralischer Beschichtungen zwar als Fähigkeit zur Erhöhung der Alkalität des Altbetons definiert, jedoch fehlen bisher hinreichende wissenschaftliche Erkenntnisse, damit die Realkalisierung für Anwender und Planer im Trinkwasserbereich fassbar und abschätzbar wird. Unter Berücksichtigung der maßgebenden Einflussgrößen werden in dieser Arbeit die Mechanismen der Realkalisierung anhand experimenteller Untersuchungen abgeleitet und erläutert. Das Realkalisierungsvermögen von Instandsetzungsmörteln wird näher spezifiziert, sodass es dem Anwender ermöglicht wird, Mörtelsysteme auszuwählen, die für das jeweilige Auskleidungsprinzip angewendet werden können.

Da der Realkalisierungsfortschritt unter Berücksichtigung der Einflussgrößen bisher nicht berechnet werden kann, wird auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen ein vereinfachtes Berechnungsmodell zur Beschreibung der Realkalisierung entwickelt. Anhand von theoretischen Simulationen wird abschließend das Modell validiert.

Abstract

The realkalizing effect of mineral mortars is known from the repair of carbonated concretes in building construction. According to the DAfStb guideline "Protection and repair of concrete components", the application limits refer to the use of a portland cement based (CEM I) repair material and to the fact that the average carbonation depth has not penetrated more than 20 mm behind the reinforcement. When repairing drinking water reservoirs, the realkalization of mineral coatings is also based on the use of repair principles, taking into account additional technical and hygienic boundary conditions.

Although the realkalization depot of mineral coatings is defined as the ability to increase the alkalinity of the old concrete for use in drinking water reservoirs, sufficient scientific knowledge is still lacking to enable users and planners in the drinking water sector to record and estimate the realkalization. Taking into account the relevant influencing variables, the mechanisms of realkalization are derived and explained in this paper on the basis of experimental investigations. The realkalization capacity of repair mortars is specified in more detail so that the user is able to select mortar systems that can be used for the respective lining principle.

Since the progress of realkalization cannot be calculated under consideration of the influencing variables so far, a simplified calculation model for the description of the realkalization is developed on the basis of the experimental investigations, so that the user has the possibility to estimate the realkalization for future repairs. Finally, the model will be validated by means of theoretical simulations.

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Großbuchstaben

A	Querschnittsfläche
A_P	ausgelaugte Probenoberfläche
A_W	Wasseraufnahmekoeffizient
D	Dicke
$D_{W(W)}$	Flüssigtransportkoeffizient
F_L	Abminderungsfaktor Lagerungsart
F_Z	Abminderungsfaktor der Zementart des Untergrundbetons
H	Druckwassersäule
K_n	Knudsenzahl
L	mittlere freie Weglänge
M	Molekulargewicht
P	Porosität des Betons
P_L	Gesamtdruck der Umgebungsluft
Q	Wasserstrom
R	universale Gaskonstante
R_K	Kontaktreakalisierung
R_D	diffusionsgesteuerte Realkalisierung
T	absolute Temperatur
V_B	Beckenvolumen
W	Wassergehalt
$W_{W,24}$	Wasseraufnahmekoeffizient nach 24 Stunden

Lateinische Kleinbuchstaben

a_i	Anpassungsfaktor a in Bezug auf die Realkalisierung
b_i	Anpassungsfaktor b in Bezug auf die Realkalisierung
c_{min}	Mindestbetondeckung
d	absorbierte Schichtdicke
d_a	Alkalitätsgrenze

d_A	Auslaugungstiefe
$d_{a,min}$	minimaler Abstand Alkalitätsgrenze
$d_{a,nom}$	nomineller Abstand Alkalitätsgrenze
$d_{a,5\%}$	5 %-Quantilwert Abstand Alkalitätsgrenze
d_R	Realkalisierungstiefe
d_{R1}	Realkalisierungstiefe zum Zeitpunkt t_1
dz	Tiefe der Zementsteinzerstörung
g	Wasserdampfdiffusion
g_E	Effusionsstrom
g_v	Dampfdiffusionsstromdichte
g_w	Flüssigtransportstromdichte
h_K	Eindringtiefe der Wasserfront
k	Durchlässigkeit gegenüber drückendem Wasser
m	Steigung
n	Exponent in Bezug auf die Realkalisierung
p	Wasserdampfpartialdruck
r	Porenradius
r_K	Kapillarporenradius
t	Zeit
t_{min}	Mindestschichtdicke
t_1	Bezugsgröße [1d]
t_f	Prüfdauer
x	Weglänge
x_R	Realkalisierungspotenzial
$x_R(t)$	Realkalisierungstiefe bezogen auf die Zeit

Griechische Buchstaben

δ_a	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
σ	Gemessene Eluat-Leitfähigkeit
σ_Q	Oberflächenspannung des Quecksilbers
$\sigma_{25^\circ C}$	Eluat-Leitfähigkeit bei 25°C

$\sigma_{25^{\circ}\text{C},10}$	Temperaturkorrektur Leitfähigkeit nach Beckenbefüllung
$\sigma_{25^{\circ}\text{C},11}$	Temperaturkorrektur Leitfähigkeit vor Beckenleerung
φ	relative Luftfeuchte
ϑ	Kontaktwinkel des Quecksilbers auf der Probe

Abkürzungen

A	Auskleidungsprinzip nach DVGW-Arbeitsblatt W 300-3
B	Beton
BSE	Rückstreuelektronen
CC	Zementmörtel
CEM I	Portlandzement
CEM II-A/LL	Portlandkalksteinzement
CEM III	Hochofenzement
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.
DBV	Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V.
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
e. V.	eingetragener Verein
G	geschnittene Oberfläche Probekörper
K	Kernbereich
k. A.	keine Angaben
KSM	Kalksteinmehl
M	Mörtel
MK	Versuchsanlage zur Alkalienabgabe
n. b.	nicht bestimmt
O	geglättete Oberfläche Probekörper
OS	Oberflächenschutzsystem
PCC	kunststoffmodifizierte Zementmörtel
R	spritzraue Oberfläche des Probekörpers
REM	Rasterelektronenmikroskopie
R1/ R2	Instandsetzungsprinzip nach DAfStb-Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“

r. F.	relative Luftfeuchte
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
RC	Repair Concrete
RM	Repair Mortar
SE	Sekundärelektronen
SRC	Sprayable Repair Concrete
SRM	Sprayable Repair Mortar
U	Unterseite des Probekörpers
u. a.	unter anderem
u. U.	unter Umständen
vgl.	vergleiche
w/z-Wert	Wasserzementwert
XC	Expositionsklasse, Bewehrungskorrosion ausgelöst durch Carbonatisierung
XD	Expositionsklasse, Bewehrungskorrosion ausgelöst durch Chloride, ausgenommen Meerwasser
XS	Expositionsklasse, Bewehrungskorrosion ausgelöst durch Chloride aus Meerwasser

Chemische Verbindungen

Aft	Aluminatferrit-Trisulfat (Ettringit)
AFm	Aluminatferrit-Monosulfat
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
C	Kohlenstoff
C ₃ A	Tricalciumaluminat
C ₂ (A,F)	Calciumaluminatferrit
C ₂ S	Dicalciumsilicat
C ₃ S	Tricalciumsilicat
Ca ²⁺	Calciumion
CaCO ₃	Calciumcarbonat
CaO	Calciumoxid
Ca(OH) ₂	Calciumhydroxid
CaSO ₄	Calciumsulfat
Cr ₂ O ₃	Chrom(III)-oxid

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

C/S	Verhältnis von Calcium zu Silizium
CH	kristallines Portlandit
Cl ⁻	Cloridion
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
C-A-F-H	Calciumaluminatferrithydrat
C-A-H	Calciumaluminathydrat
C-S-H	Calciumsilikathydrat
Fe ₂ O ₃	Eisen(III)-oxid
H ₂ O	Wasser
K ⁺	Kaliumion
KOH	Kaliumhydroxid
K ₂ O	Kaliumoxid
OH ⁻	Hydroxidion
MgO	Magnesiumoxid
MnO	Mangan(II)-oxid
Na ⁺	Natriumion
Na ₂ CO ₃	Natriumcarbonat
NaOH	Natriumhydroxid
Na ₂ O	Natriumoxid
P ₂ O ₅	Phosphorpentoxid
SiO ₂	Siliziumoxid
SO ₃	Schwefeloxid
SO ₄ ²⁻	Sulfation
TiO ₂	Titanoxid
V ₂ O ₅	Vanadium(V)-oxid

Begriffsdefinitionen

Auslaugung	Herauslösung von Substanzen durch ein Lösungsmittel aus einem Feststoff (bspw. Calciumhydroxid durch Wasser) (vgl. DVGW-Arbeitsblatt W 300-3). Schadensmechanismus infolge kalkarmen bzw. kalkfreiem Wassers.
Auslaugungstiefe	Abstand zwischen der Alkalitätsgrenze und der ursprünglichen Probenoberfläche. Der Bereich zwischen Alkalitätsgrenze und ursprünglicher Probenoberfläche ist nicht alkalisch.
Abtragstiefe	Abstand zwischen der Probenoberfläche nach Auslaugungsbeanspruchung und der ursprünglichen Probenoberfläche
Alkalitätsdepot	Alkalitätspuffer eines zementgebundenen Werkstoffs, der die Alkalität des umgebenen Eluats oder des Altbetons erhöht, ohne dass die Alkalität des Werkstoffs unterhalb der Phenolphthaleingrenze absinkt.
Alkalitätsgrenze	Grenze, welche durch den Phenolphthaleintest ermittelt wird und den Bereich zwischen hoher und niedriger Alkalität bei Beton unterscheidet (vgl. DVGW-Arbeitsblatt W 300-3).
Carbonatisierung	Chemische Reaktion zwischen Calciumhydroxid im Porenwasser des Zementsteins und Kohlendioxid der Luft, bei der die Alkalität des Betons stark abnimmt (vgl. DVGW-Arbeitsblatt W 300-3).
Hydrolytische Korrosion	Chemische Zersetzung eines Stoffes unter Wassereinwirkung (bspw. Aufspaltung der Hydratphasen) (vgl. DVGW-Arbeitsblatt W 300-3)
Kontaktreakalisierung	Anfangsreakalisierung der Betonrandzone nach Applikation einer mineralischen Beschichtung oder eines Mörtels, deren Tiefenwirkung und Dauer von unterschiedlichen Einflussfaktoren abhängig ist.
Realkalisierung	Eindringen des basischen Porenwassers eines alkalischen Mörtels oder Betons in einen Bereich im Altbeton, dessen Alkalität durch Carbonatisierung oder Auslaugung vermindert wurde. Infolgedessen wird der pH-Wert in diesem Bereich erhöht.

Realkalisierungsdepot	Fähigkeit eines Werkstoffes über einen Zeitraum die Alkalität eines darunter liegenden Werkstoffes maßgeblich zu erhöhen (vgl. DVGW-Arbeitsblatt W 300-3)
Realkalisierungsfortschritt	Zeitabhängige Entwicklung der Realkalisierung innerhalb der Betonrandzone
Realkalisierungstiefe	Abstand zwischen der Kontaktzone Untergrundbeton/mineralische Beschichtung und der Auslaugung- oder Carbonatisierungstiefe. Der Bereich zwischen der Kontaktzone Untergrundbeton/mineralische Beschichtung und der Alkalitätsgrenze ist alkalisch.
Realkalisierungspotenzial	Möglichkeit der Realkalisierung; die Möglichkeit kann bspw. infolge eines ausreichenden Feuchteangebots und der Fähigkeit des Werkstoffes (Realkalisierungsdepot) gegeben werden.
Realkalisierungsvermögen	Realkalisierung des Altbetons über einen Zeitraum unter Berücksichtigung der vorliegenden Einflussfaktoren auf den Realkalisierungsfortschritt.
Selbstabdichtung	Mechanismus von zementgebundenen Werkstoffen, der dazu führt, dass die Wasseraufnahme vom Wurzel-t-Gesetz abweicht bzw. die Durchlässigkeit gegenüber Wasser für die Baustoffe nicht konstant ist, sondern mit der Zeit abnimmt. Die kapillare Wasseraufnahme in zementgebundenen Werkstoffen wird dadurch begrenzt [Beddoe u. Springenschmid, 1999; Rucker-Gramm, 2010].
Tortuosität	Grad der Gewundenheit der Transportwege in den Poren poröser Materialien

1 Einführung

1.1 Veranlassung

Die Anforderungen an Neubau-, Instandsetzungs- und Instandhaltungsmaßnahmen von Trinkwasserbehältern werden im DVGW-Arbeitsblatt W 300, Teil 1 bis Teil 8 geregelt. Damit die hohen technischen und hygienischen Anforderungen an das Bauwerk erfüllt werden können, sind in Teil 3 des Regelwerks sogenannte Auskleidungsprinzipien für die Instandsetzung mit mineralischen Beschichtungen definiert. Neben der Sicherstellung der Standsicherheit bzw. des Verbundes der Bewehrung muss auch die Sicherstellung des Korrosionsschutzes der Bewehrung gewährleistet werden. Bei der Festlegung des Auskleidungsprinzips wird insbesondere in Bezug auf den Korrosionsschutz unterschieden, ob der vorhandene Beton für die Sicherstellung des Korrosionsschutzes der Bewehrung ausreicht oder ob eine Auskleidung bzw. eine Beschichtung für die Sicherstellung des Korrosionsschutzes benötigt wird. Unter diesem Aspekt werden die Begrifflichkeiten „Alkalitätsgrenze“ und „Realkalisierungsdepot“ aufgeführt, die bei der Wahl des Auskleidungsprinzips eine wichtige Rolle spielen.

Während die Alkalitätsgrenze als Umschlagpunkt einer Phenolphthaleinlösung klar und messbar definiert ist und den Bereich zwischen hoher und niedriger Alkalität des Betons unterscheidet, kann das Realkalisierungsdepot bisher nicht ausreichend genau spezifiziert werden. Entsprechend der Begriffsdefinition des Regelwerks wird das Realkalisierungsdepot ausschließlich als „Fähigkeit eines Werkstoffes“ beschrieben, der „über einen Zeitraum die Alkalität eines darunter liegenden Werkstoffes maßgeblich erhöht“. Grundsätzliche Voraussetzungen, Anwendungsgrenzen oder die Beschreibung der technischen Grundsätze werden im Regelwerk nicht weiter erläutert. In Bezug auf die Lebensdauer des Bauwerks und eine darauf abgestimmte Planung von Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen ist es von besonderer Bedeutung, die zu erwartende Realkalisierung abschätzen zu können.

Nicht nur die Spezifikation des Realkalisierungsdepots ist für die Überarbeitung des Regelwerks erforderlich, sondern eine Reihe von anwendungsorientierten Fragen und Unstimmigkeiten ergeben sich bei den bisherigen Anwendungsgrenzen.

1.2 Aktuelle Regelwerke und daraus resultierende Problemstellungen

Spezifische Regelungen bei der Instandsetzung von Trinkwasserbehältern werden in **DVGW-Arbeitsblatt W 300-3** festgelegt [Breit, 2014; Breitbach, 2006; Breitbach, 2018]. Zementgebundene Beschichtungen werden hierbei nach ihrer Fähigkeit, einen ausgelaugten oder carbonatisierten Beton zu realkalisieren, unterschieden. Die sogenannten Auskleidungsprinzipien unterteilen sich dabei in A1 und A2 wie folgt:

- A1: Mit Realkalisierungsdepot bei erforderlicher Realkalisierung der ausgelaugten bzw. carbonatisierten Betonrandzone

- A2: Ohne Realkalisierungsdepot bei ausreichender alkalischer Betondeckung d_a ohne erforderliche Realkalisierung der ausgelaugten bzw. carbonatisierten Betonrandzone

Die Zugrundelegung der Realkalisierung (A1) basiert auf den Erkenntnissen der Instandsetzungsrichtlinie. Für den carbonatisierten Beton im Hochbau wurde die Möglichkeit der Realkalisierung bei ausgelaugten Betonuntergründen abgeleitet. Für den Anwendungsfall A1 erfolgt die Realkalisierung der Betonrandzone zwischen dem vorbehandelten Untergrund und dem Bewehrungsstahl. Nach Bestimmung der Alkalitätsgrenze d_a ist zu prüfen, ob eine ausreichende Realkalisierung des vorhandenen Betons gewährleistet ist.

Bei Anwendungsfall A2 ist eine Realkalisierung nicht möglich. Dementsprechend muss in Abhängigkeit von der Auslaugungs- bzw. der Carbonatisierungstiefe geprüft werden, inwieweit die noch vorhandene Restalkalität für den Korrosionsschutz der Bewehrung ausreicht. Bei Auskleidungsprinzip A2 darf die mineralische Beschichtung nicht auf die Betondeckung angerechnet werden.

Vor Einführung der Technischen Regel „Instandhaltung von Bauwerken“ [TR-Instandhaltung] wurden die folgenden Grundsätze in der **DAfStb-Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“** [Instandsetzungs-Richtlinie] zur Realkalisierung beschrieben. Das in Bezug auf die Realkalisierung von carbonatisiertem Beton relevante Instandsetzungsprinzip R sollte den Korrosionsschutz der Bewehrung durch Repassivierung der Bewehrung bzw. durch dauerhafte Realkalisierung des Betons wiederherstellen. Zwei verschiedene Instandsetzungsprinzipien in Bezug auf die Realkalisierung wurden formuliert (R1 und R2).

Bei dem Instandsetzungsprinzip R1-K wurden lokal Schadstellen instand gesetzt und anschließend flächig ein alkalischer Mörtel oder Beton aufgebracht. Als Anforderung an den Instandsetzungsmörtel bzw. Instandsetzungsbeton wurde ein ausreichender Carbonatisierungswiderstand definiert, damit innerhalb der angestrebten Restnutzungsdauer die Carbonatisierungstiefe kleiner bleibt als die Schichtdicke des Instandsetzungsmaterials. Als Mindestschichtdicke des Mörtels wurden 20 mm bzw. die maximale Carbonatisierungstiefe entsprechend der angestrebten Restnutzungsdauer des Bauwerks vorgegeben. Zudem sollte Portlandzement als Bindemittel des Instandsetzungsmaterials verwendet werden. Das Verfahren R1 durfte nur angewendet werden, wenn die mittlere Carbonatisierungstiefe nicht mehr als 20 mm hinter der Bewehrung lag. Der carbonatisierte Beton war bis zur äußeren Bewehrungslage abzutragen und zu ersetzen, wenn die mittlere Carbonatisierungstiefe mehr als 20 mm hinter die Bewehrung vorgedrungen war. Eine Beschichtung der Bewehrung war nicht vorgesehen, da sonst eine Repassivierung der Bewehrung nicht möglich ist.

Das Instandsetzungsprinzip R2-K sah vor, dass ein alkalischer Mörtel ausschließlich zur Ausbesserung örtlich begrenzter Bereiche verwendet wurde. Angewendet wurde das Prinzip, wenn in örtlich eng begrenzten Bereichen Bewehrungskorrosion aufgetreten ist [Schießl u. Raupach, 1994], beispielsweise bei einer zu geringen Betondeckung oder bei zu großen Carbonatisierungstiefen. Das Instandsetzungsmaterial (Mörtel oder Beton) musste eine ausreichende Alkalität

aufweisen, und/also ausreichend dicht und dick sein, damit eine dauerhafte Repassivierung sichergestellt werden konnte. Analog zum Prinzip R1 sollte ein Portlandzement zur Anwendung kommen. Zur Verbesserung des Carbonatisierungswiderstandes des gesamten Bauteils wurde in der Regel ein Oberflächenschutzsystem (OS 2, OS 4 oder OS 5) aufgebracht. Auch hier war die Berücksichtigung der Restnutzungsdauer relevant. Die ggf. begrenzte Dauerhaftigkeit der Maßnahme musste in einem Instandhaltungsplan berücksichtigt werden. Das Prinzip R2 durfte nur angewendet werden, wenn die Betondeckung im Anschluss an die Instandsetzung mindestens 10 mm betrug. Auf ein Oberflächenschutzsystem durfte verzichtet werden, wenn sichergestellt wurde, dass außerhalb der lokal instand gesetzten Bereiche die Carbonatisierungsfront während der Restnutzungsdauer des Bauwerks die Bewehrung nicht erreichen konnte.

In der **neuen Instandhaltungsrichtlinie** [Bastert et al., 2011, TR-Instandhaltung] werden zukünftig ebenfalls Prinzipien und Verfahren zum Schutz oder zur Instandsetzung von Bewehrungskorrosion formuliert. Unter anderem wird die Thematik des Erhalts bzw. der Wiederherstellung der Passivität durch Realkalisierung von carbonatisiertem Beton (Verfahren 7.4) aufbauend auf dem Prinzip R der Instandsetzungsrichtlinie aufgegriffen. Im Folgenden wird auf die Veränderungen des Verfahrens 7.4 eingegangen.

Das Verfahren darf nur angewendet werden, wenn die größte Carbonisierungstiefe im Altbeton weniger als 40 mm beträgt. Als Anmerkung wird beschrieben, dass sich für die Festlegung der größten Carbonisierungstiefe der Ansatz des 90 %-Quantilwertes bewährt hat. Bei der Bemessung der Schichtdicke des Betonersatzes wird differenziert, ob die Zusammensetzung des Instandsetzungsmaterials bekannt oder unbekannt ist.

Bei der Verwendung von Beton nach DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2, Spritzbeton nach DIN EN 14487 in Verbindung mit DIN 18551, Trockenbeton nach DAfStb-Richtlinie „Herstellung und Verwendung von Trockenbeton und Trockenmörtel“ oder Vergussbeton nach DAfStb-Richtlinie „Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel“ kann das Instandsetzungsziel vereinfacht erreicht werden. Die Schichtdicken sind für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren deskriptiv auf Basis der relevanten Expositionsklassen XC, XS und XD unter Einhaltung der Anforderungen an die Mindestbetondeckung nach DIN EN 1992-1-1/NA festzulegen.

Bei unbekannter Zusammensetzung des Betonersatzes (RM, RC, SRM oder SRC) ist unter Berücksichtigung eines ausreichenden Carbonatisierungswiderstandes eine Mindestschichtdicke von 20 mm für XC3 und 25 mm für XC1 (ständig nass), XC2 und XC4 anzuwenden. Die geplante Nutzungsdauer wird ebenfalls mit 50 Jahren beschrieben. Bei der Festlegung der nominalen Schichtdicke soll ein Vorhaltemaß entsprechend der Rautiefe des Untergrunds berücksichtigt werden.

In **DIN EN 1504-9** wird analog zur Instandhaltungsrichtlinie das Verfahren 7.4 „Realkalisierung von carbonatisiertem Beton durch Diffusion“ beschrieben. Es wird darauf hingewiesen, dass bisherige Erfahrungen mit diesem Verfahren begrenzt sind, dennoch in einigen Teilen Europas unterschiedliche Ansätze in bestimmten Situationen angewendet werden.

Problemstellung

Zwischen Auslaugung und Carbonatisierung der Betonrandzone wird im DVGW-Arbeitsblatt W 300-3 grundsätzlich nicht unterschieden. Ebenso wird nicht erläutert, wie mit einer geschädigten oder beeinträchtigten Betonrandzone umgegangen werden soll, wenn eine Auslaugung der Betonrandzone stattgefunden hat. Für den Anwender sollten klare Vorgaben für die Instandsetzung definiert werden, damit keine zusätzlichen Nachweise wie bspw. die Überprüfung einer „ausreichenden Realkalisierung des vorhandenen Betons“ erbracht werden müssen. Grundsätzliche Voraussetzungen, Anwendungsgrenzen oder die Beschreibung der technischen Grundsätze werden im Regelwerk nicht weiter erläutert.

In Abbildung 1-1 und Abbildung 1-2 sind die bisherigen Auskleidungsprinzipien A1 und A2 dargestellt. Nicht nur die Spezifikation des Realkalisierungsdepots ist für die Überarbeitung des Regelwerks erforderlich, sondern eine Reihe von anwendungsorientierten Fragen und Unstimmigkeiten ergeben sich bei den bisherigen Anwendungsgrenzen. Alle Anmerkungen und offenen Fragestellungen sind als rote Kommentare in den Abbildungen aufgenommen und nachfolgend aufgelistet:

- 1) Aus Abbildung 1-1 und Abbildung 1-2 gemäß DVGW-Arbeitsblatt W 300-3 geht nicht hervor, wie der Ist-Zustand vor der Instandsetzung zu bewerten ist und der Soll-Zustand nach der Instandsetzung auszusehen hat. Zudem fehlt eine vereinfachte Darstellung der Auswahl von Instandsetzungsvarianten als Ablaufschema.
- 2) Bauteilbezogene Schadensmechanismen (Hydrolyse, Auslaugung und Carbonatisierung) werden pauschalisiert. Aus den Anwendungsgrenzen geht nicht hervor, dass beispielsweise eine Carbonatisierung der Bauteilrandzone im wassergesättigten Bereich nicht möglich ist und somit auch nicht betrachtet werden muss. Ebenso wird nicht unterschieden, wie mit einer geschädigten Betonrandzone umgegangen werden muss. Dazu gehört zum Beispiel die Zementsteinzerstörung während der Auslaugung. Eine geschädigte Betonrandzone muss vor dem Auftrag einer zementgebundenen Beschichtung vollständig abgetragen werden.
- 3) In Anlehnung an das DBV-Merkblatt „Betondeckung und Bewehrung“ sollte die Mindestbetondeckung c_{\min} als 5 %-Quantil definiert werden.
- 4) Das sogenannte Realkalisierungsdepot und die Alkalitätsgrenze d_a sind bei Auskleidungsprinzip A1 nicht ausreichend beschrieben.
- 5) Eine Begrenzung der zugelassenen Zemente in Bezug auf ein ausreichendes Realkalisierungsdepot ist bisher nicht erfolgt. Es ist zu prüfen, welche Zemente für eine Realkalisierung in Frage kommen.
- 6) Aus Abbildung 1-1 und Abbildung 1-2 geht nicht hervor, wo genau die Mindestschichtdicke der zementgebundenen Beschichtung definiert wird. Eine genauere Darstellung ist erforderlich.

- 7) Bei Abbildung 1-1 (A1) wird die Schichtdicke der zementgebundenen Beschichtung bei der Ermittlung der Betondeckung mit angerechnet. Bei Abbildung 1-2 (A2) ist eine Anrechnung nicht möglich. Der grundsätzliche Ausschluss ist zu überprüfen.
- 8) Bei Auskleidungsprinzip A2 soll entweder die Alkalitätsgrenze d_a als 5 %-Quantil ermittelt oder der Prüfumfang zur Ermittlung von d_a genauer beschrieben werden. Eine statistische Aussagekraft (5 %-Quantil) kann nur über eine ausreichende Anzahl von Messergebnissen ermittelt werden.
- 9) Bei Auskleidungsprinzip A2 ist ein $d_{a,nom}$ in der Praxis nicht umsetzbar. Zum Schutz der Bewehrung ist zu prüfen, ob in Bezug auf die Lebensdauer des Bauwerks $d_{a,min}$ erhöht werden sollte.
- 10) Bei Auskleidungsprinzip A2 geht aus den Anwendungsgrenzen zur Alkalitätsgrenze d_a nicht hervor, wie mit einer Unter- oder Überschreitung der Prüfergebnisse umgegangen werden muss. Aus diesem Grund sollten die Auskleidungsprinzipien erweitert werden.
- 11) Grundsätzlich geht aus den Anwendungsgrenzen der Auskleidungsprinzipien nicht hervor, wie die Instandsetzung einer Betonrandzone aussehen soll, in der der Bewehrungsstahl im bereits carbonatisierten oder ausgelaugten Bereich liegt.

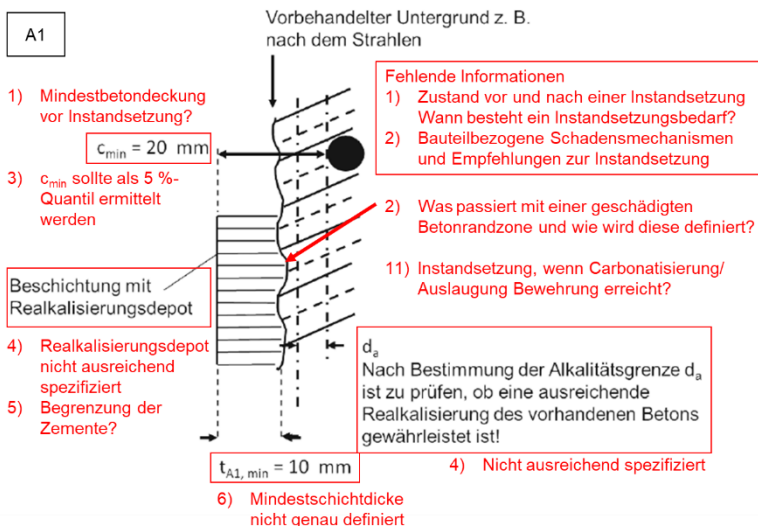


Abbildung 1-1: Auskleidungsprinzip A1, Anwendungsgrenzen zementgebundener Beschichtungen mit Realkalisierungsdepot bei erforderlicher Realkalisierung der ausgelaugten bzw. carbonatisierten Betonrandzone (DVGW-Arbeitsblatt W 300-3, Bild 3) mit Anmerkungen zur Anwendung

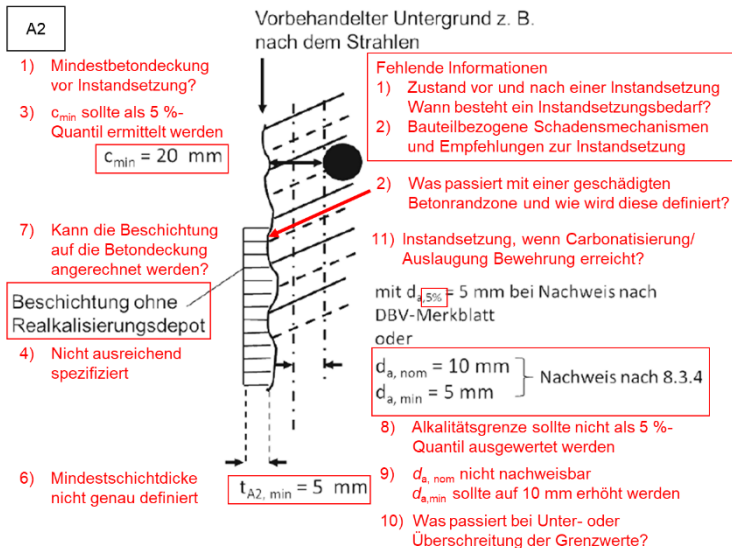


Abbildung 1-2: Auskleidungsprinzip A2, Anwendungsgrenzen zementgebundener Beschichtungen mit Realkalisierungsdepot bei erforderlicher Realkalisierung der ausgelaugten bzw. carbonatisierten Betonrandzone (DVGW-Arbeitsblatt W 300-3, Bild 4) mit Anmerkungen zur Anwendung

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die genauere Spezifikation des Realkalisierungsvermögens von Instandsetzungsmörteln im Trinkwasserbereich. Dazu sollen das Alkalitätsdepot und das Realkalisierungspotenzial von Mörteln systematisch untersucht und die notwendigen Randbedingungen für eine erfolgreiche Realkalisierung des Betonuntergrunds erfasst werden. Mit einer spezifischen Beschreibung des Realkalisierungsdepots unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden Prozesse der Realkalisierung und bestehender Einflussfaktoren soll für den Planer und Anwender der Mechanismus besser verständlich werden. Damit eine Realkalisierung in Abhängigkeit von der Lebensdauer des Bauwerks voraussagbar wird, soll der Umgang mit dem Realkalisierungsdepot in der Praxis unter Berücksichtigung der möglichen Einflussfaktoren beschrieben werden. Die zuvor beschriebenen Problemstellungen aus der aktuellen Regelwerksituation werden dabei aufgegriffen und Lösungswege aufgezeigt.

1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Zur Umsetzung der formulierten Ziele gliedert sich die vorliegende Arbeit in insgesamt sechs Kapitel (vgl. Abbildung 1-3). Zunächst werden in Kapitel 1 die Veranlassung, Problemstellung, Zielsetzung und der Aufbau der Arbeit beschrieben.

In **Kapitel 2** werden die wesentlichen Grundlagen der Eigenschaften zementgebundener Werkstoffe in Bezug auf das Alkalitätsdepot, die Alkalienabgabe

und -aufnahme veranschaulicht. Insbesondere die dem Alkalientransport zugrundeliegenden Transportmechanismen werden eingehend betrachtet und in Bezug auf den Anwendungsbereich im Trinkwasserbehälter zusammengefasst. Darauf aufbauend werden die Schadensmechanismen der Auslaugung und Carbonatisierung erläutert und voneinander abgegrenzt, sodass eine spätere Bezugnahme der möglichen Realkalisierung erfolgen kann. Des Weiteren wird der aktuelle Stand der wissenschaftlichen Forschung in Bezug auf die Realkalisierung und den Alkalientransport in zementgebundenen Werkstoffen dargestellt.

Kapitel 3 umfasst die experimentellen Untersuchungen, die dieser Arbeit zu Grunde liegen. Zur Spezifizierung des Realkalisierungsdepots wurden zwei verschiedene Untersuchungsschwerpunkte mit unterschiedlichen Zielsetzungen bearbeitet. Im ersten Arbeitsschwerpunkt wurden anhand von Laborversuchen die zeitabhängige Alkalienabgabe, das grundlegende Lösungsvermögen und die Eigenschaftsveränderungen von Instandsetzungsmörteln in demineralisiertem Wasser erfasst und bewertet. Dazu wurden insgesamt zehn verschiedene, für Trinkwasser zugelassene, marktgängige Instandsetzungsmörtel unter Praxisbedingungen im Labormaßstab hergestellt, charakterisiert und für insgesamt sechs Monate in demineralisiertem Wasser ausgelaugt. Eine für die Versuche eigens entwickelte Auslaugungsanlage ermöglichte eine kontinuierliche und kontrollierte Alkalienabgabe der Instandsetzungsmörtel. Zur Erfassung und Abschätzung der Materialveränderungen während der Alkalienabgabe wurden eine Vielzahl von begleitenden labortechnischen Untersuchungen durchgeführt und ausgewertet.

Im zweiten Arbeitsschwerpunkt wurde das Realkalisierungsvermögen von ausgewählten Mörteln untersucht. Dazu wurden Verbundkörper bestehend aus ausgelaugtem oder carbonatisiertem Beton mit Trinkwasser zugelassenen Mörteln beschichtet. Die tatsächlich ablaufende Realkalisierung konnte somit erfasst werden. Mögliche Einflussfaktoren, die den zeitlichen Verlauf der Realkalisierung und das grundsätzliche Realkalisierungspotenzial beeinflussen, wurden ermittelt und bewertet. Der Praxisbezug stand hierbei im Vordergrund, sodass eine Anwendung für den Trinkwasserbereich abgeleitet werden konnte.

Darauf aufbauend wird in **Kapitel 4** aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen ein Modell für die Berechnung des Realkalisierungsfortschrittes abgeleitet. Die in Kapitel 3 behandelten Einflussfaktoren auf das Realkalisierungsvermögen wurden mit aufgegriffen und anhand parametrisierter Faktoren in das Modell integriert. Anhand von numerischen Simulationen wurde das aufgestellte Modell abschließend validiert.

Aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen werden in **Kapitel 5** Anpassungsmöglichkeiten in Bezug auf die Beschreibung der Auskleidungsprinzipien nach DVGW Arbeitsblatt W 300-3 beschrieben.

Das abschließende **Kapitel 6** fasst die wichtigsten Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf weiterführende Untersuchungen.



Abbildung 1-3: Aufbau und Struktur der Arbeit

2 Grundlagen

2.1 Eigenschaften zementgebundener Werkstoffe

2.1.1 Allgemeines

In den folgenden Abschnitten werden die grundlegenden Eigenschaften von zementgebundenen Werkstoffen in Bezug auf das Alkalitätsdepot und die Alkalienabgabe beschrieben. Da der Alkalientransport im Werkstoff maßgeblich von der Gefügestruktur und der Zusammensetzung der Porenlösung abhängig ist, werden insbesondere der Aufbau und die Eigenschaften der Zementsteinmatrix betrachtet. Ein weiterer Aspekt ist die Transporteigenschaft in Abhängigkeit von der Umgebungsbedingung und der damit verbundene Transportmechanismus. Unter Berücksichtigung der vorherrschenden Einflussgrößen im Anwendungsbereich von Trinkwasserbehältern wird die Feuchtespeicherung und der allgemeine Feuchtetransport beschrieben.

2.1.2 Eigenschaften des Zementsteins

Bei der Reaktion von Zement und Wasser entstehen wasserhaltige Verbindungen, die das Erstarren und Erhärten des Zementleims zu Zementstein bewirken. Die Verbindungen werden als Hydratphasen bezeichnet, die bei Portlandzementklinker im Wesentlichen aus verschiedenen Klinkerphasen bestehen. Dazu zählen Tricalciumsilicat (C_3S), Dicalciumsilicat (C_2S), Tricalciumaluminat (C_3A) und Calciumaluminatferrit ($C_2(A,F)$), die beim Brennen der Ausgangsstoffe entstehen [VDZ, 2002]. Im Allgemeinen werden die Reaktionen als Lösungs- und Fällungsreaktionen bezeichnet, die als sehr komplex gelten und zu denen bis zum heutigen Zeitpunkt kein einheitliches Reaktionsmodell vorliegt. Die verschiedenen Klinkerphasen unterscheiden sich sowohl in ihrer Reaktionsgeschwindigkeit als auch in der Festigkeitsentwicklung des Zementsteins [Locher, 2000]. In Abbildung 2-1 ist schematisch dargestellt aus welchen Hydratationsprodukten, Poren und Bestandteilen der Porenlösung der Zementstein besteht. Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile erläutert und die chemischen Zusammenhänge beschrieben.

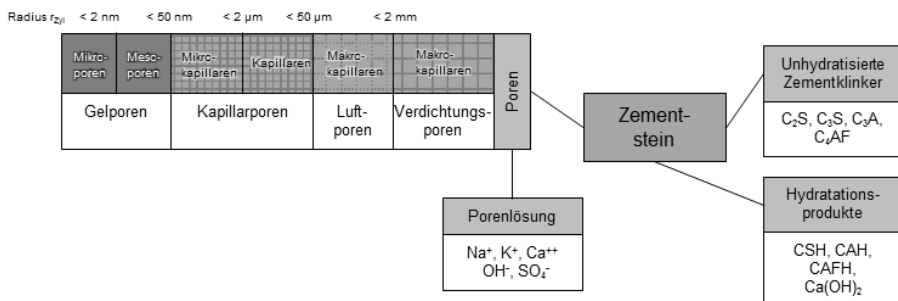


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Bestandteile des Zementsteins [Rucker-Gramm, 2010]

Die für die Festigkeit maßgebende Reaktion ist die Hydratation der silikatischen Zementbestandteile C_3S und C_2S zu Calcium-Silikat-Hydraten (CSH) [VDZ, 2002].

Abhängig von der Wasserverfügbarkeit bilden sich variable Zusammensetzungen. Aus diesem Grund werden Calcium-Silikat-Hydrate üblicherweise auf die molaren Verhältnisse von CaO/SiO_2 und $\text{H}_2\text{O/SiO}_2$ bezogen. Die CSH-Phasen sind weitestgehend amorph und werden deshalb als CSH-Gele aufgefasst. Zusätzlich werden bei der Hydratation erhebliche Mengen an Calciumhydroxid (Ca(OH)_2) gebildet, die zusammen mit den im Zement enthaltenen Alkalien Na_2O und K_2O für das alkalische Milieu der Porenlösung verantwortlich sind.

Nach [Schäfer, 2004] sinkt mit steigendem Hüttensandanteil im Zement der Ca(OH)_2 -Umsatz pro Gramm reagierten Hüttensands. Dementsprechend werden zunehmend calciumärmere Reaktionsprodukte gebildet. Bei Zementstein mit einem Hüttensandanteil von 40 M.-% beträgt das mittlere Ca/Si-Verhältnis der CSH-Phasen zwischen 1,8 - 1,9. Bei Portlandzement dagegen liegt das Ca/Si-Verhältnis zwischen 1,9 - 2,0. Bei der Berechnung des Ca/Si-Verhältnisses werden aluminathaltige Phasen nicht berücksichtigt.

Wie bei den Hüttensanden sinkt auch der Ca(OH)_2 -Umsatz pro Gramm Flugasche mit steigendem Flugascheanteil im Zement. Nach [Locher, 2000] wird ein durchschnittliches Ca/Si-Verhältnis von ca. 1,7 angegeben.

Bei einem Silikastaubanteil von 5 M.-% beträgt das aus dem Ca(OH)_2 -Umsatz berechnete Ca/Si-Verhältnis der CSH-Phasen ca. 1,3 [Schäfer, 2004]. Bei höherem Silikastaubgehalt im Zement (10 M.-% bis 15 M.-%) liegt das Ca/Si-Verhältnis zwischen 0,85 und 0,75. Nach Schäfer reicht der Ca(OH)_2 -Umsatz in diesen Zementsteinen nicht aus, um die gelöste Kieselsäure vollständig zu CSH-Phasen umzusetzen.

Mit fortschreitender Hydratation wandeln sich die Zementkörner in Zementgel um, wobei eine enge Verzahnung der nadelartigen CSH-Phasen entsteht und sich Gelporen in den Zwischenräumen ausbilden. Das Mikrogel stellt den Raum zwischen den Spitzen der CSH-Phasen dar, der nur wenige Nanometer groß ist [Rucker-Gramm, 2010]. Das Mesogel ist der zwischen 1 nm und 50 nm große Porenraum, der sich zwischen den CSH-Phasen bzw. zwischen den CSH-Phasen und anderen Hydratphasen befindet.

Der Hydratationsmechanismus des Tricalciumaluminats (C_3A) ist abhängig von dem vorhandenen Sulfatangebot. In Abwesenheit von Sulfat bildet sich dünntafeliges Tetracalciumaluminathydrat. Ist Sulfat vorhanden, so bildet sich bevorzugt Calciumaluminatsulfathydrat. Durch die Zugabe von bis zu 5 M.-% Calciumsulfat (Gips/Anhydrit) zum Zement kann das Erstarren verzögert werden, da auf der Oberfläche der C_3A -Partikel eine Ausbildung von Ettringit erfolgt, die zur Reduktion der Hydratationsgeschwindigkeit führt [VDZ, 2002].

Der Verlauf der Hydratation von Calciumaluminatferrit ($\text{C}_2(\text{A},\text{F})$) ähnelt dem Hydratationsmechanismus des C_3A . Auch hier ist die Verfügbarkeit von Sulfat für den Verlauf der Reaktion maßgebend. In Gegenwart von Sulfat bildet sich Aluminatferrit-Trisulfat (AFt), auch Eisenettringit genannt, und Aluminatferrit-Monosulfat (AFm).

2.1.3 Gefüge zementgebundener Werkstoffe

Bei w/z-Werten kleiner als 0,4 enthält der Zementstein nach abgeschlossener Hydratation unhydratisierte Reste von verbleibendem Zementklinker. Mit zunehmendem w/z-Wert verbleibt am Ende der Hydratationsreaktion ungebundenes Wasser im Gefüge, welches zu größeren Porenräumen bzw. zur Ausbildung von Kapillarporen führt, die die Transportwege im Zementstein darstellen. Die Porenradien der Kapillarporen sind im Mittel 1.000 mal so groß wie die Porenradien der Gelporen [VDZ, 2002] und beeinflussen vor allem die Eigenschaften wie Schwinden, Quellen und Kriechen des Festbetons. Nach [Romberg, 1978] und [Smolczyk u. Romberg, 1976] wird als unterer Grenzwert der Kapillarporosität ein Porenradius von $0,03 \mu\text{m}$ definiert. Poren mit einem Radius von $< 0,01 \mu\text{m}$ zählen zu den Gelporen und der Bereich dazwischen stellt einen Übergangsbereich dar. Nach [Setzer, 1991] wird zur Unterscheidung zwischen Gel- und Kapillarporen ein Porenradius von $0,05 \mu\text{m}$ als Grenzwert festgesetzt (vgl. Abbildung 2-1). Die Gel- und Kapillarporen des Zementsteins sind mit einer wässrigen Porenlösung gefüllt, in denen hauptsächlich die Kationen Na^+ , K^+ , Ca^{2+} und die Anionen OH^- und SO_4^{2-} gelöst sind.

Für das Zementsteingefüge bestehen verschiedene Modelle, welche den Zusammenhang zwischen den Gefügebestandteilen und den physikalischen und technischen Eigenschaften des Zementsteins beschreiben. Das Kapillarporengefüge kann stark vereinfacht als Zylinderkapillarporenmodell betrachtet werden, das zur Beschreibung der Transportvorgänge in porösen Werkstoffen genutzt wird. Die Modellvorstellung basiert darauf, dass der Werkstoff aus einem System vernetzter Zylinderkapillaren mit unterschiedlichen Durchmessern besteht und die Transportphänomene, wie Diffusion und Kapillarleitung, in Poren $> 50 \text{ nm}$ stattfinden [Kießl u. Gertis, 1980]. Das Modell stellt die wirkliche Geometrie oder Struktur nur näherungsweise dar [Krus, 1995], da der tatsächliche Gefügebau wesentlich komplexere Strukturen aufweist.

Die Modellvorstellung eines feinporösen Zementsteingefüges basiert auf dem Modell nach Powers, Feldmann, Sarada und Bazant und wurde als „Münchner Modell“ von [Wittmann, 1977] und [Setzer, 1976] weiterentwickelt. Der Zementstein wird als sogenanntes Xerogel dargestellt, das die feste Zustandsform des Zementgels beschreibt. Die Kohäsion der einzelnen CSH-Phasen basiert auf den Bindungskräften feiner Zementsteinpartikel, die auf Grundlage der „Van-der-Waals'schen Bindung“ wirken. Durch steigende Absorption des freien Wassers der Umgebung, beispielsweise durch die Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit ab etwa 40 %, wird das Porengefüge zwischen den CSH-Phasen aufgeweitet und der entstandene Spaltdruck trennt die direkte Kontaktstelle der einzelnen CSH-Partikel. Die Absorption hat zur Folge, dass die „Van-der-Waals'schen Bindungen“ schwächer werden und eine Längenänderung bzw. eine feuchteabhängige Volumenveränderung entsteht.

Die Transportwege von Molekülen werden nicht nur durch die Porosität des Betons, sondern auch durch die Gewundenheit der Poren (Tortuosität) beeinflusst. Der Diffusionskoeffizient muss demnach um einen Tortuositätsfaktor korrigiert werden (bspw. Modellvorstellung nach [Millington u. Quirk, 1961]).

2.1.4 Zusammensetzung der Porenlösung zementgebundener Werkstoffe

In Bezug auf die Realkalisierung ist insbesondere die Zusammensetzung und die Veränderung der Porenlösung relevant. Kurz nach dem Mischen des Betons werden durch das Zugabewasser Bestandteile des Zementes gelöst, sodass der pH-Wert der Lösung ansteigt. Insbesondere Alkalisulfate, Alkalihydroxide, freies Calciumoxid und Calciumsulfat spielen hierbei eine maßgebende Rolle. Im Folgenden wird die Zusammensetzung der Porenlösung beschrieben und welche Parameter die Alkalität maßgeblich beeinflussen.

Untersuchungen nach [Gunkel, 1983], [Smolczyk, 1984] und [Penko, 1983] ergaben, dass die Zusammensetzung der Porenlösung im Verlauf der Hydratationszeit Veränderungen aufzeigt (vgl. Abbildung 2-3). [Gunkel, 1983] beschreibt die Alkalität als Hydroxidionenkonzentration, die noch im Laufe der Hydratation ansteigt. Die Konzentration der jeweils gelösten Ionen verändert sich innerhalb der ersten Stunden wenig. In dieser Anfangsphase der Hydratation (etwa ersten sechs Stunden) überschreitet die Calcium-Ionenkonzentration die Sättigungskonzentration von Calciumhydroxid in Wasser. Aus den Untersuchungsergebnissen von [Gunkel, 1983] wurde abgeleitet, dass im Anfangsstadium der Hydratation die Alkalität der Porenlösung von den Hydroxiden des Calciums und der Alkalien (Natrium und Kalium) gebildet wird.

Nach [Locher, 2000] liegt in den ersten sechs Stunden der Hydratation ein vergleichsweise hoher Sulfatgehalt und ein verhältnismäßig geringer Anteil an Hydroxidionen in der Lösung vor. Danach findet ein Anstieg der Hydroxidionen und ein Abfall der Sulfatkonzentration sowie der Calciumkonzentration statt. Vorwiegend zurückzuführen ist dies auf die Reaktion des Alkalisulfats mit Aluminat unter Bildung von Mono- und/oder Trisulfat.

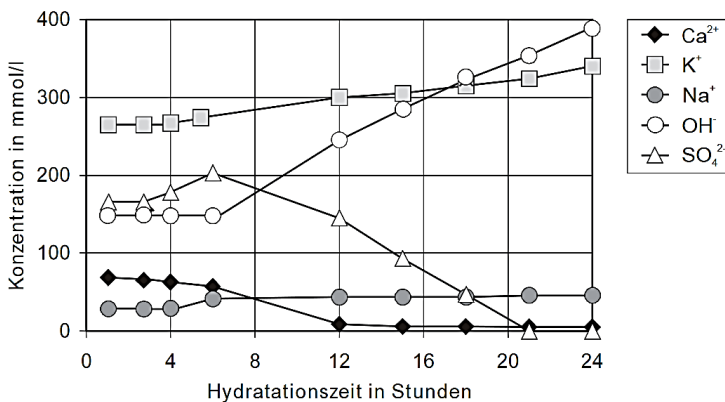


Abbildung 2-2: Veränderung der Porenlösung innerhalb der ersten 24 Stunden nach der Hydratation von Portlandzement (w/z-Wert = 0,5) [Penko, 1983]

Die Untersuchungsergebnisse von [Gunkel, 1983] und [Smolczyk, 1984] über einen Betrachtungszeitraum von insgesamt zwölf Monaten sind in Abbildung 2-3 dargestellt.

Bei einem Portlandzement und einem Hochofenzement mit einem w/z-Wert von 0,65 belüftet sich die Hydroxidkonzentration anfänglich auf 50 mmol/l bis 80 mmol/l, was einem pH-Wert von 12,7 bis 12,9 entspricht. Nach etwa einem Tag steigt die Konzentration auf über 100 mmol/l und nimmt einen pH-Wert von über 13 an. Im weiteren Verlauf der Hydratation bis zu einem Jahr steigt die Konzentration der Porenlösung weiter auf Werte zwischen 200 mmol/l und 380 mmol/l an. Bei einer Verringerung des w/z-Wertes von 0,65 auf 0,50 wird die Alkalität erhöht. Der Anstieg der Alkalität wurde darauf zurückgeführt, dass eine Konzentrierung der Porenlösung durch das niedrigere Wasservolumen stattgefunden hat.

Nach sieben Tagen war nach [Gunkel, 1983] fast das gesamte Calcium aus den Lösungen verschwunden und die Alkalität der Lösung wurde praktisch nur noch von Natrium- und Kaliumhydroxiden verursacht. Die Untersuchungsergebnisse von [Smolczyk, 1984] zeigten vergleichbare Ergebnisse. Nach [Rechenberg u. Sprung, 1983] ist die Calciumionenkonzentration der Porenlösung gering, da die Löslichkeit von Calciumhydroxid mit steigendem pH-Wert sinkt. Sowohl das freie als auch das aus den Hydratationsprodukten abspaltbare Calciumhydroxid hat nach wenigen Tagen praktisch keinen Einfluss mehr auf die Alkalität der Porenlösung, sondern gilt nur als Puffersubstanz gegen sauer reagierende Substanzen. Der pH-Wert der Porenlösung kann erst unter 12 absinken, wenn der alkalische CaO-Puffer durch die Reaktion mit beispielsweise einem saurem Angriffsmedium verbraucht ist [Gunkel, 1983].

Das bedeutet, dass nach Ende der Erstarrungsreaktion in der Porenlösung nur noch Alkali- und Hydroxidionen vorliegen und anhand der Summe der Alkaliionenkonzentration die Alkalität (pH-Wert) der Porenlösung berechnet werden kann.

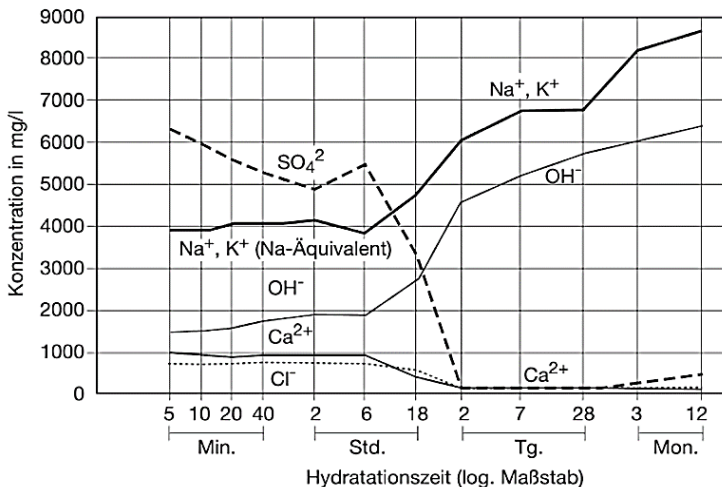


Abbildung 2-3: Zusammensetzung der Porenlösung im Zementstein in Abhängigkeit von der Zeit aus [Locher, 2000] nach [Gunkel, 1983] (w/z-Wert = 0,65)

Mit steigendem Hüttensandgehalt des Zementes sinkt die Alkalität und die Natrium- bzw. Kaliumkonzentration [Gunkel, 1983]. Diese Erniedrigung findet in einem pH-Bereich von über 13 statt. Nach [Schäfer, 2004] sind die im Hüttensand enthaltenen

Alkalien für den wirksamen Alkalienanteil eines Zements im Vergleich zum Beitrag des Klinkers von untergeordneter Bedeutung. Der in der Porenlösung gelöste Alkalienanteil erreicht in den hüttensandhaltigen Zementsteinen nach einer Hydratationsdauer von etwa 7 Tagen bis 28 Tagen ein konstantes Niveau. Bis zu einem Hüttensandgehalt von etwa 20 M.-% ist der in der Porenlösung gelöste Alkalienanteil in etwa genauso hoch wie im Portlandzement. Bei höheren Gehalten sinkt der gelöste Alkalienanteil im Vergleich zum Portlandzementstein deutlich ab.

Ein besonderer Einfluss auf den Alkalienhaushalt der Porenlösung wird nach [Schäfer, 2004] bei der Verwendung von Silikastaub als weiterer Hauptbestandteil beschrieben. Eine überproportional starke Abnahme des gelösten Alkalienanteils besteht innerhalb der ersten Tage der Hydratation. Die Menge der Reaktionsprodukte des Silikastaubs beeinflussen die Alkalienbindung des Zementsteins. Bei einer Erhöhung des Silikastaubanteils im Zement von 5 M.-% auf 10 M.-% ist eine ausgeprägte Zunahme der alkalienbindenden Wirkung festzustellen. Ein noch höherer Silikastaubanteil bewirkt nur eine leichte Zunahme des gebundenen Alkalienanteils.

2.1.5 Sorptionsverhalten und Feuchtespeicherung

Der für die Realkalisierung relevante Alkalientransport muss in Abhängigkeit vom Feuchtetransport betrachtet werden, da die Alkalien in gelöster Form vorliegen und somit ein „Huckepacktransport“ stattfindet. Hygroscopisch, poröse Baustoffe nehmen in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte Feuchtigkeit auf. In sogenannten Sorptionsisothermen wird der Zusammenhang zwischen der aufgenommenen Menge an Wasser und der relativen Luftfeuchte der Umgebung dargestellt (vgl. Abbildung 2-4). Bei zementgebundenen Werkstoffen ist in der Regel ein s-förmiger Verlauf zu beobachten, der nach [Künzel, 1994] in die nachfolgenden drei unterschiedlichen Bereiche untergliedert wird.

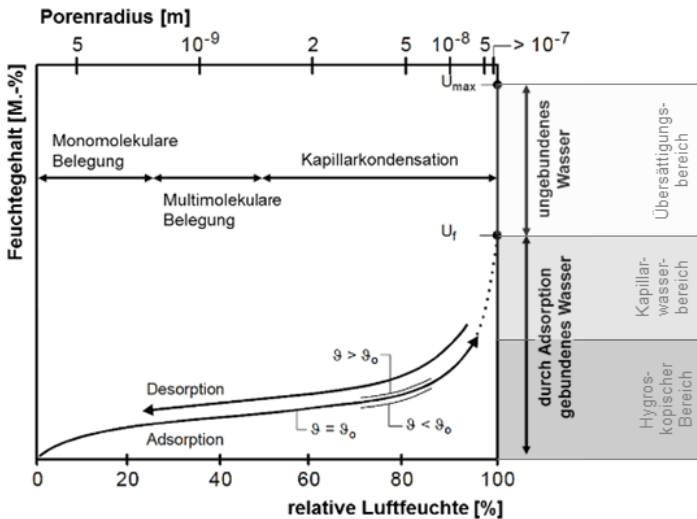


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Ad- und Desorptionsisotherme bei kapillarporösen Systemen [Kießl, 1983] mit eigenen Ergänzungen

Hygroskopischer Bereich (Bereich niedriger Feuchte): Bis ca. 25 % relativer Luftfeuchte geht man nach der BET-Theorie (nach Brunauer, Emmett und Teller) davon aus, dass alle freien Oberflächen mit einer monomolekularen Wasserschicht belegt sind. Mit zunehmender relativer Luftfeuchte lagern sich durch Van-der-Waals-Kräfte weitere Molekülschichten an und führen zu einem annähernd linearen Anstieg des Wassergehalts im Baustoff (multimolekulare Belegung) [Wittmann, 1977]. Bei ca. 50 % r. F. werden keine weiteren Molekülschichten durch Van-der-Waals-Kräfte an der Oberfläche gebunden, sondern der nachfolgend progressiv ansteigende Bereich wird der sogenannten Kapillarkondensation zugeschrieben. Im Mikroporenbereich zwischen $2 \cdot 10^{-9}$ m und 10^{-7} m treten Kondensationserscheinungen auf [Krus, 1995].

Kapillarwasserbereich (Bereich höherer Feuchte): Die Sorptionsisotherme steigen bei einer relativen Luftfeuchte von über 95 % stark an und es beginnt der sogenannte Kapillarwasserbereich bzw. überhygroskopische Bereich [Krus, 1995]. Wasser kann bis zum Erreichen der freien Wassersättigung aufgenommen werden. Das bedeutet, dass ohne die Einwirkung äußerer Kräfte Wasser entgegen der Schwerkraft durch freies Saugen absorbiert wird. Eine vollständige Füllung der Poren ist nicht möglich, da eingeschlossene Luftblasen vorhanden sind.

Übersättigungsbereich: Bei 100 % relativer Luftfeuchte steigt der Verlauf der Sorptionsisotherme zwischen der freien Wassersättigung und der maximalen Wassersättigung stark an. Die maximale Wassersättigung kann durch Aufbringen eines äußeren Drucks oder Vakuums sowie durch eine sehr lange Unterwasserlagerung erreicht werden. Ein Gleichgewichtszustand zwischen Luft- und Wassergehalt existiert nicht mehr.

Zwischen Feuchteaufnahme und -abgabe (Adsorption und Desorption) wird ein Hystereseeffekt beschrieben, der als Folge unterschiedlicher Benetzungseigenschaften oder als durch die Porenraumgeometrie hervorgerufener Effekt angesehen wird. [Künzel, 1994] beschreibt, dass die Hysterese nur gering ausgeprägt ist und zur Charakterisierung des Sorptionsfeuchtebereichs die Adsorptionsisotherme ausreichen. Nach [Klopfer, 1974] bestehen Zweifel, ob es sich um eine „echte“ Hysterese handelt oder ob der Effekt auf zu kurze Messzeiten bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte zurückzuführen ist.

Der Einfluss der Temperatur auf die Sorptionsisotherme ist gering [Krus, 1995]. Bei geringerer Temperatur nimmt der Sorptionsfeuchtegehalt zu, da bei tieferen Temperaturen und gleichen Partialdruckverhältnissen die Kapillarkondensation bereits in größeren Porenräumen einsetzt.

Einen weiteren Einfluss auf den Verlauf der Sorptionsisotherme nimmt die Gesamtporosität des Werkstoffs ein. Bei einem kleineren w/z -Wert ist die maximal aufnehmbare Wassermenge aufgrund der geringeren Gesamtporosität kleiner als bei einem höheren w/z -Wert. Bei einem w/z -Wert von 0,3 wird der Großteil des Porenraums (hauptsächlich Gelporen) durch die reine Adsorption gefüllt. Bei einem w/z -Wert von 0,65 wird ein Großteil des Porenraums (hoher Anteil an Kapillarporen) erst durch Kapillarkondensation und kapillare Wasseraufnahme gefüllt [Rucker-Gramm, 2010].

2.1.6 Feuchtetransport bei mineralischen Werkstoffen

2.1.6.1 Allgemeines

In Trinkwasserbehältern treten in Abhängigkeit von der Bauteillage und -geometrie sowie von den äußeren Bedingungen verschiedene Feuchtebedingungen und Transportprozesse auf. Der Alkalientransport innerhalb des Porenraums ist gekoppelt an den Wassertransport und den Feuchtezustand des Betons. In den folgenden Abschnitten wird auf die unterschiedlichen Transportprozesse und Feuchtezustände bei der Befüllung, während des Betriebs und bei der Außerbetriebnahme der Wasserkammer eingegangen. Der jeweilige Mechanismus, dessen Effektivität sowie die Wechselwirkung der einzelnen Prozesse werden beschrieben und in Bezug auf Trinkwasserbehälter bewertet.

Der Alkalientransport in mineralischen Werkstoffen ist von unterschiedlichen Mechanismen abhängig. Grundsätzlich ist zunächst zu unterscheiden, ob ein Wasserdampf- oder ein Flüssigkeitstransport vorliegt. Zu den für eine Realkalisierung in der Praxis relevanten Transportmechanismen zählen die Wasserdampfdiffusion, die Oberflächendiffusion als Flüssigkeitstransportmechanismus an der Porenoberfläche, die Kapillarleitung und die Permeation als Flüssigkeitstransportmechanismus in den Porenräumen (vgl. Abbildung 2-5). Die Grundlagen der maßgebenden Mechanismen werden im Folgenden erläutert.

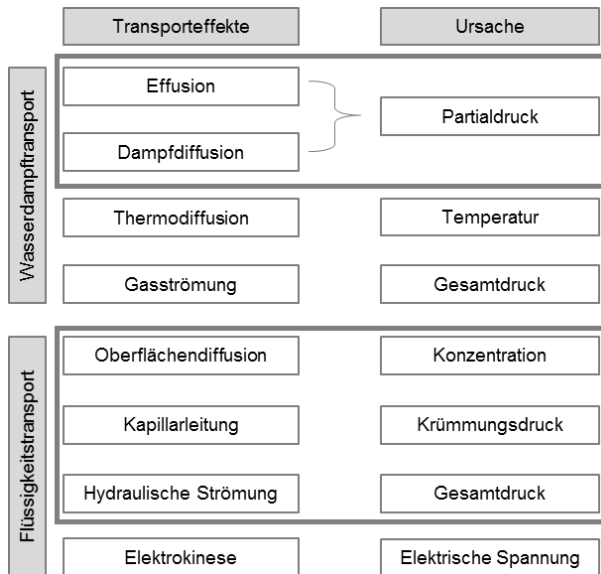


Abbildung 2-5: Übersicht der Feuchtetransportphänomene in Bezug auf den Alkalien- und Feuchtetransport modifiziert nach [Krus, 1995; Kießl, 1983]

Grundlagen zur Diffusion

- Als Diffusion gilt ein Transport von Ionen und Molekülen aufgrund von Partialdruck- oder Konzentrationsunterschieden und Molekularbewegung, wenn das Gesamtdruckgefälle gleich null ist [Schwiete et al., 1968].

- Bei der Wasserdampfdiffusion kann aufgrund von Partialdruckunterschieden sowohl Dampfdiffusion als auch Effusion auftreten. Ist die mittlere freie Weglänge größer als der Porenraumdurchmesser, liegt eine Effusion bzw. die sogenannte Knudsen'sche Molekularbewegung vor [Krus, 1995]. Dampfdiffusion kann nur stattfinden, wenn die transportierten Teilchen kleiner sind als die Abmessungen der Porenkanäle im Feststoff ($K_n \ll 1$). Bestimmt wird der Transport nicht wie bei der Effusion durch die Stöße mit der Porenwand, sondern durch Stöße der Wassermoleküle untereinander.
- Da zementgebundene Werkstoffe ein breites Porenspektrum aufweisen, ist eine klare Abgrenzung zwischen den Mechanismen der Effusion und der reinen Wasserdampfdiffusion kaum möglich. Zudem ist der Partialdampfdruck bei beiden Mechanismen ursächlich für den Transport. Die reine Dampfdiffusion durch einen porösen Stoff hindurch ist deutlich kleiner als durch eine gleich dicke Luftschicht. Infolge der Gewundenheit der Transportwege (Tortuosität) steht dem Diffusionsstrom ein Widerstand entgegen [Rucker-Gramm, 2010; Wiegrink, 2002]. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ gibt an, wieviel größer der Diffusionswiderstand des Materials im Vergleich zu einer gleich dicken Schicht ruhender Luft ist. Der Kennwert ist experimentell zu ermitteln.

Grundlagen zur Oberflächendiffusion

- Zementgebundene, poröse Werkstoffe wirken hygroskopisch, sodass sich an den Porenwänden Wassermoleküle anlagern. In Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte bildet sich ein Sorbatfilm und mit steigender relativer Luftfeuchte nimmt die Dicke des Sorbatfilms zu.
- Mit zunehmender Dicke des Sorbatfilms werden die Wassermoleküle beweglicher [Klopfer, 1974]. Unter isothermen Bedingungen und einem Partialdruckgradienten ist ein Gradient der relativen Luftfeuchte bzw. des Sorptionsgehalts vorhanden. Dadurch findet entlang der Kapillare ein Diffusionstransport in einer gasförmigen Phase und ein Flüssigkeitstransport in der Sorbatschicht statt (vgl. Abbildung 2-6). Die Richtung dieses Transportes ist von der Richtung des Partialdruckgradienten abhängig [Krus, 1995].

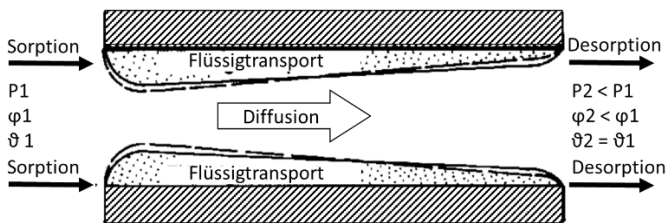


Abbildung 2-6: Modell für den überlagerten Flüssig- und Dampftransport im Porenraum hygroskopischer Baustoffe bei isothermen Randbedingungen [Krus u. Künzel, 1995]

- Die Oberflächendiffusion kann die Leistungsfähigkeit der Diffusion um mehrere Größenordnungen übersteigen [Klopfer, 1974]. Nach [Hedenblad, 1997] ist die Oberflächendiffusion bei einer relativen Luftfeuchte zwischen 35 % bis 70 % von untergeordneter Bedeutung. Mit zunehmender Luftfeuchtigkeit wird der

Einflussbereich größer, bis bei 100 % relativer Luftfeuchte der Feuchtetransport maßgeblich durch die Oberflächendiffusion bestimmt wird.

- Nach [Wiegrink, 2002] liegt nicht wie in der theoretischen Modellbildung eine glattwandige, kreisrunde Kapillare vor, sondern es bilden sich Zwickel in der realen Porenstruktur aus. Die Sorbatfilme bilden sich vor allem in Zwickeln aus, sodass sich durch eine Kapillarkondensation dicke bewegliche Wasserfilme ausbilden, die einen Feuchtetransport ermöglichen (vgl. Abbildung 2-7). Vergleichbare Annahmen werden auch in [Krus, 1995] beschrieben.

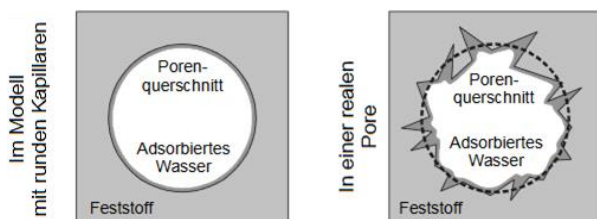


Abbildung 2-7: Theoretisches und reales Porenmodell in Verbindung mit differenzierter Ausbildung des Sorbatfilms nach [Wiegrink, 2002]

- Nach [Krus, 1995] ist die Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte auf eine Überlappung von Wasserdampftransport und Oberflächendiffusion zurückzuführen. Die Oberflächendiffusion ist als Flüssigkeitstransport zu beschreiben, die im Bereich des Sorbatfilms stattfindet. Zusätzlich entsteht ein Wasserdampftransport außerhalb des Sorbatfilms. Unter isothermen Bedingungen findet der Wasserdampf- und Flüssigkeitstransport in dieselbe Richtung statt.

Grundlagen zur Kapillarleitung und kapillarem Saugen

- Zementgebundene Werkstoffe wirken in der Regel hydrophil, d. h. aufgrund der starken Adhäsionskräfte an der Grenzfläche zwischen Porenwandung und Flüssigkeit in Verbindung mit der Oberflächenspannung des Wassers bildet sich eine konkave (nach innen gewölbte) Oberfläche aus. Entgegen der Schwerkraft kann Wasser durch einen resultierenden Kapillarsog in die Kapillaren eingesogen werden.
- In zementgebundenen Werkstoffen liegen unterschiedlich große, miteinander verknüpfte Poren vor, die verschieden große kapillare Zugkräfte und Widerstände aufweisen. Die Saugspannung in der Pore ist umgekehrt proportional zum Porenradius und die Geschwindigkeit ist umgekehrt proportional zum Radius im Quadrat. In großen Kapillaren kann trotz der geringen Saugspannung das Wasser schneller steigen als in kleinen Kapillaren. Die Steighöhe in kleineren Kapillaren ist jedoch größer als in großen Kapillaren [Krus, 1995]. Nach [Setzer, 1991] findet ein kapillarer Saugtransport nur in einem Porenradius zwischen 50 nm und 50 μm statt.
- Die Saugversuche über längere Zeiträume an wasserundurchlässigem Beton von [Beddoe u. Springenschmid, 1999] zeigten, dass die kapillare Steighöhe nur anfangs einem Wurzel-Zeit-Gesetz folgt und sich anschließend verlangsamt. In Abhängigkeit von der Porenverteilung und dem Feuchtegehalt des Betons stellt

sich nach etwa einem Monat eine maximale Steighöhe zwischen 5 mm und 70 mm ein (vgl. Abbildung 2-8). Somit liegt ein endliches Wasseraufnahmeverhalten vor.

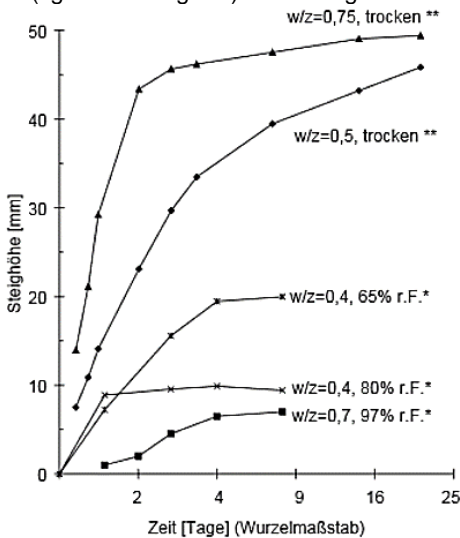


Abbildung 2-8: Steighöhe des Wassers in Beton durch kapillares Saugen aus [Beddoe u. Springenschmid, 1999], * nach [Volkwein, 1993], ** nach [Kaufmann u. Studer, 1995]

- Nach [Wittmann u. Prim, 1996] ist das kapillare Saugen bei Zementstein von dem vorliegenden Feuchtegehalt abhängig. Vergleichbare Aussagen sind auch in [Volkwein, 1993] festzustellen. Im Allgemeinen nimmt nach [Wittmann u. Prim, 1996] die kapillare Saugfähigkeit des Zementsteins mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt stark ab und erreicht in der Nähe von 100 % relativer Luftfeuchte vernachlässigbar kleine Werte. Kapillar saugen können nur leere Poren, jedoch füllen sich feine Poren bei einer relativen Luftfeuchte von 50 % durch Kapillarkondensation. Diese feinen Poren stehen bei höheren Luftfeuchten für die kapillare Wasseraufnahme nicht mehr zur Verfügung. Poren mit einem Radius von etwa 1 nm bis etwa 100 nm sind durch Kapillarkondensation füllbar. Ist der Anteil der Poren im Werkstoff hoch, übt die Feuchtigkeit aus der Umgebung einen starken Einfluss auf die kapillare Saugfähigkeit aus. Die kapillare Saugspannung ist im übersättigten Bereich gleich null, sodass es trotz Wassergehaltsgefälle keinen Flüssigkeitstransport gibt [Krus, 1995].
- Die Ursache der endlichen Wasseraufnahme und der Abweichung des Wurzel-Zeit-Gesetzes wird auf die Selbstabdichtung des Betongefüges zurückgeführt. Unterschiedliche Mechanismen wie das Bingham'sche Fließen der Porenlösung in den Kapillarporen [Volkwein, 1993], eine Querschnittsverkleinerung der Kapillaren aufgrund des inneren Quellens des Zementgels [Krus et al., 1997], Lösungs- und Ablagerungsvorgänge [Hearn u. Morley, 1997] und auch die Nachhydratation des Zements [Beddoe u. Springenschmid, 1999] werden als Ursachen genannt. Nach [Rucker et al., 2006] wurde die Selbstabdichtung auf das Quellen im Gelporenraum zurückgeführt.
- Als theoretische Grundlage für die Abschätzung des Wassertransports über Kapillarleitung wird vereinfacht ein Kapillarbündelmodell angenommen, welches

aus parallel angeordneten, widerstandslos miteinander verbundenen Zylinderkapillaren mit unterschiedlichen Durchmessern besteht. [Krischer u. Kast, 1978] haben formal den Wassergehalt als treibendes Potenzial eingeführt. Zur Modellierung derartiger Transportvorgänge hat sich folgender Ansatz durchgesetzt (z. B. [Krischer u. Kast, 1978; Krus, 1995; Rucker-Gramm, 2008]).

$$g_w = -D_{w(w)} \frac{dw}{dx} \quad (2-1)$$

mit

g_w	Flüssigtransportstromdichte in [kg/(m ² ·s)]
$D_{w(w)}$	Flüssigtransportkoeffizient in [m ² /s]
w	Wassergehalt in [kg/m ³]
x	Weglänge in [m]

- Die kapillare Wasseraufnahme kann anhand DIN EN ISO 15148 abgeschätzt werden. Anhand der Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten kann zwar die aufgenommene Flüssigkeitsmenge abgeschätzt werden, Aussagen über die Wassergehaltsverteilung oder kapillare Ausgleichsvorgänge sind jedoch nicht möglich [Krus, 1995].

Im Folgenden wird basierend auf den zuvor beschriebenen Grundlagen auf die unterschiedlichen Transportprozesse und Feuchtezustände bei der Befüllung (Erstbefüllung und nach längerer Außerbetriebnahme), während des Betriebs und bei der Außerbetriebnahme einer Wasserkammer eingegangen. Der Fokus in Bezug auf die Auslaugung und Realkalisierung infolge möglicher Transportprozesse liegt auf während der Betriebszeit. Erst über die Betriebsdauer können langfristige Veränderungen entstehen.

2.1.6.2 Inbetriebnahme

In Abbildung 2-10 werden schematisch die zu unterscheidenden Bereiche eines Trinkwasserbehälters (Wasserkammer) in Bezug auf die wirkenden Transportmechanismen dargestellt. Betriebs- und bauteilbedingt bilden sich zwei verschiedene Bereiche aus. Dazu zählen die Decken- und Wandflächen oberhalb des Wasserstands mit hoher relativer Luftfeuchte und die Wand- und Bodenflächen unterhalb des Wasserstandes mit dauerhaft anstehendem Wasser.

Nach der Befüllung des Behälters steigt die relative Luftfeuchte oberhalb des Wasserstands an. Zunächst ist von einer Dampfdiffusion bis hin zur Oberflächendiffusion in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte auszugehen. Im weiteren Verlauf können sich an der Deckenfläche der Wasserkammer aufgrund der sich einstellenden hohen Luftfeuchtigkeit (~ 100 % r. F.) im Behälter Kondensattropfen an der Mörtel- bzw. Betonoberfläche bilden. Die Oberflächendiffusion entwickelt sich im Bereich der Kondensatbildung zu einer Kapillarleitung aus, was den Übergang zum Betriebszustand darstellt.

Die Wandflächen der Wasserkammer weisen zwei Transportmechanismen auf. Oberhalb der maximalen Einstauhöhe sind dieselben Transportprozesse maßgebend wie im Deckenbereich. Der Unterschied besteht darin, dass Wasser in flüssiger Form

bauteil- und betriebsbedingt leichter abtropfen bzw. ablaufen kann, sodass von einer geringeren Kondensatbildung als an der Deckenfläche auszugehen ist.

Unterhalb des Wasserstandes können die Transportprozesse im Druckwasserbereich in Anlehnung an Bauteile aus wasserundurchlässigem Beton angesetzt werden (vgl. Abbildung 2-9). Vergleichbar mit ungerissenen WU-Bauteilen, die einseitig mit drückendem Wasser beaufschlagt werden, findet der Feuchtetransport [Wiens u. Alfes, 2007; Beddoe u. Springenschmid, 1999] wie folgt statt.

Ausgehend von der vom Wasser beaufschlagten Seite ist zunächst von einer Permeation auszugehen, indem Wasser durch den hydraulischen Druck in den Beton eindringt. Dabei wird das Porensystem in Folge des äußeren Drucks mit Wasser durchströmt. Die Durchlässigkeit von Beton gegenüber drückendem Wasser kann mit dem k -Wert nach Darcy beschrieben werden. Der Einflussbereich liegt bei WU-Bauwerken in der Größenordnung einiger Millimeter. Die Wasserdruckhöhe und die Betonqualität sind dabei als maßgebende Einflussfaktoren relevant. Als Arbeitsmodell [Wiens u. Alfes, 2007] wurde die Ausdehnung des Druckwasserbereichs mit maximal 25 mm angesetzt. Nach dem Bereich der Permeation folgt der Kapillarbereich (Kapillarleitung). Der Beton kann je nach vorliegenden Feuchtebedingungen Wasser kapillar aufsaugen. Da die kapillare Eindringtiefe nicht von der Schwerkraft beeinflusst wird, gilt das Arbeitsmodell [Wiens u. Alfes, 2007] nicht nur für Wandflächen, sondern auch für Bodenflächen.

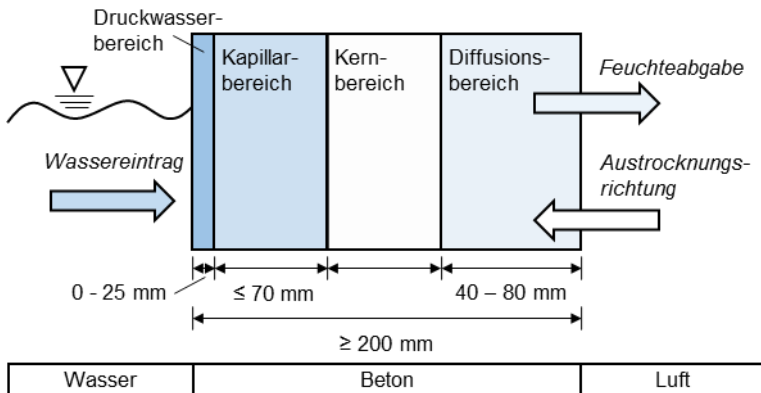


Abbildung 2-9: Arbeitsmodell für Feuchtebedingungen in einem Betonbauteilquerschnitt unter einseitiger Beaufschlagung mit drückendem Wasser (Beton C30/37, w/z-Wert $\leq 0,55$) aus [Wiens u. Alfes, 2007] mit eigenen Modifizierungen

Zusammengefasst findet in Trinkwasserbehältern aufgrund der sich schnell einstellenden hohen relativen Luftfeuchte während der Inbetriebnahme nur kurzzeitig eine Dampfdiffusion statt. Bis ca. 95 % r. F. liegt eine Mischung aus wasserdampf- und wassergefüllten Poren vor und es treten gleichzeitig dampfförmige und flüssige Feuchteströme auf. Der zunehmende Flüssigkeitstransport bewirkt einen exponentiellen Anstieg der Diffusionsleitfähigkeit. Oberhalb von 95 % r. F. erfolgt der gesamte Massenstrom in der Flüssigphase.

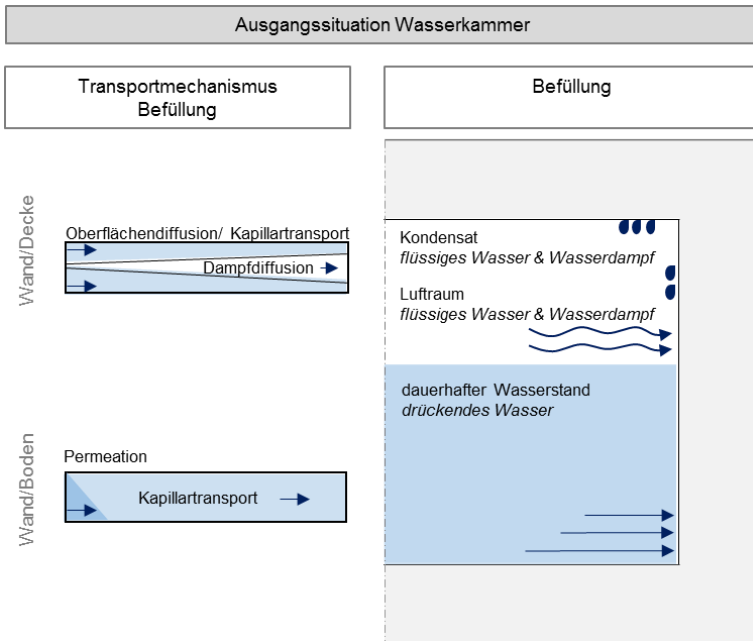


Abbildung 2-10: Schematische Darstellung der maßgebenden Feuchtetransportmechanismen in Abhängigkeit von der Bauteilfeuchte und -lage bei Befüllung der Wasserkammer

2.1.6.3 Betriebszustand

In Abbildung 2-11 werden schematisch die zu unterscheidenden Bereiche eines Trinkwasserbehälters (Wasserkammer) in Bezug auf die wirkenden Transportmechanismen während des Betriebs dargestellt. Die Unterschiede zur Inbetriebnahme werden im Folgenden beschrieben.

Wie bei der Inbetriebnahme beschrieben, können sich an der Deckenfläche der Wasserkammer aufgrund der hohen Luftfeuchtigkeit (~ 100 % r. F.) im Behälter Kondensattropfen an der Mörtel- bzw. Betonoberfläche bilden.

Die Zusammensetzung des Kondenswassers unterscheidet sich vom Trinkwasser, da ein Wechsel des Aggregatzustandes eine Destillation bewirkt und somit einen geringeren Mineralstoff- und Ionenanteil aufweist. Als treibender Transportmechanismus ist hier die Oberflächendiffusion im Bereich hoher relativer Luftfeuchtigkeit und die Kapillarleitung im Bereich des Kondensats anzusetzen. Damit das gebildete Kondensat schneller abtropfen kann, wird bei der Mörtelapplikation eine spritzraue Oberfläche bevorzugt, die als natürliche Tropfkante dient. Eine spritzraue Fläche weist im Verhältnis zu einer geglätteten Fläche eine größere wirksame Oberfläche auf, die sich dementsprechend beschleunigend auf die Transportprozesse auswirken kann.

Die Kondensatbildung und hohe relative Luftfeuchte bewirken, dass die Bauteilrandzone wassergesättigt ist und die Oberflächendiffusion und der Kapillartransport in die Tiefe begrenzt wird. Während des Betriebs stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein.

An den Wandflächen ergibt sich betriebsbedingt eine Wasserwechselzone. Hier findet maßgeblich eine Kapillarleitung statt. Auch bei sinkendem Wasserstand ist aufgrund der hohen relativen Luftfeuchtigkeit im Behälter von keinem nennenswerten Rückgang der Wassersättigung auszugehen. Eine Oberflächendiffusion findet, wenn überhaupt, nur untergeordnet statt. Eine zeitweise Permeation in der Bauteilrandzone tritt bei Erhöhung des Wasserstandes auf. Ein kapillares Saugen ist trotz der Wasserwechselzone aufgrund der hohen relativen Luftfeuchte vernachlässigbar klein.

Ein wechselnder Wasserstand hat folgenden zusätzlichen Effekt bzw. Transportmechanismus zur Folge. Bei der Befüllung der Wasserkammer wird durch den hydrostatischen Druck die im Porenraum enthaltene Luft komprimiert. Sobald sich der äußere Druck vermindert, wie bspw. bei einem wechselnden Wasserstand oder bei der Entleerung, wird das Wasser durch die gespannte Luft wieder aus dem Porensystem herausgedrückt. An Fehlstellen in dem sonst dichten Zementsteingefüge können sich so verstärkt Ausfällungen kreisrund abbilden. Nach [Boos u. Breit, 2010] wird der Effekt als „Pumpeffekt“ bezeichnet. Dieser Prozess ist für mögliche Auslaugprozesse in der Betonrandzone relevant. Für die Realkalisierung ist aufgrund der begrenzten Tiefe dieser zusätzliche Mechanismus zu vernachlässigen.

Die kapillare Wasseraufnahme infolge der Oberflächenspannung an den Porenwandungen wird durch die „Selbstabdichtung“ begrenzt (Wand- und Bodenbereich). Nach Untersuchungen von [Beddoe u. Springenschmid, 1999] wird eine maximale Eindringtiefe von 5 mm bis 70 mm je nach Betonqualität und Feuchtegehalt nach ca. einem Monat erreicht. Diese Erkenntnis führte zur Festlegung eines Kapillarwasserbereichs von maximal 70 mm.

Bei den meisten porösen mineralischen Baustoffen (bspw. Ziegel, Kalkstein oder Naturstein) nimmt die Eindringtiefe proportional mit der Wurzel der Zeit zu [Krus u. Künzel, 1995; Rucker-Gramm, 2018]. Bei Beton gilt die Wurzel-Zeit-Beziehung zwischen Eindringtiefe und Zeit für längere Wasserbeaufschlagungen nicht, da nur anfänglich das Eindringverhalten einem Wurzel-Zeit-Gesetz entspricht und mit zunehmender Zeit abflacht und sich einer horizontalen Asymptote annähert (vgl. Abschnitt 2.1.6.1). Zusammengefasst ist der Einfluss des kapillaren Wassertransports in die Tiefe begrenzt.

An den Kapillarbereich schließt der Kernbereich an, in dem kein Feuchtetransport aus Permeation und Kapillartransport mehr stattfindet, wobei eine ausreichende Bauteildicke vorliegen muss. An den Kernbereich schließt zur Luftseite hin der Diffusionsbereich an, der eine Feuchteabgabe durch Wasserdampfdiffusion zur Folge hat. Die Einflüsse aus Druckwasserbereich, Kapillarbereich und Kernbereich sind in Abbildung 2-9 dargestellt.

Im Betriebszustand sind die Bauteiloberflächen wassergesättigt. Auch unterhalb des Wasserstandes ist ein kapillarer Wassertransport möglich, der durch Selbstabdichtung in der Tiefe begrenzt wird. Ein Wasser- und Alkalientransport kann in der flüssigen Phase nur im Kapillarbereich stattfinden.

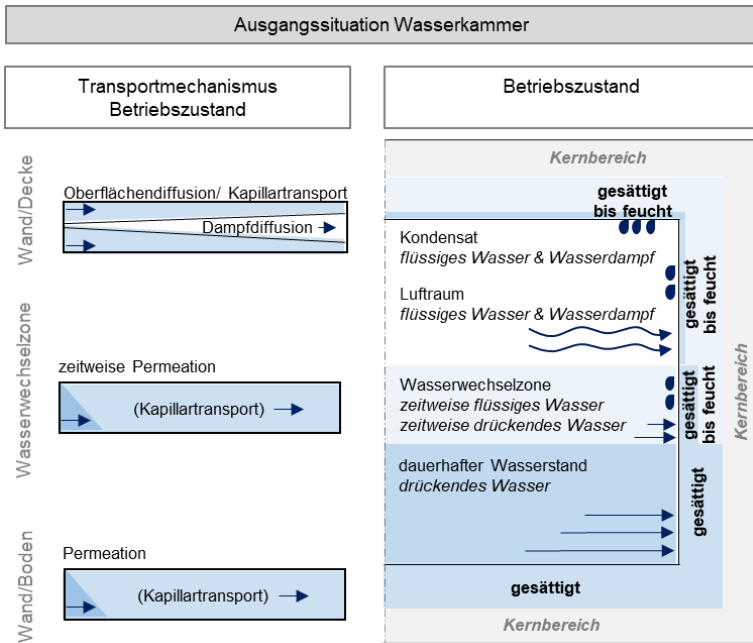


Abbildung 2-11: Schematische Darstellung der maßgebenden Feuchtetransportmechanismen in Abhängigkeit von der Bauteilfeuchte und -lage während des Betriebs

2.1.6.4 Außerbetriebnahme

In Abbildung 2-12 werden schematisch die zu unterscheidenden Bereiche eines Trinkwasserbehälters (Wasserkammer) in Bezug auf die wirkenden Transportmechanismen infolge einer Außerbetriebnahme dargestellt. Die Unterschiede zur Inbetriebnahme bzw. zum Betrieb werden im Folgenden beschrieben.

Sollte für eine jährliche Begehung oder Reinigung der Wasserkammer der Behälter außer Betrieb genommen werden (< 1 Tag), bleibt die Betonrandzone wassergesättigt. Eine nennenswerte Änderung der maßgebenden Transportprozesse aus dem Betrieb findet nicht statt. Der einzige zusätzliche Stoff- und Wassertransport kann durch den zuvor beschriebenen „Pumpeffekt“ entstehen (vgl. Betrieb; Abschnitt 2.1.6.3). Bei längeren Außerbetriebnahmen trocknet die Betonrandzone durch strömende Luft (Wasserdampfdiffusion) ab, sodass der Transportzyklus (Inbetriebnahme → Betrieb) von Neuem beginnt.

Im Rahmen einer Instandsetzung wird der Behälter außer Betrieb genommen. Während der Instandsetzungsmaßnahme verbleibt i. d. R. eine hohe relative Luftfeuchte in der Wasserkammer. Ebenso führen die Maßnahmen während einer Instandsetzung (Untergrundvorbereitung, Schadensstellenbearbeitung und mineralische Beschichtung) zu keinem signifikanten Abtrocknen der Oberflächen, sodass, wenn überhaupt, die oberflächennahe Betonrandzone zeitweise abtrocknen kann. Im Grunde genommen bleibt die Betonrandzone wassergesättigt bzw. wird sie durch die Maßnahmen wie bspw. Vornässen als Vorbereitung der Mörtelapplikation feucht

gehalten. In Bezug auf die Realkalisierung ist davon auszugehen, dass kein ausgetrockneter Betonuntergrund vorliegt.

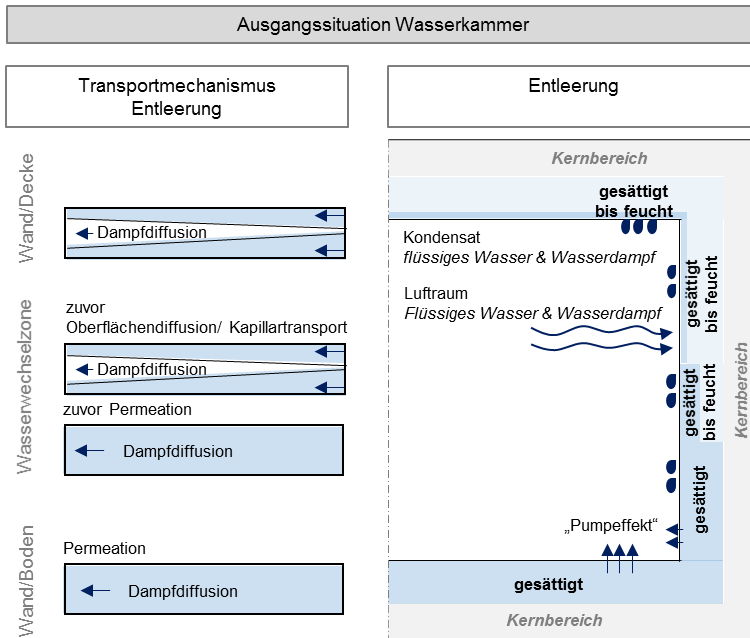


Abbildung 2-12: Schematische Darstellung der maßgebenden Feuchtetransportmechanismen in Abhängigkeit von der Bauteilfeuchte und -lage bei der Außerbetriebnahme der Wasserkammer

2.2 Auslaugung und Carbonatisierung des Zementsteins

2.2.1 Allgemeines

Für die Mechanismen und den zeitabhängigen Verlauf der Realkalisierung ist zunächst relevant, wodurch eine pH-Wert Absenkung im Beton möglich ist und welche Werkstoffveränderungen damit einhergehen. In den folgenden Abschnitten werden die beiden Schadensmechanismen Auslaugung und Carbonatisierung von zementgebundenen Werkstoffen erläutert. Insbesondere die grundlegenden Unterschiede, die Veränderungen der Gefügestruktur und die Veränderung der Zusammensetzung werden für beide Mechanismen betrachtet.

2.2.2 Auslaugung

Unter hydrolytischer Korrosion ist ein lösender Angriff zu verstehen, der einen Zersetzungsprozess der calciumhaltigen, silikatischen, aluminatischen und ferritischen Feststoffphasen durch Wasserstoffionen des dissoziierten Wassers in ihre basischen und sauren Bestandteile zur Folge hat [Boos, 2003; Boos u. Breit, 2010]. Unter Auslaugung versteht man den gesamten Schadensmechanismus, der eine Lösung von Calcium und eine anschließende Verarmung an Calcium des Zementsteins infolge kalkarmen bzw. kalkfreiem Wasser bewirkt. Die einzelnen Prozessschritte der

Auslaugung und der Zeitpunkt des Zersetzungsprozesses infolge einer hydrolytischen Korrosion sind in Abbildung 2-13 dargestellt und werden im Folgenden erläutert.

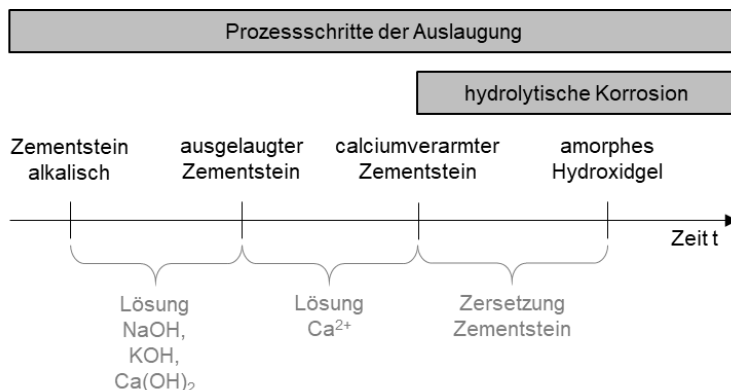


Abbildung 2-13: Vereinfachte Darstellung der Prozessschritte der Auslaugung zementgebundener Werkstoffe bei Kontakt mit kalkfreiem und kalkarmem Wasser, Abgrenzung von Auslaugung und hydrolytischer Korrosion

Unter thermodynamischen Gesichtspunkten ist Zementstein in reinem Wasser nicht beständig. Das Wasser dringt über das Porensystem in den Zementstein ein. Aufgrund des bestehenden Konzentrationsgefälles zwischen der hochalkalischen Porenlösung (pH-Wert 12 bis 13) und dem Wasser (pH-Wert ca. 7) wird eine Ionendiffusion ausgelöst. Die Auslaugung ist somit als kombinierter Lösungs- und Diffusionsprozess anzusetzen.

Die verschiedenen Calciumverbindungen, bestehend aus Calciumsilikathydrat (CSH), kristallinem Portlandit (CH) sowie in der Porenlösung gelöstem Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), stehen in enger Wechselwirkung zueinander und können sich auf Basis thermodynamischer Prozesse umwandeln. Bei der Auslaugung werden zunächst die Alkalihydroxide (NaOH und KOH) und das Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) aus dem Porensystem gelöst und aufgrund des Diffusionsprozesses nach außen transportiert. Die Porenlösung bleibt hierbei zunächst calciumgesättigt (~20 mmol/l [Le Bellégo et al., 2000]), solange Portlandit im Zementstein vorhanden ist (vgl. Abbildung 2-14). Nach [Adenot u. Buil, 1992] stabilisiert sich der pH-Wert der Porenlösung dabei auf ca. 12,5. Nachdem das Portlandit restlos aufgelöst ist, beginnt der Zementstein an Calcium zu verarmen und gleichzeitig sinkt die Calciumkonzentration der Porenlösung (pH-Wert < 12,5). Hierbei verringert sich das Calcium/Silizium-Verhältnis im Zementstein von Werten um 1,5 auf Werte unter 1,0. Nach einer Calciumverarmung schließt die fortgesetzte Zersetzung des Zementsteins an. Nach [Boos, 2003] wandeln sich Calciumsilikathydrate in amorphe Kieselsäure um. Tricalciumaluminathydrat zersetzt sich aufgrund der Calciumauflösung in gelöstes Calcium und in schwerlösliche, amorphe Aluminiumhydroxide. Eisenhaltige Zementsteinphasen zerfallen zu amorphen dreiwertigen Eisenhydroxiden.

Die genannten Prozesse laufen zeitlich dicht aufeinanderfolgend und tiefenabhängig ab. Mit zunehmender Schädigungstiefe wird die Oberfläche aufgeweicht und die Gesteinskörnung sandet ab [Schwotzer, 2008; Le Bellégo et al., 2000]. In der Literatur

wird beschrieben, dass die hydrolytische Korrosion mit einer Erhöhung der Gesamtporosität einhergeht [Boos, 2003; Schwotzer, 2008; Breitbach, 2007].

Die Annahme vereinfachter Lösungszusammenhänge der Zementbestandteile und Fick'scher Diffusion der gelösten Bestandteile erlaubt es dabei die zeit- und tiefenabhängige Auslaugung und Schädigung mittels verschiedener mathematischer Gesetzmäßigkeiten abzubilden. Einfache Ansätze basieren dabei auf einem Wurzel-Zeit-Ansatz [Le Bellégo et al., 2000] und können hin zu komplexeren numerischen Modellen erweitert werden [Gerard et al., 2002].

Es können, je nach Stärke der Beanspruchung, Parallelen zu einer säurebedingten Schädigung von Beton gezogen werden. Hierbei dringen Säuremoleküle in den hochalkalischen Beton ein, reagieren dort und neutralisieren diesen. Die je nach Säure gebildeten Produkte weisen eine geringe Festigkeit und erhöhte Löslichkeit auf und werden im weiteren Prozess abgetragen. Unter Annahme einer gleichbleibenden Konzentrationsdifferenz kann zu Beginn der Beanspruchung eine zeitlich lineare Auflösung des Zementsteins und damit ein reaktionskontrollierter Prozess aufgrund des kongruenten Lösungsverhaltens von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ angenommen werden [Gerlach, 2017]. Mit fortschreitender Zeit bildet sich eine calciumverarmte Deckschicht, die den Abtransport weiterer Zementsteinbestandteile aus größeren Tiefen aufgrund des inkongruenten Lösungsverhaltens der CSH-Phasen reduziert. Die Prozessgeschwindigkeit wird zunehmend verlangsamt und folgt einem Wurzel-Zeit-Gesetz unter der Annahme, dass ein diffusionskontrollierter Prozess zu Grunde liegt. Die calciumverarmte Zone gewinnt zunächst an Dicke, wird jedoch mit fortschreitender Schädigung auch zunehmend abgetragen. In diesem Stadium bleibt die Dicke der calciumverarmten Zone konstant und der Korrosionsprozess läuft mit konstanter Geschwindigkeit ab [Gerlach, 2017]. Der beschriebene dreistufige Mechanismus ist in Abbildung 2-15 dargestellt.

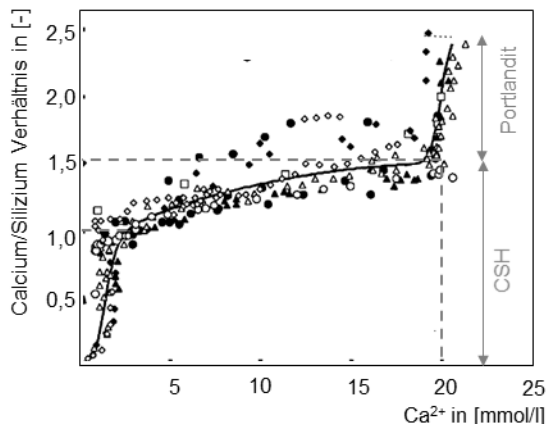


Abbildung 2-14: Lösungsgleichgewicht von Calcium in der Porenlösung und Calcium/Silizium-Verhältnis des umgebenden Zementsteins nach [Le Bellégo et al., 2000]

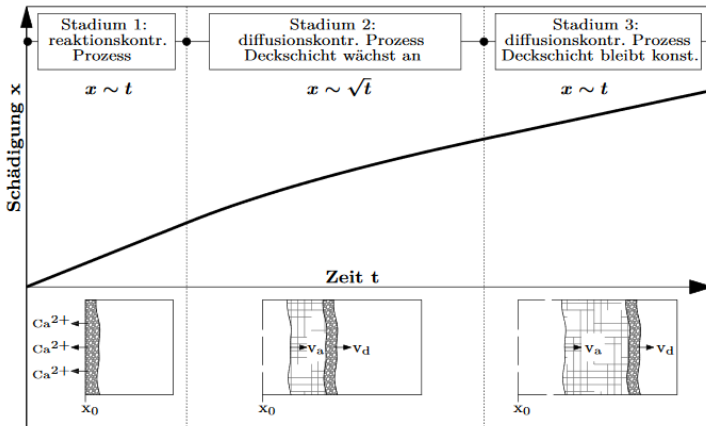


Abbildung 2-15: Korrosionsstadien beim lösenden Betonangriff [Gerlach, 2017]

Der beschriebene Mechanismus der Auslaugung ist ausschließlich in mineralstofffreiem Wasser ungestört möglich. Mineralstofffreies Wasser ist in Trinkwasserbehältern ausschließlich als Kondensat im Deckenbereich gegeben.

Bei Kontakt mit Trinkwasser fällt im oberflächennahen Bereich zusätzlich Calciumcarbonat aus, das sich auf der Werkstoffoberfläche abscheidet. Der kombinierte Lösungs-/Diffusionsmechanismus wird dadurch stark verlangsamt [Boos - 2003, Boos u. Breit, 2007]. Untersuchungen zum Auslaugungswiderstand von Betonoberflächen in Trinkwasser [Schulte Holthausen et al., 2020a; Schulte Holthausen et al., 2020b; Schulte Holthausen et al., 2016] ergaben, dass nach einer Gesamtdauer von 280 Tagen keine negativen Veränderungen des Zementsteingefüges eintraten (~ 7 °dH, weiches Wasser).

Nach [Locher, 2000] führt erst sehr weiches Wasser mit einer Gesamthärte unter 4 °dH zu einem leichten, lösenden Angriff. Verstärkt wird der lösende Angriff durch kalklösende Kohlensäure im Wasser oder durch saures Wasser. Erst ab einem pH-Wert von $\leq 6,5$ wird entsprechend DIN 4030-1 ein Betonangriff beschrieben.

2.2.3 Carbonatisierung

Die Carbonatisierung des Betons nimmt bei Trinkwasserbehältern eine nur untergeordnete Rolle ein. Wie in Abschnitt 2.1.6 beschrieben, ist unterhalb des Wasserstands von einer dauerhaften Wassersättigung auszugehen. Eine Carbonatisierung ist demnach zu vernachlässigen. Oberhalb der Wasserwechselzone herrscht i. d. R. eine hohe relative Luftfeuchtigkeit (≥ 95 %), sodass auch hier eine Carbonatisierung zu vernachlässigen ist. Sollte betriebsbedingt eine gute Belüftung oberhalb des Wasserstands bestehen, kann eine CO_2 -Diffusion zu einer Carbonatisierung der Betonrandzone führen.

Im Folgenden wird auf die Carbonatisierung des Betons und die einhergehenden Werkstoffveränderungen eingegangen, da für die experimentellen Untersuchungen zur Realkalisierung insbesondere carbonisierte Betonuntergründe verwendet werden mussten.

Das aus der Umgebungsluft in das Porensystem des Betons eindringende Kohlenstoffdioxid (CO_2) führt zu chemischen Veränderungen der Zusammensetzung und Umwandlung von Mikrostrukturen im Beton. Der pH-Wert der Porenlösung sinkt von über 12,6 auf pH-Werte < 9 ab. Grundlegend verläuft die Carbonatisierung des Zementsteins in drei Schritten [Jungermann, 1982]:

1. Diffusion von CO_2 in die feinsten Kapillarporen
2. Lösen des CO_2 in der Porenlösung der Porenwände
3. Reaktion des Calciumhydroxids und der Alkalihydroxide mit der Kohlensäure

Die Alkalihydroxide Natriumhydroxid (NaOH) und Kaliumhydroxid (KOH), welche Bestandteile der Porenlösung sind, werden in neutrale Carbonate umgewandelt [Smolczyk, 1976]. Das Verhalten von KOH ist dem von NaOH vergleichbar [Verbeck, 1988]. Calciumhydroxid reagiert mit CO_2 bei Anwesenheit von Wasser zu Calciumcarbonat [Bier, 1988].

Bei der Reaktion wird sämtliches Calciumhydroxid in gelöster Form umgesetzt. Aufgrund des ständigen Nachlieferns von kristallinem CH, wird auch dieses verbraucht [Bier, 1988]. Das CSH-Gel reagiert ebenfalls mit dem Kohlendioxid unter Bildung von Calciumcarbonat und Kieselsäuregel.

Entsprechend den Untersuchungen von [Bier, 1988] und [Matsusato et al., 1992] findet eine gleichzeitige Carbonatisierungs-Reaktion von CH und CSH statt. Die zuvor dicht gelagerten CSH-Phasen werden dabei in poröses Silikathydrat-Gel (SH-Gel) umgewandelt. Je nach Anteil der CSH-Phasen im Zementstein und dem Grad der SH-Gel Umwandlung entsteht eine mehr oder weniger stark veränderte Gefügestruktur des Zementsteins [Bier, 1988].

Die Carbonatisierung übt einen Einfluss auf die Mikrostruktur und die Porenradienverteilung des Zementsteins aus. Die Gesamtporosität wird in Abhängigkeit vom Klinkergehalt verringert. Die Verringerung ist bei Portlandzementen entsprechend größer als bei hüttensandhaltigen Zementen [Bier, 1986]. Gleichzeitig findet eine Veränderung der Porenradienverteilung insofern statt, als dass der Gelporenanteil durch die Zersetzung der CSH-Phasen reduziert wird [Kropp, 1983]. Insbesondere der Gelporenanteil (kleiner 5 nm) wird verringert und bei ca. 10 nm bildet sich ein neuer Peak bei Betrachtung der Porenradienverteilung aus. Zwischen 10 nm und 100 nm wird der Porenanteil ebenso reduziert und der Porenanteil größer 100 nm nimmt zu [Härdtl, 1995]. Die Veränderung des Porengefüges bewirkt einen Festigkeitsanstieg in Abhängigkeit vom Zementklinkergehalt im carbonatisierten Bereich. Mit sinkendem Klinkergehalt, beispielsweise bei Hochofenzement mit hohem Hüttensandanteil, kann ebenso eine Festigkeitsminderung auftreten [Härdtl, 1995].

Eine Carbonatisierung des Zementsteins führt zu veränderten Transporteigenschaften und -geschwindigkeiten in Bezug auf die Diffusion von Gasen und die Feuchteaufnahme und -abgabe. Da für einen Alkalientransport insbesondere die Wasseraufnahme und -abgabe relevant ist, wird im Folgenden auf den veränderten Wassertransport eingegangen. Aus verschiedenen Literaturquellen geht hervor, dass bei carbonatisiertem Beton eine verstärkte kapillare Wasseraufnahme im Vergleich zu nicht carbonatisiertem Beton besteht.

[Parrot, 1992] beschreibt, dass die durchschnittliche Wasseraufnahme bei flugasche- und hüttensandhaltigen Proben im carbonatisierten Bereich größer ist als im nicht carbonatisierten Kernbereich. Bei reinem Portlandzement ist eine Verringerung dieser Kennwerte zu verzeichnen, jedoch führt die Carbonatisierung ebenso zu einer erhöhten Wasseraufnahme. Zwar kann carbonatisierter Beton größere Wassermengen kapillar aufnehmen, dennoch gibt der Beton das Wasser auch schneller an die Umgebung wieder ab.

Aus Untersuchungen von [Schießl et al., 1994] geht anhand tiefenabhängiger elektrischer Widerstandsmessungen in carbonatisiertem und nicht carbonatisiertem Beton hervor, dass carbonatisierte Randzonen unabhängig von der Zementart bei einer Wasserbeaufschlagung schneller Wasser aufnehmen und danach schneller wieder Wasser abgeben.

Anhand der Untersuchungen von [Brameshuber et al., 2000] zum Einfluss der Carbonatisierung auf den Frost-Tauwechselwiderstand können Rückschlüsse auf die Wasseraufnahme gezogen werden. Bei carbonatisiertem Beton stellt sich eine geringere Ausgleichsfeuchte bei trockenen Umgebungsbedingungen ein als bei nicht carbonatisiertem Beton. Bei anschließenden Saugversuchen konnte der carbonatisierte Beton entsprechend mehr Wasser in das Porensystem aufnehmen.

Auch wenn bei carbonatisiertem Beton höhere Diffusionswiderstände gegenüber Gasen bestehen, ist durch die schnellere Wasseraufnahme von erhöhten Transportgeschwindigkeiten für wässrige Medien auszugehen. Trotz Reduzierung der Gesamtporosität besteht eine erhöhte Kapillaraktivität des Zementsteins. In Bezug auf die Alkalienaufnahme während der Realkalisierung ist die verstärkte kapillare Wasseraufnahme von carbonatisiertem Beton von besonderem Interesse.

2.3 Realkalisierung zementgebundener Werkstoffe

2.3.1 Allgemeines

Die bisherigen Erkenntnisse zur Realkalisierung von carbonatisiertem Beton werden in den folgenden Abschnitten behandelt. In diesem Bereich liegen umfassende Untersuchungen und Ergebnisse auch aus der angewandten Praxis vor. Insbesondere die zugrundeliegenden Mechanismen und bisher erfassten Einflussfaktoren sollen dabei betrachtet werden. Die Realkalisierung von zuvor ausgelaugten Betonuntergründen wurde in Forschungsarbeiten bisher nicht behandelt.

2.3.2 Mechanismus der Realkalisierung

Das grundlegende Prinzip der Realkalisierung von carbonatisiertem Beton durch den Auftrag eines alkalischen Mörtels beruht auf der Diffusion von alkalischen Bestandteilen (NaOH , KOH und Ca(OH)_2). Der Transport der gelösten Alkalien findet nur bei einem ausreichenden Feuchteangebot statt.

Der zugrundeliegende Mechanismus der Realkalisierung nach [Bier, 1988] ist in Abbildung 2-16 dargestellt. In (a) ist die Grenzfläche zwischen alkalischem Mörtel und carbonatisiertem Altbeton abgebildet. Die Porenlösung des Mörtels ist mit Calcium- und Hydroxidionen gesättigt. Das Konzentrationsgefälle führt zum Eintrag von

Calcium- und Hydroxidionen in die Gefügematrix des Altbetons (b). Je nach Zementart und Carbonatisierungsgrad ist amorphes Kieselsäuregel vorhanden. An der Oberfläche des Silikatgels wachsen neue, stabile CSH-Phasen. Die Diffusion der Ionen wird in Abhängigkeit von der Menge und der Reaktivität des Kieselsäuregels durch eine chemische Reaktion gebremst. Bei ausreichend langer Realkalisierung und Eintrag von Calciumhydroxid kann die Bildung von neuen CSH-Phasen ein verändertes Porengefüge im Vergleich zum zuvor carbonatisierten Beton aufbauen (c). Die Bildung neuer CSH-Phasen kann auch durch eine Nachhydratation von bisher nicht hydratisierten Zementpartikeln entstanden sein. Aufgrund der Nachhydratation des Zementes vermindert sich der Kapillarporenanteil und die Porengrößen verkleinern sich.

Für den Transport bei konstanter Sättigung des Porensystems können folgende Diffusionskoeffizienten der relevanten Ionen angesetzt werden. Für Na-Ionen wird für Portlandzementstein mit einem w/z-Wert von 0,30 bis 0,45 ein Diffusionskoeffizient von 10^{-9} cm²/s bis 10^{-7} cm²/s angegeben [Goto u. Roy, 1981], für Ca-Ionen ein Diffusionskoeffizient von $2,8 \cdot 10^{-10}$ cm²/s [Goto u. Roy, 1981] und für OH-Ionen in carbonatisiertem Beton (Portlandzement und Hochofenzement) ein Wert von $5 \cdot 10^{-11}$ cm²/s bis $7 \cdot 10^{-11}$ cm²/s [Bier, 1988]. Die Diffusionskoeffizienten gelten nur bei konstanter Sättigung des Porensystems.

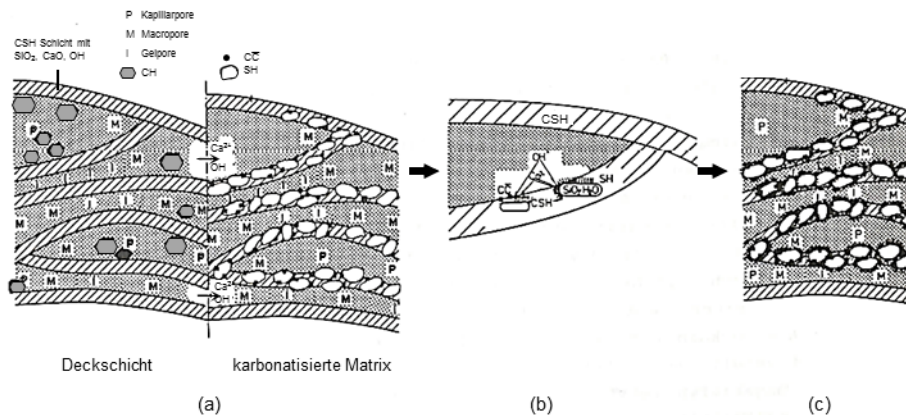


Abbildung 2-16: Mechanismus der Realkalisierung [Bier, 1988]

2.3.3 Einflussfaktoren der Realkalisierung

Aus den Untersuchungen von [Guse et al., 1994] geht hervor, dass mit zunehmender **Festigkeit des Altbetons aus Portlandzement** die Geschwindigkeit des Realkalisierungsfortschritts abnimmt (vgl. Abbildung 2-17). Zurückgeführt wird das Ergebnis auf einen höheren Anteil von größeren Porenradien (> 100 nm) bei geringeren Festigkeitsklassen. Dabei fördern Kapillareffekte, die nach [Lutz et al., 1985] in Poren mit einem Durchmesser ab 100 nm zu beobachten sind, das Vordringen der Alkalien.

Des Weiteren zeigte sich in den Untersuchungen, dass die Realkalisierung eines Altbetons aus **Hochofenzement** langsamer voranschreitet als bei einem Beton aus **Portlandzement** mit vergleichbarer Festigkeit (vgl. Abbildung 2-17). Begründet wurde

das Ergebnis damit, dass mit steigendem Hüttensandanteil des Zementes der Anteil des carbonatisierten CSH im Zementstein und die damit verbundene Bildung von Silikatgel ansteigt [Bier, 1988]. Mit wachsendem Silikatgelgehalt können verstärkt Alkalien in der carbonatisierten Matrix gebunden werden. Für die Erhöhung des pH-Wertes der Porenlösung stehen diese nicht mehr zur Verfügung.

[Guse et al., 1994] untersuchten den Realkalisierungsfortschritt von CC Mörteln (Zementmörtel) im Vergleich zu PCC Mörteln (kunststoffmodifizierte Zementmörtel) (vgl. Abbildung 2-18). Verwendet wurde ein PCC I Mörtel mit 5 M.-% (Polymeranteil bezogen auf das Bindemittel) und ein PCC II mit 10 M.-%. Die Verwendung eines **kunststoffmodifizierten Mörtels** führt zu einem geringeren Realkalisierungsfortschritt in Abhängigkeit von der Zeit. Polymerdispersionen führen zu einer teilweisen Füllung bzw. einer Abdichtung des Porensystems, sodass ein höheres Wasserrückhaltevermögen besteht und der Transport der Alkalien in den Altbeton zurückgehalten wird.

Ein weiterer Einfluss ergibt sich aus der Variation der **Schichtdicke** [Guse et al., 1994]. Bei einer Schichtdicke von 10 mm anstatt 20 mm ist ein geringerer Realkalisierungsfortschritt zu verzeichnen. Aufgrund der schnelleren Austrocknung der relativ dünnen Mörtelschicht steht kein ausreichendes Feuchteangebot für den Alkalientransport zur Verfügung.

Die **Nachbehandlungsdauer** und das anschließende **Lagerungsklima** sind für den Realkalisierungsfortschritt ebenfalls entscheidend [Guse et al., 1994; Bier, 1988]. Mit zunehmender Nachbehandlungsdauer wird die Realkalisierung beschleunigt, da die für den Alkalientransport erforderliche Porenlösung länger in ausreichendem Maße zur Verfügung steht. Mit steigender relativer Luftfeuchte und Wasser/Trocken-Wechselagerungen konnte eine schnellere Realkalisierung erreicht werden [Guse et al., 1994]. [Franke u. Wesselmann, 1992] beschreiben, dass sich das kapillare Saugen positiv auf die Realkalisierung auswirkt.

[Breitenbücher u. Solacolu, 1995] stellten bei Auslagerungsversuchen fest, dass eine Realkalisierung unter sehr **dichtem Mörtel** nicht eintritt. Untersuchungen an Stahlbetonstützen unter Praxisbedingungen ergaben nach zehn Jahren, dass keine nachweisbare Realkalisierung stattfand [Leißner u. Weber, 1994].

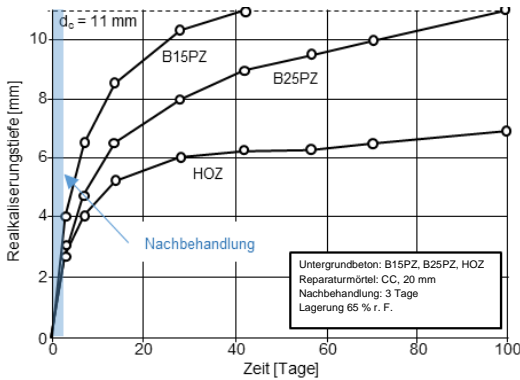


Abbildung 2-17: Realkalisierungsfortschritt bei Portlandzement (PZ) und Hochofenzement (HOZ) der Festigkeitsklasse B15 und B25 (Altbeton) mit CC Mörtel (w/z-Wert von ca. 0,5, Portlandzement) [Guse et al., 1994], mit farblicher Ergänzung der Nachbehandlungsdauer

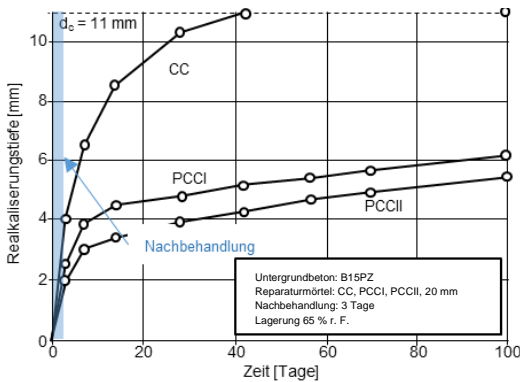


Abbildung 2-18: Realkalisierungsfortschritt bei Portlandzement (PZ) der Festigkeitsklasse B15 (Altbeton) mit CC und PCC Mörteln [Guse et al., 1994], mit farblicher Ergänzung der Nachbehandlungsdauer

Eine grundsätzliche Abschätzung der Realkalisierung anhand der Untersuchungsergebnisse nach [Guse et al., 1994] kann mit Hilfe folgender Formel erfolgen:

$$d_R = d_{R1} \cdot \prod_{i=1}^4 a_i \cdot \left(\frac{t}{t_1}\right)^{n \cdot \prod_{i=1}^7 b_i} \quad (2-2)$$

mit

- d_R Realkalisierungstiefe in [mm]
- d_{R1} Realkalisierungstiefe zum Zeitpunkt t_1 in [mm] = 3 mm
- a_i, b_i Anpassungsfaktoren nach Tabelle 2-1 und Tabelle 2-2 [-]
- t Realkalisierungsdauer in [d]
- t_1 Bezugsgröße [1d]
- n Exponent in [-] = 0,4

Tabelle 2-1: Anpassungsfaktoren a_i [Guse et al., 1994]

Parameter		Anpassungsfaktoren a_i		
Altbeton	Zementart	a_1	Portlandzement (PZ)	1,00
			Hochofenzement (HOZ) Hüttensand ca. 60 M.-%	0,95
	Festigkeit	a_2	B15	1,00
			B25	0,90
Haftbrücke	a_3	ohne	1,00	
		Zementleim	1,00	
		Zementleim + Polymerdispersion	0,95	
		Epoxidharz ¹⁾	0,20	
Instandsetzungsmörtel, Anteil der Polymerdispersion [M.-%/z]	a_4	0	1,00	
		5	0,80	
		10	0,75	

1) Einfluss der EP-Haftbrücke wurde abgeleitet aus [Bier, 1988]

Tabelle 2-2: Anpassungsfaktoren b_i [Guse et al., 1994]

Parameter		Anpassungsfaktoren b_i		
Altbeton	Zementart	b_1	Portlandzement (PZ)	1,00
			Hochofenzement (HOZ) Hüttensand ca. 60 M.-%	0,80
	Festigkeit	b_2	B15	1,00
			B25	0,95
Haftbrücke	b_3	ohne	1,00	
		Zementleim	1,00	
		Zementleim + Polymerdispersion	0,95	
		Epoxidharz ¹⁾	0,60	
Instandsetzungsmörtel (Bindemittel PZ) ²⁾	Schichtdicke [mm]	b_4	10 mm	0,95
			20 mm	1,00
	Nachbehandlungsdauer ¹⁾ (feuchte Jute und Folie)	b_5	3 Tage	0,80
			7 Tage	0,90
			14 Tage	1,00
	Anteil der Polymerdispersion [M.-%/z]	b_6	0	1,00
			5	0,90
10			0,85	
Umgebungsbedingungen nach Nachbehandlung (N)	b_7	Periodische Wasser-Trocken-Wechsel	3 Tage (N)	1,25
			7 Tage (N)	1,11
			14 Tage (N)	1,00

1) Abschätzung der Realkalisierungstiefe am Ende der Nachbehandlung: $b_5 = 1,00$, b_7 entfällt

2) Na_2O -Äquivalent ca. 0,95 M.-%

2.3.4 Beständigkeit der Realkalisierung

Nach [Bier, 1988] bildet sich durch die Realkalisierung ein stabiles Werkstoffgefüge aus. Die neuen CSH-Phasen bilden sich entweder durch eine Nachhydratation und/oder durch die Silika-Reaktion. Die stabile Gefügematrix soll prinzipiell vergleichbar sein mit den Phasen, die während der Zementhydratation entstehen. Das bedeutet, dass die Folgen der Carbonatisierung wieder rückgängig gemacht werden können. CSH-Phasen werden in modifizierter Form neu aufgebaut und ein alkalisches Milieu (pH-Wert ~ 11) geschaffen. Carbonat bleibt jedoch erhalten, während CH in kristalliner Form nicht gebildet wird.

Aus den Untersuchungen von [Gerdes u. Wittmann, 1999] geht hervor, dass der pH-Wert des realkalisierten Bereichs nicht im erwarteten Umfang steigt, sondern ein hoher pH-Wert sich ausschließlich in rein wässrigen Lösungen einstellt. Da in der Porenlösung von carbonatisiertem Beton stets Sulfationen enthalten sind, führt eine sogenannte Ionenaustauschreaktion zu einer Erniedrigung des pH-Wertes im realkalisierten Bereich. Eine pH-Wert Erhöhung infolge der Realkalisierung wird zwar

nicht außer Kraft gesetzt, jedoch besteht ein entgegengesetzter Mechanismus, der der Realkalisierung entgegenwirkt.

[Guse et al., 1994] beschreiben, dass die Realkalisierung im Wesentlichen durch die Porenlösung ohne Pufferwirkung gewährleistet wird. Eine Austrocknung und ein damit verbundener Rückgang der Realkalisierung konnte nicht ausgeschlossen werden. Auch die Untersuchungen nach [Budnik et al., 1993] ergaben, dass der realkalisierte Bereich nicht stabil ist. Zwei Stunden nach Einsprühen des Indikators Phenolphthalein ist die Farbintensität des realkalisierten Bereichs nur noch schwach vorhanden. Nach 24 Stunden ist der Farbumschlag vollständig verschwunden. Zurückgeführt wurde das Ergebnis auf eine erneute Carbonatisierung des zuvor realkalisierten Bereichs. Die Autoren [Guse et al., 1994; Budnik et al., 1993] sind sich jedoch darin einig, dass in der Praxis aufgrund der dicken, dichten Mörtelschicht kein Kohlenstoffdioxid im Bereich der Realkalisierung eindringt.

2.3.5 Alkalientransport bei mineralischen Werkstoffen

2.3.5.1 Allgemeines

Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben beruht der Alkalientransport auf der Diffusion von alkalischen Bestandteilen (NaOH , KOH und $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Der Alkalientransport und dessen Effektivität sind maßgeblich vom Feuchtegehalt im Beton abhängig, da die Alkalien in Wasser gelöst sind. Ein Berechnungsmodell für die Realkalisierung in der Betonrandzone wurde ausschließlich anhand der Untersuchungsergebnisse nach [Guse et al., 1994] aufgestellt. Weitere Modelle zum Alkalientransport in Bezug auf die Realkalisierung von Beton bestehen nicht.

Als Vergleich soll im Folgenden der Eintrag von gelösten Ionen in den Porenraum unter Berücksichtigung der bisherigen Erkenntnisse zum Chloridtransport betrachtet werden. Zu unterscheiden ist der Vorgang der Konvektion und Diffusion. Nach [Maultzsch, 1984] sind die Transportvorgänge der Alkalien (Kationen) mit denen der Chloridionen (Anionen) eng verbunden. Es wird angenommen, dass die Aufnahme von Kationen und Anionen nach getrennten Mechanismen erfolgt. Die Kationenaufnahme erfolgt durch elektrostatische Kräfte in Abhängigkeit vom Radius des hydratisierten Ions und die Anionenaufnahme durch chemische Bindung [Scheibel, 1990].

2.3.5.2 Konvektion

Die Konvektion wird vereinfacht als „Huckepacktransport“ bezeichnet, welche den Eintrag von Wasser über einen Kapillartransport inklusive der in Wasser gelösten Bestandteile beschreibt.

Bei der erzwungenen Konvektion werden die gelösten Ionen mit dem eindringenden Wasser in den Beton transportiert. Dabei ist zwischen dem Hydratationssog des Zementsteins und dem kapillaren Saugen zu unterscheiden. Der Hydratationssog tritt insbesondere bei jungem Beton auf, wohingegen das kapillare Saugen bei allen porösen Stoffen relevant ist [Stark u. Wicht, 2013].

Der Hydratationssog basiert auf dem inneren Schrumpfen infolge der Zementhydratation. Ein Nachsaugen von Wasser bewirkt eine Aufnahme von den im

Wasser gelösten Ionen. Die sich aus dem Schrumpfvolumen des Zementes ergebende Eindringtiefe ist dabei umso größer, je dicker das Bauteil und je niedriger der w/z-Wert ist [Volkwein, 1993]. In Bezug auf die Realkalisierung des Betons ist ein Hydratationssog zu vernachlässigen, da i. d. R. ein fortgeschrittenes Bauteilalter für die Anwendung einer realkalisierenden Maßnahme zugrunde liegt.

Die Aufnahme von gelösten Ionen in Abhängigkeit von der kapillaren Wasseraufnahme kann am Beispiel des Chloridtransports beschrieben werden. Grundsätzlich kann Wasser in porösen Medien kapillar aufsteigen (vgl. Abschnitt 2.1.6). Das Wasser als Lösungsmittel dringt jedoch tiefer und mit steilerem Gradienten ein als die gelösten Chloridionen. Nach [Volkwein, 1993] wird bei praxisüblichen Feuchtegehalten eine Chlorideindringtiefe von 40 % bis 70 % der Wassereindringtiefe erreicht. Als Ursache hierfür werden die Chloridbindung und die ionogene Interaktion angeführt, wodurch sich dieser Effekt mit zunehmender Zeit verstärkt [Volkwein, 1993; Rucker-Gramm, 2008]. Nach [Bier, 1988] wird der Eintrag der Ionen in Abhängigkeit von der Menge und Reaktivität des Kieselsäuregels durch chemische Reaktion ebenfalls gebremst (vgl. Abschnitt 2.3.2). Inwieweit sich eine Bindung der Alkalien auf die Realkalisierungstiefe in Abhängigkeit von der Wassereindringtiefe auswirkt, ist nicht bekannt.

Nach [Volkwein, 1993] werden Ionen in der Praxis überwiegend durch Konvektion befördert und die reine Diffusion ist vernachlässigbar gering.

2.3.5.3 Diffusion

Der Diffusionsprozess beschreibt die Verteilung von Molekülen infolge der thermischen Eigenbeweglichkeit der Teilchen („Brown'sche Molekularbewegung“) unter dem Bestreben, eine gleichmäßige Verteilung in einem Medium zu erreichen. Die Diffusion ist daher ein Ausgleich eines Konzentrationsunterschieds in Flüssigkeiten oder Gasen ohne äußere Einwirkungen. Die Moleküle bewegen sich dabei entlang des Konzentrationsgradienten vom hohen zum niedrigen Konzentrationsniveau.

Für den stationären Fall wird dieser Zusammenhang mit dem 1. Fick'schen Diffusionsgesetz beschrieben (vgl. Gleichung 2-14). Die Proportionalitätskonstante wird dabei als Diffusionskoeffizient bezeichnet. Die Bezeichnung des Diffusionskoeffizienten variiert in der Literatur. In Anlehnung an die Chloriddiffusion wird dieser Diffusionskoeffizient mit dem Indize ss für steady state (engl. für stationär) gekennzeichnet [bspw. Volkwein, 1993].

$$J = -D_{ss} \frac{dc}{dx} \quad (2-3)$$

mit

J	Massenstromdichte in [(kg/s)/m ²]
D_{ss}	stationärer Diffusionskoeffizient in [m ² /s]
x	Weglänge in [m]
c	im Porenraum gelöste Ionenkonzentration in [kg/m ³]

Für nicht-stationäre Verhältnisse mit zeitlich und örtlich variabler Konzentration gilt das 2. Fick'sche Diffusionsgesetz. Die Lösung der Differentialgleichung wird unter

Berücksichtigung eines konstanten Chloridgehalts und einer Anfangskonzentration von $c = 0$ nach [Crank, 1975] wie folgt hergeleitet.

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{\text{nss}} \cdot t}} \right] \quad (2-4)$$

mit

$C(x, t)$	Chloridkonzentration in der Tiefe x zum Zeitpunkt t in $[\text{kg}/\text{m}^3]$
C_s	Chloridkonzentration an der Oberfläche in $[\text{kg}/\text{m}^3]$
D_{nss}	nicht-stationärer Diffusionskoeffizient in $[\text{m}^2/\text{s}]$
x	Weglänge in $[\text{m}]$
t	Auslagerungszeit in $[\text{s}]$
erf	Gauss'sche Fehlerfunktion (Errorfunktion) [-]

Bei Anwendung eines zeitabhängigen Diffusionskoeffizienten D_{nss} ist ein integraler Mittelwert über die diffusionsaktive Zeitspanne zu berücksichtigen [Kapteina, 2011]. Der zeitabhängige Mittelwert $D_{\text{nss}}(t)$ wird im Rahmen einiger Modelle als scheinbarer [Bamforth, 2004; Lindvall, 2001] oder effektiver Chloriddiffusionskoeffizient [Gehlen, 2000] benannt. Wird der Chloriddiffusionskoeffizient im Rahmen von Versuchen bestimmt, in denen die Chloridbindekapazität des Betons noch nicht erschöpft ist, liegen grundsätzlich nicht-stationäre Bedingungen vor.

Im wassergesättigten Porenraum sind folgende Einflussfaktoren auf den Diffusionswiderstand von Beton zu berücksichtigen:

- Porosität und Tortuosität (geometrische Eigenschaften der Betonstruktur)
- Eigenschaft der Lösung (Lösungszusammensetzung)
- Adsorptionsvorgänge von Anionen und Kationen an der Feststoffoberfläche (Interaktion von Lösung und Beton)
- Temperatur (Eigenbeweglichkeit der Moleküle)

Im teilwassergesättigten Porenraum wird die Effektivität des Diffusionsprozesses reduziert. In teilwassergesättigten Kapillarporen ist eine Diffusion der in Wasser gelösten Stoffe im Bereich des Sorbatfilms möglich (vgl. Abschnitt 2.1.6) oder in Poren, die durch Kapillarkondensation gefüllt sind (vgl. Abschnitt 2.1.5). Die zuvor beschriebenen Einflussfaktoren auf den Diffusionswiderstand im wassergesättigten Porenraum sind ebenso für den teilwassergesättigten Porenraum anzusetzen.

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Einleitung

Zur Spezifizierung des Realkalisierungsdepots wurden zwei verschiedene Untersuchungsschwerpunkte mit unterschiedlichen Zielsetzungen bearbeitet. Im ersten Arbeitsschwerpunkt (vgl. Abschnitt 3.2) wurden anhand von Laborversuchen die zeitabhängige Alkalienabgabe, das grundlegende Lösungsvermögen und die Eigenschaftsveränderungen von Instandsetzungsmörteln in demineralisiertem Wasser erfasst und bewertet.

Im zweiten Arbeitsschwerpunkt (vgl. Abschnitt 3.3) wurde das Realkalisierungsvermögen von Mörteln in Abhängigkeit vom Untergrundbeton und von den Umgebungsbedingungen untersucht. Aufbauend auf den grundlegenden Untersuchungen zur Alkalienabgabe von Mörteln wurde die zeitabhängige Realkalisierung an der Kontaktfuge analysiert und bewertet. Zudem wurden anhand von Laborversuchen die Einflussfaktoren auf die Realkalisierung bestimmt.

3.2 Untersuchungen zur Alkalienabgabe von Instandsetzungsmörteln

3.2.1 Zielsetzung und Versuchsprogramm

Im ersten Arbeitsschwerpunkt wurden DVGW-konforme Instandsetzungsmörtel (Typ 1 bis Typ 4) mit verschiedenen Oberflächenqualitäten, Zementarten und Anwendungsgebieten (Nassspritzmörtel, Bodenmörtel, etc.) auf ihr Auslaugungsverhalten und auf ihre Alkalienabgabe untersucht. Insgesamt wurden zehn verschiedene, marktgängige Instandsetzungsprodukte von sechs Herstellern ausgewählt (vgl. Abbildung 3-1 und Tabelle 3-1). Untersucht wurden sieben Nassspritzmörtel, ein Trockenspritzmörtel, ein Bodenmörtel und eine mineralische Dichtungsschlämme. Die ausgewählten Mörtel entsprachen den Vorgaben des DVGW-Arbeitsblattes W 300-5 und den hygienischen Anforderungen nach DVGW-Arbeitsblatt W 347 und W 270.

Da der Alkalientransport zwischen Werkstoff und Wasser in hohem Maße von der Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst wird und der Mörtel in Bezug auf seine Zusammensetzung in der Kontaktzone zum Altbeton und direkt an der Oberfläche vom Kernbereich abweicht, sind die Oberflächenvariationen Oberfläche geglättet (O), geschnitten (G) und Unterseite der Probe (U) differenziert worden. Eine genaue Erläuterung der Herstellung und der Unterschiede ist in Abschnitt 3.2.2 beschrieben.

Damit eine Abgrenzung der verschiedenen marktgängigen Mörtel möglich war, wurden zunächst bei allen Mörteln, soweit möglich, die Zusammensetzung, die mechanischen Kenngrößen und die Porositätsstruktur bestimmt (vgl. Abschnitt 3.2.3). Sieb- und Elementanalyse sollten Rückschlüsse auf die Zusammensetzung geben. Zu den mechanischen Kenngrößen zählten Druck-, Biegezug- und Haftzugfestigkeit sowie der Elastizitätsmodul. Die Gesamtporosität, die scheinbare Dichte und die Porenradialverteilung wurden ebenfalls erfasst.

Im Anschluss an die Grundcharakterisierung wurden die Mörtelproben über einen Zeitraum von sechs Monaten kontrolliert in demineralisiertem Wasser ausgelaugt. Für die Versuche wurde dazu eine vollautomatisierte Auslaugungsanlage konzipiert, die in Abschnitt 3.2.4 erläutert ist. Während und nach Abschluss der Versuche wurden unterschiedliche Untersuchungen durchgeführt, um die materialtechnischen Veränderungen aufgrund der Auslaugungsbelastung bewerten zu können. Die grundlegende Beschreibung der Messverfahren ist in Abschnitt 3.2.4 enthalten, die Ergebnisse und Schlussfolgerungen in Abschnitt 3.2.5 und 3.2.6. Hier werden die allgemeinen Erkenntnisse der Eigenschaftsveränderungen während einer Auslaugungsbelastung und mögliche Einflussfaktoren auf die Alkalienabgabe sowie den Auslaugungswiderstand beschrieben.

Grundlegend können zwei verschiedene Zielsetzungen abgeleitet werden: Zum einen sollen die Instandsetzungsmörtel kontrolliert ausgelaugt werden, damit die tiefen- und zeitabhängige Alkalienabgabe aus den Messergebnissen abgeleitet und die damit einhergehenden Veränderungen erfasst werden können. Zum anderen sollen in Abhängigkeit von der Mörtelzusammensetzung Eingangsparameter für das Realkalisierungspotenzial der Mörtel (Abschnitt 3.3) geschaffen werden.

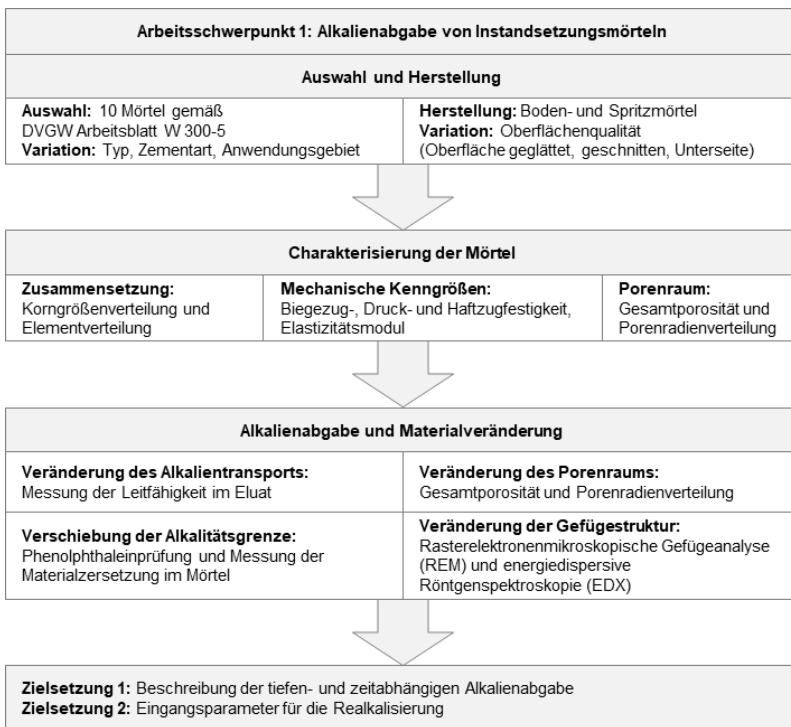


Abbildung 3-1: Übersicht und Aufbau der einzelnen Arbeitsschritte des Arbeitsschwerpunktes 1

Tabelle 3-1: Prüfkörpermatrix für die Untersuchungen zur Alkalienabgabe

Art	Bezeichnung	Typ gem. W 300 / Zementart	Oberfläche	7d Abbürsten
Bodenmörtel	M1O	Typ 1/ CEM III	Geglättet	1
	M1G		Geschnitten	1
Nassspritzmörtel	M2O	Typ 2/ CEM I	Geglättet	1
	M2G		Geschnitten	1
	M3O	Typ 1/ CEM I	Geglättet	1
	M3G		Geschnitten	1
	M4O	Typ 1/ CEM I	Geglättet	1
	M4U		Unterseite	1
	M5O	Typ 1/ keine Angabe	Geglättet	1
	M5U		Unterseite	1
	M5G		Geschnitten	1
	M6O	Typ 2/ CEM I	Geglättet	1
	M6U		Unterseite	1
	M6G		Geschnitten	1
	M8O	Typ 1/ CEM I	Geglättet	1
	M8G		Geschnitten	1
	M9O	Typ 3/ CEM I	Geglättet	1
	M9U		Unterseite	1
	M9G		Geschnitten	1
	Trockenspritzmörtel	M7O	Typ 1/ CEM II A/LL	Geglättet
M7G		Geschnitten		1
Dichtungsschlämme	M10O	Typ 4/ CEM I	Geglättet	1
	M10G		Unterseite	1
Summe				23

3.2.2 Herstellung und Lagerung

Damit praxisnahe Einbaubedingungen ermöglicht werden konnten, wurden die Mörtel M1 bis M8 von den jeweiligen Herstellern gespritzt. Der Bodenmörtel M1, der Spritzmörtel M9 und die mineralische Dichtungsschlämme wurden händisch verarbeitet. Nach 24 Stunden Nachbehandlung unter Folie wurden die Versuchskörper, ausgenommen M10, entformt und in Prismen mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm³ geschnitten. Die Prismen wurden in Folie eingepackt und bei (20 ± 2) °C und (95 ± 5) % relativer Luftfeuchte bis zur Prüfung gelagert. Im Folgenden wird auf die Besonderheiten der Herstellung eingegangen.

Der Einbau des Bodenmörtels M1 bestand aus verschiedenen Verfahrensschritten (vgl. Abbildung 3-2). Gemäß den Herstellerangaben wurde der Frischmörtel in zwei Lagen eingebracht und mit einer Abziehlplatte verteilt und verdichtet. Der zweite Einbauschritt bestand darin, die Oberfläche händisch abzureiben, damit die Feinanteile des Mörtels nach oben getrieben wurden und so eine geschlossene und dichte Oberfläche entstand. Nach einer Wartezeit von ca. einer Stunde wurde die Oberfläche abgetellert und anschließend händisch nachgeglättet. Damit wurde ein

Verschluss offener Poren und Lunker ermöglicht. Die Nachbereitung erzielte zudem eine ebene und glatte Oberfläche.

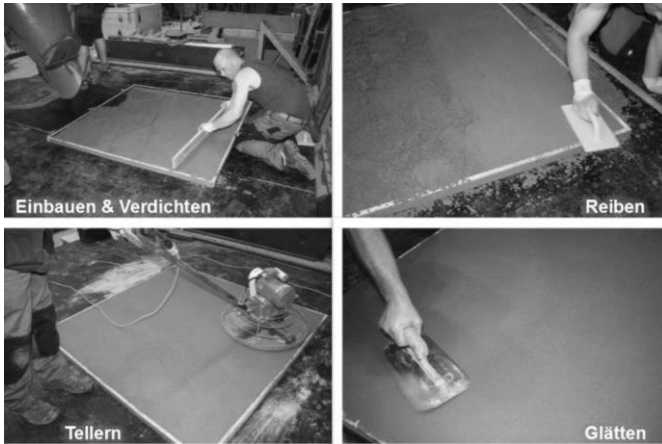


Abbildung 3-2: Herstellung Bodenmörtel M1

Die Herstellung der Spritzmörtel (M2 bis M8) erfolgte im Nass- oder Trockenspritzverfahren. Die einzelnen Arbeitsschritte sind in Abbildung 3-3 dargestellt. Als Schalung kamen Spritzpfannen mit den Innenmaßen $46 \times 46 \times 4 \text{ cm}^3$ zum Einsatz. Zusätzlich wurden Verbundkörper hergestellt aus eingeschalteten Betongrundkörpern der Klasse MC045 gemäß DIN EN 1766 mit den Abmessungen $30 \times 30 \times 10 \text{ cm}^3$, die 20 mm dick mit Mörtel beschichtet wurden. Das Auftreten von Gefüge störenden Schwingungen während des Spritzvorgangs war durch die gewählte Befestigung ausgeschlossen. Zum Erreichen einer gleichmäßigen Probenhöhe wurden die Frischmörtel entlang der Schalung abgezogen, durch Nachreiben der Oberfläche geglättet und mittels Folienabdeckung nachbehandelt.

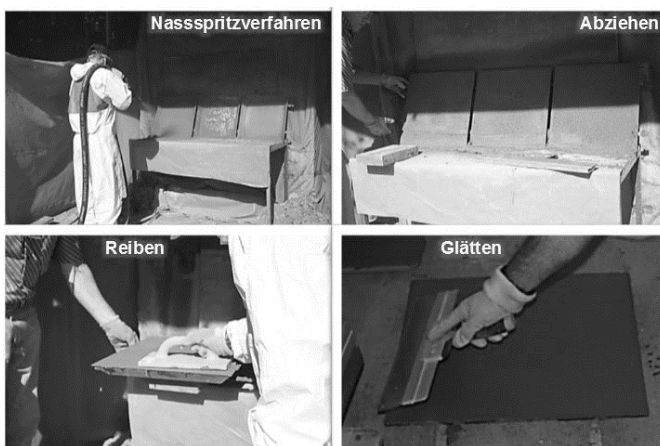


Abbildung 3-3: Herstellung Nassspritzmörtel M4

Die Mörtel M9 und M10 wurden händisch hergestellt. Prismenschalungen mit den Maßen 40 x 40 x 160 mm³ kamen bei dem Mörtel M9 zum Einsatz. Aufgrund der geringen Maximalschichtdicke des M10-Materials von 5 mm, wurde die Dichtungsschlämme auf eine PE-Folie händisch appliziert und nach einem Tag in Prismen mit den Maßen 40 x 5 x 160 mm³ geschnitten.

Entsprechend DVGW-Arbeitsblatt W 300-5 sind grundsätzlich folgende Lagerungen der Materialien vorgesehen:

- Lagerung A: 24 h feucht bei (21 ± 2) °C, danach bis zur Prüfung unter Wasser bei (21 ± 2) °C
- Lagerung C: 24 h feucht bei (10 ± 2) °C, danach bis zur Prüfung unter Wasser bei (10 ± 2) °C

Im Rahmen dieser Arbeit wich die Lagerung der Proben hiervon ab. Die Wasserlagerung bis zur Prüfung wurde nicht vorgesehen, damit eine frühzeitige Alkalienabgabe durch Wasserlagerung vermieden werden konnte. Alle Proben wurden in Folie bei ≥ 95 % relativer Luftfeuchte bis zur Prüfung gelagert. Ein Vergleich der Mörtelcharakterisierung mit den Regelwerksanforderungen konnte daher nur in Anlehnung erfolgen.

Die Prüfkörperoberfläche der Prismen variierte wie folgt:

- Oberfläche geglättet (O): Der Bodenmörtel M1 wurde an der Oberfläche abgetellert und nachgeglättet. Bei den Nass- und Trockenspritzmörteln (M2 bis M8) wurde die Oberfläche händisch geglättet und nachgerieben. Die mineralische Dichtungsschlämme M10 und der Mörtel M9 wurden ebenfalls an der Oberfläche geglättet.
- Oberfläche geschnitten (G): Die bearbeitete Oberfläche wurde nach Erhärtung des Mörtels mittels Säge abgeschnitten. Da der Bereich der Bindemittelanreicherung entfernt wurde und die Verteilung von Gesteinskörnung und Bindemittel den Kernbereich widerspiegelte, wurde die geschnittene Oberfläche als Referenz angesetzt. Aufgrund der geringen Schichtdicke der Dichtungsschlämme (M10) sind keine geschnittenen Proben hergestellt worden.
- Unterseite (U): Der abgetellte Bodenmörtel zeigte verarbeitungsbedingt eine abnehmende Verdichtungsenergie über die Tiefe und somit ein abweichendes Gefüge an der Unterseite. Bei den Nass- und Trockenspritzmörteln sollte eine hohe Dichtigkeit an der Unterseite aufgrund der Aufprallenergie erreicht werden. Die gesonderte Betrachtung sollte zeigen, ob ein Unterschied zwischen geglätteter Oberfläche und Unterseite bestand.

3.2.3 Charakterisierung der verwendeten Mörtel

3.2.3.1 Labortechnische Untersuchungen

Prüfungen an Werk trockenmörteln

Die Werk trockenmörtel wurden zunächst hinsichtlich ihrer Zusammensetzung mittels Sieb- und Elementanalyse untersucht. Die Untersuchung der Korngrößenverteilung der Mörtel erfolgte gemäß DIN EN 933-1. Am Siebrückstand ($\leq 0,063$ mm) wurden die Oxidphasen mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) in Anlehnung an DIN EN 196-2 bestimmt. Die Elementanalyse erfolgte an den Mörteln M1 bis M8.

Mechanische Kenngrößen

Die Prüfung der Druck- und Biegezugfestigkeit erfolgte nach DIN EN 12190 an jeweils drei Prismen bzw. sechs würfelförmigen Probekörpern. Für die Messung der Haftzugfestigkeit entsprechend DIN EN 1542 wurden jeweils an einer Verbundplatte fünf Einzelpfahrungen durchgeführt. Der Mindest- und Mittelwert wurde aus den Messwerten ermittelt. Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls erfolgte an stehenden Prismen entsprechend dem Verfahren 2 nach DIN EN 13412. Dazu wurden insgesamt drei Vorbelastungszyklen und ein Prüfbelastungszyklus initiiert. Eine Übersicht der Prüfungen ist in Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-2: Übersicht der Prüfungen zur Charakterisierung der Mörtel

Art der Prüfung	Prüfverfahren	Alter (d)	Art der Probekörper	Anzahl
Elementanalyse	DIN EN 196-2	-	Trockenmörtel	-
Biegezug- und Druckfestigkeit	DIN EN 12190	7, 28, 90	Prismen	9
Haftzugfestigkeit	DIN EN 1542	7	Platten	2
Elastizitätsmodul	DIN EN 13412	28	Prismen	3

3.2.3.2 Charakterisierung

Die an den Mörteln untersuchten Bestandteile sind in Tabelle 3-3 aufgelistet. Anhand der Ergebnisse sind Unterschiede in Bezug auf die Bindemittel der Mörtel festzustellen. Die Mörtel M1, M4 und M8 hatten ein vergleichsweise geringes Calcium/Silizium-Verhältnis, was auf die Verwendung eines Hochofenzementes oder die Ergänzung siliziumreicher Mörtelzusätze (z. B. Silikastaub, Quarzmehl) hindeutet. Mörtel M5 wies einen deutlich erhöhten Aluminatanteil auf. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass vermutlich ein Calcium-Aluminat-Zement verwendet wurde. Mörtel M7 zeigte trotz Verwendung eines CEM II/A-LL Zementes keinen deutlich erhöhten Kohlendioxidgehalt, der auf erhöhte Mengen an Kalkstein hindeutet.

Tabelle 3-3: Ergebnisse der Oxidanalyse der Siebrückstände

Analyse	Bestandteil	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
		M.-%							
Siebanalyse	< 0,063 mm	15,3	35,6	32,8	28,2	13,4	32,7	22,0	35,5
Glühverlust	Atmosphäre	1,88	1,92	3,24	2,37	0,64	1,97	4,01	3,89
	Schutzgas	4,87	4,57	n.b.	4,91	0,71	3,63	n.b.	6,57
C-S-Analysator	SO ₃	3,49	3,90	2,69	2,54	0,08	2,54	3,32	2,79
	CO ₂	3,13	2,59	2,70	3,27	0,66	2,46	3,67	4,81
Lösen	Sulfat	1,93	2,59	n.b.	2,31	0,04	2,24	n.b.	2,57
XRF (gegähnt unter Atmosphäre)	Na ₂ O	0,24	0,19	0,25	0,34	1,41	0,14	0,32	0,38
	MgO	3,36	0,90	0,87	1,23	0,57	0,69	2,35	1,24
	Al ₂ O ₃	9,20	6,16	4,45	8,95	46,5	4,38	5,10	9,60
	SiO ₂	33,3	30,8	26,1	34,2	12,9	28,1	28,1	34,0
	P ₂ O ₅	0,11	0,02	0,15	0,35	0,14	0,15	0,15	0,31
	SO ₃	3,19	3,78	2,75	2,35	0,07	2,38	3,35	2,60
	K ₂ O	0,92	0,98	0,31	1,22	0,48	0,83	0,85	1,18
	CaO	45,2	53,2	60,8	46,0	33,6	59,9	57,5	46,3
	TiO ₂	0,55	0,30	0,23	0,43	3,73	0,22	0,28	0,47
	V ₂ O ₅	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02
	Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	<0,01	0,01	0,05	0,01	<0,01	0,01
	MnO	0,12	0,48	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05
Fe ₂ O ₃	2,09	2,22	2,51	3,06	2,20	1,56	2,06	2,98	
C/S-Verhältnis		1,45	1,85	2,50	1,44	2,79	2,28	2,19	1,46

Die Ergebnisse der mechanischen Kenngrößen (Druck-, Biegezug-, Haftzugfestigkeit und Elastizitätsmodul) sind in Tabelle 3-4 zusammengefasst. Bei der Dichtungsschlämme M10 wurden aufgrund der geringen Schichtdicke keine mechanischen Kenngrößen erfasst. Im Folgenden werden die Unterschiede der einzelnen Mörtelsysteme erläutert.

Der händisch verarbeitete Nassspritzmörtel M9 wies die geringsten Festigkeitseigenschaften auf (Druckfestigkeit nach 90 Tagen mit 35,7 N/mm², Biegezugfestigkeit nach 90 Tagen mit 5,5 N/mm² und mittlere Haftzugfestigkeit mit 1,2 N/mm² nach 7 Tagen). Die Anforderungen nach DVGW-Arbeitsblatt W 300-5 werden nicht erfüllt.

Bis auf die Biegezugfestigkeit erfüllten die restlichen Mörtelsysteme die Anforderungen an die mechanischen Kenngrößen entsprechend DVGW-Arbeitsblatt W 300-5 (≥ 8 N/mm²). Ein Abfall der Biegezugfestigkeiten zwischen 28 Tagen und 90 Tagen war bei den Mörteln M4, M5 und M9 festzustellen. Ein Abfall der Druckfestigkeit zwischen 28 Tagen und 90 Tagen bestand bei den Mörteln M1, M2, M3 und M9. Eine Unterschreitung der Mindestwerte ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die vorgegebene Lagerung A und/oder C nicht durchgeführt wurde. Die Lagerung bis zur Prüfung fand analog zur Messung der Alkalienabgabe unter Folie bei ≥ 95 % r.F. statt.

Mörtel M5 unterschied sich von den anderen Mörtelsystemen aufgrund der hohen Druckfestigkeit, der Biegezugfestigkeit und dem Elastizitätsmodul nach 28 Tagen.

Tabelle 3-4: Ergebnisse der mechanischen Charakterisierung der Mörtelproben

Bez.	Druckfestigkeit [N/mm ²]			Biegezugfestigkeit [N/mm ²]			Haftzugfestigkeit [N/mm ²]		E-Modul [N/mm ²]
	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d	7 d-Min	7 d-Mittel	> 28 d
M1	44,4	58,0	48,4	4,3	6,8	8,0	2,1	2,2	33.100
M2	75,6	81,3	72,9	4,8	8,9	10,4	2,7	3,1	41.300
M3	69,7	86,1	79,9	5,5	9,2	9,6	0,2	1,3	45.500
M4	68,8	83,6	88,2	5,4	7,9	7,7	1,7	2,1	45.100
M5	83,0	107,4	107,6	7,6	9,9	7,3	2,6	3,0	52.800
M6	77,6	97,5	97,4	8,5	6,7	8,8	2,1	2,3	47.700
M7	68,0	80,3	90,5	7,3	8,1	9,1	2,2	2,6	40.900
M8	74,0	84,2	90,7	5,7	6,4	7,5	2,5	2,9	48.400
M9	25,7	38,3	35,7	5,8	6,4	5,5	0,9	1,2	-

In Abbildung 3-4 und Anlage B sind die Ergebnisse der Porositätsmessungen mittels Quecksilberdruckporosimetrie der Mörtel M1 bis M9 und die Bestimmung der scheinbaren Dichte dargestellt (vgl. Anhang D, Verfahrensbeschreibung). Bei der mineralischen Dichtungsschlämme wurde aufgrund der geringen Schichtdicke ausschließlich der Porositätswert an der Oberfläche erfasst.

Bei der Prüfung der Gesamtporosität nach > 90 d zeigte der Mörtel M5 im Kernbereich und auf der Unterseite die niedrigsten Messwerte (3 Vol.-%). Die Porositäten aller weiteren Mörtel (bis auf M9) lagen sowohl an der Oberfläche als auch im Kernbereich nach 90 d bei Messwerten < 8 M.-%. Die Mindestvorgaben entsprechend dem DVGW-Arbeitsblatt W 300-3 wurden nach 28 d und nach 90 d eingehalten.

Die Porosität des Mörtels M9 mit Werten zwischen 14 Vol.-% und 18 Vol.-% erfüllte nicht die Anforderungen des DVGW-Arbeitsblattes W 300-5 nach 28 d bzw. 90 d. Die Porositätswerte waren deutlich höher als bei allen anderen DVGW-konformen Mörteln. Bereits bei Prüfung der mechanischen Kennwerte waren vergleichsweise geringe Festigkeitseigenschaften festgestellt worden. Der Mörtel M9 wurde händisch hergestellt und dementsprechend hat er keine optimale Verdichtung, wie es bei einer Spritzapplikation zu erwarten wäre, erfahren.

Eine Porositätsveränderung zwischen 28 d und 90 d war insbesondere bei Mörtel M2 festzustellen. Eine Abnahme von ca. 6 Vol.-% im Kernbereich war zwischen den beiden Prüfungen zu verzeichnen. Im oberflächennahen Bereich der Mörtelprobe M8 lag ebenfalls eine Porositätsabnahme von ca. 6 Vol.-% vor. Alle weiteren Mörtel zeigten eine Porositätsabnahme zwischen 1 Vol.-% und 4 Vol.-% (28 Tage und 90 Tage).

Die Nachbearbeitung durch Glätten (Oberseite) und die Verdichtung an der Unterseite führte im Vergleich zum Kernbereich zu einer zum Teil abnehmenden und zum Teil zunehmenden Porosität. Eine direkte Ableitung, inwieweit eine Erhöhung oder Erniedrigung der Porositäten durch die Oberflächenbeschaffenheit besteht, konnte nicht bestimmt werden. Jeder Mörtel wies nicht nur eine andere Zusammensetzung auf, sondern wurde auch von jedem Materialhersteller gesondert verarbeitet. Schwankungen aufgrund händischer Oberflächenbearbeitung waren somit nicht auszuschließen. Eine Bewertung ist abschließend nicht möglich.

Die Messergebnisse zum Gel- bzw. Kapillarporenvolumen können der Tabelle 3-5 (Messwerte > 28 d und > 90 d) und Abbildung 3-5 (Messwerte > 90 d) entnommen werden. Mörtel M9 wies den höchsten Anteil an Gel- und Kapillarporen auf. Nach > 90 d liegt das Gelporenvolumen mit 41 mm³/g (8 Vol.-%) und das Kapillarporenvolumen mit 55 mm³/g (10 Vol.-%) deutlich über dem Porenvolumen der restlichen Mörtel (7 mm³/g bis 20 mm²/g). Bei Mörtel M5 und M8 (90 Tage) ist ein geringes Kapillarporenvolumen von 5 mm³/g (1 Vol.-%) und 8 mm³/g (2 Vol.-%) festzustellen. Bei allen anderen Mörteln, ausgenommen M9, liegt das Kapillarporenvolumen zwischen 14 mm³/g (3 Vol.-%) und 19 mm³/g (4 Vol.-%).

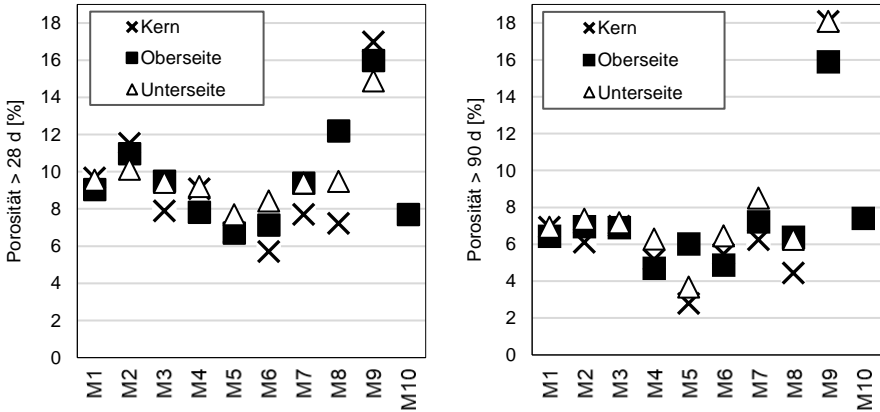


Abbildung 3-4: Darstellung der Porositäten der Mörtel M1 bis M10, links > 28 d, rechts > 90 d

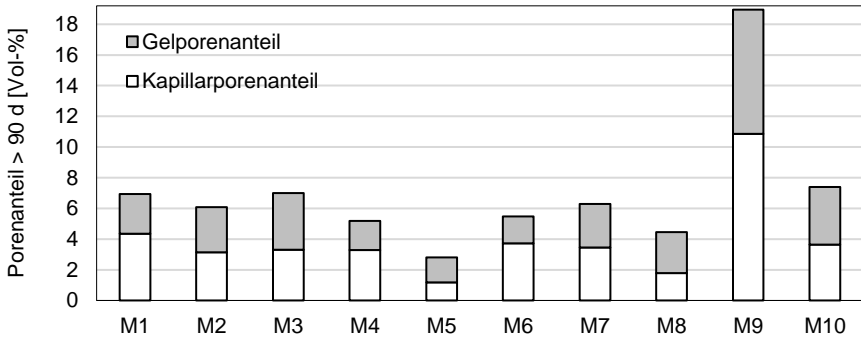


Abbildung 3-5: Darstellung des Kapillar- und Gelporenanteils der Mörtel M1 bis M10, > 90 d

Tabelle 3-5: Porenvolumen der Mörtel M1 bis M10 nach > 28 Tagen und nach > 90 Tagen

Mörtel	Proben-tiefe	Porenvolumen in [mm ³ /g]					
		Gesamt	Kapillar	Gel	Gesamt	Kapillar	Gel
		> 28 d			> 90 d		
M1	Kern	43,3	20,0	23,3	27,5	17,2	10,3
M2	Kern	54,1	20,1	34,0	27,7	14,2	13,4
M3	Kern	33,5	11,7	21,8	30,9	14,6	16,3
M4	Kern	41,1	17,5	23,7	23,8	15,1	8,7
M5	Kern	28,6	22,2	6,4	11,6	4,9	6,7
M6	Kern	24,7	13,5	11,2	23,6	16,1	7,5
M7	Kern	33,4	16,8	16,5	26,8	14,8	12,1
M8	Kern	32,0	10,2	21,9	19,3	7,7	11,6
M9	Kern	70,4	31,7	38,8	91,7	55,0	41,0
M10	-	-	-	-	39,2	19,2	19,9

Die zusammenfassenden Ergebnisse der Charakterisierung sind in Tabelle 3-6 dargestellt. In Bezug auf die noch zu untersuchende Alkalienabgabe ist Folgendes hervorzuheben.

- Porosität:** Der Mörtel M9 (Typ 3, CEM I) weist mit der größten Porosität und dem höchsten Kapillarporenvolumen den folglich größten Transportraum auf. Den kleinsten Transportraum mit dem geringsten Kapillarporenvolumen weisen die Mörtel M5 (Typ 1, Bindemittel keine Angabe) und Mörtel M8 (Typ 1, CEM I) auf. Ein vergleichbares Kapillarporenvolumen zwischen 14 mm³/g (3 Vol.-%) und 19 mm³/g (4 Vol.-%) liegt bei den restlichen Mörteln vor.
- Mechanische Kennwerte und Porosität:** Hohe Druckfestigkeiten gehen i. d. R. mit geringen Porositäten einher. Für den untersuchten Hochofenzement (M1, CEM III) ist diese Beziehung nicht eindeutig. Ein direkter Bezug zwischen Druckfestigkeit und Porosität kann nicht hergestellt werden. Die Druckfestigkeit als indirekter Kennwert für die Abschätzung des Transportraums für Alkalien kann nicht abgeleitet bzw. herangezogen werden.
- Elementanalyse:** Das Calcium/Silizium-Verhältnis ist in Bezug auf den möglichen Alkalienpuffer bei der Auswertung zu berücksichtigen. C/S > 2,0: M6, M3 (CEM I), M7 (CEM II/A-LL) und M5 (Aluminiumanteil nicht berücksichtigt) C/S > 1,5: M1 (CEM III), M2, M4 und M8 (CEM I)

Tabelle 3-6: Zusammenfassende Ergebnisse der Mörtel M1 bis M10 im Rahmen der Charakterisierung (Grün (+): Anforderung nach DVGW-Arbeitsblatt W 300-5 erfüllt; Gelb (o): Messwert nahe Grenzwert; Rot (-): Anforderungen nicht erfüllt; n.b. nicht bestimmt)

Untersuchte Instandsetzungsmörtel			CEM I Typ 1			CEM I Typ 2		CEM I Typ 3	CEM I Typ 4	CEM II A/LL Typ 1	CEM III Typ 1	k.A. Typ 1
Anforderung			M3	M4	M8	M6	M2	M9	M10	M7	M1	M5
Charakterisierung	Haftzugfestigkeit	Mittelwert $\geq 2,0$ N/mm ²	-	+	+	+	+	-	n.b.	+	+	+
	Biegezugfestigkeit	≥ 8 N/mm ²	+	o	-	-	+	-	n.b.	+	-	+
	Biegezugfestigkeit	kein Festigkeitsabfall	+	+	+	+	+	-	n.b.	+	+	-
	Druckfestigkeit	≥ 45 N/mm ²	++	++	++	++	++	-	n.b.	++	+	++
	Druckfestigkeit	kein Festigkeitsabfall	-	+	+	+	-	-	n.b.	+	-	+
	E-Modul	≥ 20 GPa	++	++	++	++	++	n.b.	n.b.	++	+	++
	Porosität 28 d	≤ 12 Vol.-%	+	+	o	++	o	-	+	+	+	++
	Porosität 90 d	≤ 10 Vol.-%	+	+	+	+	+	-	+	+	+	++

3.2.4 Labortechnische Untersuchungen zur Alkalienabgabe

3.2.4.1 Anlagentechnik

Für die Prüfung der Alkalienabgabe der Mörtelproben wurde eine Auslaugungsanlage geplant und aufgebaut, die einen täglichen, vollautomatisierten Wasserwechsel ermöglichte (vgl. Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7).

Der verwendete Versuchsaufbau umfasste drei voneinander getrennte steuerbare Anlagen (MK1, MK2 und MK3) mit jeweils acht Einzelbecken aus Edelstahl (vgl. Abbildung 3-7). Insgesamt konnten so gleichzeitig 24 verschiedene Probenvariationen untersucht werden.

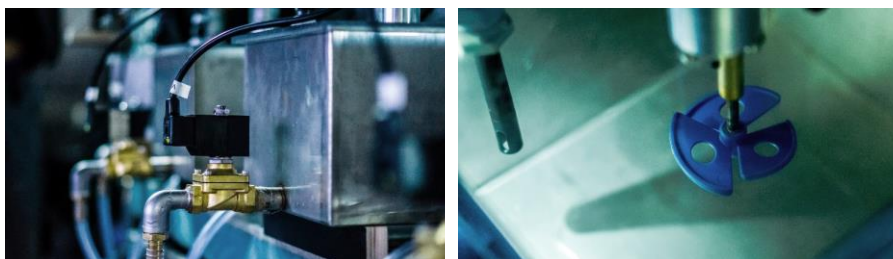


Abbildung 3-6: Links: Einzelbecken aus Edelstahl (Ansicht), rechts: Innenansicht eines Edelstahlbeckens mit integriertem Rührer und Leitfähigkeitssonde

An der Rückseite der Behälter wurden ein Zu- und Überlauf für einen konstanten Wasserstand angeordnet. An der Vorderseite wurde ein Ablauf integriert, der über ein Magnetventil geöffnet werden konnte (vgl. Abbildung 3-6, links). Auf dem Behälter wurde ein abnehmbarer Plexiglasdeckel mit eingefräster Nut angebracht, der einen Luftzutritt vermindern und ein Herausnehmen der Probe zu jeder Zeit ermöglichen sollte. In den Deckel war eine Halterung für einen elektrisch betriebenen Motor eingelassen worden, der gleichzeitig mit einem rotierenden Rührer verbunden war. Jeweils zwei Probekörper wurden im Behälter angeordnet, wobei ein Abstand von ca. 20 mm zum Behälterboden durch Kunststoffleisten erzeugt wurde, um eine Umströmung der Probe zu gewährleisten. Die Umströmung war bewusst gewählt worden, damit zum einen keine dauerhafte Carbonatschichtbildung an der Werkstoffoberfläche eintrat und so eine dauerhafte Auslaugung ermöglicht werden konnte, und zum anderen das Eluat homogenisiert wurde.

Zur Prüfung der Alkalienabgabe fand kontinuierlich eine digitale Erfassung der Temperatur und der elektrischen Leitfähigkeit statt. Eine kontinuierliche pH-Wert-Aufzeichnung des Eluats war aus technischer Sicht nicht möglich, da bei einer Versuchsdauer von sechs Monaten die gepufferte Kaliumchloridlösung aus der Glasmembran entweichen würde. Damit die Messung der Leitfähigkeit nicht verfälscht und zudem die pH-Elektrode nicht beschädigt wurde, fand die standardmäßige Erfassung des pH-Wertes beim Ablassen des Wassers statt.

Der Wasserwechsel in jedem Becken erfolgte automatisiert über die Steuerungstechnik. Die gewählte Zeitspanne wurde im Rahmen von Vorversuchen zum Anstieg der Leitfähigkeit und des pH-Wertes des Wassers abgeleitet. Damit eine praxisnahe Alkalienabgabe geprüft werden kann, muss gewährleistet sein, dass eine Diffusion den Austausch der Alkalien ermöglicht, ohne dass die Sättigungskonzentration im Wasser erreicht wird. Für die Auslaugungsversuche kam demineralisiertes Wasser zur Anwendung, das über eine Osmose-Vollentsalzungsanlage erzeugt wurde.

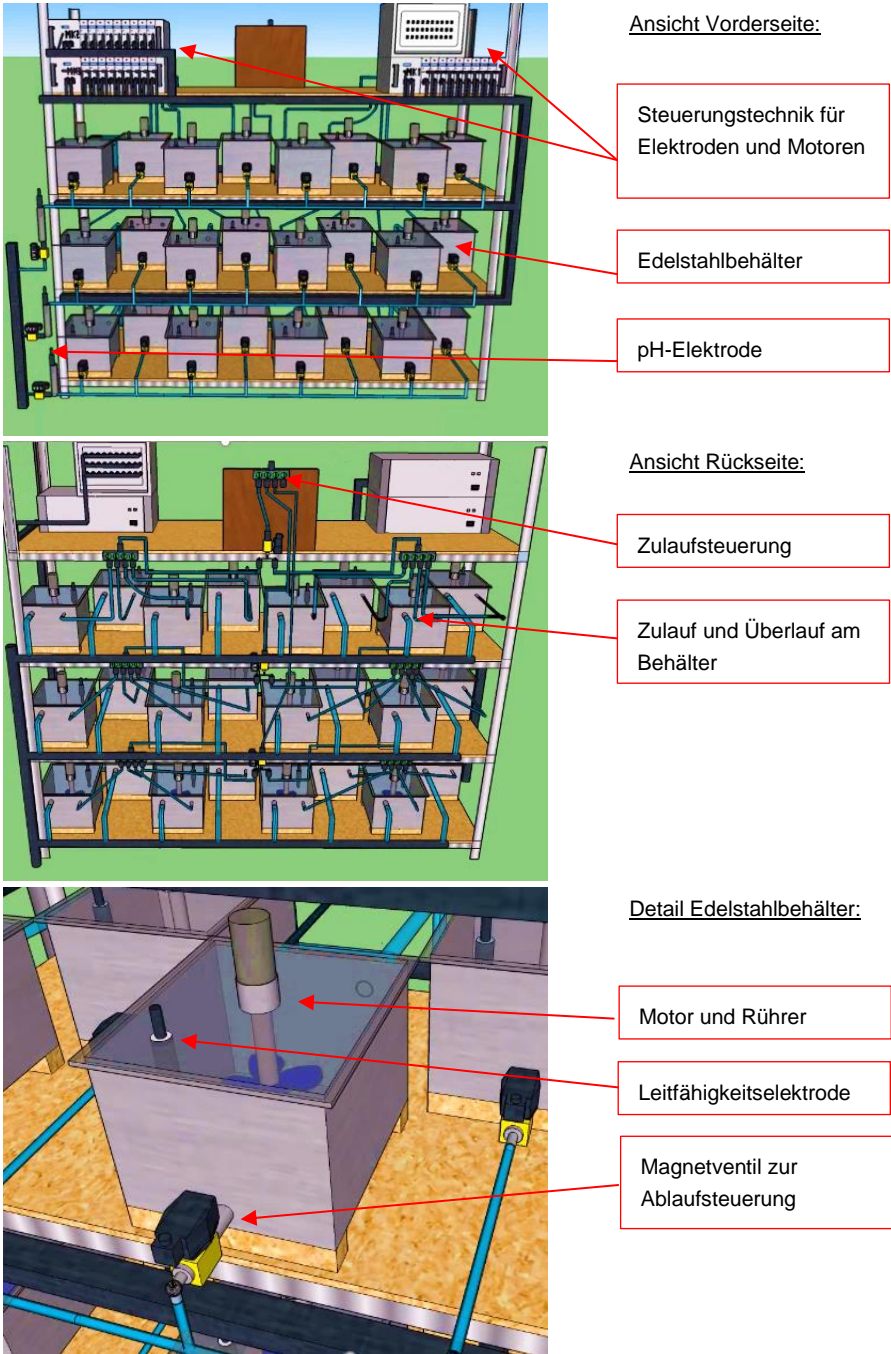


Abbildung 3-7: Übersicht der Auslaugungsanlage, Aufbau der Einzelanlagen MK1, MK2 und MK3 und Aufbau des Lagerungsbehälters

3.2.4.2 Messung der elektrischen Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit gemäß DIN EN 27888 ist definiert als Maß für die Konzentration ionisierbarer gelöster Stoffe in einer Probe bzw. gelöster Ionen im Wasser, die elektrischen Strom leiten. Der Messwert ist abhängig von der Ionenkonzentration, der Ionenart, der Temperatur des Wassers und von der Viskosität der Lösung. Aufgrund der Eigendissoziation hat „reines“ Wasser bei 25°C eine elektrische Leitfähigkeit von 0,055 µS/cm. In Wasser gelöste Ionen erhöhen die Leitfähigkeit entsprechend ihrer molaren Leitfähigkeit (vgl. Tabelle 3-7).

Tabelle 3-7: Molare Leitfähigkeiten relevanter Ionen [Wedler u. Freund, 2012]

Kation [-]	Λ_0^+ [µS/cm·L/mol]	Anion [-]	Λ_0^- [µS/cm·L/mol]
H ⁺	0,350	OH ⁻	0,199
Na ⁺	0,050	Cl ⁻	0,077
K ⁺	0,074	1/2 SO ₄ ²⁻	0,080
1/2 Mg ²⁺	0,053	HCO ₃ ⁻	0,045
1/2 Ca ²⁺	0,060	-	-

In der vollautomatisierten Auslaugungsanlage wurde in jedem Behälter eine Leitfähigkeitselektrode (BlackLine CR-GT konduktiver 2-Elektroden Leitfähigkeitssensor, Pt100 in Zweileiterschaltung, Firma Jumo) verbaut. Der Leitfähigkeitssensor besitzt eine Graphit-Elektrode und weist eine Zellkonstante von 1,0 cm⁻¹ auf. Die Eluat-Temperatur wurde mit einer Genauigkeit von 0,1 °C gemessen. Die Eluat-Leitfähigkeiten wurden zu Beginn der Untersuchungen mit einer Auflösung von 1 µS/cm aufgezeichnet, die nach wenigen Wochen auf 0,1 µS/cm herabgesetzt wurde. Die Leitfähigkeitsmessungen in den Behältern wurden gemäß der folgenden Gleichung auf eine Temperatur von 25 °C normiert.

mit
$$\sigma_{25^\circ\text{C}} = \frac{\sigma}{(1 + 0,02 \frac{1}{^\circ\text{C}} (T - 25^\circ\text{C}))} \quad (3-1)$$

- $\sigma_{25^\circ\text{C}}$ Eluat-Leitfähigkeit bei 25 °C in [µS/cm]
- σ Gemessene Eluat-Leitfähigkeit in [µS/cm]
- T Gemessene Temperatur in [°C]

Um auf Basis des während der Einlagerung auftretenden Leitfähigkeitsanstiegs eine Aussage zur Auslaugung der Proben treffen zu können, wurden die Differenzen der temperaturkorrigierten Eluat-Leitfähigkeiten direkt nach Befüllung sowie direkt vor Leerung der Becken gebildet, über die Wechselzyklen aufsummiert und anschließend auf das Beckenwasservolumen sowie die ausgelaugte Probenoberfläche bezogen.

mit bezogene Leitfähigkeit =
$$(\sigma_{25^\circ\text{C}, t_0} - \sigma_{25^\circ\text{C}, t_1}) \frac{V_B}{A_P} \quad (3-2)$$

- $\sigma_{25^\circ\text{C}, t_0}$ Temperaturkorrektur Leitfähigkeit nach Beckenbefüllung in [µS/cm]
- $\sigma_{25^\circ\text{C}, t_1}$ Temperaturkorrektur Leitfähigkeit vor Beckenleerung in [µS/cm]
- A_P Ausgelaugte Probenoberfläche in [cm²]
- V_B Beckenvolumen in [l]

3.2.4.3 Messung der Auslaugungstiefe

Zur Bestimmung der Alkalitätsgrenze wurde die Auslaugungstiefe mit der Phenolphthalein-Prüfung entsprechend DIN EN 14630 bestimmt.

Als Indikatorlösung wird 1 g Phenolphthalein in 70 ml Ethylalkohol gelöst und mit destilliertem oder entionisiertem Wasser auf 100 ml verdünnt. Die Farbe des Indikators schlägt ab einem pH-Wert > 9 von farblos in rot-violett um. Somit ist die nach DVGW-Arbeitsblatt W 300-3 definierte Alkalitätsgrenze als Umschlagpunkt der Lösung feststellbar.

Für die Prüfung wurden zu jeweils drei Zeitpunkten der Auslaugungsdauer (zwei, vier und sechs Monate) Teilproben der Prismen mit den Abmessungen 40 x 40 x 40 mm³ mittels wassergekühltem Schneiden abgetrennt. Die frischen Schnittflächen der Restproben wurden im Anschluss mithilfe von Epoxidharz versiegelt.

Die zu untersuchende Teilprobe wurde gespalten, sodass eine frische Bruchfläche als Prüffläche erzeugt wurde. Die Auslaugungstiefe wurde als Abstand der Farbumschlagsgrenze von der Oberfläche bestimmt. Eine langsame Farbänderung kann ein Anzeichen für eine pH-Wert-Erniedrigung sein, die aber dennoch über einem pH-Wert von 9 liegt. Als zusätzlicher Messwert zur Beurteilung der Auslaugung wurde die Tiefe der zerstörten Zementsteinmatrix mit aufgenommen. Als jeweilige Bezugslinie galt die Oberkante der seitlich angebrachten PVC-Plättchen. Die Prüfung ist in Abbildung 3-8 dargestellt.

Der Mittelwert der Auslaugungstiefe (d_A in mm), die Phenolphthaleingrenze und die Abtragstiefe einer Prüffläche wurden mit mikroskopischen Aufnahmen in 6,4-facher Vergrößerung erfasst. Die Abtragstiefe sowie die Tiefe der Phenolphthalein-Umschlagsgrenze wurden an mehreren gleichmäßig über die Bildausschnittsgröße verteilten Messpunkten bestimmt.

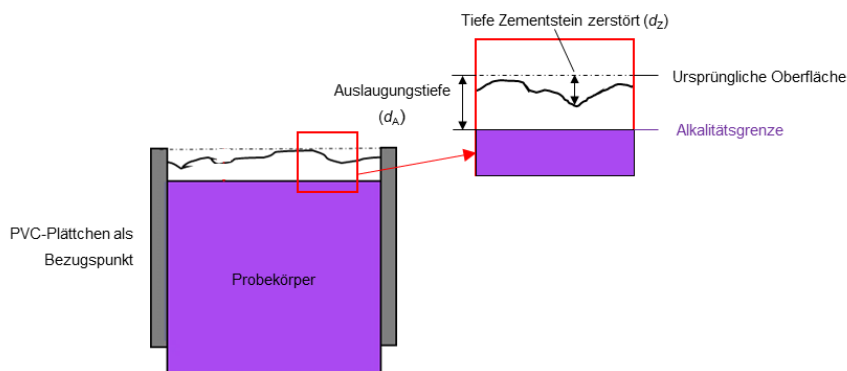


Abbildung 3-8: Bestimmung der Auslaugungstiefe und Alkalitätsgrenze

3.2.4.4 Gefügestruktur und Elementverteilung

Unter dem Rasterelektronenmikroskop wurde die Gefügestruktur der Probekörper untersucht. Durch die hohe Bildauflösung konnte die Phasenzusammensetzung des Zements visuell bis in den Nanometerbereich untersucht werden. Für die

Untersuchungen wurde das Gerät der Firma Zeiss, Typ DSM 962 verwendet. Der einfallende Elektronenstrahl (Primärelektrode, PE) erzeugte verschiedene Signale, die für die Bildentstehung genutzt werden konnten. Dazu zählten die Abbildung mittels Sekundärelektronen (SE) und Rückstreuielektronen (RE). Der Kontrast eines SE-Bildes wird hauptsächlich von der Oberflächentopographie der Probe bestimmt. Bei RE-Bildern hängt der Kontrast insbesondere von der Kernladungszahl, d. h. von der Materialzusammensetzung des untersuchten Probenbereichs ab. Beide Signale wurden zur Bildentstehung genutzt.

Das verwendete Rasterelektronenmikroskop war zusätzlich mit energiedispersiven Detektoren (EDX) ausgerüstet. Hierdurch war es möglich, Messungen der chemischen Elemente qualitativ durchzuführen.

Als Proben wurden repräsentative Bruchstücke mit einer Länge bzw. Breite von ca. 10 mm und einer Dicke von ca. 5 mm aus den Oberflächenrandzonen nach der Auslaugungsprüfung entnommen. Die zu untersuchenden Probenflächen entsprachen dabei den wasserberührten Flächen der Auslaugungsprüfung bis in eine Tiefe von 5 mm.

Damit eine Schattenbildung keine Verfälschung der Messergebnisse verursachte, sollte eine möglichst ebene Fläche betrachtet werden. Zunächst wurden die Proben im Vakuum mit Gold bedampft, wodurch eine leitfähige Schicht entstand. Im Anschluss wurden die bedampften Proben in das Rasterelektronenmikroskop eingebaut und unter starker Vergrößerung bis in den μm -Bereich betrachtet. Die zusätzlichen EDX-Analysen in Verbindung mit der REM-Aufnahme ergaben Aufschlüsse über die Zusammensetzungen der Zementsteinphasen und über die Veränderungen der Zementsteinmatrix.

3.2.5 Ergebnisse der Untersuchungen

3.2.5.1 Allgemeine Erkenntnisse zur Alkalienabgabe und Beständigkeit mineralischer Beschichtungen

Die sechsmonatige Lagerung in demineralisiertem Wasser führte zu feststellbaren Veränderungen des Zementsteingefüges (Auslaugungstiefe, Porosität, Gefügestruktur und optisches Erscheinungsbild). Durch die Belastung mit demineralisiertem Wasser zersetzte sich die Zementsteinmatrix bis hin zum vollständigen Freiliegen der Gesteinskörnung. Die sukzessiven Auflösungsprozesse begannen dabei ab dem Zeitpunkt der Einlagerung. Im Folgenden werden die allgemeinen Erkenntnisse zur Alkalienabgabe und Beständigkeit der mineralischen Beschichtungen beschrieben.

Bei allen Mörteln konnten mehr oder weniger starke **farbliche Veränderungen der Oberfläche** beobachtet werden (vgl. Abbildung 3-9). In Abhängigkeit von der Mörtelzusammensetzung zeigte die anfänglich zementgraue Oberfläche nach wenigen Wochen flächige, gelbliche bzw. bräunliche Farbveränderungen. Danach folgte je nach Mörtel die vollständige Auflösung des Zementsteins, bis die Gesteinskörnung erst in Teilbereichen und im weiteren zeitlichen Verlauf vollflächig freigelegt wurde. Die bräunlich-gelblichen Farbveränderungen waren nach sechs Monaten Auslaugung zum Teil abgelöst und zum Teil gut zu erkennen. Der Einfluss

des Mörteltyps, der Zementart und der Oberflächenbearbeitung gegenüber einer Auslaugungsbelastung werden in den Abschnitten 3.2.5.2 bis 3.2.5.4 behandelt.

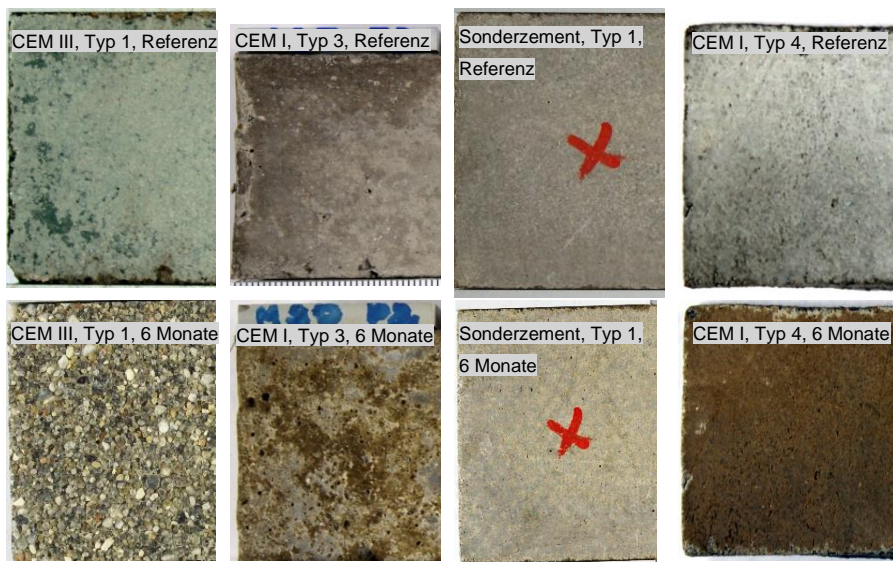


Abbildung 3-9: Veränderung des optischen Erscheinungsbildes nach sechsmonatiger Auslaugungsbelastung, ausgewählte Mörtel, Oberfläche geglättet (O)

Die von der Wasserbelastung **ausgelaugte Zementsteinmatrix** erschien unter dem Rasterelektronenmikroskop bei allen Mörteln porös und aufgelöst. Ein poröser Zementstein war bis in eine Tiefe von 100 μm bis 500 μm je nach Mörtelsystem im oberflächennahen Bereich ersichtlich. In Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11 ist der Übergang zwischen dem geschädigten Bereich und einer intakt erscheinenden Gefügestruktur dargestellt.

In der Oberflächenrandzone waren weder im Porenraum noch im Phasengrenzbereich zwischen Gesteinskörnung und Zementstein Portlanditkristalle feststellbar. Calciumhydroxid ist in Bezug auf die Auslaugung die instabilste Phase und die Untersuchungen zeigten, dass Calciumhydroxid nicht mehr nachweisbar war und im porös erscheinenden Bereich somit vollständig herausgelöst wurde.

Die Auflösung der Zementsteinphasen führte dazu, dass schwerlösliche, amorphe und wasserhaltige Hydroxidgel verblieben (Silizium-, Aluminium- und Eisenhydroxidgel) und so der Anteil an Al_2O_3 , Fe_2O_3 und SiO_2 im Vergleich zu CaO erhöht wurde. Bei allen Mörteln (ausgenommen M5 - Sonderzement, Typ 1) war ein vergleichsweise kleiner Übergangsbereich zwischen vollständigem Abtrag der Zementsteinmatrix, Auflösung des Zementsteins bis hin zur intakten Gefügestruktur erkennbar.

Die Gehalte an Na_2O , MgO und SO_3 veränderten sich nur unwesentlich.

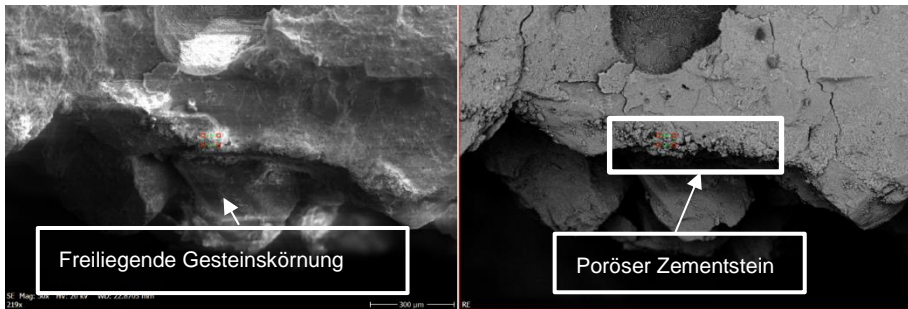


Abbildung 3-10: Randbereich CEM I, Typ 1 (M4U), nach sechs Monaten Auslaugung, links: SE-Aufnahme (Sekundärelektronen), rechts: RE-Aufnahme (Rückstrahlelektronen)

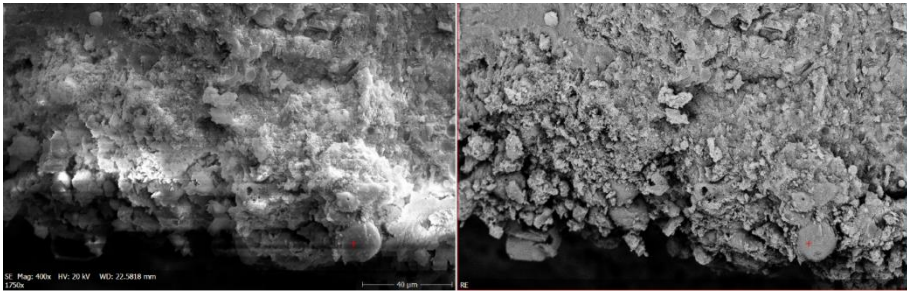


Abbildung 3-11: Poröser Zementstein CEM I, Typ 1 (M4U), nach sechs Monaten Auslaugung, links: SE-Aufnahme, rechts: RE-Aufnahme, Detailaufnahme

Mittels Phenolphthaleinprüfung wurde nach einer Auslaugungsdauer von zwei, vier und sechs Monaten die **Alkalitätsgrenze** zerstörend bestimmt. Sowohl das Auflösen des Zementsteins als auch das Fortschreiten der Alkalienabgabe in Abhängigkeit von der Tiefe folgte in demineralisiertem Wasser keinem Wurzel-Zeit-Gesetz (vgl. Abbildung 3-12). Aufgrund der fehlenden Carbonatschichtbildung an der Oberfläche und dem dauerhaften Wasserwechsel ohne Erreichen der Sättigungskonzentration wurde ein permanentes Konzentrationsgefälle zwischen der hochalkalischen Porenlösung und dem Wasser aufrechterhalten. Die Transportwege der Alkalien im Porengefüge des Werkstoffes wurden aufgrund des Fortschreitens der Auslaugungstiefe zwar länger, jedoch wurde dieser Effekt durch den Abtrag des Zementsteins ebenfalls gemindert.

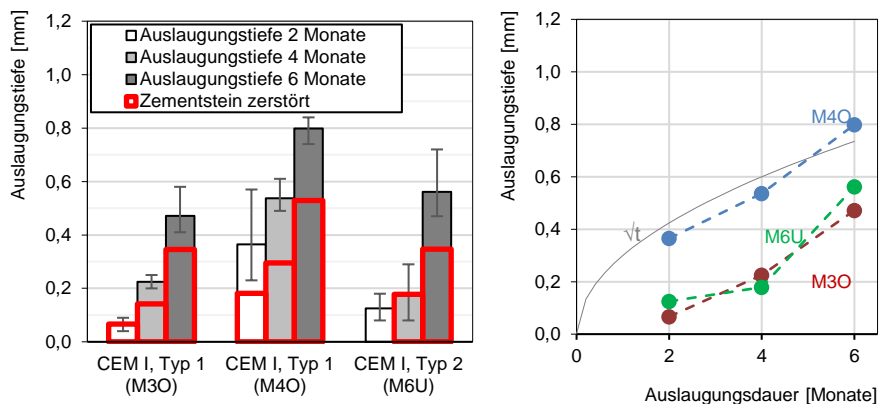


Abbildung 3-12: Verschiebung der Alkalitätsgrenze nach sechs Monaten bei ausgewählten Mörteln, links: Auslaugungstiefe und Tiefe der Zementsteinzerstörung nach zwei, vier und sechs Monaten, rechts: Vergleich des Verlaufs der Auslaugungstiefe mit einem Wurzel-Zeit-Gesetz

Anhand der Messergebnisse der kontinuierlich aufgezeichneten Leitfähigkeit konnte eine **Beschreibung der Alkalienabgabe** in „kalkarmem Wasser“ aus den untersuchten Mörteln erfolgen.

Aufgrund der Alkalienabgabe bzw. Erhöhung der Ionenkonzentration im Wasser fand eine Erhöhung der elektrolytischen Leitfähigkeit des Eluats statt. An Wochentagen fand ein täglicher Wasserwechsel statt, während an Wochenenden und Feiertagen ein Wasserwechsel betriebsbedingt nicht möglich war (vgl. Abbildung 3-14), sodass sich zwei verschiedene Wasserwechselzyklen ergaben.

Zwei Effekte waren am Verlauf der elektrolytischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Zeit zu unterscheiden (vgl. Abbildung 3-13). Der Leitfähigkeitsanstieg lag nicht als linearer Verlauf vor, sondern mit zunehmender Ionenkonzentration im Wasser sank das Konzentrationsgefälle zwischen dem Eluat und der Porenlösung, sodass sich ein zeitlich abflachender Verlauf ergab. Der Leitfähigkeitsanstieg war deutlich von der Konzentration im Eluat abhängig.

Anhand der Messwertverläufe konnte die Freisetzung der Alkalien aus dem zementgebundenen Werkstoff als zweiter Effekt abgeleitet werden. Dazu lagen zwei verschiedene Freisetzungsmechanismen zugrunde. Anfänglich wirkte als dominierende Einflussgröße der „wash-off-Effekt“ [Hohberg, 2002], der einen erhöhten Lösungsprozess direkt in der Kontaktzone zwischen Werkstoff und Wasser bewirkte. Wie in Abbildung 3-13 dargestellt, zeigte sich der Mechanismus in den ersten vergleichsweise großen Maximalwerten nach 24 Stunden bis zum Wasserwechsel. Zur Verdeutlichung sind die maximalen Leitfähigkeiten über einen Betrachtungszeitraum von 24 Stunden über eine Versuchsdauer von 180 Tagen in Abbildung 3-14 dargestellt. Nach ca. einem Monat nahm die Alkalienverfügbarkeit an der Oberfläche ab und im weiteren Verlauf fand eine Alkaliendiffusion (diffusionskontrollierte Auslaugung) als maßgebender Transportmechanismus unter Berücksichtigung der Durchlässigkeit (Permeabilität), der Porosität sowie der Gewundenheit des Porenraums (Tortuosität) statt. Die Alkaliendiffusion wird zusätzlich durch den Abtrag des oberflächennahen Zementsteins beeinflusst.

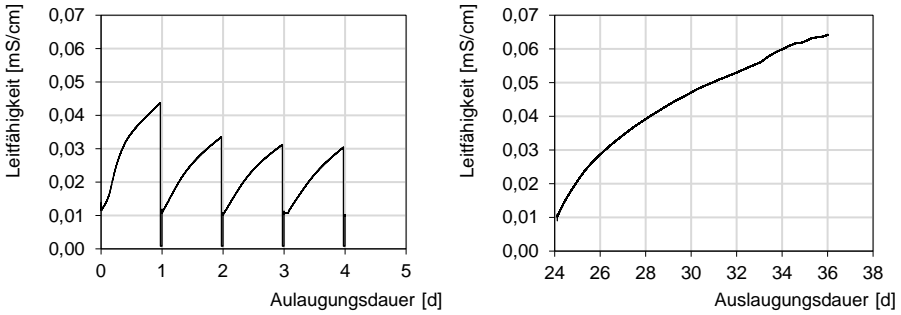


Abbildung 3-13: Exemplarischer Anstieg der Leitfähigkeit des Mörtels M10 (CEM III, Typ 1, Bodenmörtel), links: Tag 0 bis Tag 4 mit 24 stündigem Wasserwechsel, rechts: zwischen Tag 24 und Tag 36 ohne Wasserwechsel

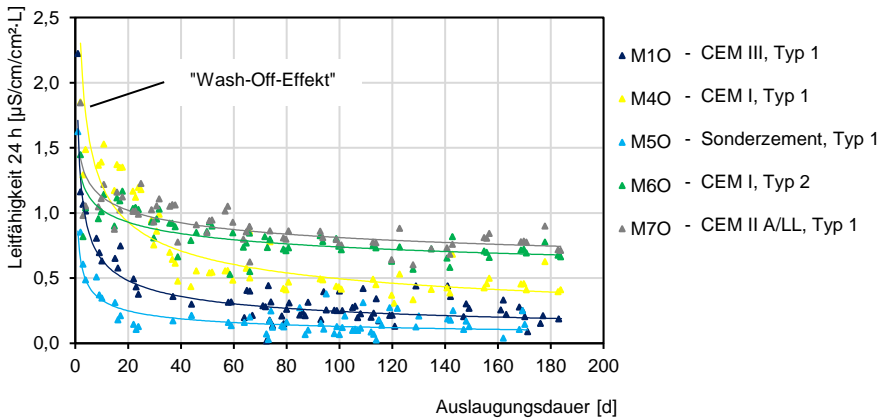


Abbildung 3-14: Veränderung der maximalen Leitfähigkeiten nach jedem Wasserwechsel über eine Versuchsdauer von 180 Tagen (jeder Messpunkt zeigt den Maximalwert nach 24 h)

Da insbesondere die anfängliche Alkalienabgabe in Bezug auf ein grundsätzliches Realkalisierungspotenzial zu bewerten ist, werden die summierten Leitfähigkeiten in den ersten zwei Wochen in Abbildung 3-15 betrachtet. Darstellungsbedingt wurde dieser Zeitraum gewählt, damit die anfänglichen Leitfähigkeiten hervorgehoben werden konnten. Innerhalb der ersten ein bis vier Tage war eine stetige Alkalienabgabe bei allen Mörteln festzustellen (Stadium 1), welche durch Lösungsprozesse der Alkalien im direkten Kontaktbereich zwischen Wasser und Werkstoff hervorgerufen wurden. Danach erfolgte ein bei allen Mörteln abgeschwächtes Lösungsverhalten (Stadium 2). Zwischen 40 Tagen bis 60 Tagen fand eine weitere signifikante Änderung im Lösungsverhalten der Mörtel statt (Stadium 3, nicht dargestellt). Das dritte Stadium wird bei der Auswertung der Einflussgrößen (Mörteltyp, Zementart und Oberflächenbearbeitung) aufgegriffen.

Eine Bewertung der Alkalienverfügbarkeit erfolgt unter Betrachtung des gesamten Prüfzeitraums in den Abschnitten 3.2.5.2 bis 3.2.5.4.

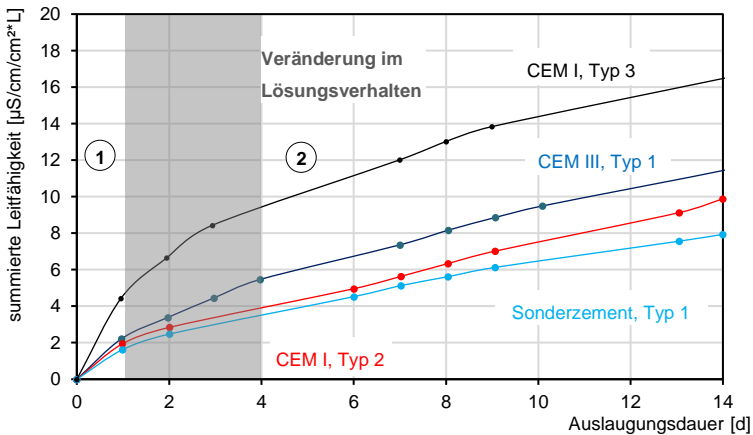


Abbildung 3-15: Summierte Leitfähigkeiten ausgewählter Mörtel über eine Versuchsdauer von 14 Tagen zur Abgrenzung der anfänglichen Alkalienabgabe

3.2.5.2 Einfluss des Mörteltyps

Zur Unterscheidung eines Einflusses des Mörteltyps (Typ 1 bis Typ 4) auf die Alkalienabgabe und den Auslaugungswiderstand wurden die Untersuchungsergebnisse folgender Mörtel miteinbezogen:

- Typ 1, CEM I: M3, M4, M8
- Typ 2, CEM I: M2, M6
- Typ 3, CEM I: M9
- Typ 4, CEM I: M10

Durch die Belastung mit demineralisiertem Wasser zersetzte sich bei den Typ 1 und Typ 2 Mörteln die Zementsteinmatrix bis hin zum vollständigen Freiliegen der Gesteinskörnung. Die anfänglich zementgraue Oberfläche zeigte nach wenigen Wochen flächige, gelbliche bzw. bräunliche **Farbveränderungen**. Danach folgte die vollständige Auflösung des Zementsteins, bis die Gesteinskörnung erst in Teilbereichen und im weiteren zeitlichen Verlauf vollflächig freigelegt wurde.

Bei den Typ 3 und Typ 4 Mörteln war zwar eine bräunlich-gelbliche Veränderung des Zementsteins festzustellen, ein Zementsteinabtrag, verbunden mit dem Freiliegen von Gesteinskörnung, fand jedoch nicht statt.

Bei der Betrachtung der mittleren **Auslaugungstiefe** nach sechs Monaten (vgl. Abbildung 3-16 und Abbildung 3-17, rechts) wies der Typ 4 Mörtel die geringste Auslaugungstiefe mit 0,06 mm auf. Bei dem Typ 3 Mörtel lag eine mittlere Auslaugungstiefe von 0,18 mm nach sechs Monaten vor. Anhand der Messwerte der Zementsteinzerstörung und Auslaugungstiefe ist abzuleiten, dass durch die Zugabe von Kunststoffzusätzen erwartungsgemäß ein positiver Einfluss auf den Widerstand gegen die Auslaugungsbelastung ausgeübt werden konnte.

Ein Vergleich zwischen Typ 1 und Typ 2 Mörteln ergab, dass der Mörtel M30 (CEM I, Typ 1, geglättet (O)) mit 0,47 mm die geringsten Auslaugungstiefen nach sechs Monaten aufwies. Bei der Betrachtung unter dem Auflichtmikroskop konnten im

oberflächennahen Bereich freiliegende, faserartige Strukturen detektiert werden (vgl. Abbildung 3-17, links), die anhand der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) als Kunststofffasern identifiziert wurden. Entsprechend den Vorgaben des Materialherstellers war der Mörtel nach DVGW-Arbeitsblatt W 300-5 als Typ 1 einzuordnen, der mit Fasern modifiziert wurde. Weitere Unterschiede zwischen Typ 1 und Typ 2 Mörteln konnten aus den Ergebnissen nicht abgeleitet werden.

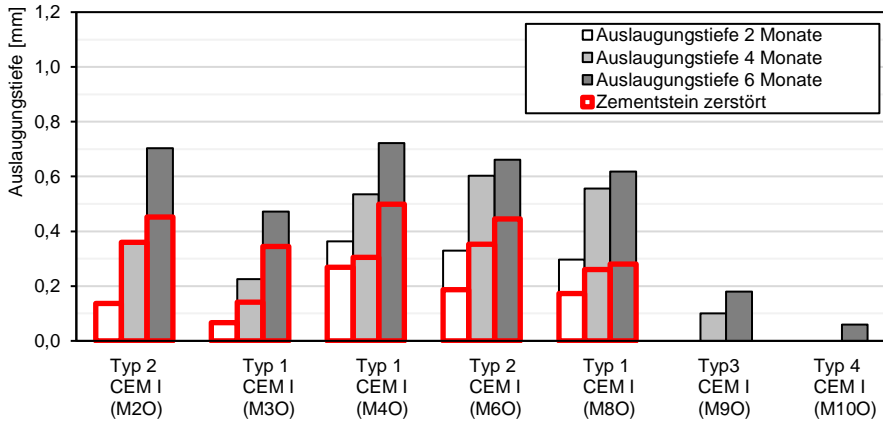


Abbildung 3-16: Mittlere Auslaugungstiefe und Zementsteinauflösung nach zwei, vier und sechs Monaten Versuchsdauer in der vollautomatisierten Auslaugungsanlage, Oberfläche geglättet (O), Typ 1 bis Typ 4

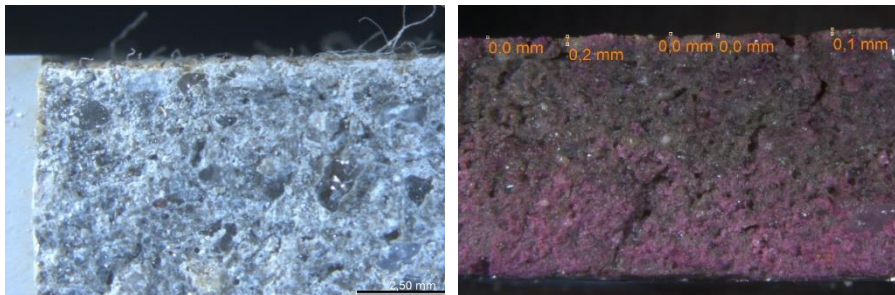


Abbildung 3-17: Mikroskopaufnahme nach sechs Monaten, links: Probenquerschnitt des Mörtels M30 mit Kunststofffasern, rechts: Bestimmung der Auslaugungstiefe des Mörtels M100

Die aufgelöst erscheinende **Zementsteinmatrix** der Typ 1 und Typ 2 Mörtel zeigte CaO-Gehalte von ca. 25 Oxid.-% (EDX-Analyse). Bei der Bestimmung der Alkalitätsgrenze mittels Phenolphthalein zeigte sich bereits, dass keine tiefere Auslaugung in Form einer pH-Wert-Absenkung zu verzeichnen war, sondern zum Teil direkt nach dem abgetragenen Zementstein ein pH-Wert größer als der des Phenolphthaleinumschlagspunktes vorlag (vgl. Abbildung 3-16). In anderen Teilbereichen lag der CaO-Gehalt bei < 10 Oxid.-% und der pH-Wert lag unterhalb der Phenolphthaleinumschlagsgrenze. Schlussfolgernd ergibt sich eine ungleichmäßige, in die Tiefe reichende Auslaugung, bei der ein Abfall des pH-Wertes mit der Zerstörung des Zementsteins direkt aufeinander folgt (vgl. Abbildung 3-17).

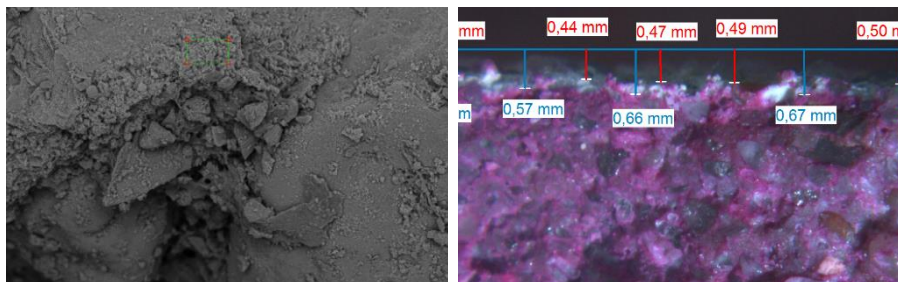


Abbildung 3-18: Randbereich Mörtel M6O, links: SE-Aufnahme im oberflächennahen Bereich, rechts: Auslaugungstiefe nach sechs Monaten Auslaugung

Der Typ 3 Mörtel (M9) beinhaltet wie der Mörtel M3 (Typ 1) Kunststofffasern, die eine höhere Beständigkeit aufwiesen als der Zementstein. Bei dem Mörtel M9 zeichnete sich keine freiliegende Gesteinskörnung an der Oberfläche ab, sondern der Zementstein blieb trotz veränderter, poröser Gefügestruktur bestehen (vgl. Abbildung 3-19). Die Aufnahmen unter dem Rasterelektronenmikroskop zeigten nach sechs Monaten Auslaugung ein deutlich verändertes Zementsteingefüge der Mörtelrandzone. Die Aluminiumoxid- und Eisenoxid-Gehalte waren im ausgelaugten Bereich deutlich erhöht.

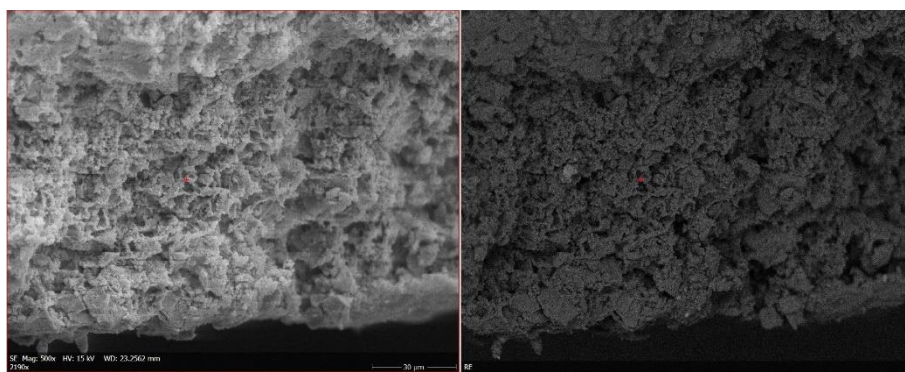


Abbildung 3-19: Mörtel M9U, REM Aufnahme des Randbereichs, links: SE-Aufnahme, rechts: RE-Aufnahme nach sechs Monaten Auslaugung

Im Kernbereich des Typ 4 Mörtels (M10) konnten hohe Anteile an Kohlenstoff (ca. 50 %) festgestellt werden, die auf die Verwendung von kunststoffhaltigen Zusätzen bis maximal 25 M.-%/z zurückzuführen sind. Ein dichtes Zementsteingefüge lag zudem im Kernbereich vor (vgl. Abbildung 3-20, rechts). Im oberflächennahen Bereich der Probe konnte ebenso wie bei den zuvor beschriebenen, untersuchten Mörtelproben ein aufgelöstes Zementsteingefüge visuell erfasst werden (vgl. Abbildung 3-20, links).

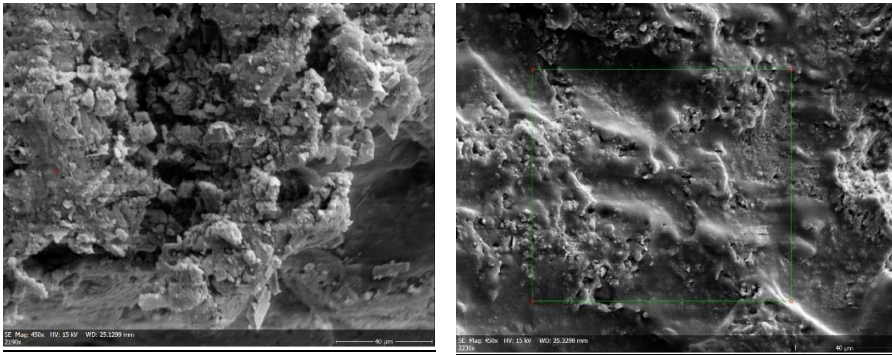


Abbildung 3-20: REM-Aufnahme, 450-fache Vergrößerung, links: Randbereich Mörtel M100, rechts: Kernbereich Mörtel M100 nach sechs Monaten Auslaugung

In Bezug auf die **Porositätsveränderung** konnte bis auf Mörtel M20 und M90 eine Porositätszunahme zwischen 0,2 Vol.-% und 2,4 Vol.-% festgestellt werden (vgl. Abbildung 3-21). Anstatt der erwarteten Porositätssteigerung trat eine zum Teil deutliche Reduktion der Porosität bei dem Typ 3 Mörtel auf. Da der Mörtel einen deutlich höheren Polymeranteil aufweist, kann die Wasserlagerung eine Nachhydratation oder eine chemische Wechselwirkung mit möglichen Quellvorgängen zur Folge haben. Ein deutlicher Abtrag des Zementsteins bzw. eine Zementsteinzerstörung infolge der Auslaugung war nicht festzustellen. Inwieweit zunächst eine Verringerung der Porosität infolge der Wasserlagerung und anschließend eine mögliche Erhöhung der Porosität infolge der Auslaugung stattfand, konnte anhand der Messwerte nicht bewertet werden.

Ein Einfluss des Mörteltyps auf die Porositätsveränderung konnte anhand der Ergebnisse nicht abgeleitet werden.

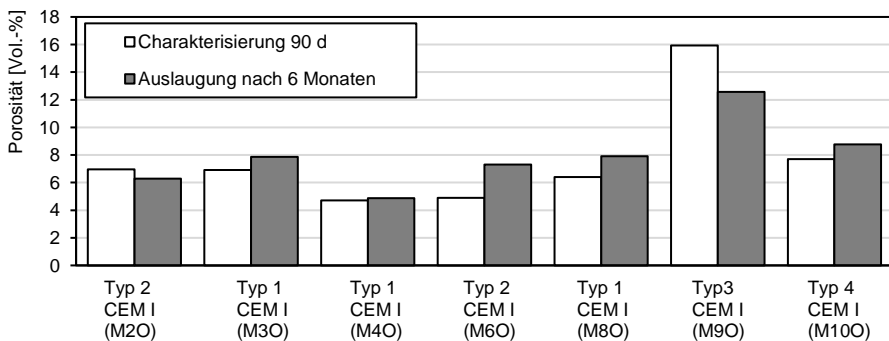


Abbildung 3-21: Auswertung der Gesamtporosität nach > 90 Tagen und nach sechs Monaten Auslaugung, Oberfläche geglättet (O), Typ 1 bis Typ 4

Der Einfluss des Mörteltyps auf die **Alkalienabgabe** über den gesamten Versuchszeitraum von sechs Monaten ist in Abbildung 3-22 dargestellt (summierte Leitfähigkeiten). Eine Differenzierung anhand der Ergebnisverläufe zwischen Typ 1 und Typ 2 war nicht möglich. Der Typ 3 Mörtel wies zunächst ein vergleichbares Alkalienabgabeverhalten in den ersten 50 Tagen der Versuchsführung auf. Anschließend war nicht - wie bei den Typ 1 und Typ 2 Mörteln - ein weiterhin

ansteigender Messwerteverlauf zu beobachten, sondern die kumulierten Verläufe flachten mit zunehmender Versuchsdauer deutlich ab. Bei dem Typ 4 Mörtel war in den ersten 20 Tagen ein vergleichbares Alkalienabgabeverhalten zu den anderen Mörteln zu betrachten. Anschließend war eine deutliche Abflachung des Messwerteverlaufs ersichtlich. Nach 80 Tagen war die weitere Alkalienabgabe ins Eluat vernachlässigbar klein. Nach 160 Tagen Versuchsdauer beträgt die kumulierte elektrolytische Leitfähigkeit ca. $32 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2\cdot\text{L}$. Zum Vergleich wurde bei den Typ 1 und Typ 2 Mörteln eine kumulierte elektrolytische Leitfähigkeit zwischen $75 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2\cdot\text{L}$ und $110 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2\cdot\text{L}$ ermittelt.

Die Messwerteverläufe deuten auf ein ähnliches Lösungsverhalten von Typ 1 und Typ 2 Mörteln und eine abweichende Alkalienabgabe von Typ 3 und Typ 4 Mörteln hin.

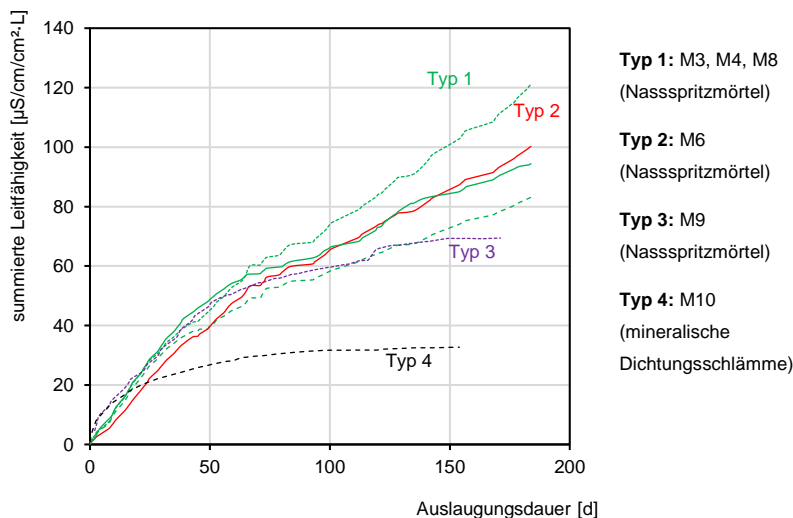


Abbildung 3-22: Kumulierte flächen- und becken volumenbezogene elektrolytische Leitfähigkeit des Eluats, Vergleich des Mörteltyps

3.2.5.3 Einfluss der Zementart

Zur Abgrenzung des Einflusses des Bindemittels (CEM I, CEM II/A-LL, CEM III, Sonderzement) auf die Alkalienabgabe und den Auslaugungswiderstand wurden die Untersuchungsergebnisse folgender Mörtel miteinbezogen:

- CEM I, Typ 1: M3, M4, M8
- CEM II/A-LL, Typ 1: M7
- CEM III, Typ 1: M1
- Sonderzement, Typ 1: M5

Bei den CEM I, CEM II/A-LL und CEM III Mörteln zersetzte sich die Zementsteinmatrix bis hin zum vollständigen Freiliegen der Gesteinskörnung (vgl. Abschnitt 3.2.5.1). Bei dem Sonderzement (M5, keine Angabe zum Bindemittel, Typ 1) war keine sukzessive Zerstörung der Zementsteinmatrix ersichtlich. Auch nach sechs Monaten Auslaugung konnten augenscheinlich keine **Veränderungen der Oberfläche** beobachtet werden.

Bei der Betrachtung der mittleren **Auslaugungstiefe** nach sechs Monaten (vgl. Abbildung 3-23) war keine Abgrenzung zwischen den verschiedenen Bindemittelarten möglich. Die mittlere Auslaugungstiefe nach sechs Monaten lag bei den aufgeführten Mörteln zwischen 0,47 mm und 0,76 mm. Zu den Mörtelsystemen gab es nur begrenzte Informationen über die genaue Zusammensetzung. Zu den nicht bekannten Angaben gehören u. a. die Verwendung von Zusatzstoffen, der w/z-Wert (Anforderungen aus dem Regelwerk < 0,50) und der Bindemittelgehalt. Zwischen der Porosität und der Auslaugungstiefe war u. a. auch aufgrund der zuvor beschriebenen, unbekannt Materialkennwerten kein Zusammenhang ableitbar (vgl. Anhang C). Aufgrund der nicht ausreichenden Datenbasis und der fehlenden Angaben zu den marktgängigen Produkten war eine Abschätzung der Widerstandsfähigkeit und Auslaugung in Bezug auf die Zementart nicht eindeutig möglich.

Wie bereits beschrieben, wurde bei Mörtel M5 (Typ 1, keine Angabe zum Bindemittel) kein Abtrag des Zementsteins festgestellt. Dennoch war nach sechsmonatiger Auslaugung eine Verschiebung der Alkalitätsgrenze zu erfassen. Aus dem Versuchsergebnis ließ sich ableiten, dass auch ohne optische Veränderung eine Auslaugung in Form einer Alkalienabgabe bei diesem Mörtel stattgefunden hat.

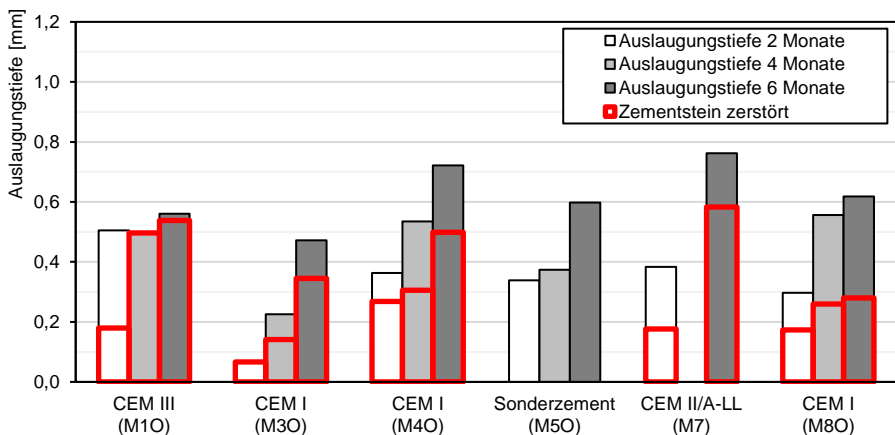


Abbildung 3-23: Mittlere Auslaugungstiefe und Zementsteinauflösung nach zwei, vier und sechs Monaten Versuchsdauer, Oberfläche geglättet (O), Variation der Zementart

Die aufgelöst erscheinende **Zementsteinmatrix** des CEM III Mörtels (M1) zeigte CaO-Gehalte zwischen 5 Oxid.-% und 10 Oxid.-%. Im Kernbereich war ein CaO-Gehalt von 25 Oxid.-% bis 35 Oxid.-% festzustellen. Demzufolge hat im oberflächennahen Bereich eine Calciumverarmung stattgefunden. Im Vergleich zu einem CEM I Mörtel (M3 und M6) war der Alkalienpuffer des CEM III-Zementes im Kernbereich erwartungsgemäß geringer. Der CaO-Gehalt bei den CEM I-Mörteln betrug ca. 40 Oxid.-% im Kernbereich.

Die Zementsteinmatrix im Kernbereich des Sonderzementes (M5) setzt sich aus drei Hauptbestandteilen zusammen (CaO, Al₂O₃, SiO₂). Dies bestätigt die Annahme, dass vermutlich ein Calcium-Aluminat-Zement verwendet wurde (vgl. Abschnitt 3.2.4). Bei der Auslaugung des Zementsteins wurde insbesondere CaO als Hauptbestandteil herausgelöst und sank auf Werte zwischen 6 Oxid.-% und 7 Oxid.-%. Der Anteil an

Aluminat stieg und bildete ein stabiles Gefüge, welches eine nur geringfügige Oberflächenveränderung mit sich brachte (vgl. Abbildung 3-24). Im Vergleich zu den anderen geprüften Mörtelsystemen war der CaO- und auch der $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalt als gering einzustufen (Kernbereich CaO-Gehalt 15 Oxid.-% bis 30 Oxid.-%). Der Anteil an Alkalien, der sowohl das Realkalisierungspotenzial als auch den Widerstand gegen Auslaugung bestimmt, war im Kernbereich vergleichsweise gering. Aufgrund des geringeren Alkalienpuffers konnte trotz dichter Porenstruktur eine messbare Auslaugung stattfinden.

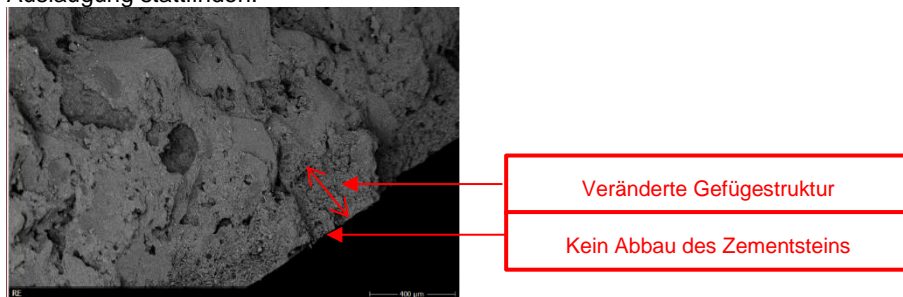


Abbildung 3-24: Mörtel M50, RE-Aufnahme Randbereich

Ein Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL) besteht als Hauptbestandteil aus 80 % - 94 % Portlandzementklinker und 6 % - 20 % Kalkstein. Der gemahlene Kalkstein, mit hohen Gehalten an Calciumcarbonat, kann die Korngrößenverteilung des Zementes im feinen Bereich verbessern. Als inerter Bestandteil ist der Einfluss des Kalksteinmehls auf die Zementeigenschaften im Wesentlichen auf die Füllerwirkung beschränkt.

Trotz Auslaugungstiefen von im Mittel 0,76 mm bei dem CEM II/A-LL Mörtel (M7) lag der CaO-Gehalt des ausgelaugten Bereiches bei ca. 30 Oxid.-% (vgl. Abbildung 3-25). Der Kernbereich zeigte CaO-Gehalte zwischen 40 Oxid.-% und 50 Oxid.-%. Die hohen CaO-Gehalte im oberflächennahen Bereich waren auf das Calciumcarbonat aus dem Portlandkalksteinzement zurückzuführen. Calciumcarbonat ist in Wasser schwerer löslich als Calciumhydroxid. Dementsprechend verblieb an der Oberfläche eine vergleichsweise hohe Calciumkonzentration trotz abnehmender Alkalität.

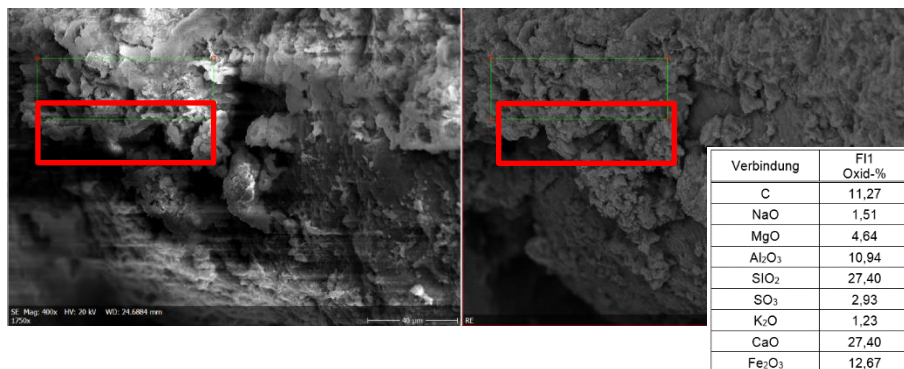


Abbildung 3-25: Mörtel M70, links: SE-Aufnahme, rechts: RE-Aufnahme

In Bezug auf die **Porositätsveränderung** konnte bei allen Mörteln eine Porositätszunahme zwischen 0,2 Vol.-% und 2,5 Vol.-% festgestellt werden (vgl. Abbildung 3-26). Der Sonderzement (M5) wies die größte Veränderung in Bezug auf die Porositätszunahme auf. Die Oberflächen aller untersuchten Mörtel, ausgenommen M5, wiesen Auflösungserscheinungen und einen Abtrag der Zementsteinmatrix auf. Mögliche Porositätsveränderungen in dem bereits abgetragenen Bereich konnten somit für diese Mörtel nicht in die Bewertung mit aufgenommen werden.

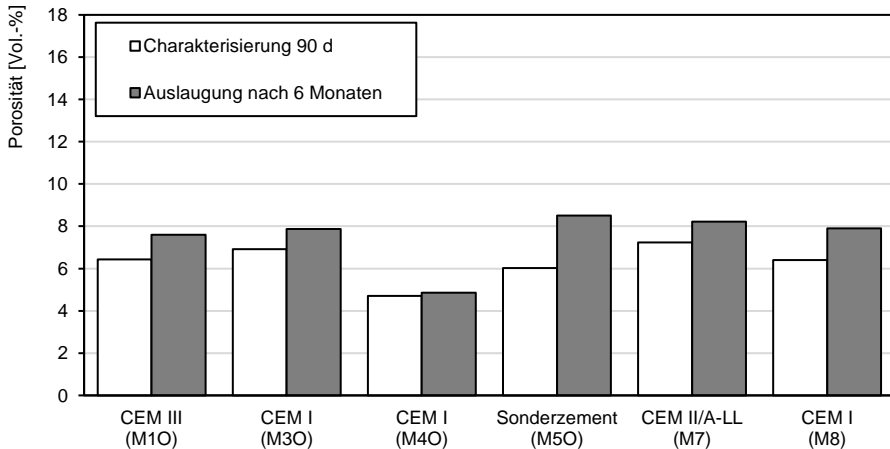


Abbildung 3-26: Auswertung der Gesamtporosität nach > 90 Tagen und nach sechs Monaten Auslaugung, Oberfläche geglättet (O), Variation der Zementart

Der Einfluss des Bindemittels auf die **Alkalienabgabe** über den gesamten Versuchszeitraum von sechs Monaten ist in Abbildung 3-27 dargestellt. Die Mörtel mit CEM I-Zementen (M3, M4 und M8) und der Mörtel mit CEM II/A-LL-Zement (M7) zeigten vergleichbare Ergebnisverläufe. Bei den Mörteln mit CEM I-Zementen und CEM II/A-LL-Zement war zunächst ein Anstieg der kumulierten Leitfähigkeiten bis zu einer Prüfdauer von 40 Tagen festzustellen, was auf einen kontinuierlichen Lösungsprozess von Alkalien hindeutete. Zwischen 40 Tagen und 90 Tagen wurde die Alkalienabgabe ins Eluat abgeschwächt. Nach ca. 90 Tagen liegt ein weiterer Anstieg der Leitfähigkeiten vor.

Der Mörtel mit dem CEM III-Zement (M1) zeigte in den ersten zwei Wochen eine vergleichbare Alkalienabgabe wie die CEM I-Zemente. Im weiteren Verlauf war eine abgeschwächte Alkalienabgabe festzustellen. Nach ca. 180 Tagen Auslaugungsdauer wurde bei dem CEM III-Zement eine kumulierte elektrolytische Leitfähigkeit von ca. $46 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2\text{-L}$ ermittelt. Die CEM I-Zemente wiesen im Mittel eine kumulierte Leitfähigkeit von ca. $100 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2\text{-L}$ auf. Der Mörtel M5 wich bereits nach wenigen Tagen von dem stetigen Anstieg der Leitfähigkeit ins Eluat ab. Nach ca. 180 Tagen Auslaugungsdauer wurde eine kumulierte Leitfähigkeit mit ca. $25 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2\text{-L}$ ermittelt. Der Alkalienpuffer ist somit deutlich geringer als der eines CEM I-Zementes.

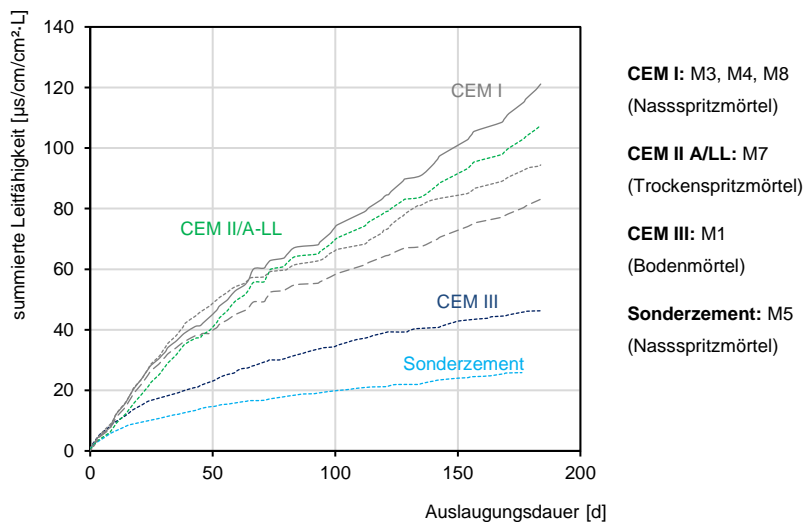


Abbildung 3-27: Kumulierte flächen- und becken volumenbezogene elektrolytische Leitfähigkeit des Eluats, Variation Zementart

3.2.5.4 Einfluss der Oberflächenbearbeitung

Zur Abgrenzung der Art der Oberflächenbearbeitung (Geglättet, Geschnitten, Unterseite der Probe) auf die Alkalienabgabe und den Auslaugungswiderstand wurden die Untersuchungsergebnisse folgender Mörtel miteinbezogen:

- Geschnitten (G): M1, M3, M5, M6, M7
- Geglättet (O): M1, M3, M5, M6, M7
- Unterseite der Probe (U): M5, M6

Die Auswertung der mittleren **Auslaugungstiefe** nach sechs Monaten (vgl. Abbildung 3-28) ergab, dass bei allen Mörteln eine geschnittene Oberfläche (G) eine höhere Auslaugungstiefe aufwies als eine geglättete Oberfläche (O) oder die Unterseite der Probe (U). Daraus konnte abgeleitet werden, dass ein Glätten nicht nur eine zementreiche, ebene und dichte Oberfläche ergab, sondern aufgrund der Bearbeitung einen höheren, temporären Widerstand gegenüber den Auslaugungsprozessen bot.

Die mittlere Auslaugungstiefe der geschnittenen Mörteloberfläche M1G mit 1,25 mm war im Vergleich zu den restlichen Mörtelsystemen vergleichsweise hoch. Bei dem Bodenmörtel war ein ausgeprägter Porenraum im Bruchquerschnitt des oberflächennahen Randbereichs ersichtlich (vgl. Abbildung 3-29). Somit konnte eine partielle Auslaugung im Bereich der Porenräume stattfinden. Ebenso fand bei Mörtel M7G eine tiefgehende Zerstörung des Zementsteins statt. Der Zementstein löste sich an der Oberfläche vollständig und die Gesteinskörnung lag frei.

Ein Einfluss der Oberflächenbearbeitung auf die **Porositätsveränderung** konnte nicht festgestellt werden.

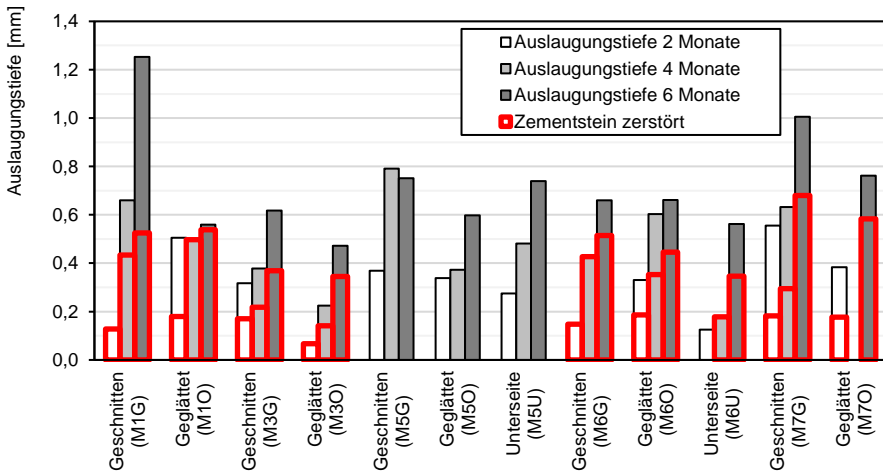


Abbildung 3-28: Mittlere Auslaugungstiefe und Zementsteinauflösung nach zwei, vier und sechs Monaten Versuchsdauer in der vollautomatisierten Auslaugungsanlage, Variation der Oberflächenbearbeitung, Mörtel M1, M3, M5, M6 und M7

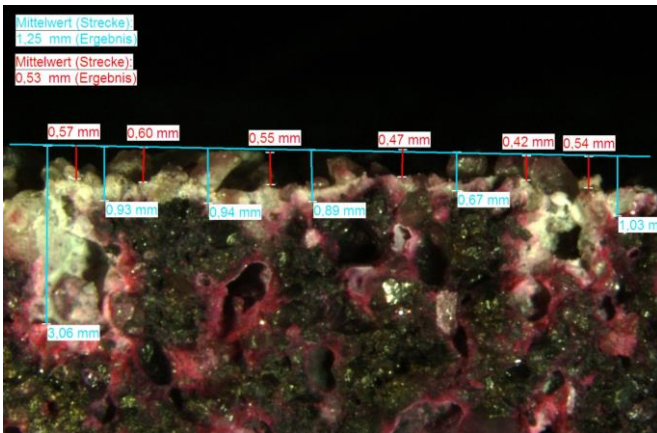


Abbildung 3-29: Auslaugungstiefe des Mörtels M1G nach sechs Monaten Auslaugung

Die Auswirkungen der Oberflächenbearbeitung auf die **Alkalienabgabe** werden anhand der über die gesamte Versuchsdauer summierten Leitfähigkeiten beschrieben.

In Abbildung 3-30 (links) ist der Einfluss der Oberflächenbearbeitung (geglättet (O) oder geschnitten (G)) dargestellt. Eine geglättete Oberfläche im Vergleich zur geschnittenen Oberfläche führte bei allen Mörteln zu einer höheren kumulierten Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Zeit. Der Ergebnisverlauf war darauf zurückzuführen, dass ein höherer Zementleimgehalt an der Oberfläche vorhanden war und somit eine größere Alkalienabgabe ermöglicht wurde. Der weiterhin ansteigende Verlauf über die Zeit weist darauf hin, dass die zementreiche, oberflächennahe Schicht noch nicht gelöst wurde.

Eine Abweichung der Ergebnisverläufe trat bei dem Mörtel M1 nach ca. 100 Tagen Auslaugungsdauer auf. Die geschnittene Oberfläche zeigte höhere Leitfähigkeitsanstiege als eine geglättete Oberfläche. Bei Mörtel M1G lag ein ausgeprägter Porenraum im Bruchquerschnitt des oberflächennahen Randbereichs vor und im Bereich großer Porenräume konnte eine partielle Auslaugung und dementsprechend eine höhere Alkalienabgabe stattfinden.

Abbildung 3-30 (rechts) zeigt den allgemeinen Einfluss der Oberflächenbearbeitung. Eine geglättete Oberfläche zeigte im Vergleich zur Unterseite keinen signifikanten Unterschied im Ergebnisverlauf. Zurückzuführen war die vergleichbare Alkalienabgabe auf einen ähnlichen Zementleimgehalt an den Oberflächen. Für das Realkalisierungsverhalten war der erhöhte Zementleimgehalt und der damit erhöhte Alkalienpuffer an der Unterseite der Probe in Bezug auf die Alkalienabgabe als vorteilhaft zu bewerten.

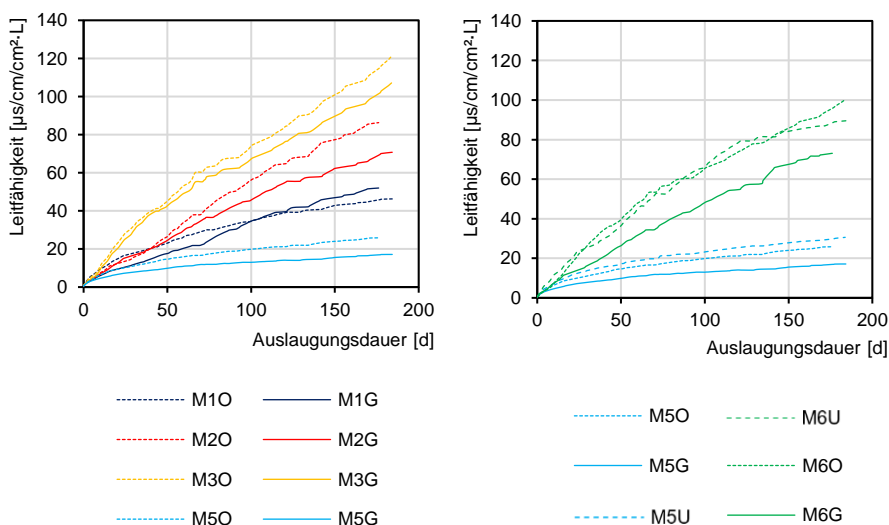


Abbildung 3-30: Kumulierte flächen- und becken volumenbezogene elektrolytische Leitfähigkeit des Eluats, links: Vergleich Oberfläche geglättet (O) oder geschnitten (G), rechts: Vergleich Oberfläche geglättet (O), geschnitten (G) und Unterseite (U)

3.2.6 Diskussion der Ergebnisse

Für das Arbeitspaket 1 wurden zwei verschiedene Zielsetzungen formuliert. Als erste Zielsetzung (Zielsetzung 1) sollte eine Beschreibung der tiefen- und zeitabhängigen Alkalienabgabe erfolgen. Damit verbundene Eigenschaftsveränderungen sollten ausgearbeitet werden. In der zweiten Zielsetzung (Zielsetzung 2) sollten Eingangsparameter für das Realkalisierungspotenzial der Mörtel geschaffen werden. Diese werden in Abschnitt 3.3.1 beschrieben.

Zielsetzung 1: Beschreibung der tiefen- und zeitabhängigen Alkalienabgabe

Die Alkalienabgabe in „mineralstoffarmem“ Wasser und die damit verbundene Auslaugung der alkalischen Bestandteile des Porengefüges sowie der

Zementsteinphasen von mineralischen Werkstoffen folgen bei einem ungestörten Lösungsprozess einem dreigeteilten Mechanismus (vgl. Abbildung 3-31).

Im **ersten Stadium** werden die oberflächennahen alkalischen Anteile (u. a. Calcium, Natrium-, Kalium- und Hydroxidionen) aus dem Porensystem der Zementsteinmatrix gelöst. Dabei findet zunächst - vergleichbar zum Säureangriff [Gerlach, 2017] - ein reaktionskontrollierter Prozess statt. Die Porenlösung bleibt hierbei calciumgesättigt (~ 20 mmol/l) [Schulte Holthausen et. al, 2020a]. Nach [Boos, 2003] stabilisiert sich der pH-Wert der Porenlösung von ca. 12,5 solange wie Calciumhydroxid in der Zementsteinmatrix verfügbar ist. Erst nach vollständigem Herauslösen des Calciumhydroxids beginnt eine pH-Wert Absenkung und die Zementsteinphasen beginnen zu zerfallen [Adenot u. Buil, 1992].

Die Freisetzung und das Lösen der Alkalien können anhand der Veränderung der Leitfähigkeit beschrieben werden. Anfänglich wirkt als dominierende Einflussgröße der „wash-off-Effekt“, der einen erhöhten Lösungsprozess direkt in der Kontaktzone zwischen Werkstoff und Wasser bewirkt. Der Mechanismus ist in den ersten Tagen des Versuchsablaufs am größten. Danach nimmt die Alkalienvfügbarkeit an der Oberfläche ab.

Unterschiede im Ergebnisverlauf ergeben sich z. B. durch die Zementart. Das Alkaliendepot eines CEM I, CEM II/A-LL und CEM III Zements ist in den ersten Tagen der Alkalienabgabe vergleichbar. M5 (Calcium-Aluminat-Zement) weist hingegen bereits in den ersten Tagen der Alkalienabgabe einen niedrigeren Alkalienpuffer auf. Eine Ableitung bzw. einen Zusammenhang dieses Verhaltens zu beispielsweise dem C/S-Verhältnis, Gesamtcalciumgehalt oder zur Porosität des Instandsetzungsmörtels konnte aus den Versuchsergebnissen nicht abgeleitet werden.

Nachdem die löslichen Anteile in das Eluat abgegeben wurden, beginnen die Zementsteinphasen zu zerfallen. Im **zweiten Stadium** geht das Calcium der Zementsteinphasen in Lösung, der Zementstein beginnt an Calcium zu verarmen und gleichzeitig sinkt die Calciumkonzentration der Porenlösung ($\text{pH} < 12,5$). Zuerst erfolgt eine Calciumverarmung (zweites Stadium) und anschließend verbleiben lediglich amorphe und wasserhaltige Hydroxidgele (Silizium-, Aluminium- und Eisenhydroxidgele) auf der Werkstoffoberfläche (Übergang drittes Stadium). Das Zementsteingefüge wird in diesem Stadium poröser und ein braun-gelblich verändertes Zementsteingefüge erscheint auf der Werkstoffoberfläche.

Die durch die Auslaugung angegriffene Oberfläche wirkte bei allen Mörteln unter dem Rasterelektronenmikroskop porös und aufgelöst. Eine Grenze zwischen der aufgelösten und intakten Gefügestruktur konnte messtechnisch nicht erfasst werden. Der Übergang wirkte fließend. In der Oberflächenrandzone waren weder Portlanditkristalle im Porenraum noch im Phasengrenzbereich zwischen Gesteinskörnung und Zementstein nachweisbar. Der Abbau bzw. die Zerstörung der Zementsteinphasen führte dazu, dass schwerlösliche, amorphe und wasserhaltige Hydroxidgele gebildet und so der Anteil an Al_2O_3 , Fe_2O_3 und SiO_2 im Vergleich zu CaO erhöht wurden.

In diesem Stadium ist ein diffusionskontrollierter Transportmechanismus maßgebend (vgl. Abschnitt 3.2.5.1). Die Eigenschaften und die Gefügestruktur des Zementsteins

spiegeln sich beim Widerstand gegenüber der Auslaugungsbelastung wider. Zusätzlich beeinflussen die Durchlässigkeit (Permeabilität), die Porosität, die Gewundenheit der Poren (Tortuosität) sowie der Gesamtalkalienpuffer die Lösung der Alkalien maßgeblich.

Bezüglich des Alkalienpuffers zeigten die Untersuchungen vergleichbare Ergebnisse für die eingesetzten CEM I Zemente bzw. den CEM II/A-LL Zement. Im Gegensatz dazu konnte für den verwendeten CEM III Zement erwartungsgemäß nur ein geringerer Gesamtalkalienpuffer ermittelt werden. Der Mörtel M5 (Calcium-Aluminat-Zement) zeigte in den Versuchen die geringste Alkalienvfügbarkeit, wobei zu beachten ist, dass eine geringe Kapillar- und Gesamtporosität vorliegt.

Im **letzten Stadium** wird die Zementsteinmatrix vollständig aufgelöst, sodass die Gesteinskörnung oberflächennah freiliegt. Aus den Versuchsergebnissen geht hervor, dass bestimmte Zemente eine auslaugbare (pH-Wert Erniedrigung infolge der Alkalienabgabe) und trotzdem weiterhin stabile Zementsteinmatrix aufweisen. Gegenüber einem lösenden Angriff an der Oberfläche können Typ 3 Mörtel oder Typ 4 Mörtel ohne Absandungserscheinungen länger bestehen. Ebenso zeigte der Mörtel M5 (Calcium-Aluminat-Zement) keinen Abtrag bzw. kein Auflösen des Zementsteins.

Bei der Verwendung von Kunststofffasern ist zu beachten, dass diese gegenüber den zuvor beschriebenen Prozessen korrosionsbeständig sind. Somit verbleiben z. B. freiliegende Kunststofffasern so lange an der Oberfläche, bis sie aus der Zementsteinmatrix vollständig herausgelöst werden (Mörtel M3).

Anhand der Veränderungen der Leitfähigkeiten des Eluats zeigte sich im dritten Stadium der Auslaugung eine Abweichung des Wurzel-Zeit-Gesetzes (diffusionskontrollierter Prozess). Die Mörtel, die einen deutlichen Abtrag des Zementsteins aufwiesen, gingen in einen näherungsweise linearen Messwertverlauf über. Der Messwertverlauf wird auch durch die Ergebnisse an Betonen unterschiedlicher Zusammensetzung nach [Schulte Holthausen et. al., 2020a] bestätigt. Der Abtrag des calciumverarmten Zementsteins führt dazu, dass Calcium aus größeren Tiefen leichter gelöst werden kann und so eine Abweichung zum Wurzel-Zeit-Gesetz entsteht.

Die Abgrenzung zwischen dem zweiten und dritten Stadium (Beginn bis zur vollständigen Zersetzung des Zementsteins) folgt zeitlich dicht aufeinander. Nur geringe Übergangsbereiche konnten zwischen intakter Gefügestruktur, Auflösung des Zementsteins bis hin zum vollständigen Abtrag ausgemacht werden. Eine vorauslaufende tiefgehende Auslaugung des Zementsteins und eine damit verbundene pH-Wert Erniedrigung bestehen nicht. Zum Teil ist direkt nach dem abgetragenen Zementstein ein pH-Wert oberhalb des Phenolphthaleinumschlagpunktes festzustellen.

Die in insgesamt drei Stadien beschriebene Auslaugung in demineralisiertem bzw. kalkfreiem Wasser stellt einen Extremfall für die Auslaugung dar. In der Praxis kann eine derartige Beanspruchung der Oberflächen nur durch regelmäßiges Einleiten von bspw. Roh- und Regenwasser oder durch sehr weiches, calcitlösendes Wasser entstehen. Im Regelfall bildet sich eine schützende Calcitschicht auf der Oberfläche und stoppt die Auslaugungsreaktion.

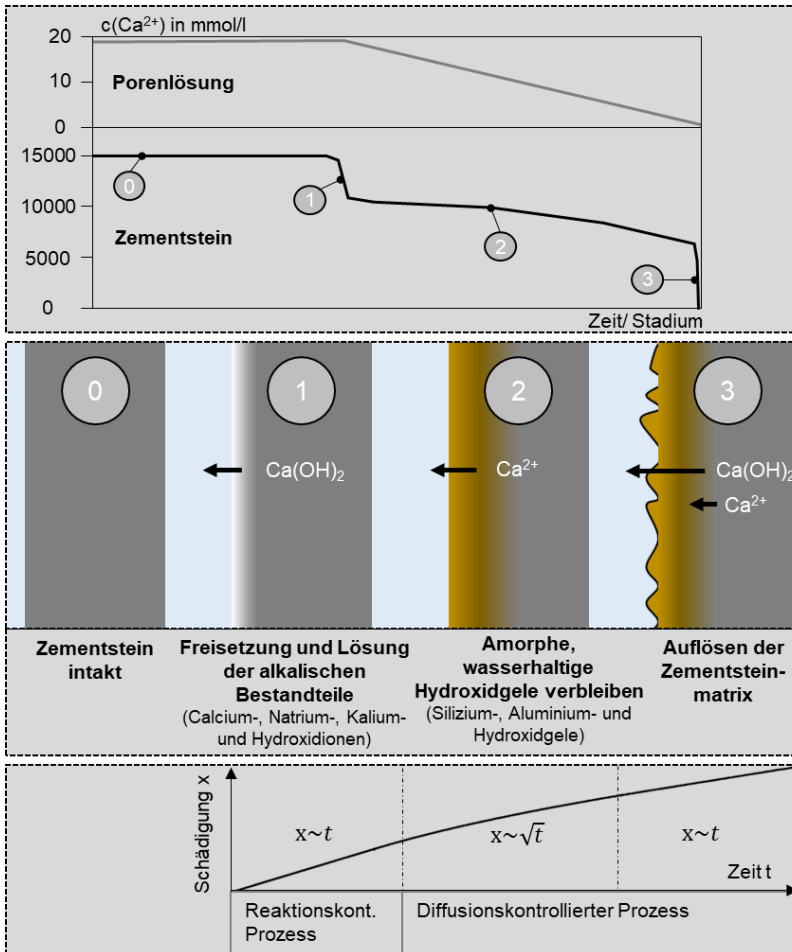


Abbildung 3-31: Dreistufiger Auslaugungsmechanismus in kalkfreiem Wasser, oben: Veränderung des Calciumgehalts der Porenlösung und des Zementsteins in Anlehnung an [Gerard et. al.] aus [Schulte-Holthausen et. al.,2020a], Mitte: Vereinfachte Darstellung der Prozessschritte, unten: Prozessverlauf abgeleitet aus [Gerlach, 2017]

Anhand der Untersuchungsergebnisse des ersten Arbeitsschwerpunktes können folgende Schlussfolgerungen in Bezug auf die Alkalienabgabe, Alkalienverfügbarkeit und den Widerstand gegenüber einer Auslaugung der Instandsetzungsmörtel abgeschätzt werden:

- Eine tiefgehende Auslaugung ohne Zementsteinzerstörung ist in der Regel nicht möglich. Abweichungen können sich durch andersartige Zemente wie Calcium-Aluminat-Zemente ergeben.
- Eine dichte Gefügestruktur ist für den Auslaugungswiderstand entscheidend. Ein ausgeprägter Porenraum (Verdichtungs-poren, Luftporen) kann zu einer partiellen, tiefergehenden Auslaugung führen.
- Innerhalb der ersten Tage ist der Anstieg der Leitfähigkeit bei allen Mörteln vergleichbar. Das langfristige Alkalitätsdepot variiert in Abhängigkeit der Zementart und des Typs.
- Zementreiche Schichten wie bspw. eine geglättete Oberfläche bzw. die gespritzte Unterseite des Probekörpers weisen einen höheren Zementanteil an der Oberfläche auf und somit zeigt sich bei allen Mörteln eine höhere kumulierte Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Zeit. Eine höhere Alkalienverfügbarkeit besteht.
- Der Gesamtcalciumgehalt eines Calcium-Aluminat-Zements war deutlich geringer als der eines Portlandzements (CEM I), eines Portlandkalksteinzements (CEM II/A-LL) oder eines Hochofenzements (CEM III). Der geringere Calciumanteil führte dazu, dass ein geringerer Alkalienpuffer zur Verfügung stand. Die Leitfähigkeitsveränderungen des jeweiligen Eluats bestätigen dieses Ergebnis. Eine Alkalienabgabe und eine nachweisbare Auslaugung fanden trotz dichter Porenstruktur statt.
- Der Hochofenzement (M1) zeigte einen vergleichbaren Gesamtcalciumgehalt und ein ähnliches C/S-Verhältnis wie die Mörtel M4 und M8 (Portlandzement). Sowohl die Gesamtporosität als auch das Kapillarporenvolumen unterschieden sich nicht signifikant von den untersuchten CEM I und CEM II Mörteln. Anhand der Leitfähigkeitsveränderungen des Eluats konnte festgestellt werden, dass der Gesamtalkalienpuffer deutlich geringer ist als der eines CEM I und CEM II Zementes.
- Der Typ 3 Mörtel (M9) wies eine geringere Gesamtalkalienabgabe als ein Typ 1 oder Typ 2 Mörtel auf. Die Beständigkeit gegenüber der Auslaugungsbelastung war höher.
- Die Dichtungsschlämme (Typ 4, M10) zeigte eine geringe Alkalienverfügbarkeit und eine hohe Beständigkeit gegenüber einer Auslaugungsbelastung. Bei den untersuchten CEM I und CEM II Mörteln (Typ 1 und Typ 2) waren im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Einflussfaktoren höhere Alkalienabgaben und Alkalienverfügbarkeiten abzuleiten.

In Tabelle 3-8 sind die Ergebnisse des Auslaugungswiderstands zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3-8: Zusammenfassende Ergebnisse der Mörtel M1 bis M10 im Rahmen der Auslaugung (Dunkelblau (-); Blau (o); Hellblau (+); n.b. nicht bestimmt)

Untersuchte Instandsetzungsmörtel		CEM I Typ 1			CEM I Typ 2		CEM I Typ 3	CEM I Typ 4	CEM II A/LL Typ 1	CEM III Typ 1	k.A. Typ 1
		M3	M4	M8	M6	M2	M9	M10	M7	M1	M5
Auslaugung	Auslaugungstiefe Oberfläche geglättet 6 Monaten ≥ 0,6 mm (-) < 0,6 mm (o) < 0,2 mm (+)	o	-	-	-	-	+	+	-	o	-
	Zementsteinzerstörung Oberfläche geglättet 6 Monaten ≥ 0,5 mm (-) < 0,5 mm (o) < 0,1 mm (+)	o	-	o	o	o	+	+	-	-	+
	Porositätsänderung Oberfläche geglättet 6 Monaten ≥ 2 Vol.-% (-) ≥ 1 Vol.-% (o) < 1 Vol.-% (+)	o	+	o	-	+	-	o	o	o	-
	Leitfähigkeitsanstieg 2 Wochen ≥ 12 μS/cm/cm ^{2*1} (+) > 8 μS/cm/cm ^{2*1} (o) ≤ 8 μS/cm/cm ^{2*1} (-)	+	+	+	o	o	+	+	o	o	-
	Leitfähigkeitsanstieg 6 Monaten ≥ 80 μS/cm/cm ^{2*1} (+) ≥ 50 μS/cm/cm ^{2*1} (o) < 50 μS/cm/cm ^{2*1} (-)	+	+	+	+	+	o	-	+	-	-

3.3 Untersuchungen zum Realkalisierungspotenzial

3.3.1 Eingangsparameter, Zielsetzung und Versuchsprogramm

Nachdem im ersten Arbeitsschwerpunkt die Alkalienabgabe, die damit verbundenen Eigenschaftsveränderungen und das Alkalitätsdepot der Instandsetzungsmörtel untersucht wurden, erfolgten im zweiten Arbeitsschwerpunkt die Untersuchungen zum Realkalisierungsverhalten. Hierfür wurden Verbundkörper aus carbonatisiertem und ausgelaugtem Untergrundbeton hergestellt, auf die Instandsetzungsmörtel appliziert wurden. Die tatsächlich ablaufende Realkalisierung in der Kontaktfuge und der zeitliche Verlauf des Realkalisierungsfortschritts sollten messtechnisch erfasst werden.

Mögliche Einflussfaktoren auf den Realkalisierungsfortschritt (u. a. Feuchteangebot, Zusammensetzung des Betonuntergrunds und des Instandsetzungsmörtels) wurden in unterschiedlichen Versuchsreihen systematisch untersucht. Die Beständigkeit der Realkalisierung und die Eigenschaftsveränderungen, die mit der Realkalisierung einhergehen, sollten ebenso betrachtet werden.

Eingangsparameter aus Arbeitspaket 1

Nach der Durchführung des Arbeitspaketes 1 konnte eine erste Abschätzung erfolgen, welche Instandsetzungsmörtel ein mögliches Realkalisierungspotenzial besitzen und welche Materialien in Bezug auf eine verringerte Alkalienabgabe ein auffälliges Verhalten zeigen. Insgesamt wurden sechs verschiedene Instandsetzungsmörtel auf Basis der Ergebnisse des Arbeitsschwerpunktes 1 ausgewählt. Stichpunktartig werden im Folgenden die abgeleiteten Erkenntnisse in Bezug auf die Realkalisierung zusammengefasst und die Auswahl der einzelnen Mörtel für weitere Untersuchungen begründet:

- Ein geringer Gesamtcalciumgehalt des Zementes, wie bspw. bei einem Calcium-Aluminat-Zement, führte zu einem geringeren Alkalienpuffer, was sich ggf. negativ auf den zeitabhängigen Realkalisierungsfortschritt auswirken kann. Ein geringes Kapillarporenvolumen führte zu einer Verringerung des Transportraums von gelösten, für die Realkalisierung relevanten Alkalien. Das Realkalisierungsvermögen des Mörtels könnte dadurch herabgesetzt werden.
 - Auswahl von Mörtel M5 zur Untersuchung des Realkalisierungspotenzials
- Der Gesamtalkalienpuffer eines Hochofenzementes (CEM III) war geringer als der eines Portlandzementes (CEM I) oder Portlandkompositzementes (CEM II). Mögliche negative Auswirkungen auf die zeitabhängige Realkalisierung sollen weiter untersucht werden.
 - Auswahl von Mörtel M1 zur Untersuchung des Realkalisierungspotenzials
- Aus den vorangegangenen Untersuchungsergebnissen des Abschnitts 3.2 konnten zwischen einem Typ 1 und Typ 2 keine signifikanten Unterschiede bei der Alkalienabgabe abgeleitet werden. Aufgrund der höheren Polymergehalte eines Typ 3 Mörtels könnte das Realkalisierungspotenzial verringert werden.
 - Auswahl von Mörtel M9 zur Untersuchung des Realkalisierungspotenzials
- Die mineralische Dichtungsschlämme Typ 4 wies eine geringe Alkalienverfügbarkeit bei einer Auslaugungsbelastung auf. Eine mögliche, verringerte Alkalienabgabe aus dem Mörtel in Bezug auf die Realkalisierung ist in weiteren Untersuchungen zu überprüfen.
 - Auswahl von Mörtel M10 zur Untersuchung des Realkalisierungspotenzials
- Bei den untersuchten CEM I und CEM II Mörteln (Typ 1 und Typ 2) waren im Vergleich zu den anderen untersuchten Mörteln eine höhere Alkalienabgabe und Alkalienverfügbarkeit abgeleitet worden. Das Realkalisierungspotenzial kann dadurch verbessert werden. Die Alkalienverfügbarkeit in den ersten Tagen war insbesondere bei Mörtel M4 ausgeprägt, sodass ein grundlegendes Realkalisierungspotenzial gegeben ist. Der Mörtel M6 wies anfänglich ein geringes Alkalienabgabevermögen auf, jedoch scheint der Gesamtalkalienpuffer, abgeleitet aus der Leitfähigkeitsveränderung, höher zu sein. Die Porositäten der beiden Mörtel sind etwa gleich. Das C/S-Verhältnis ist bei Mörtel M6 deutlich höher als bei Mörtel M4, sodass für tiefergehende Erkenntnisse bzw. Differenzierungskriterien Realkalisierungsversuche mit beiden Mörteln durchgeführt werden.

- Auswahl von Mörtel M4 (Typ 1) und Mörtel M6 (Typ 2) zur Untersuchung des Realkalisierungspotenzials
- Eine Auslaugung bis hin zur vollständigen Zerstörung der Zemensteinmatrix ist für trinkwasserzugelassene Mörtel bei Wässern, die den Vorgaben der Trinkwasserverordnung entsprechen, nicht zu erwarten. Wenn überhaupt kann bei weichem oder calcitlösendem Wasser ausschließlich in oberflächennahen Bereichen ausgelaugt werden. In Bezug auf die Realkalisierung resultiert, dass in tieferen Zonen, d. h. im Kontaktbereich zwischen Altbeton und Instandsetzungsmörtel, bei ausreichender Schichtdicke eine Calciumverarmung oder eine Zementsteinzerstörung infolge einer Auslaugung nicht entstehen. Die Realkalisierung kann daher durch eine Auslaugung nicht beeinflusst werden.

In Tabelle 3-9 sind die Ergebnisse des Untersuchungsschwerpunktes 1 in Bezug auf ein mögliches Realkalisierungspotenzial zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3-9: Zusammenfassende Ergebnisse der Mörtel M1 bis M10 zur Ableitung des Realkalisierungspotenzials (Dunkelblau (++) ; Blau (+); Hellblau (o); n.b. nicht bestimmt)

Untersuchte Instandsetzungsmörtel		CEM I Typ 1			CEM I Typ 2		CEM I Typ 3	CEM I Typ 4	CEM II A/LL Typ 1	CEM III Typ 1	k.A., Typ 1
		M3	M4	M8	M6	M2	M9	M10	M7	M1	M5
Gefüge	CaO-Gehalt > 50 M.-% (++) > 40 M.-% (+) > 30 M.-% (o)	++	+	+	++	++	n.b.	n.b.	++	+	o
	Al ₂ O ₃ -Gehalt > 40 M.-% (++) < 10 M.-% (o)	o	o	o	o	o	n.b.	n.b.	o	o	++
	Kapillarporenvolumen 90 Tagen > 50 mm ³ /g (++) < 20 mm ³ /g (+) < 8 mm ³ /g (o)	+	+	o	+	+	++	+	+	+	o
	Gelporenvolumen 90 Tagen > 40 mm ³ /g (++) < 20 mm ³ /g (+) < 10 mm ³ /g (o)	+	o	+	o	+	++	+	+	+	o
Auslaugung	Auslaugungstiefe Oberfläche geglättet 6 Monaten ≥ 0,6 mm (++) < 0,6 mm (+) < 0,2 mm (o)	+	++	++	++	++	o	o	++	+	++
	Leitfähigkeitsanstieg 0 bis 16 Tage ≥ 16 µS/cm/cm ² (++) ≥ 10 µS/cm/cm ² (+) < 10 µS/cm/cm ² (o)	++	++	++	+	+	++	++	+	+	o
	Leitfähigkeitsanstieg 6 Monaten ≥ 80 µS/cm/cm ² (++) ≥ 50 µS/cm/cm ² (+) < 50 µS/cm/cm ² (o)	++	++	++	++	++	+	o	++	o	o
Abschätzung Realkalisierungspotenzial hoch (++) eingeschränkt (+) niedrig (o)		++	++	++	++	++	+	o	++	+	o

Zielsetzung

Entsprechend Abbildung 3-32 können grundlegend vier verschiedene Zielsetzungen (in Fortführung der Zielsetzungen 1 und 2 aus Abschnitt 3.2) abgeleitet werden (Zielsetzung 3 bis Zielsetzung 6): Zunächst werden der zeitabhängige Ablauf der Realkalisierung, die zugrundeliegenden Mechanismen sowie die einhergehenden Eigenschaftsveränderungen erfasst und beschrieben (Zielsetzung 3). Des Weiteren werden die möglichen Einflussfaktoren variiert und hinsichtlich ihrer Gewichtung beurteilt (Zielsetzung 4). Mögliche Konsequenzen für die Anwendbarkeit der Realkalisierung in der Praxis sollen aus den Untersuchungsergebnissen abgeleitet werden (Zielsetzung 5). Abschließend werden die Ergebnisse als Eingangsparameter für die Modellbildung (vgl. Kapitel 4) genutzt (Zielsetzung 6).

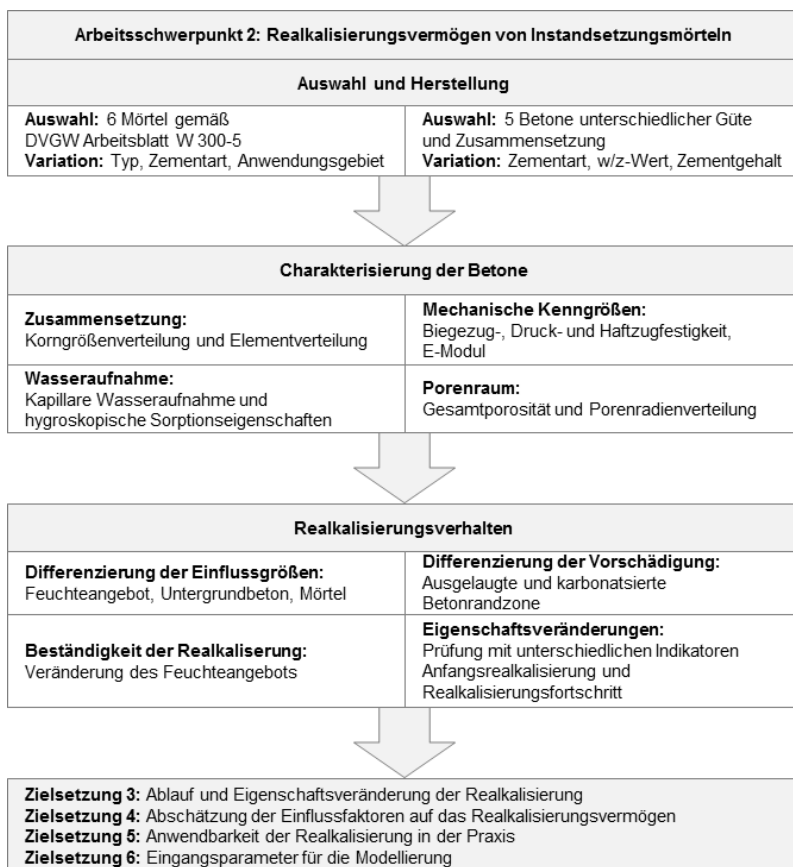


Abbildung 3-32: Übersicht und Aufbau der einzelnen Arbeitsschritte des Arbeitsschwerpunktes 2

Versuchsprogramm

Für die Untersuchungen zum Realkalisierungsvermögen wurden Untergrundbetone unterschiedlicher Betonzusammensetzungen ausgewählt. B1 und B2 repräsentierten Betone mit geringerer Qualität, sodass ein Altbeton in einem Trinkwasserbehälter simuliert und die Transportprozesse abgeleitet werden konnten. B3 entsprach den Vorgaben des DVGW-Arbeitsblattes W 300-1 und repräsentierte als X_{TWB} -konformer

Beton die derzeitigen Mindestanforderungen im Neubau. Damit der Einfluss der Zementart untersucht werden konnte, wurde bei Beton B2 die Zementart variiert. Folgende Betone kamen für die Bearbeitung des Untersuchungsschwerpunktes zur Anwendung:

- Beton B1: CEM I 32,5 R, w/z-Wert 0,8, Zementgehalt 240 kg/m³
- Beton B2.1: CEM I 32,5 R, w/z-Wert 0,7, Zementgehalt 260 kg/m³
- Beton B2.2: CEM II/A-LL 32,5 R, w/z-Wert 0,7, Zementgehalt 260 kg/m³
- Beton B2.3: CEM III/A 32,5 N, w/z-Wert 0,7, Zementgehalt 260 kg/m³
- Beton B3: CEM I 32,5 R, w/z-Wert 0,5, Zementgehalt 320 kg/m³

Da Beton B1 mit einem w/z-Wert von 0,8 das größte Kapillarporenvolumen und folglich den größten Transportraum aufwies, wurde dieser zur Beschreibung der Realkalisierungsprozesse als Referenzbeton verwendet. Die Charakterisierung der Betone wird in Abschnitt 3.3.3 beschrieben.

Für die Untersuchungen zur Realkalisierung wurden unterschiedliche Versuchsreihen entsprechend Tabelle 3-10 geplant. Damit sollten die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die Geschwindigkeit der Realkalisierung, die grundlegenden Prozesse und Eigenschaftsveränderungen abgeleitet werden.

Tabelle 3-10: Übersicht der Versuchsreihen

Versuchsreihe	Mörtelvariation	Betonvariation	Vorschädigung	Lagerung	Schwerpunkt
1.1	M1, M4, M5, M6	B1, B2, B3	ausgelaugt, carbonatisiert	Wasser	Einflussparameter Untergrundbeton, Mörtel Vorschädigung
1.2	M4	B2	carbonatisiert	Wasser, 60 %, r. F.	Abschätzung Alkalität
2	M1, M4, M6	B1, B2.1	carbonatisiert	Wasser, 60 % r. F.	Einflussparameter Feuchteangebot, Mörtel
3	M1, M4, M5, M6	B1	carbonatisiert	Wasser, 60 % r. F., 80 % r. F., 100 % r. F.	Einflussparameter Feuchteangebot, Mörtel
4	M1, M4, M6	B1	carbonatisiert	Wasser, 100 % r. F.	Beständigkeit Realkalisierung
5	M4	B1	carbonatisiert	Feuchte Tücher	Einflussparameter Anfangsrealkalisierung
6	M9, M10	B1	carbonatisiert	Wasser	Einflussparameter Mörtel

3.3.2 Herstellung und Lagerung

Die Untergrundbetone wurden als Balken mit den Maßen 40 x 150 x 600 mm³ hergestellt, nach zwei Tagen ausgeschalt und bis zur Herstellung der Verbundkörper unter zwei unterschiedlichen Bedingungen gelagert (ca.1 Jahr):

- Lagerung „Auslaugung“: 5 Tage feucht (20 ± 2) °C, danach in demineralisiertem Wasser (20 ± 2) °C mit wöchentlichem Wasserwechsel
- Lagerung „Carbonatisierung“: 5 Tage feucht (20 ± 2) °C, danach bei 1 %iger CO₂-Konzentration in einem Klimaschrank bei (20 ± 2) °C und (50 ± 5) % relativer Luftfeuchte

Zwei verschiedene Schädigungsprozesse sollten für den Abfall der Alkalität zugrunde liegen. Zum einen die „Auslaugung“, die den Anwendungsfall eines Betons in einem Trinkwasserbehälter simulieren sollte. Die Carbonatisierung der Untergrundbetone wurde im Nachgang für diesen Untersuchungsschwerpunkt als Referenzlagerung angesetzt, da innerhalb eines Jahres trotz optimaler Auslaugungsbedingungen nur eine begrenzte Auslaugung in die Tiefe erreicht werden konnte.

Vor der Mörtelapplikation wurde der Untergrund mittels Druckluftstrahlen mit festem Strahlmittel vorbereitet, damit zum einen mindere Bestandteile der Oberfläche entfernt und zum anderen durch eine ausreichende Rauigkeit ein guter Haftverbund zwischen Untergrund und Mörtel gewährleistet werden konnte. Der Untergrund wurde vor dem Mörtelauftrag ausreichend mit Wasser vorgewässert, damit zum Zeitpunkt des Aufbringens des jeweiligen Mörtels der Beton „mattefeucht“ war.

Um den Einfluss zwischen händisch verarbeitetem und gespritztem Mörtel untersuchen zu können, wurde der Mörtel M6 händisch und vom Hersteller gespritzt hergestellt (vgl. Abbildung 3-33 und Abbildung 3-34). Die Mörtel M1, M4, M5 und M9 wurden ausschließlich händisch unter Verwendung einer systemabhängigen Haftbrücke angewendet (gleiches Material jedoch ohne Größtkorn). Alle Mörtel wurden in einer Dicke von ca. 20 mm aufgebracht und an der Oberfläche geglättet. Die mineralische Dichtungsschlämme (M10) wurde ebenfalls händisch in einer Schichtdicke von ca. 2 mm appliziert.



Abbildung 3-33: Herstellung der gespritzten Verbundkörper, links: eingeschalteter Untergrundbeton, rechts: Mörtelauftrag im Nassspritzverfahren

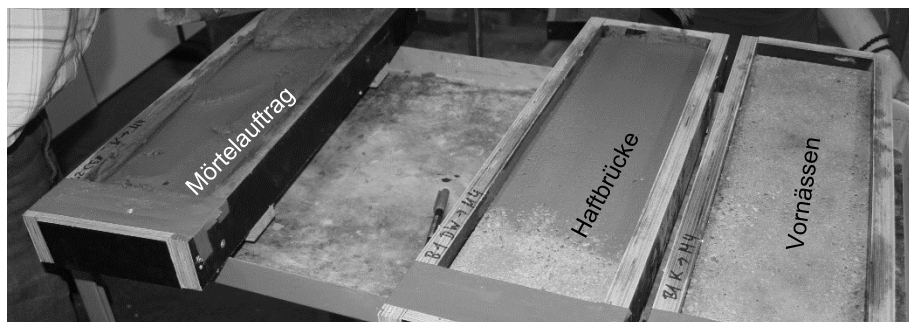


Abbildung 3-34: Herstellung der händisch hergestellten Verbundkörper

Bei der **ersten Versuchsreihe** wurde der Verbundkörper unter feuchten Tüchern drei Tage nachbehandelt, im Anschluss ausgeschalt, in Prismen geschnitten und für zwölf Tage unter Laborbedingungen bei (20 ± 2) °C und (60 ± 5) % relativer Luftfeuchte gelagert. Die Laborlagerung war notwendig, damit ein Abdichten der Seitenflächen und der Unterseite mit Epoxidharz ermöglicht wurde. Analog zu den Versuchen der Alkalienabgabe sollte während der Realkalisierung ein ausschließlich einseitiger Kontakt mit dem umgebenden Medium gewährleistet werden. Nach insgesamt 16 Tagen fand die Lagerung bei (60 ± 5) % relativer Luftfeuchte und (20 ± 2) °C bzw. in Leitungswasser bei (20 ± 2) °C statt.

Für die **zweite Versuchsreihe** wurden die Verbundkörper vier Tage unter feuchten Tüchern nachbehandelt, ausgeschalt und sieben Tage unter Laborbedingungen bei (20 ± 2) °C und (60 ± 5) % relativer Luftfeuchte gelagert. Die Abdichtung erfolgte ebenfalls mit Epoxidharz. Nach insgesamt zwölf Tagen fand die Lagerung bei (60 ± 5) % relativer Luftfeuchte und (20 ± 2) °C bzw. in Leitungswasser bei (20 ± 2) °C statt.

Damit die Anfangsrealkalisierung sowie der Feuchteinfluss untersucht werden konnten, wurden in der **dritten Versuchsreihe** die Nachbehandlung und das Ausschalen auf einen Tag verkürzt. Am zweiten Tag wurden die Proben in Prismen geschnitten, mit flüssigem PVC abgedichtet und ab dem dritten Tag unter folgenden Bedingungen gelagert:

- Lagerung im Klimaschrank bei (60 ± 5) % relativer Luftfeuchte und (20 ± 2) °C
- Lagerung im Klimaschrank bei (80 ± 5) % relativer Luftfeuchte und (20 ± 2) °C
- Lagerung im Klimaschrank bei 100 % relativer Luftfeuchte bei (20 ± 2) °C
- Lagerung in Leitungswasser bei (20 ± 2) °C

In der **vierten Versuchsreihe** zur Prüfung der Realkalisierungsbeständigkeit wurden die Verbundkörper zwei Tage nachbehandelt, ausgeschalt, in Prismen geschnitten und nach insgesamt sechs Tagen wie folgt gelagert:

- Lagerung im Klimaschrank bei 100 % relativer Luftfeuchte bei (20 ± 2) °C
- Lagerung in Leitungswasser bei (20 ± 2) °C

In der **fünften Versuchsreihe** wurden zur Untersuchung des Einflusses der Anfangsrealkalisierung in den ersten Stunden bzw. Tagen die Verbundkörper für einen Tag vor Austrocknung geschützt, anschließend ausgeschalt und 27 Tage unter feuchten Tüchern nachbehandelt.

Zur weiteren Eingrenzung des Einflusses des Instandsetzungsmörtels wurden in **Versuchsreihe sechs** dieselben Nachbehandlungs- und Lagerungszeiten wie in Versuchsreihe zwei vorgesehen.

Zusammenfassend sind die einzelnen Versuchsreihen in Tabelle 3-11 aufgeführt.

Tabelle 3-11: Übersicht der Versuchsreihen, Lagerung und Nachbehandlung

Versuchsreihe	Nachbehandlung	Einlagerung	Feuchtebedingung	Temperatur
1.1, 1.2	3 Tage feucht + 12 Tage Labor	16 Tagen	(60 ± 5) % r. F., Wasser	(20 ± 2) °C
2, 6	4 Tage feucht + 7 Tage Labor	12 Tagen	(60 ± 5) % r. F., Wasser	(20 ± 2) °C
3	1 Tag feucht + 1 Tag Labor	3 Tagen	(60 ± 5) % r. F., (80 ± 5) r. F., 100 % r. F., Wasser	(20 ± 2) °C
4	2 Tage feucht + 3 Tage Labor	6 Tagen	100 % r. F., Wasser	(20 ± 2) °C
5	28 Tage feucht	-	-	(20 ± 2) °C

3.3.3 Charakterisierung der verwendeten Betone

Die verwendeten Zemente zur Herstellung der Substrate wurden hinsichtlich ihrer Zusammensetzung mittels Elementanalyse bestimmt. Zur Erfassung der mechanischen Kenngrößen wurde die Prüfung der Druck- und Biegezugfestigkeit analog zu den verwendeten Mörteln (vgl. Abschnitt 3.2.3) nach DIN EN 12190 an jeweils drei Prismen bzw. sechs würfelförmigen Probekörpern sowie die Bestimmung des Elastizitätsmoduls an stehenden Prismen entsprechend des Verfahrens 2 nach DIN EN 13412 durchgeführt. Im Alter von 90 Tagen wurden die Porosität und die scheinbare Dichte der Betonproben mittels Quecksilberdruckporosimetrie gemäß DIN 66133 gemessen. Zusätzlich zu den mechanischen Eigenschaften und der Porosität wurden Versuche zur Wasseraufnahme durchgeführt. Nach erfolgter Carbonatisierung der Betonrandzone (> 1 Jahr) wurden Prismen aus dem carbonatisierten Bereich entnommen und hinsichtlich der kapillaren Wasseraufnahme nach DIN EN ISO 15148 sowie auf die hygroskopischen Sorptionseigenschaften nach DIN EN ISO 12571 geprüft.

Eine Übersicht der durchgeführten Untersuchungen geht aus Tabelle 3-12 hervor.

Tabelle 3-12: Übersicht der Prüfungen zur Charakterisierung der verwendeten Untergrundbetone

Art der Prüfung	Prüfverfahren	Alter (d)	Art der Probekörper	Anzahl
Elementanalyse	DIN EN 196-2	-	Zement	-
Biegezug- und Druckfestigkeit	DIN EN 12190	28	Prismen	9
Elastizitätsmodul	DIN EN 13412	28	Prismen	3
Quecksilberdruckporosimetrie	DIN 66133	90	Bruchstücke	1
Kapillare Wasseraufnahme an carbonatisierten Betonproben	DIN EN ISO 15148	> 1 Jahr	Prismen	3
Hygroskopische Sorptionseigenschaften carbonatisierter Betonproben	DIN EN ISO 12571	> 1 Jahr	Prismen	3

In Tabelle 3-13 sind die Analyseergebnisse der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung der Zemente dargestellt. Die Festbetonkennwerte nach 28 Tagen

können Tabelle 3-14 entnommen werden. Die Ergebnisse zeigten, dass die Betone B1 bis B3 eine für Bauwerkbeton realistische Bandbreite der Festigkeit aufweisen.

Für das Realkalisierungspotenzial ist insbesondere der zur Verfügung stehende Porenraum relevant. In Tabelle 3-15 sind die Porositätskennwerte im Alter von 90 Tagen dargestellt. Erwartungsgemäß wies der Beton B1 mit einem w/z-Wert von 0,8 nach 90 Tagen die größte Porosität und das größte Kapillarporenvolumen auf. Ein direkter Vergleich von B1 und B3 ergab, dass das für den Alkalientransport verfügbare Volumen bei B1 mehr als doppelt so groß war wie bei Beton B3. Der Beton B2 (CEM III/A) zeigte das geringste Kapillarporenvolumen. Das Gelporenvolumen lag bis auf Beton B2-CEM I (35 mm³/g) zwischen 17 mm³/g und 23 mm³/g.

Tabelle 3-13: Analyseergebnisse der Zemente

Analyse	Bestandteil	CEM I	CEM II/A-LL	CEM III/A
		M.-%		
Glühen	Glühverlust	2,54	7,42	0,59
C-S-Analysator	SO ₃	3,15	2,23	2,12
	CO ₂	1,96	7,84	1,47
Titration	Chlorid	0,03	0,04	0,06
Gravimetrisch lösen	Sulfat	n.b.	n.b.	2,35
XRF (geglüht)	Na ₂ O	0,20	0,18	0,32
	MgO	2,30	0,85	3,45
	Al ₂ O ₃	5,40	5,02	7,91
	SiO ₂	21,0	23,0	27,3
	P ₂ O ₅	0,03	0,81	0,08
	SO ₃	2,71	2,27	3,79
	K ₂ O	0,87	0,77	0,54
	CaO	64,6	63,1	52,8
	TiO ₂	0,27	0,27	0,56
	V ₂ O ₅	0,01	0,01	0,01
	Cr ₂ O ₃	0,00	0,01	0,01
	MnO	0,06	0,07	0,16
	Fe ₂ O ₃	2,62	4,41	1,46

Tabelle 3-14: Festbetonkennwerte bestimmt an 40 x 40 x 160 mm³ Normprismen nach 28 Tagen

Bez.	Rohdichte [kg/dm ³]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]
B1	2,17	21,2	3,9	22.900
B2-CEM I	2,31	32,1	5,6	27.000
B2-CEM II	2,32	25,9	4,7	26.700
B2-CEM III	2,24	25,6	4,9	27.800
B3	2,34	47,4	6,6	30.900

Tabelle 3-15: Dichte- und Porositätskennwerte nach 90 Tagen

Bez.	Scheinbare Dichte [g/cm ³]	Porosität [Vol.-%]	Kapillarporenvolumen [mm ³ /g]	Gelporenvolumen [mm ³ /g]
B1	2,59	15,6	38,5	20,1
B2-CEM I	2,51	15,3	28,3	34,9
B2-CEM II	2,60	12,4	24,7	22,7
B2-CEM III	2,53	9,1	9,7	23,2
B3	2,56	9,6	18,1	17,6

Die kapillare Wasseraufnahme wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 15148 an vollständig carbonatisierten Prismen der Betone B1, B2.1 und B3 an jeweils drei Prüfkörpern ermittelt. Entscheidend für die Bewertung der Ergebnisse ist der Messwerteverlauf während der Prüfung (vgl. Abbildung 3-35). Als Typ A wird nach einer kurzen anfänglichen Stabilisierungsphase ein geradliniger Verlauf der Massenzunahme über \sqrt{t} beschrieben. Sollte kein geradliniger, sondern ein beliebiger Verlauf der Messwerte festzustellen sein, wird die weitere Bewertung als Typ B bezeichnet. Aufgrund eines nicht eindeutigen Verlaufs wird die Berechnung des Wasseraufnahmekoeffizienten (Typ B) nach 24 h ermittelt. Maßgebend für den Wasseraufnahmekoeffizienten bei Typ B ist die Massenänderung nach 24 Stunden. Der mittlere Wasseraufnahmekoeffizient der vollständig carbonatisierten Betonproben beträgt bei B1 $W_{W,24} = 0,46 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$, bei B2.1 $W_{W,24} = 0,34 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ und bei B3 $W_{W,24} = 0,23 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$.

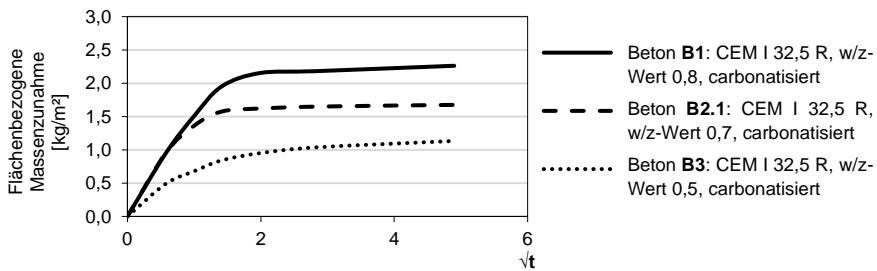


Abbildung 3-35: Mittlere flächenbezogene Massenzunahme bezogen auf die Zeit, Betone B1, B2.1 und B3, vollständig carbonatisiert

Die Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 12571 an vollständig carbonatisierten Prismen der Betone B1, B2.1 und B3 ermittelt. Für die Darstellung der Adsorptions- und Desorptionskurven wurde der Mittelwert der berechneten Feuchtegehalte für jeweils drei Probekörper bei einer relativen Luftfeuchte von 65 %, 75 %, 85 % und 95 % zugrunde gelegt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-36 dargestellt. Aufgrund des geringeren Kapillarporenvolumens bei Beton B3 wird der Porenraum durch die reine Adsorption gefüllt (vgl. Abschnitt 2.1.5). Daraus resultieren höhere massebezogene Feuchtegehalte im Vergleich zu Beton B1 und B2.1 bei Luftfeuchten zwischen 65 % und 85 %.

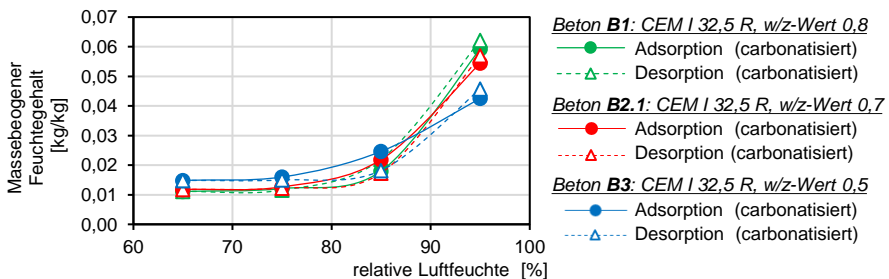


Abbildung 3-36: Mittlerer massebezogener Feuchtegehalt in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte, Betone B1, B2.1 und B3, vollständig carbonatisiert

3.3.4 Labortechnische Untersuchungen

In allen Versuchsreihen erfolgte die Untersuchung der Probekörper primär zerstörend mittels Brechen der Probekörper, Aufsprühen der Indikatorlösung und Betrachtung der Gefügestruktur unter dem Auflichtmikroskop. Die Mörtel wurden dazu oberflächennah mittels Säge eingeschnitten und im Anschluss gebrochen (vgl. Abbildung 3-37). Nicht alle Proben waren vollständig carbonatisiert, sodass teilweise eine Restalkalität im Untergrund vorgefunden wurde. Für die Bestimmung des Realkalisierungsfortschrittes wurde in den verschiedenen Versuchsreihen in der Regel Phenolphthalein als indikative Bestimmung verwendet. Damit eine Abschätzung der vorliegenden Alkalität im Untergrundbeton vorgenommen werden konnte, wurden zusätzliche Indikatoren eingesetzt. Die Umschlagbereiche können Abbildung 3-38 entnommen werden. Stichprobenartig wurden rasterelektronenmikroskopische Gefügeanalysen (REM) durchgeführt.



Abbildung 3-37: Prinzipskizze zur Bestimmung der Realkalisierungstiefe

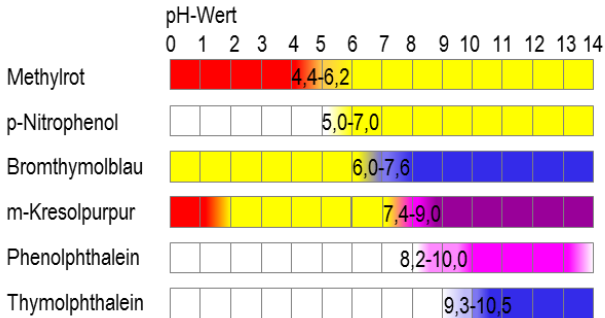


Abbildung 3-38: Umschlagbereiche der verwendeten Indikatoren [Jander u. Jahr, 1973; Küster u. Thiel, 2011; Kahlert u. Scholz, 2014; Raupach u. Orłowski, 2008]

3.3.5 Ergebnisse der Untersuchungen

3.3.5.1 Einfluss der Umgebungsfeuchte

Der Einfluss des Feuchtegehalts (Umgebungsfeuchte, Lagerungsbedingungen) auf die Realkalisierung des Betons wurde anhand der Versuchsreihen 2 und 3 untersucht. Die Versuchsreihe 2 beinhaltete die Mörtelvariationen M1, M4 und M6 in Kombination mit den Betonen B1 und B2.1. Die Lagerung der Verbundproben erfolgte in Leitungswasser und bei einer relativen Luftfeuchte von $(60 \pm 5) \% \text{ r. F.}$

Wie in Abbildung 3-39 dargestellt, nimmt in Abhängigkeit von der Zeit bei allen drei Mörteln die Realkalisierungstiefe in Leitungswasser zu. Der Messwerteverlauf der einzelnen Mörtel verläuft nahezu parallel, d. h. die altersabhängigen Steigungen der hinterlegten Regressionslinien sind vergleichbar. Der einzige signifikante Unterschied ergibt sich hinsichtlich des ersten Messwertes, der im Alter von zwölf Tagen ermittelt wurde. Das bedeutet, dass ein wichtiger Unterscheidungsparameter der Mörtel bereits in einem frühen zeitlichen Stadium vorliegt.

Bei Lagerung bei $(60 \pm 5) \% r. F.$ zeigt sich anhand des Messwerteverlaufs (vgl. Abbildung 3-39), dass ein zeitabhängiger Realkalisierungsfortschritt nicht erfolgt, sondern stagniert. Die Anfangsmesswerte nach zwölf Tagen sind zu den Proben in Leitungswasser identisch, da die Nachbehandlung und anschließende Lagerung gleichermaßen durchgeführt wurden. Daraus lässt sich folgern, dass die in der Luft enthaltene Feuchte bei ca. $60 \% r. F.$ nicht ausreicht, damit eine in die Tiefe fortschreitende Realkalisierung möglich ist. Dieses Ergebnis ist ebenso bei der Verbundkombination mit B2 zu beobachten (vgl. Abbildung 3-40). Eine zeitabhängige Realkalisierung über einen Versuchszeitraum von > 50 Tagen hat nicht stattgefunden.

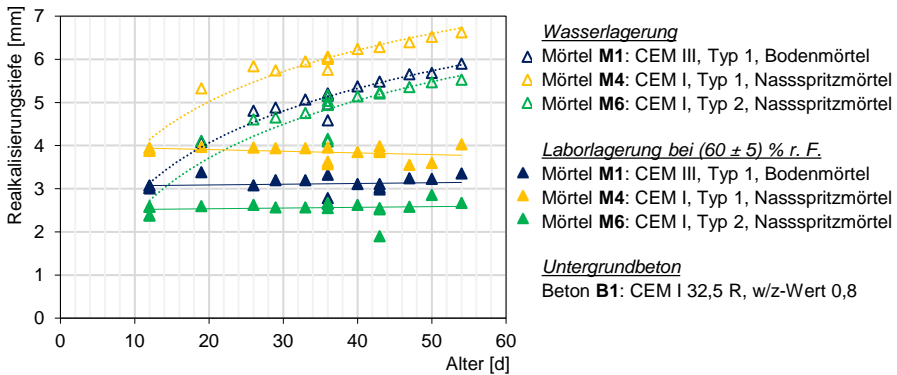


Abbildung 3-39: Mittlerer Realkalisierungsfortschritt bei Mörtel M1, M4 und M6, Untergrundbeton B1 bei Lagerung in Wasser und bei $(60 \pm 5) \% r. F.$ (Versuchsreihe 2)

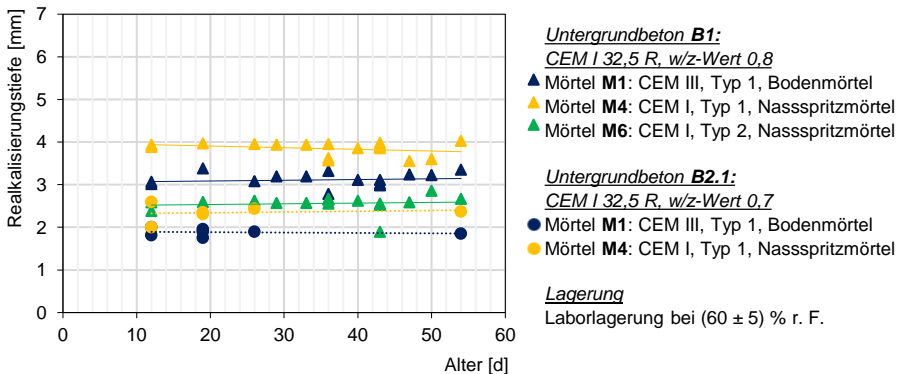


Abbildung 3-40: Mittlerer Realkalisierungsfortschritt bei Mörtel M1, M4 und M6, Untergrundbeton B1 und B2, Lagerung bei $(60 \pm 5) \% r. F.$ (Versuchsreihe 2)

In Versuchsreihe 3 wurde gezielt auf den Einfluss der relativen Luftfeuchte und der Lagerung in Leitungswasser eingegangen. Dazu sind die folgenden Lagerungen variiert worden: Lagerung in Leitungswasser, $(60 \pm 5) \% \text{ r. F.}$, $(80 \pm 5) \% \text{ r. F.}$ und $100 \% \text{ r. F.}$ Verwendet wurde der Beton B1 in Kombination mit den Mörteln M1, M4, M5 und M6.

Zunächst wird auf die Messwerteverläufe der Lagerung in Leitungswasser eingegangen. Die Realkalisierungstiefe nimmt in Abhängigkeit von der Lagerungszeit bei allen Mörteln zu (Abbildung 3-41). Wie bereits bei der zweiten Versuchsreihe festgestellt, ist bei allen Mörteln ein vergleichbarer Messwerteverlauf ersichtlich. Zur Veranschaulichung der Messwerteverläufe wurden Regressionslinien hinterlegt.

Bei $100 \% \text{ r. F.}$ ist ebenfalls eine Zunahme der Realkalisierungstiefe in Abhängigkeit von der Lagerungszeit bei allen Mörteln festzustellen (vgl. Abbildung 3-42). Bei den Mörteln M1 und M4 ist die gemessene, maximale Realkalisierungstiefe nach einer Versuchsdauer von > 50 Tagen geringer als die Realkalisierungstiefe der Proben in Leitungswasser bei gleicher Versuchsdauer. Bei Mörtel M5 ist kein messbarer Unterschied zwischen der Lagerung in Leitungswasser oder bei $100 \% \text{ r. F.}$ zu beobachten.

Bei $(60 \pm 5) \% \text{ r. F.}$ und $(80 \pm 5) \% \text{ r. F.}$ standen die anfängliche Feuchtigkeit aus dem Vornässen, die Mörtelfeuchtigkeit (Applikation und Nachbehandlung) und die Luftfeuchtigkeit zur Verfügung. An dem Messwerteverlauf zeigt sich kein signifikantes Fortschreiten der Realkalisierung unter den gegebenen Lagerungsbedingungen (vgl. Abbildung 3-43 und Abbildung 3-44). Ausschließlich vor Beginn der Einlagerung fand eine deutlichere Realkalisierung der Betonrandzone statt (innerhalb des ersten Tages). Das bedeutet, dass die Anfangsrealkalisierung aus der Applikation und kurzzeitigen Nachbehandlung resultiert und bei anschließenden $(80 \pm 5) \% \text{ r. F.}$ die Realkalisierungstiefe konstant bleibt. Bei $(60 \pm 5) \% \text{ r. F.}$ ist mit zunehmender Prüfzeit sogar ein Rückgang der Realkalisierungstiefe zu verzeichnen.

Der Effekt der ausgeprägten Anfangsrealkalisierung ist ebenso bei $100 \% \text{ r. F.}$ und in abgeschwächter Form bei Wasserlagerung festzustellen. Im Folgenden wird dazu die Begrifflichkeit „Kontaktrealkalisierung“ eingeführt, da eine differenzierte Betrachtung zur tiefenabhängigen Realkalisierung erforderlich ist. Erläuterungen dazu werden zusammenfassend in Abschnitt 3.3.6 gegeben.

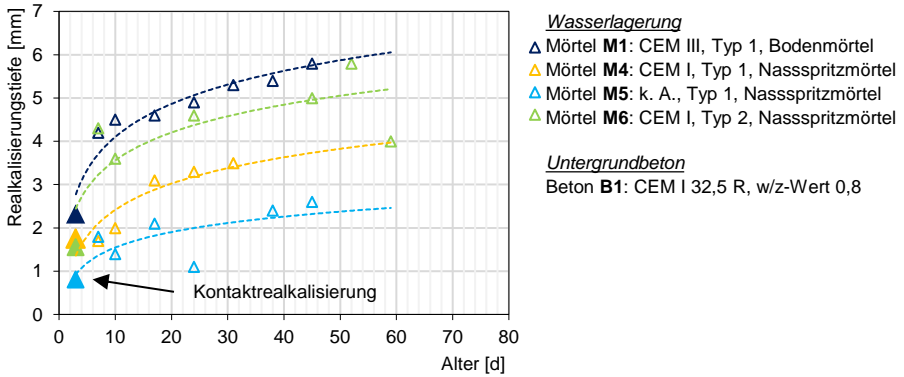


Abbildung 3-41: Mittlerer Realkalisierungsfortschritt bei Mörtel M1, M4, M5 und M6 in Abhängigkeit von den Lagerungsbedingungen, Beton B1, Lagerung in Leitungswasser (Versuchsreihe 3)

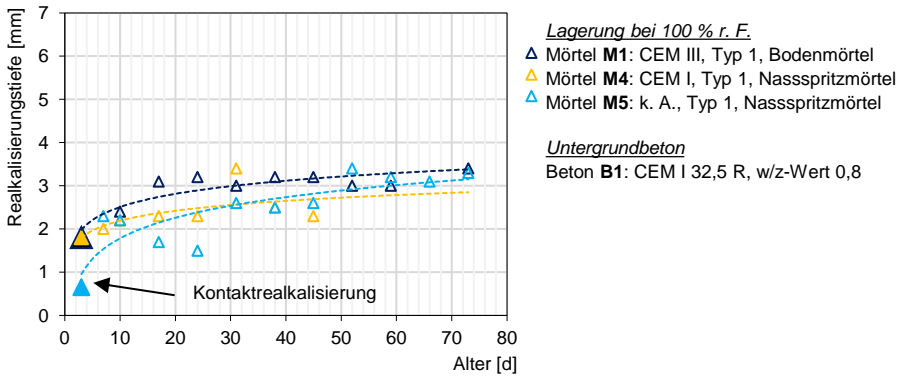


Abbildung 3-42: Mittlerer Realkalisierungsfortschritt bei Mörtel M1, M4 und M5 in Abhängigkeit von den Lagerungsbedingungen, Beton B1, Lagerung bei 100 % r. F. (Versuchsreihe 3)

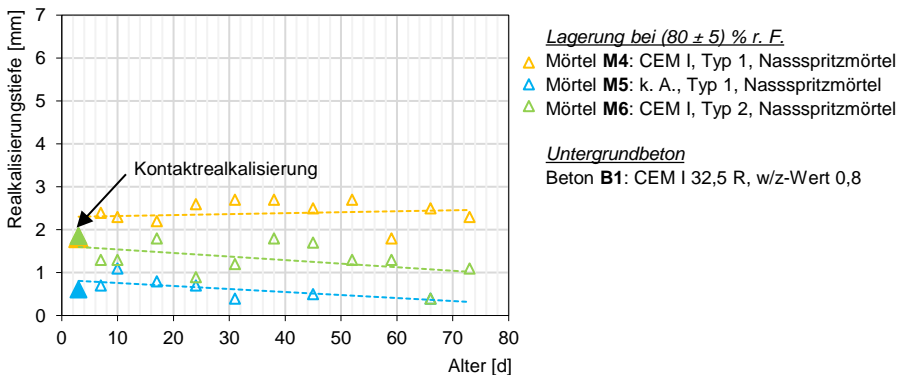


Abbildung 3-43: Mittlerer Realkalisierungsfortschritt bei Mörtel M4, M5 und M6 in Abhängigkeit von den Lagerungsbedingungen, Beton B1, Lagerung bei (80 ± 5) % r. F. (Versuchsreihe 3)

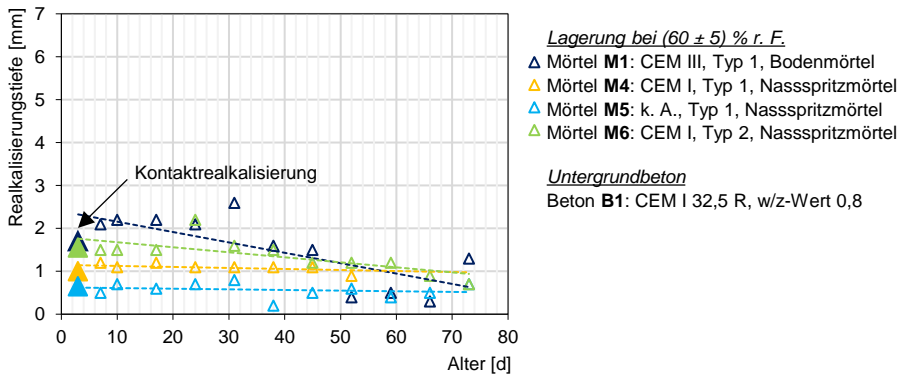


Abbildung 3-44: Mittlerer Realkalisierungsfortschritt bei Mörtel M1, M4, M5 und M6 in Abhängigkeit von den Lagerungsbedingungen, Beton B1, Lagerung bei (60 ± 5) % r. F. (Versuchsreihe 3)

Die Realkalisierung des Untergrundbetons durch die Applikation mineralischer Werkstoffe war nicht die einzige Alkalitätsveränderung, die anhand der Versuche festgestellt werden konnte. Bei Wasserlagerung fand eine Alkalitätszunahme auch im Bereich der Restalkalität des Untergrundbetons statt (vgl. Abbildung 3-45). Eine eindeutige zeitabhängige Zunahme war nicht festzustellen.

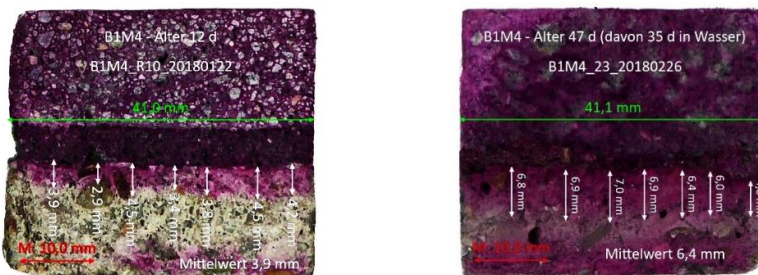


Abbildung 3-45: Realkalisierungstiefe von B1M4, links: im Alter von zwölf Tagen vor Beginn der Wasserlagerung, rechts: im Alter von 47 Tagen nach 35 Tagen Wasserlagerung

Interpretation der Ergebnisse

Der Zusammenhang zwischen hoher Luftfeuchtigkeit und zunehmenden Realkalisierungstiefen lässt sich anhand der Sorptionsisotherme erklären (vgl. Abschnitt 2.1.5 und 2.1.6). Diese verläuft bei hygroskopisch porösen Baustoffen s-förmig und nimmt erst ab Luftfeuchtigkeiten von über 95 % r. F. stark zu [Kießl - 1983]. Bei hohen Luftfeuchtigkeiten kommt es zur Entstehung eines Sorbatfilms an den Porenoberflächen des Gefüges. Da dieser proportional zur relativen Luftfeuchtigkeit ansteigt, werden mit zunehmender Luftfeuchtigkeit auch mehr Alkalien mittransportiert. Darüber hinaus nimmt die Mobilität der Wassermoleküle mit anwachsendem Sorbatfilm kontinuierlich zu [Krus, 1995].

Demzufolge ist die Kapillarleitung bei den in Leitungswasser und in 100 % r. F. gelagerten Probekörpern bis zur Wassersättigung der vorherrschende Transportmechanismus. Alkalien aus dem Mörtel werden zusammen mit der Feuchtigkeit in den Beton transportiert.

Ein Alkalientransport infolge einer Permeation kann in Leitungswasser weitgehend ausgeschlossen werden, da dieser Transportprozess ausschließlich in oberflächennahen Bereichen stattfindet und aufgrund der Dichte und Schichtstärke des Mörtels der Einfluss an der Verbundfuge zum Betonuntergrund zu vernachlässigen ist.

Bei geringen relativen Luftfeuchtigkeiten findet ausschließlich eine Dampfdiffusion im Bereich der Kapillarkondensation statt. Ein nennenswerter Alkalientransport hingegen ist nur in der flüssigen Phase zu erwarten. Bei geringen relativen Luftfeuchtigkeiten erreicht der Sorbatfilm nicht die nötige Schichtdicke für eine ausreichende Mobilität der Calcium- und Hydroxidionen. Zudem nimmt der Feuchtegradient bei sinkender relativer Luftfeuchte ab, weshalb die Geschwindigkeit des Wasserdampftransports im Allgemeinen abnimmt.

Durch die Vorlagerung der carbonatisierten Betonuntergründe bei 1 %iger CO₂-Konzentration in einem Klimaschrank und bei (50 ± 5) % relativer Luftfeuchtigkeit tritt als zusätzlicher Effekt durch das Vornässen und die Mörtelapplikation ein kapillares Saugen auf. Grundsätzlich nimmt die kapillare Saugfähigkeit des Zementsteins mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt stark ab und erreicht nahe an 100 % r. F. vernachlässigbar kleine Werte. Kapillar saugen können nur leere Poren, jedoch füllen sich feine Poren bei einer relativen Luftfeuchtigkeit ab 50 % durch Kapillarkondensation (vgl. Abschnitt 2.1.5 und 2.1.6).

In Bezug auf die Feuchtespeicherfunktion besteht ein Zusammenhang zwischen Porenraum und aufnehmbarer Wassermenge. Bei einem niedrigen w/z-Wert, bei dem der Porenraum vorwiegend aus Gelporen besteht, ist ein Großteil der Poren durch die reine Absorption gefüllt. Bei einem großen Anteil an Kapillarporen ist es nötig, den Porenraum durch Kapillarkondensation und kapillare Wasseraufnahme zu füllen. Es ist davon auszugehen, dass der Alkalientransport grundlegend nur in verbundenen Kapillarporen möglich ist, sodass eine reine Absorption in Bezug auf die Realkalisierung zu vernachlässigen ist.

3.3.5.2 Einfluss des Untergrundbetons

Der Einfluss des Untergrundbetons (w/z-Wert und Zementart) wurde in der Versuchsreihe 1 untersucht. Die Versuchsreihe 1 beinhaltete die Mörtelvariationen M1 und M6 in Kombination mit den Betonen B1, B2.1, B2.2, B2.3 und B3. Die Lagerung der Verbundproben erfolgte in Leitungswasser.

In Abbildung 3-46 und Abbildung 3-47 sind die Messergebnisse der Versuchsreihe dargestellt, in der carbonatisierte Betonuntergründe untersucht wurden. Zur Veranschaulichung der Messwerteverläufe sind auch hier Regressionskurven hinterlegt.

Bei Beton B2 wurde die Zementart variiert (B2.1: CEM I, B2.2: CEM II-A/LL und B2.3: CEM III). Bei Verwendung eines CEM III-Zements läuft die Realkalisierung deutlich langsamer ab. Bei Verwendung des M6 Mörtels ist für den Realkalisierungsverlauf keine Differenzierung zwischen einem CEM I und CEM II-A-LL möglich (vgl. Abbildung 3-46). Bei Verwendung des M4 Mörtels anstatt des M6 Mörtels zeigt sich eine deutlich schnellere Realkalisierung bei dem Beton B2 CEM I (vgl. Abbildung 3-47).

Beton B1 wies den höchsten w/z-Wert auf und verfügte über die größte Kapillarporosität. Der Beton B3 wurde mit dem niedrigsten w/z-Wert hergestellt. Demzufolge wies er die kleinste Kapillarporosität auf und es ist grundsätzlich von einem kleineren Transportraum für mögliche Realkalisierungsprozesse auszugehen. Entsprechend zeigten die Messergebnisse, dass der Beton B1 den größten Realkalisierungsfortschritt (in mm) aufweisen konnte. Mit Verringerung des w/z-Wertes des Untergrundbetons nahm auch die tiefenabhängige Realkalisierung ab. Aufgrund der geringen Carbonatisierungstiefen bei Beton B3 war eine vollständige Realkalisierung bereits nach wenigen Wochen erreicht (2 mm bis 3 mm).

Zur Verdeutlichung der Abhängigkeiten werden für den Mörtel M4 (CEM I) die ersten Messpunkte der Realkalisierung (Kontaktreakalisierung) zusammen mit dem Kapillarporenvolumen und der kapillaren Wasseraufnahme der Betone dargestellt (vgl. Abbildung 3-48).

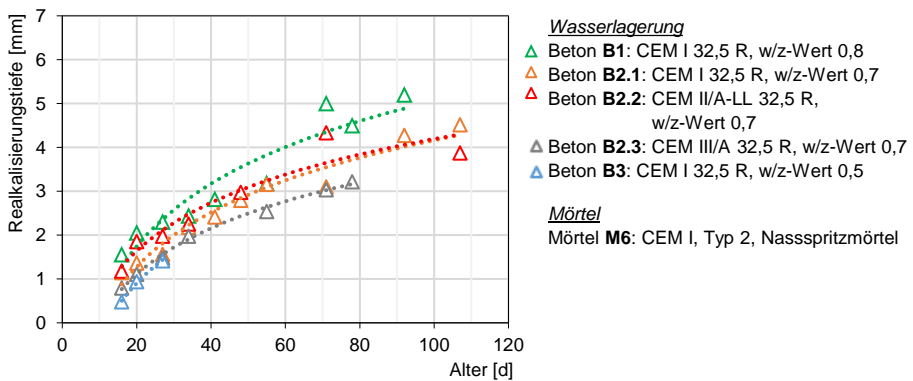


Abbildung 3-46: Mittlerer Realkalisierungsfortschritt in Abhängigkeit vom Betonuntergrund, Mörtel M6 (Versuchsreihe 1)

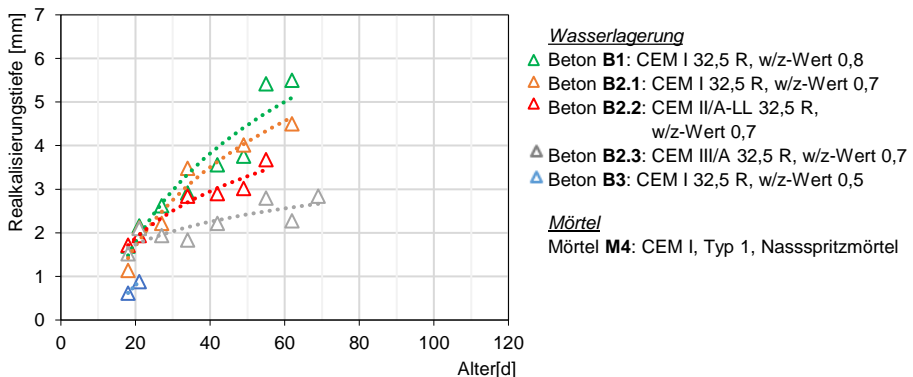


Abbildung 3-47: Mittlerer Realkalisierungsfortschritt in Abhängigkeit vom Betonuntergrund, Mörtel M4 (Versuchsreihe 1)

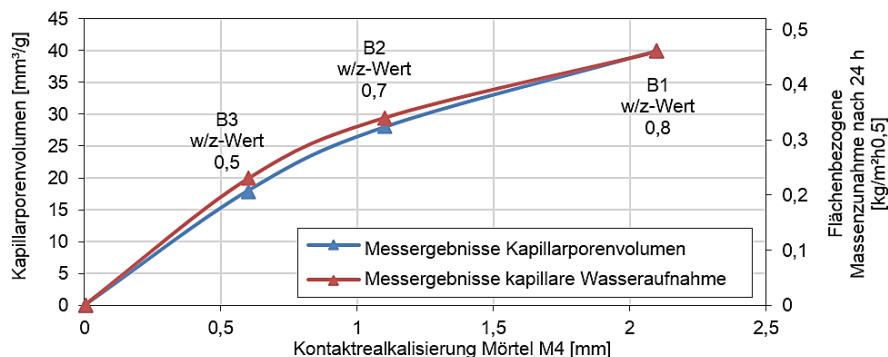


Abbildung 3-48: Abhängigkeit der Kontaktreakalisierung vom Kapillarporenvolumen und der flächenbezogenen Massenzunahme, Mörtel M4

Interpretation der Ergebnisse

Der w/z-Wert des Betons ist entscheidend für den Anteil an Kapillarporen und somit für die Größe des zur Verfügung stehenden Transportraums. Demzufolge weist ein Beton mit niedriger Kapillarporosität grundsätzlich einen kleineren Transportraum für mögliche Realkalisierungsprozesse auf.

Die Zementart übt ebenfalls einen Einfluss auf das Realkalisierungspotenzial aus. Ein CEM III-Zement zeigte bei gleichem w/z-Wert deutlich geringere Realkalisierungstiefen als ein CEM I-Zement. Ein CEM I-Zement führt zu einem höheren zeitabhängigen Realkalisierungsfortschritt als ein CEM II/A-LL-Zement.

Vergleichend mit einem Chloridtransport (vgl. Abschnitt 2.3.5) kommt es zu Adsorptionsvorgängen von Anionen und Kationen an der Feststoffoberfläche und zur Bindung der Alkalien in die Zementsteinmatrix. Infolgedessen kann der Ionentransport abgebremst bzw. die Diffusionsrate reduziert werden. Die Diffusion der Ionen wird in Abhängigkeit von der Menge und Reaktivität des Kieselsäuregels durch chemische Reaktion gebremst. Mit steigendem Silikatgelgehalt können verstärkt Alkalien in der carbonatisierten Matrix gebunden werden (vgl. Abschnitt 2.3.2). Für die Erhöhung des pH-Wertes der Porenlösung stehen diese dann nicht mehr zur Verfügung.

3.3.5.3 Einfluss des Instandsetzungsmörtels

Der Einfluss des Instandsetzungsmörtels bei carbonatisierten Betonuntergründen (Beton B1) wird in Abbildung 3-49 bis Abbildung 3-51 anhand von drei Versuchsreihen dargestellt. Die Lagerung fand bei allen Versuchsreihen in Leitungswasser statt.

Der Realkalisierungsfortschritt in Abhängigkeit von der Zeit ist bei Mörtel M5 vergleichsweise gering (vgl. Abbildung 3-49). Bei den Mörteln M1, M4 und M6 ist in den ersten 50 Tagen ein vergleichbarer Verlauf der Messergebnisse zu beobachten. Eine Unterscheidung der Mörtel M1, M4 und M6 in Bezug auf ihr Realkalisierungspotenzial kann nicht abgeleitet werden.

In Versuchsreihe 2 zeigt der Mörtel M4 eine zum Zeitpunkt der Einlagerung in Leitungswasser tiefere Realkalisierungsfront (vgl. Abbildung 3-50).

Verarbeitungsbedingte Einflüsse wie bspw. Unterschiede in der Verdichtung könnten hierbei eine Rolle gespielt haben. Der zeitabhängige Messwerteverlauf ist bei den untersuchten drei Mörteln (M1, M4, M6) vergleichbar. Die Unterschiede der Messreihen und damit auch der Ergebnisse resultieren aus der Dauer der Nachbehandlung und dem Zeitpunkt der Einlagerung (Unterschied in der Kontaktreakalisierung).

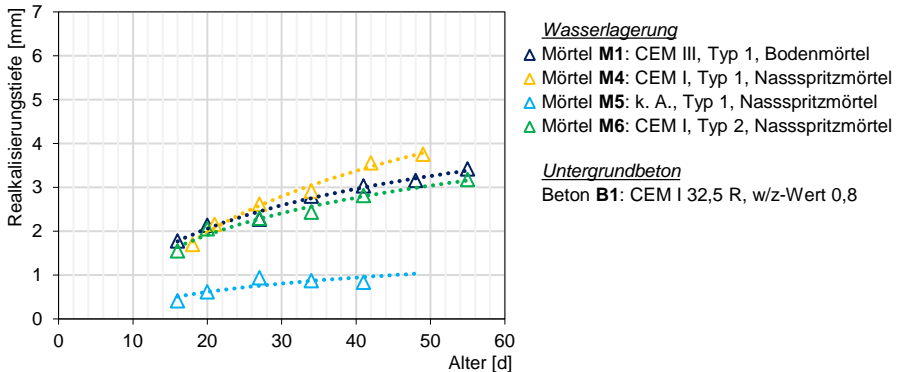


Abbildung 3-49: Mittlerer Realkalisierungsfortschritt in Abhängigkeit von den untersuchten Instandsetzungsmörteln M1, M4, M5 und M6, Beton B1 (Versuchsreihe 1)

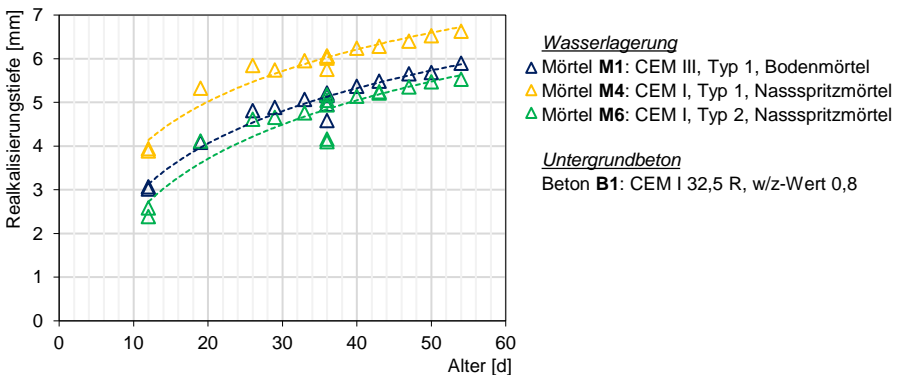


Abbildung 3-50: Mittlerer Realkalisierungsfortschritt in Abhängigkeit von den untersuchten Instandsetzungsmörteln M1, M4 und M6, Beton B1 (Versuchsreihe 2)

Der Einfluss des Mörteltyps auf die Realkalisierung ist in Abbildung 3-51 dargestellt. Der Mörtel M10 (Typ 4) mit kunststoffhaltigen Zusätzen zwischen 10 M.-%/z und 25 M.-%/z stellt die geringste Kontaktreakalisierung und den geringsten Realkalisierungsfortschritt dar. Bei Mörtel M9 (Typ 3) mit kunststoffhaltigen Zusätzen bis max. 10 M.-%/z ist im Gegensatz zu Mörtel M10 eine höhere Anfangsreakalisierung festzustellen, die jedoch geringer ausfällt als bei den Mörteln M4 und M6.

Der weitere Funktionsverlauf des Mörtels M9 über den ersten Messwert hinaus ist vergleichbar mit denen der Mörtel M4 und M6. Die Typen 1 und 2 unterscheiden sich gemäß DVGW-Arbeitsblatt W 300-5 in Bezug auf kunststoffhaltige Zusätze. Bei Typ 1

sind keine Betonzusatzmittel oder kunststoffhaltige Zusätze erlaubt und bei Typ 2 dürfen maximal 5 M.-%/z Betonzusatzmittel ohne kunststoffhaltige Zusätze verwendet werden. Aus den Messergebnissen geht hervor, dass der Verlauf der Realkalisierung eines Typ 1 und Typ 2 Mörtels gleich ist.

In Abbildung 3-52 ist der Einfluss des Instandsetzungsmörtels auf die Realkalisierung bei den Betonen B2 und B3 dargestellt. Anhand der Messwerte zeigt sich, dass bei höherer Betonqualität der Einfluss des Instandsetzungsmörtels abnimmt und eine eindeutige Unterscheidung der Anfangsrealkalisierung und des weiteren Realkalisierungsverlaufs nicht mehr möglich ist.

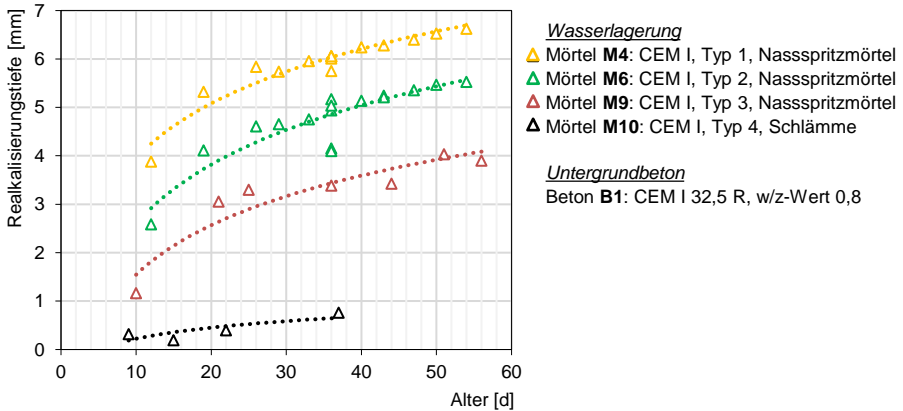


Abbildung 3-51: Mittlere Realkalisierungstiefe in Abhängigkeit vom Mörteltyp, Wasserlagerung, Beton B1 (Versuchsreihe 2 und 6)

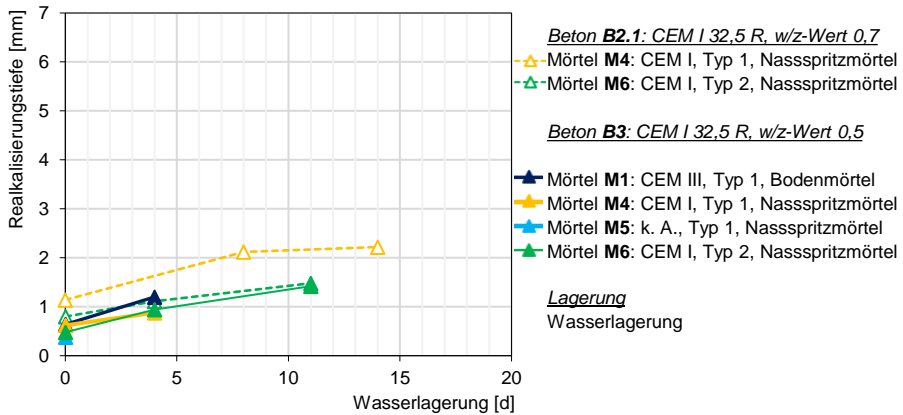


Abbildung 3-52: Mittlere Realkalisierungstiefe in Abhängigkeit vom Mörteltyp, Wasserlagerung, Beton B2 und B3, Versuchsreihe 1

Interpretation der Ergebnisse

Im Allgemeinen behält die Porenlösung im Zementstein ihren Sättigungswert von etwa 20 mmol/L bei, solange ein C/S-Verhältnis von > 1,5 besteht und damit freies Portlandit

vorhanden ist. Eine Verringerung der Alkalität unterhalb des Phenolphthalein-Umschlagpunktes ist unter Abwesenheit von Calciumcarbonat erst unterhalb eines C/S-Verhältnisses von ~ 1 zu erwarten. Wenn das C/S-Verhältnis ausreichend hoch ist, dann scheint die Zementart keinen Einfluss auszuüben. Aus diesem Grund findet ein vergleichbarer Realkalisierungsfortschritt unabhängig von der Zementart des Instandsetzungsmörtels statt. Spezialzemente (beispielsweise Mörtel M5, Calcium-Aluminat-Zement), die einen geringen Anteil an Calciumhydroxid aufweisen, zeigen dagegen einen vergleichsweise geringen Realkalisierungsfortschritt auch bei für die Realkalisierung optimalen Feuchtebedingungen.

Die Alkalienabgabeversuche aus Abschnitt 3.2 zeigten, dass der Mörtel M1 mit einem CEM III Zement in den ersten Tagen eine vergleichbare Alkalienabgabe wie ein CEM I Zement aufwies, was auf einen vergleichbaren Sättigungswert der Porenlösung schließen lässt. Danach flacht der Messwerteverlauf ab, da eine Verringerung der Alkalität stattfindet und ein geringerer Alkalienpuffer vorliegt. In Bezug auf das Realkalisierungsdepot zeigt der CEM III Mörtel eine ausreichende Anfangsrealkalisierung. Inwieweit der langfristig geringere Alkalitätspuffer eines CEM III Mörtels sich ggf. negativ auf die Realkalisierung auswirkt, ist aus den Versuchen nicht zu ermitteln. Hierfür sind längere Versuchszeiträume ggf. über Jahre notwendig.

Die Menge an kunststoffhaltigen Zusätzen (Unterscheidung der Typen 1 bis 4) übt einen Einfluss auf das Realkalisierungspotenzial aus. Zwischen Typ 1 und Typ 2 (CEM I) ist kein signifikanter Unterschied festzustellen. Bei einem Typ 3 Mörtel (CEM I) übt der Kunststoffgehalt (bis zu 10 M.-%/z) einen negativen Einfluss auf die Kontaktrealkalisierung und diffusionsgesteuerte Realkalisierung aus. Bei einer mineralischen Dichtungsschlämme (Typ 4, kunststoffhaltigen Zusätzen zwischen 10 M.-%/z und 25 M.-%/z) findet erwartungsgemäß keine ausreichende Realkalisierung in die Tiefe statt. Wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben, führt die Verwendung von Polymeren zur teilweisen Füllung bzw. Abdichtung des Porensystems, sodass ein höheres Wasserrückhaltevermögen und der Transport der Alkalien in den Altbeton zurückgehalten werden.

3.3.5.4 Einfluss der Vorschädigung des Untergrundbetons

Die Auslaugung in demineralisiertem Wasser innerhalb eines Jahres bewirkte eine Auslaugungstiefe von rund 1 mm bis 2 mm je nach Untergrundbeton. Zum ersten Prüfzeitpunkt (vier Tage nach Herstellung der Verbundkörper) wurde unabhängig von der applizierten Mörtelart der ausgelaugte Bereich vollständig realkalisiert. Wie in Abbildung 3-53 dargestellt, war ein vollflächiger Phenolphthaleinumschlag über die gesamte Probentiefe zu erkennen. Eine zeit- und tiefenabhängige Betrachtung des Realkalisierungsprozesses bei ausgelaugten Betonuntergründen konnte somit nicht erfolgen.

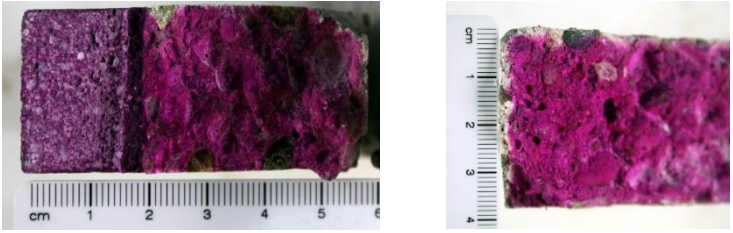


Abbildung 3-53: Links: Realkalisierung des Verbundkörpers M4B1DW (Mörtel M4, Beton B1, Vorlagerung in demineralisiertem Wasser) nach vier Tagen, rechts: Auslaugungstiefe von im Mittel 1 mm bis 2 mm nach ca. einem Jahr

Bei Mörtel M4 in Kombination mit dem ausgelagten Betonuntergrund B1 zeigte der zuvor alkalische Kernbeton zwischen 29 Tagen und 36 Tagen Wasserlagerung keinen eindeutigen Farbumschlag (vgl. Abbildung 3-54, a). Dagegen war im Übergangsbereich zwischen Mörtel und Beton eine intensive Violettfärbung zu erkennen, die in Abhängigkeit von der Zeit tiefenabhängig zunahm (a und b). Dieser Effekt war nach 49 Tagen Wasserlagerung nicht mehr messtechnisch erfassbar. Nach 114 Tagen Wasserlagerung war eine gleichmäßige Färbung ersichtlich (c). Eine eindeutige Zuordnung der tatsächlichen Alkalität im Kernbereich ist auf Basis der Phenolphthaleinprüfung nicht möglich, jedoch ist unter Berücksichtigung der Farbintensität des Randbereichs ein zeitabhängiger Alkalientransport in die Tiefe anzunehmen.

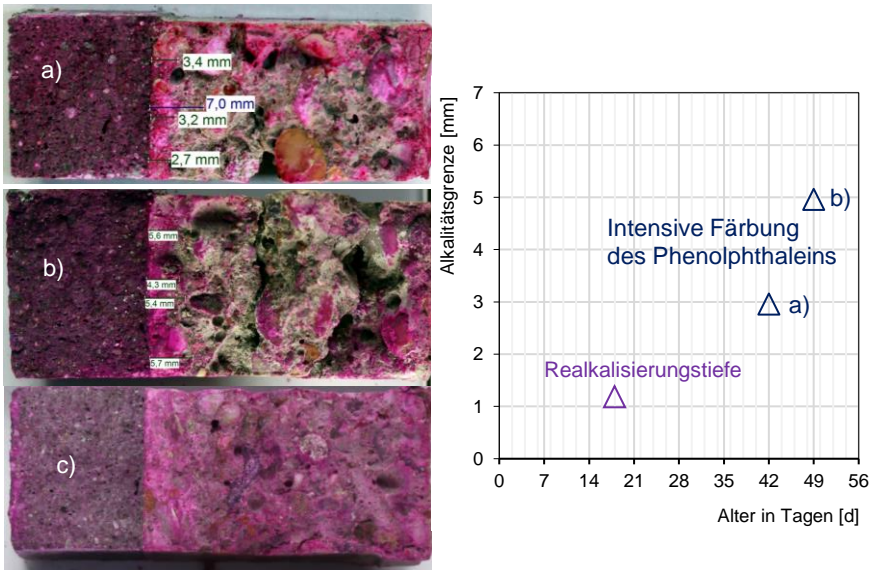


Abbildung 3-54: Links: Farbnuancen des Indikators, a) im Alter von 42 Tagen (29 Tage Wasserlagerung), b) im Alter von 49 Tagen (36 Tage Wasserlagerung), c) im Alter von 127 Tagen (114 Tage Wasserlagerung), rechts: Mittelwerte der Messergebnisse

Interpretation der Ergebnisse

Ein Alkalitätsabfall kann durch eine Auslaugung oder Carbonatisierung der Betonrandzone entstehen. Infolge einer Auslaugung der Betonrandzone findet eine Porositätszunahme statt, in deren Folge auch der Transportraum erweitert wird. Eine Carbonatisierung dagegen verursacht i. d. R. durch Bildung von Calciumcarbonat eine Abnahme der Porosität. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass ein zuvor ausgelaugter Untergrund im Hinblick auf den Transportraum ein höheres Realkalisierungspotenzial aufweist.

Die Untersuchungen zeigten, dass bei ausgelaugten Betonuntergründen eine Realkalisierung grundsätzlich möglich ist, da jedoch eine Auslaugungstiefe von nur ca. 2 mm erreicht wurde, war der Untergrund bereits zum ersten Prüfzeitpunkt (vier Tage nach Herstellung) infolge der Kontaktrealkalisierung vollständig realkalisiert. Eine tiefgehende Auslaugung war innerhalb des angesetzten Versuchszeitraums nicht realisierbar.

3.3.5.5 Verarbeitungsbedingte Einflussgrößen

Hohlstellen oder Fehlstellen, die bei der Applikation auftreten können, verhindern eine Realkalisierung (vgl. Abbildung 3-55, links). Eine nicht ausreichende Untergrundvorbereitung, die erst nach dem Brechen des Probekörpers aufgefallen ist, vermindert nicht nur den Haftverbund zwischen Mörtel und Beton, sondern beeinträchtigt auch das Realkalisierungspotenzial. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass eine Realkalisierung nur bei direktem Kontakt mit dem alkalischen Instandsetzungsmörtel möglich war.

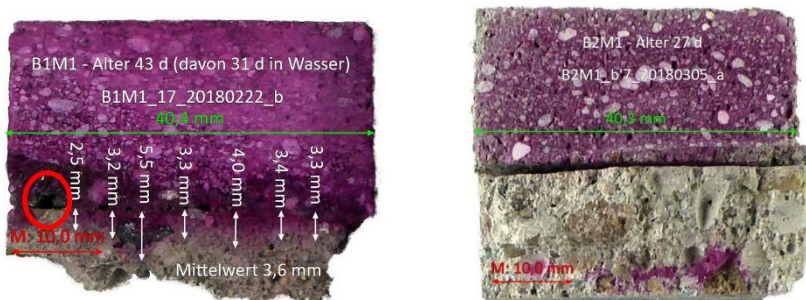


Abbildung 3-55: Links: Fehlstelle zwischen Instandsetzungsmörtel und Betonuntergrund, rechts: Trennfuge zwischen Instandsetzungsmörtel und Betonuntergrund

Als weiterer Einflussfaktor wurde das Porengefüge des Instandsetzungsmörtels miteinbezogen. Der Alkalientransport findet insbesondere in den miteinander verbundenen Kapillarporen statt. Der Mörtel M5 mit einer Gesamtporosität von 3,7 Vol.-% (Referenzwert Charakterisierung der Unterseite, vgl. Abschnitt 3.3.3) und einem Kapillarporenvolumen von 4,9 mm³/g wies den kleinsten Realkalisierungsfortschritt auf. Die Mörtel M1 (6,9 Vol.-%, 17,2 mm³/g), M4 (6,3 Vol.-%, 15,1 mm³/g) und Mörtel M6 (6,5 Vol.-%, 16,1 mm³/g) wiesen ein vergleichbares Kapillarporenvolumen und eine ähnliche Gesamtporosität auf. Eine Unterscheidungsmöglichkeit beim Realkalisierungsvermögen zwischen den drei Mörteln bestand nicht. Inwieweit der Mörtel M5 aufgrund seiner geringen Porosität

oder aufgrund des Bindemittels ein geringeres Realkalisierungspotenzial aufweist, kann nicht abschließend geklärt werden.

Die Versuchsreihe 2 und 3 ergaben zum Teil unterschiedliche Ergebnisse im Realkalisierungsvermögen der Mörtel. Bei genauer Betrachtung der Gefügestruktur des Mörtels M1 zeigte sich, dass dieser in der 1. und 2. Versuchsreihe augenscheinlich besser verarbeitet wurde und dementsprechend dichter erscheint. In der Versuchsreihe 3 fand eine schlechtere Verdichtung statt (vgl. Abbildung 3-56). Visuell feststellbare Transporträume lagen augenscheinlich zusätzlich vor, die sich positiv auf die Realkalisierung auswirkten.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass ein größerer Porenraum auch einen größeren Raum für Lösungsprozesse von Alkalien darstellt. Der Mörtel wird zudem durchlässiger, sodass Wasser und gelöste Alkalien schneller durch den Porenraum transportiert werden können.

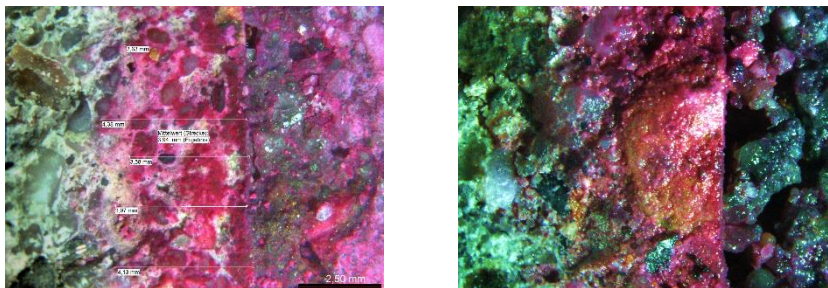


Abbildung 3-56: Gefügestruktur des Mörtels M1 in Kombination mit Beton B1, links: 2. Versuchsreihe, rechts: 3. Versuchsreihe

In Versuchsreihe 1 wurde der Mörtel M6 auf die Verbundkörper gespritzt und in Versuchsreihe 2 bis 4 händisch verarbeitet. Ein Einfluss der Applikationsart konnte nicht abgeleitet werden.

3.3.5.6 Kontakt- und diffusionsgesteuerte Realkalisierung

Anhand der zuvor beschriebenen Versuchsreihen und Einflussfaktoren zeigte sich, dass eine Differenzierung der Realkalisierungsphasen bestehen muss. Dazu werden die Begrifflichkeiten der Kontaktreakalisierung (Anfangsreakalisierung) und diffusionsgesteuerten Realkalisierung (fortschreitende Realkalisierung) eingeführt. Im Folgenden wird näher auf die Eigenschaften und die zeitliche Abgrenzung der beiden Realkalisierungsphasen eingegangen.

Der Ablauf der Kontakt- bzw. der diffusionsgesteuerten Realkalisierung soll an Versuchsreihe 5 näher erläutert werden. Dazu wurde der Verbundkörper bestehend aus Beton B1 und Mörtel M4 nach 10 min, 1 h, 2 h, 6 h, 24 h, 2 d, 3 d und nach 28 d gebrochen und mit den Indikatoren Phenolphthalein und Thymolphthalein geprüft.

In Abbildung 3-57 ist die mittlere Realkalisierungstiefe inklusive Fehlerindikatoren der Minimal- und Maximalwerte bis zu 24 Stunden dargestellt. Während der Erstarrungsphase ist ein linearer Anstieg der tiefenabhängigen Realkalisierung mit dem Indikator Phenolphthalein und Thymolphthalein festzustellen. Nach Abschluss der

Erstarrungsphase liegt zunächst kein weiterer Realkalisierungsfortschritt vor, da der Verbundkörper zwar vor Austrocknung geschützt wurde, jedoch keine feuchtezuführende Nachbehandlung in dieser Zeit erfolgte. Die mit dem Indikator Thymolphthalein ermittelte Tiefe ist bei allen Messpunkten geringer als die mit Phenolphthalein (vgl. Abbildung 3-59). Der zunächst steile Anstieg und die anschließende Abschwächung des Verlaufs ist bei beiden Indikatoren während der Kontaktreakalisierung vergleichbar.

Nach einem Tag (24 h) erfolgte das Ausschalen des Verbundkörpers und nach Erfassung des 24 h-Messwertes wurden die Proben in feuchten Tüchern bis zu einem Alter von 28 Tagen nachbehandelt, sodass eine weitere Austrocknung verhindert wurde und gleichzeitig eine minimale Feuchtezufuhr in das Porengefüge erfolgte (vgl. Abbildung 3-58). Aus diesem Grund ist ein vergleichsweise hoher Anstieg nach 48 h festzustellen. Aufgrund der Unterbindung des Austrocknens ist im weiteren Verlauf ein Anstieg der Realkalisierung mittels Phenolphthalein zu verzeichnen. Die Feuchte- und Alkaliernzufuhr ist jedoch nicht in dem Maße gegeben, wie während der Erstarrungsphase des Mörtels, sodass der Anstieg wesentlich geringer ausfällt als zuvor. Zur Veranschaulichung des Realkalisierungsfortschrittes sind Regressionsverläufe hinterlegt.

Ein Fortschreiten des Alkalieneintrags in die Tiefe oberhalb des Thymolphthaleinumschlagpunktes ist ausschließlich bis zum zweiten Tag messtechnisch zu erfassen. Danach ist anhand der Messwerte ein Rückgang des Realkalisierungsfortschritts zu verzeichnen. Nach 28 Tagen ist ausschließlich in der Kontaktfuge ein Farbumschlag mikroskopisch festzustellen (vgl. Abbildung 3-60). Die damit verbundene Frage nach der Beständigkeit der Realkalisierung wird in Abschnitt 3.3.5.8 erläutert.

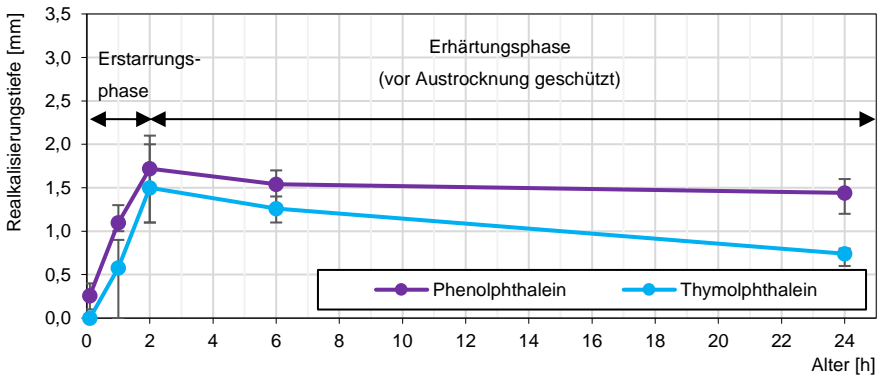


Abbildung 3-57: Kontaktreakalisierung in den ersten 24 h nach Applikation, Verbundkörper M4B1 (Mörtel M4 CEM I, Typ 1, Beton B1, CEM I, w/z-Wert 0,8)

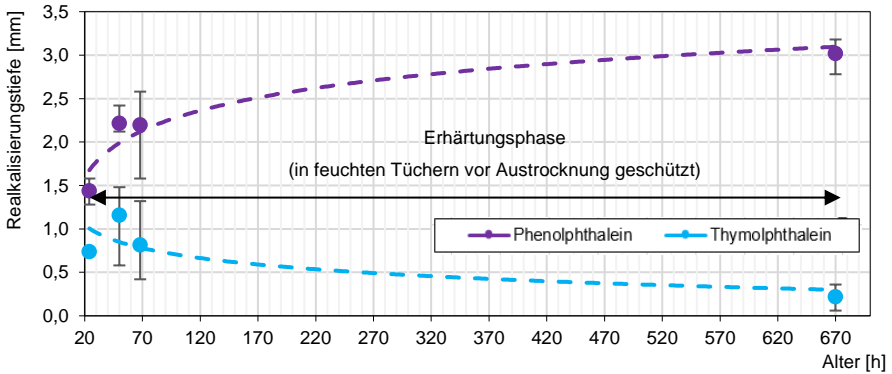


Abbildung 3-58: Realkalisierung zwischen 24 h und 670 h (28 Tage), Verbundkörper M4B1 (Mörtel M4 CEM I, Typ 1, Beton B1, CEM I, w/z-Wert 0,8)

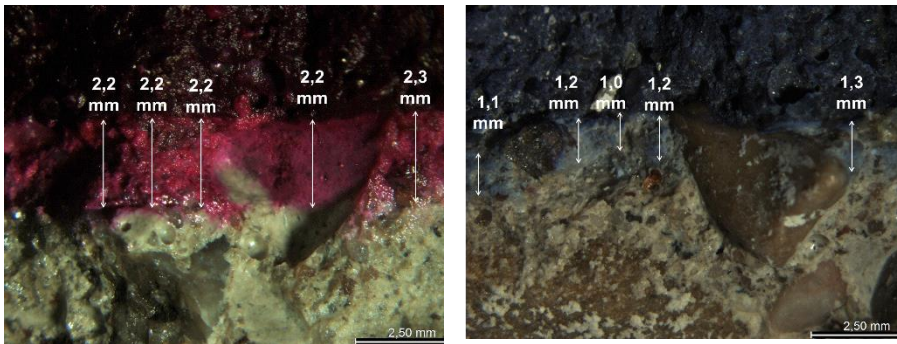


Abbildung 3-59: Realkalisierungstiefe nach 24 h, links: Phenolphthalein, rechts: Thymolphthalein, Verbundkörper M4B1 (Mörtel M4; CEM I, Typ 1, Beton B1: CEM I, w/z-Wert 0,8)

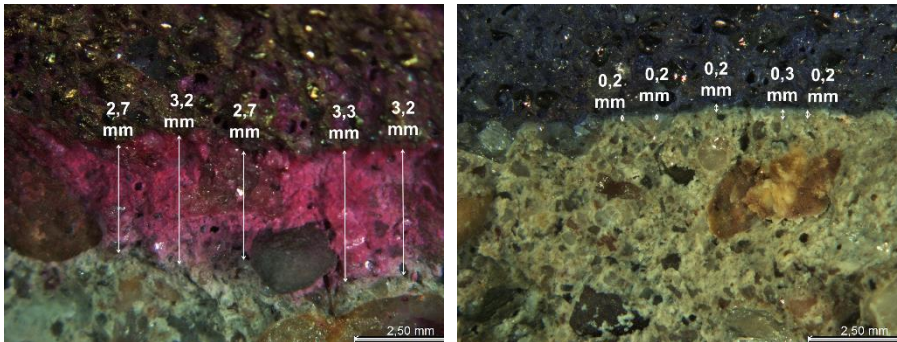


Abbildung 3-60: Realkalisierungstiefe nach 28 d, links: Phenolphthalein, rechts: Thymolphthalein, Verbundkörper M4B1 (Mörtel M4: CEM I, Typ 1, Beton B1: CEM I, w/z-Wert 0,8)

Bei einer Unterbrechung oder nach Abschluss der Nachbehandlung stellt sich sowohl im Mörtel als auch im Altbeton eine Ausgleichsfeuchte in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte ein. Die weiterführende diffusionsgesteuerte Realkalisierung ist in hohem Maße vom Feuchteangebot der Umgebung abhängig. Ein zu geringes

Feuchteangebot führt dazu, dass eine Realkalisierung über die Kontaktrealkalisierung hinaus nicht ermöglicht werden kann.

Zusammengefasst umfasst die Kontaktrealkalisierung einen Zeitraum von ca. 24 Stunden, wobei die realkalisierte Betonrandzone einen pH-Wert ≥ 10 (Umschlagpunkt Thymolphthalein) erreicht. Im Anschluss ist von einer diffusionsgesteuerten Realkalisierung auszugehen, die von der Umgebungsfeuchte abhängig ist. Der Zeitraum der möglichen Realkalisierung ist variabel, solange ein ausreichendes Feuchteangebot zur Verfügung steht. Der pH-Wert der Porenlösung erreicht in diesem Zeitraum nicht den Umschlagpunkt von Thymolphthalein, sodass ein pH-Wert oberhalb des Phenolphthaleinumschlagpunktes anzunehmen ist (pH-Wert $> 8,4$).

3.3.5.7 Überprüfung der Alkalität

Zur Erfassung der Alkalität bzw. des pH-Wertes des realkalisierten Bereiches wurden an ausgewählten Verbundkörpern Prüfungen mit unterschiedlichen Indikatoren durchgeführt. Folgende Einflussgrößen werden unterschieden: Wasserlagerung bei vorheriger Carbonatisierung der Substrate B1, B2 und B3, 60 % relative Luftfeuchte bei vorheriger Carbonatisierung.

70 Tage Wasserlagerung bei vorheriger Carbonatisierung

Die in Abbildung 3-61 dargestellte Probe M4B2.2 wies vor Beginn der Realkalisierungsversuche eine mittlere Carbonatisierungstiefe von ca. 15 mm auf. Nach 70 Tagen Wasserlagerung kann mittels Phenolphthalein eine vollständige Realkalisierung des zuvor carbonatisierten Bereichs festgestellt werden. Die Prüfung mit Thymolphthalein zeigte, dass der pH-Wert der „realkalisierten“ Front kleiner ist als der Umschlagpunkt des Indikators (pH-Wert 10). Ausschließlich der direkte Kontaktbereich umfasste einen messtechnisch nicht erfassbaren Umschlagbereich. Erst in einer Tiefe von ca. 15 mm war ein Farbumschlag des Indikators zu beobachten, welcher die Restalkalität des Betons wiedergibt. Der Indikator Kresolpurpur war im realkalisierten Bereich vollständig umgeschlagen und Bromthymolblau zeigte einen hellblauen Farbumschlag, was auf einen pH-Wert nahe des Umschlagpunktes von Phenolphthalein und Bromthymolblau (\sim pH-Wert 8) schließen lässt.

Die Versuche mit dem Verbundkörper M4B2.1 zeigten vergleichbare Ergebnisse.

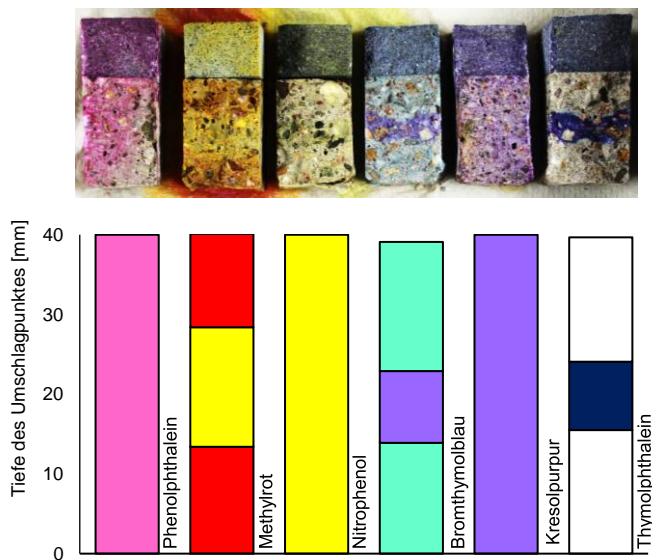


Abbildung 3-61: Prüfung der Alkalität mit unterschiedlichen Indikatoren bei dem Verbundkörper M4B2.2 (Mörtel M4: CEM I, Typ 1, Beton B2: CEM II A-LL, w/z-Wert 0,7) Wasserlagerung, Alter 70 Tage

114 Tage Wasserlagerung bei vorheriger Carbonatisierung

Die in Abbildung 3-62 dargestellte Probe M4B2.3 wies vor Beginn der Realkalisierungsversuche eine vollständige Carbonatisierung über den gesamten Querschnitt (ermittelt mit Phenolphthaleinprüfung) auf. Nach 114 Tagen Wasserlagerung lag eine Realkalisierungstiefe von 3 mm (Mittelwert) vor. Ein purpurner Farbumschlag mit Kresolpurpur war bei ca. 6 mm (Mittelwert) und ein hellblauer Farbumschlag mit Bromthymolblau bei ca. 7 mm (Mittelwert) festzustellen. Daraus lässt sich ableiten, dass der Alkalientransport auch in größeren Tiefen stattfindet und zu einer pH-Wert-Erhöhung unterhalb des Phenolphthaleinumschlagpunktes führt. Unterhalb der Umschlaggrenzen der Indikatoren Bromthymolblau und Kresolpurpur war ein blasses grün/gelb und ein blasses purpur/gelb zu erkennen, was auf einen pH-Wert im Bereich des Umschlagpunktes schließen lässt (pH-Wert 6 bis 7). Eine Realkalisierung über einen pH-Wert von 10 war ausschließlich im direkten Kontaktbereich zwischen Mörtel und Beton analog zu den zuvor beschriebenen Proben ersichtlich.

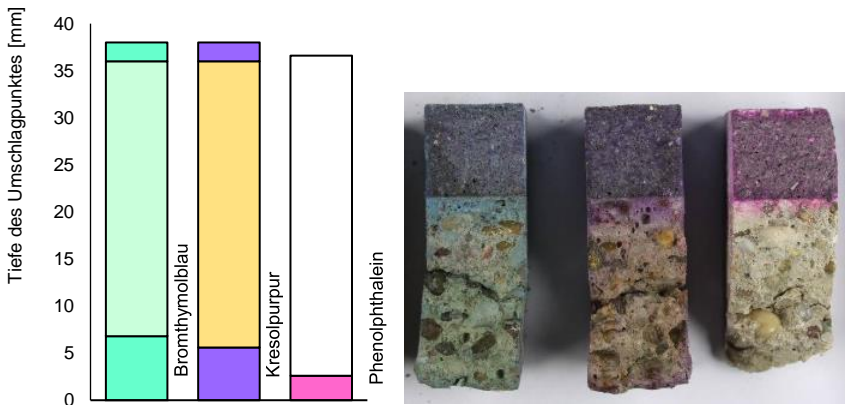


Abbildung 3-62: Prüfung der Alkalität mit unterschiedlichen Indikatoren bei dem Verbundkörper M4B2.3 (Mörtel M4: CEM I, Typ 1, Beton: B2 CEM III, w/z-Wert 0,7) Wasserlagerung, Alter 114 Tage

114 Tage Lagerung bei 60 % relativer Luftfeuchte bei vorheriger Carbonatisierung

Auch die in Abbildung 3-63 dargestellte Probe M4B1 war vor Beginn der Realkalisierungsversuche vollständig carbonatisiert. Nach 114 Tagen Lagerung unter 60 % relativer Luftfeuchte lag die mit Phenolphthalein bestimmte Realkalisierungstiefe bei < 1 mm. Der Indikator Kresolpurpur zeigte einen hellvioletten Bereich bis zu 3 mm und Bromthymolblau einen hellblauen Bereich bis zu 5 mm. Bei den Indikatoren Bromthymolblau und Kresolpurpur war im Kernbereich der Proben eine gelbe Farbgebung festzustellen. Dieser Farbumschlag lässt auf einen pH-Wert < 6 schließen. Der tiefenabhängige Farbverlauf von Bromthymolblau lässt erkennen, dass ein geringer Alkalientransport in die Tiefe möglich war. Eine Erhöhung des pH-Wert über 7 fand erst in der Kontaktzone zwischen Mörtel und Beton statt.

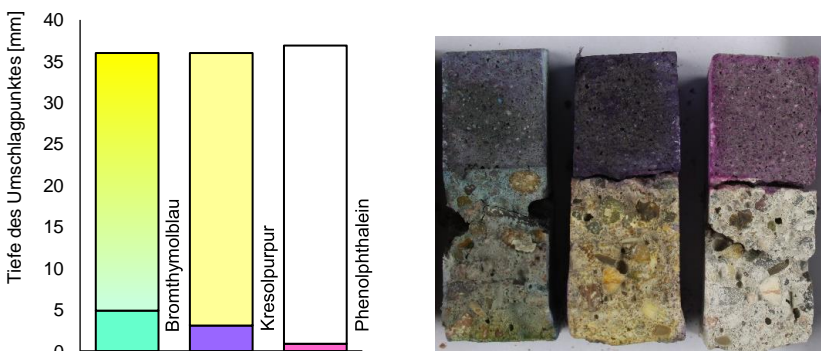


Abbildung 3-63: Prüfung der Alkalität mit unterschiedlichen Indikatoren bei dem Verbundkörper B1M4 (Mörtel M4, CEM I, Typ 1, Beton B1 CEM I, w/z-Wert 0,8), Lagerung 60 % r. F., Alter 114 Tage

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass die Porenlösung im realkalisierten Bereich ausschließlich im direkten Kontaktbereich zwischen Mörtel und Altbeton einen pH-Wert > 10 aufweist, unabhängig von der Lagerungsart und der Untergrundzusammensetzung. Die mittels Phenolphthalein ermittelte Realkalisierungsfront muss im unteren Bereich des Umschlagpunktes des Indikators liegen (pH-Wert ~ 8), da Bromthymolblau und Kresolpurpur keinen intensiven Farbumschlag zeigen. Bei vollständiger Wassersättigung erfolgt über den gesamten Probenquerschnitt ein Alkalientransport, der den Phenolphthaleinumschlagpunkt nicht erreicht (pH-Wert ~ 7).

Bei geringer relativer Luftfeuchte (60 % r. F.) ist ausschließlich im direkten Kontaktbereich eine Erhöhung der Alkalität nahe des Phenolphthaleinumschlagpunktes (pH-Wert ~ 8) zu erreichen. In tieferen Lagen findet zwar ein Alkalientransport statt, welcher jedoch nur einen Umschlag von Bromthymolblau und Kresolpurpur bewirkt (pH-Wert ~ 7). Die weiterhin carbonatisierte Betonzone weist einen pH-Wert < 6 auf.

3.3.5.8 Beständigkeit des realkalisierten Bereichs

Anhand der fünften Versuchsreihe wurde die Beständigkeit der Realkalisierung bei Reduzierung des Feuchteangebots überprüft. Dazu wurden zunächst Verbundkörper aus den Betonen B1 und B2.1 (carbonatisiert) und den Mörteln M1, M4 und M6 für 35 Tage in Leitungswasser und unter 100 % r. F. gelagert. Danach erfolgte die Lagerung unter reduzierten Feuchtebedingungen bei (60 ± 5) r. F. für 112 Tage.

Wie in Abbildung 3-64 und Abbildung 3-65 dargestellt, lag zu Beginn der Beständigkeitsprüfung eine Realkalisierungstiefe bei Beton B1 von ca. 5,5 mm (Wasserlagerung), bei Beton B2 von ca. 3,5 mm (Wasserlagerung) und bei 100 % r. F. zwischen 2,0 mm und 3,5 mm nach 35 Tagen vor. Der weitere Verlauf der Ergebnisse zeigte einen stetigen Rückgang der zuvor mittels Phenolphthaleinprüfung ermittelten Realkalisierungstiefe. Nach 112 Tagen war visuell mittels Phenolphthaleinprüfung keine Realkalisierung mehr im Altbeton nachzuweisen. Unter dem Auflichtmikroskop war ausschließlich im direkten Kontaktbereich zwischen Mörtel und Beton ein alkalischer Bereich von maximal 0,2 mm (Mittelwert) ersichtlich. Eine Abhängigkeit von der Mörtelzusammensetzung hinsichtlich des Rückgangs der Realkalisierung konnte anhand der Messergebnisse nicht festgestellt werden. Ebenso bestand keine erkennbare Abhängigkeit zwischen den zwei verschiedenen Betonzusammensetzungen. Unabhängig vom w/z-Wert des Untergrundbetons fand ein Rückgang der Realkalisierungstiefe mit vergleichbaren Messwerten (Mittelwerten) statt.

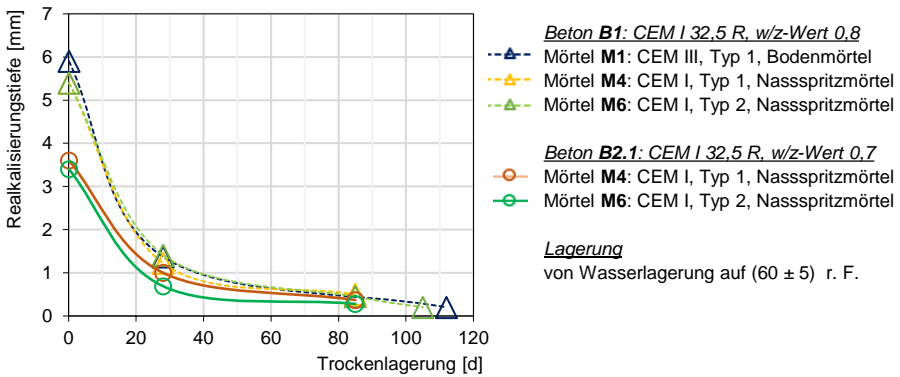


Abbildung 3-64: Mittlere Realkalisierungstiefe bei Reduzierung des Feuchteangebots, Rückgang der Realkalisierung nach 35 Tagen Lagerung in Leitungswasser und anschließend (60 ± 5) r. F.

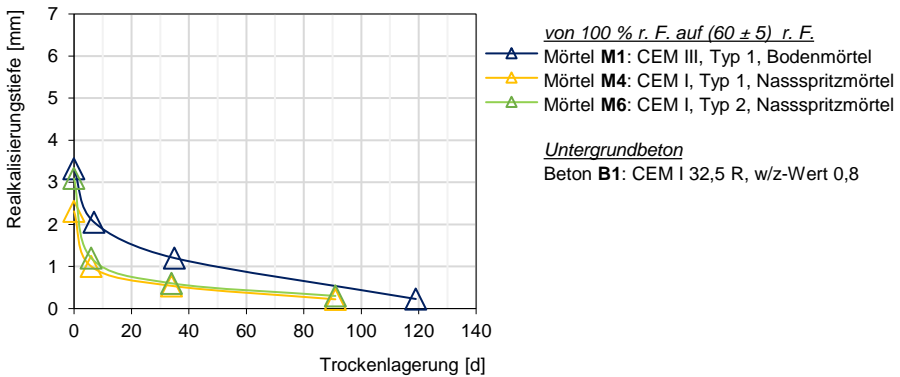


Abbildung 3-65: Mittlere Realkalisierungstiefe bei Reduzierung des Feuchteangebots, Rückgang der Realkalisierung nach 35 Tagen Lagerung unter 100 % r. F. und anschließend (60 ± 5) r. F.

3.3.6 Diskussion der Ergebnisse

Für das Arbeitspaket 2 wurden vier verschiedene Zielsetzungen formuliert. Als erste Zielsetzung (Zielsetzung 3) sollten der zeitabhängige Verlauf der Realkalisierung und die damit einhergehenden Eigenschaftsveränderungen erfasst und beschrieben werden. Die Einflussfaktoren einer Realkalisierung sollten im Rahmen der zweiten Zielsetzung (Zielsetzung 4) untersucht und auf ihre Gewichtung hin beurteilt werden. Als weitere Zielsetzung (Zielsetzung 5) sollten mögliche Konsequenzen für die Anwendbarkeit der Realkalisierung in der Praxis abgeleitet werden. Die Eingangsparameter für die Modellierung (Zielsetzung 6) werden in Abschnitt 4.1 beschrieben.

Zielsetzung 3: Ablauf und Eigenschaftsveränderungen bei der Realkalisierung

Für die Betrachtung der Realkalisierungsprozesse sind die Kontaktreakalisierung und die diffusionsgesteuerte Realkalisierung zu unterscheiden (vgl. Abbildung 3-66). Unter Kontaktreakalisierung ist die Anfangsreakalisierung der Betonrandzone zu verstehen, die insbesondere durch die anfängliche Feuchtigkeit aus dem Vornässen und der

Mörtelfeuchte (Applikation und Nachbehandlung) beeinflusst wird. Die tatsächlichen Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise die Luftfeuchtigkeit, spielen in diesem Stadium eine untergeordnete Rolle. Die Dauer ist abhängig von der Erhärtungsgeschwindigkeit des Mörtels und dem Zeitpunkt sowie der Art der Nachbehandlung. Maßgebend für die Tiefe der Kontaktrealkalisierung sind die Alkalität des Frischmörtels, die Erhärtungsgeschwindigkeit und die kapillare Wasser- und Alkalienaufnahme des Altbetons.

Nach der Hydratation des mineralischen Werkstoffs stellt sich eine Ausgleichsfeuchte des Mörtels in Abhängigkeit von den Feuchtebedingungen ein. Der maßgebende Einfluss während der diffusionsgesteuerten Realkalisierung ist das Feuchteangebot. Bei einer zu geringen Luftfeuchte ist ein Realkalisierungsfortschritt über die Kontaktrealkalisierung hinaus nicht möglich. Ein Rückgang der anfänglichen Realkalisierungsfront kann nicht ausgeschlossen werden. Im Folgenden werden die Mechanismen der Kontakt- und diffusionsgesteuerten Realkalisierung erläutert.

In Bezug auf den pH-Wert der Kontaktrealkalisierung während der Erstarrungsphase des Mörtels ist die Überschreitung der Sättigungskonzentration relevant. Unmittelbar nach dem Kontakt mit Wasser setzt bei mineralischen Werkstoffen die Hydratation ein, sodass Alkalisulfate, Alkalihydroxide, freies Calciumoxid und Calciumsulfat in Lösung gehen. Im Anfangsstadium der Hydratation wird die Alkalität der Porenlösung von den Hydroxidionen des Calciums sowie der Alkalien Natrium und Kalium gebildet. In den ersten Stunden überschreitet die Calcium-Ionenkonzentration die Sättigungskonzentration von Calciumhydroxid in Wasser (vgl. Abschnitt 2.1.4). Anhand der vergleichenden Untersuchungen mit den Indikatoren Phenolphthalein und Thymolphthalein zeigte sich zunächst ein pH-Wert-Anstieg des realkalisierten Bereiches > 10 (Umschlagpunkt Thymolphthalein). Diese Phase der Realkalisierung umfasst ausschließlich die ersten Stunden bis ca. 24 Stunden der Hydratation. Anschließend ist ein Rückgang der Realkalisierungsfront mit einem pH-Wert > 10 festzustellen, der in einem Alter von 28 Tagen nur noch die Kontaktfuge zwischen Mörtel und Altbeton betrifft.

Im weiteren Verlauf der Hydratation wird die Alkalität der Lösung praktisch nur noch von Natrium- und Kaliumhydroxiden verursacht und die Löslichkeit von Calciumhydroxid sinkt mit steigendem pH-Wert (vgl. Abschnitt 2.1.4). Solange Portlandit im Zementstein vorhanden ist, liegt die Calciumsättigungskonzentration bei ~ 20 mmol/l (vgl. Abschnitt 2.2.2). In Bezug auf die diffusionsgesteuerte Realkalisierung ist anzunehmen, dass eine stabilisierte Calciumkonzentration in der Porenlösung vorliegt und ein thermodynamisches Gleichgewicht zwischen gelöstem Calciumhydroxid, kristallinem Portlandit und Calciumsilikathydrat vergleichbar mit der Auslaugung des Zementsteins besteht. Anhand der Indikatorversuche (vgl. Abschnitt 3.3.5.7) zeigte sich, dass der pH-Wert der Porenlösung einen Wert > 10 während der diffusionsgesteuerten Realkalisierung nicht mehr erreichen kann. Der pH-Wert der realkalisierten Betonrandzone muss nahe des Phenolphthaleinumschlagpunktes pH-Wert ~ 8 liegen. Der niedrigere pH-Wert kann darauf zurückgeführt werden, dass während der diffusionsgesteuerten Realkalisierung keine Überschreitung der Calcium-Ionenkonzentration im Mörtel stattfindet. Die Menge der gelösten Alkalien reicht nicht aus, um den pH-Wert > 10 zu erhalten.

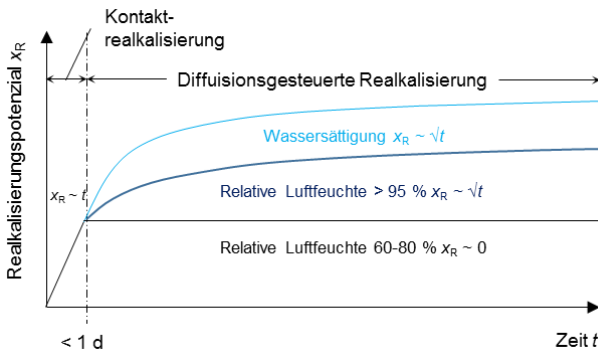


Abbildung 3-66: Abgrenzung der Kontaktreakalisierung und diffusionsgesteuerten Realkalisierung

Alkalitätspuffer und Beständigkeit der Realkalisierung

Die Indikatorversuche mit Thymolphthalein zeigten aufgrund des nicht erfolgten Farbumschlags, dass nur ein alkalisches Milieu mit einem pH-Wert < 10 durch den Realkalisierungsprozess ausgebildet werden konnte. Der neu gebildete Alkalienpuffer erreicht somit nicht den pH-Wert eines intakten alkalischen Zementsteingefüges (pH-Wert > 12). Die Pufferwirkung der Realkalisierung ist damit wesentlich geringer als die Ausgangssituation vor der Carbonatisierung des Zementsteins. Zusätzlich bildet sich kein neues CH in kristalliner Form aus, sodass auch kein weiterer Puffer aufgebaut werden kann (anhand von REM und EDX-Untersuchungen der realkalisierten Betonrandzone konnten keine neu gebildeten Calciumhydroxidkristalle detektiert werden).

Der Alkalientransport findet im Porensystem des Altbetons statt und der anfänglich hohe pH-Wert stellt sich ausschließlich in der wässrigen Lösung ein. Sobald die relative Luftfeuchte der Umgebung so weit absinkt, dass ein weiterer Alkalientransport in den Altbeton stark verlangsamt bzw. unterbunden wird, könnten die in der Porenlösung von carbonatisiertem Beton enthaltenen Sulfationen durch eine Ionenaustauschreaktion [Gerdes u. Wittmann - 1999] zu einer Erniedrigung des pH-Wertes unterhalb des Phenolphthaleinumschlagpunktes auch im zuvor realkalisierten Bereich führen (vgl. Abschnitt 2.3.4). Ebenso werden Alkalien in der Zementsteinmatrix gebunden (vgl. Abschnitt 2.3.2) und es kann durch die Verlangsamung des Alkaliennachschubs zu einer Umverteilung der Alkalien kommen. Die Menge der Alkalien reicht in diesem Moment nicht mehr aus, um den Phenolphthaleinumschlagpunkt zu erreichen. Da der Alkalienpuffer der Realkalisierung wesentlich geringer ist als vor der Carbonatisierung, kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine sofortige Carbonatisierung der freigelegten Bruchfläche eintritt.

Die Ergebnisse aus den Versuchsreihen 2 und 3 zeigten, dass die Beständigkeit der Realkalisierung vom Hydratationsgrad bzw. vom Austrocknen des Instandsetzungsmörtels abhängt. Nach wenigen Wochen stellt sich eine Ausgleichsfeuchte in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte sowohl im Mörtel als auch im Beton ein. Bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte kann unter Umständen

ein Alkalientransport stattfinden. Da die Mobilität der Wassermoleküle über die Zeit und in die Tiefe abnehmen, findet ein immer geringerer Alkalientransport statt. Aus diesem Grund ist auch nicht mit einem sofortigen Rückgang der Realkalisierung zu rechnen, sondern entsprechend der Kombination der Ionenaustauschreaktion der Sulfationen, der Bindung in die Zementsteinmatrix und dem Rückgang des Alkaliennachschubs entwickelt sich die Realkalisierung zurück. Ein vergleichbarer Effekt ist ebenfalls bei der Feuchtereduktion bei zuvor wassergelagerten Proben bzw. nach Abschluss der Nachbehandlung festzustellen. Mit dem Austrocknen des Mörtels und des Betons wird auch die Alkalienezufuhr unterbunden. Bei zeitgleichen Adsorptionsvorgängen von Anionen und Kationen an der Feststoffoberfläche des Betons kann eine ausreichende Realkalisierung nicht mehr stattfinden.

Zielsetzung 4: Abschätzung und Bewertung der Einflussfaktoren

Bei der Realkalisierung des Betons bestehen unterschiedliche Faktoren, die den Realkalisierungsfortschritt beeinflussen (vgl. Abschnitt 3.3.5). Der Grad der Beeinflussung sinkt entsprechend der nachfolgend aufgeführten Reihenfolge.

- Feuchteangebot
- Kunststoffhaltige Zusätze der mineralischen Beschichtung (Mörteltyp)
- Zementart des Untergrundbetons
- Zementart der mineralischen Beschichtung

Im Folgenden werden die Erkenntnisse auf die Anwendung der Realkalisierung in einem Trinkwasserbehälter abgeleitet.

Einfluss der Feuchte

Die Alkalien werden zusammen mit der Feuchtigkeit aus dem Mörtel in den Beton transportiert. Bei einer hohen Luftfeuchtigkeit entsteht ein Sorbatfilm an der Porenoberfläche, sodass die Alkalien, welche für die Realkalisierung des Betons relevant sind, über Diffusion in den Beton transportiert werden.

Bei einer dauerhaften Wasserbeaufschlagung dringt Wasser durch den hydrostatischen Druck in den Untergrund ein (Permeation). Hierzu kann das in Abschnitt 2.1.6 beschriebene, für WU-Bauwerke aufgestellte Modell herangezogen werden. Der Druckwasserbereich ist bei WU-Bauwerken mit maximal 25 mm anzusetzen. Dies umfasst in etwa die Dicke des aufzubringenden Mörtels bei einer Instandsetzung. Ein Alkalientransport in den Beton infolge einer Permeation kann somit weitgehend ausgeschlossen werden, da dieser Transportprozess ausschließlich in oberflächennahen Bereichen stattfindet und aufgrund der Dichte und Schichtstärke des Mörtels der Einfluss an der Verbundfuge zum Betonuntergrund zu vernachlässigen ist.

Bei Wasserbeaufschlagung dringt Wasser somit über Kapillarleitung in das Betongefüge ein. Die aus dem Mörtel im Wasser gelösten Alkalien werden zunächst über eine Konvektion (Huckepacktransport) in den Beton transportiert. Die kapillare Wasseraufnahme wird durch Selbstabdichtung in die Tiefe hin begrenzt. Wie unter Abschnitt 2.1.6 beschrieben wird die maximale Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Mörtel- und Betonqualität nach ca. einem Monat erreicht. Für eine Realkalisierung ist daraus abzuleiten, dass auch die maximale Realkalisierungstiefe durch die

Selbstabdichtung begrenzt wird. Die Diffusion einer ausreichenden Menge an Alkalien zum Erreichen des Phenolphthaleinumschlagpunktes scheint langsamer abzulaufen als die maximale kapillare Wasseraufnahme der Betonrandzone. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen (vgl. Abschnitt 3.3.5) konnte bei dauerhafter Wasserbeaufschlagung bis zu 120 Tagen keine maximale Realkalisierungsfront festgestellt werden, da weiterhin ein Realkalisierungsfortschritt messtechnisch erfasst wurde.

Bei einer relativen Luftfeuchte von 100 % r. F. flacht der Realkalisierungsfortschritt mit zunehmender Zeit ab und nähert sich einer horizontalen Asymptote an. Dieser Verlauf ist ebenfalls mit der in die Tiefe begrenzten kapillaren Wasseraufnahme zu erklären. Bei einer relativen Luftfeuchte von 100 % r. F. ist demnach ausschließlich eine Realkalisierung in der oberflächennahen Randzone (wenige Millimeter) zu erwarten.

Bei geringen relativen Luftfeuchtigkeiten findet ausschließlich eine Dampfdiffusion im Bereich der Kapillarkondensation statt. Ein nennenswerter Alkalientransport hingegen ist nur in der flüssigen Phase zu erwarten. Bei geringen relativen Luftfeuchtigkeiten erreicht der Sorbatfilm nicht die nötige Schichtdicke für eine ausreichende Mobilität der Calcium- und Hydroxidionen. Ein Alkalientransport infolge einer Dampfdiffusion ist vernachlässigbar klein.

Einfluss des Instandsetzungsmörtels

Aus den Ergebnissen ist abzuleiten, dass ausschließlich Instandsetzungsmörtel vom Typ 1 und Typ 2 ein ausreichendes Realkalisierungsdepot aufweisen und nur diese für eine Realkalisierung als Instandsetzungsziel verwendet werden sollten.

Aus den Laborversuchen lässt sich kein signifikanter Unterschied der Realkalisierung zwischen einem CEM I und CEM III Zement feststellen. Solange ein C/S-Verhältnis von $> 1,5$ besteht und damit freies Portlandit vorhanden ist, behält im Allgemeinen die Porenlösung im Zementstein ihren Sättigungswert von etwa 20 mmol/L bei. Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass CEM I, CEM II und CEM III Zemente mit einem C/S-Verhältnis $> 1,5$ ein ausreichendes Realkalisierungspotenzial aufweisen. Spezialzemente wie bspw. ein Calcium-Aluminat-Zement können mit einem geringeren Calciumhydroxidgehalt kein ausreichendes Realkalisierungspotenzial liefern.

Die Menge an kunststoffhaltigen Zusätzen (Typ 1 bis Typ 4) beeinflusst die mögliche Realkalisierung des Betons. Wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben, führt die Verwendung von Polymeren zur teilweisen Füllung bzw. Abdichtung des Porensystems, sodass ein höheres Wasserrückhaltevermögen und der Transport der Alkalien in den Altbeton zurückgehalten werden.

Einfluss des Untergrundbetons

Das Realkalisierungspotenzial sinkt in folgender Reihenfolge (Bewertung auf Basis der untersuchten Zementarten): CEM I, CEM II/A-LL, CEM III. Dies ist auf Adsorptionsvorgänge von Anionen und Kationen an der Feststoffoberfläche und der Bindung der Alkalien in die Zementsteinmatrix zurückzuführen (vgl. Abschnitt 3.3.5.2 und 2.3.5.3). Zudem ist der Zementstein eines CEM I poröser als ein CEM III Beton.

Der zur Verfügung stehende Transportraum im Beton wird durch den w/z-Wert gesteuert. Es besteht ein Zusammenhang zwischen Kapillarporenvolumen, kapillarer Wasseraufnahme und Kontaktreakalisierung. Betone mit einer niedrigen Kapillarporosität führen zu einem niedrigeren Realkalisierungspotenzial. Bei Trinkwasserbehältern sollten aus diesem Grund die Porosität und, sofern möglich, die Zementart des Untergrundbetons erfasst werden.

Zielsetzung 5: Anwendbarkeit der Realkalisierung in der Praxis

In Trinkwasserbehältern findet unterhalb des maximalen Wasserstandes in Abhängigkeit von der Beanspruchung des gespeicherten Wassers eine Auslaugung der Betonrandzone statt. Wie in Abschnitt 3.2.6 beschrieben, geht bei einer Auslaugung und damit verbundenen Lösung von Alkalien eine räumlich dicht gefolgte Zersetzung des Zementsteins einher. Eine tiefreichende pH-Wert-Erniedrigung ohne ein Absanden der Betonoberfläche und Herauslösen des Zementsteins besteht nicht. Aus diesem Grund ist eine klassische Realkalisierung, wie sie im Hochbau formuliert wird, nicht notwendig bzw. anwendbar. Eine durch die Zementsteinerstörung geschädigte Betonoberfläche stellt keinen tragfähigen Untergrund für die Applikation eines Instandsetzungsmörtels dar. Im Rahmen einer Untergrundvorbereitung würde die geschädigte und ausgelaugte Betonrandzone abgetragen werden.

Oberhalb des maximalen Wasserstands herrscht eine hohe relative Luftfeuchte. Die Kondensatbildung, insbesondere an Deckenflächen, führt zu einer Auslaugung der Betonrandzone, die nur wenige Millimeter umfasst. Im Rahmen der Untergrundvorbereitung vor Applikation eines Instandsetzungsmörtels wird dieser Bereich i. d. R. abgetragen und eine Realkalisierung ist somit nicht notwendig.

Sollte bei einer guten Belüftung der Wasserkammer eine Carbonatisierung der Betonrandzone oberhalb des Wasserstands entstehen, besteht im Umkehrschluss kein ausreichendes Feuchteangebot für eine Realkalisierung. Die durchgeführten Untersuchungen mit den marktgängigen Instandsetzungsmörteln haben ergeben, dass eine in die Tiefe begrenzte, diffusionsgesteuerte Realkalisierung erst ab einer relativen Luftfeuchte von ca. 100 % möglich ist. Die applizierte Mörtelschicht übernimmt somit eher eine Schutzfunktion vor dem weiteren Eintrag von Kohlenstoffdioxid in den Beton. Ein Wiederherstellen eines ausreichend alkalischen Milieus ist nicht zu erwarten.

Zusammengefasst ist bei der Instandsetzung von Trinkwasserbehältern das Anwendungsgebiet einer flächigen Realkalisierung durch Diffusion von Alkalien in den Beton, anders wie zurzeit im allgemeinen Hochbau eingesetzt, nicht zielführend. Die aus den experimentellen Versuchen gewonnen Erkenntnisse werden in Kapitel 5 aufgegriffen und mögliche Regelwerksänderungen diskutiert.

4 Modellbildung zur Beschreibung der Realkalisierung

4.1 Eingangsparmeter und Zielsetzung

Im ersten Arbeitsschwerpunkt der experimentellen Untersuchungen wurden das Alkalitätsdepot und der Auslaugungswiderstand der Mörtel untersucht (vgl. Abschnitt 3.2). Daraus konnte abgeleitet werden, wie die Freisetzung und Lösung der Alkalien ablaufen. Einflussfaktoren auf die Alkalienabgabe wie bspw. die Zementart des Mörtels und der Mörteltyp konnten abgeschätzt werden. Im zweiten Arbeitsschwerpunkt wurde der Ablauf der Realkalisierung untersucht. Aus den Untersuchungen konnten Einflussfaktoren auf das Realkalisierungspotenzial ermittelt und auf ihre Gewichtung hin beurteilt werden (vgl. Abschnitt 3.3).

Im Folgenden soll ein vereinfachtes Modell zum Realkalisierungspotenzial aus den Untersuchungsergebnissen abgeleitet und mit Hilfe numerischer Simulationen validiert werden. Aus den vorgenannten Untersuchungen konnten Erkenntnisse zum Ablauf der Realkalisierung gewonnen werden, die als Eingangsparmeter für die Modellbildung angesetzt und im Folgenden erläutert werden (vgl. Abbildung 4-1).



Abbildung 4-1: Eingangsparmeter und Zielsetzung der Modellbildung

Für den Ablauf der Realkalisierungsprozesse und auch für die Modellbildung sind die Kontaktreakalisierung und die diffusionsgesteuerte Realkalisierung zu unterscheiden (vgl. Abschnitt 3.3.6). Unter der **Kontaktreakalisierung** ist die Anfangsreakalisierung der Betonrandzone zu verstehen, deren Tiefenwirkung und Dauer von unterschiedlichen Einflussfaktoren abhängig sind. Dazu zählen:

- anfängliche Feuchtigkeit aus dem Vornässen, Mörtelfeuchte und Untergrundeuchte
- Erhärtungsgeschwindigkeit des Mörtels sowie der Zeitpunkt und die Art der Nachbehandlung
- Alkalienabgabe des Frischmörtels und Wasserrückhaltevermögen
- Alkalienaufnahme und kapillare Wasseraufnahme des Betons

Die Alkalien werden während der Applikation und Erhärtung mittels Konvektion „huckepack“ in den Beton transportiert. Die Vielzahl an Variationsparametern und die Interaktion untereinander führen dazu, dass die Kontaktreakalisierung nicht auf vereinfachte Weise dargestellt und beschrieben werden kann, sondern für jeden Mörtel in Abhängigkeit von den Feuchtebedingungen ermittelt werden muss.

Da der Betonuntergrund eines Bauwerks meist eine unbekannte Zusammensetzung aufweist, ist die sicherste Variante zur Abschätzung einer konkreten objektbezogenen Kontaktreakalisierung Bohrkerne aus dem Bauwerk zu entnehmen, den geplanten Mörtel zu applizieren und die Kontaktreakalisierung innerhalb der ersten Woche zu prüfen. Eine allgemeine Einschätzung der Kontaktreakalisierung von Instandsetzungsmörteln kann anhand von Laborversuchen erfolgen. Hierzu sollte ein standardisierter Referenzbeton als Untergrundbeton entwickelt werden, der die Expositionsklasse $X_{T_{WB}}$ widerspiegelt. Für ältere Behälter mit höherem w/z-Wert und einer geringeren Druckfestigkeitsklasse sollte ein zusätzlicher Referenzbeton entwickelt werden, damit die entsprechend höhere Kontaktreakalisierung abgeschätzt werden kann. Der Untergrund ist vor Applikation des Instandsetzungsmörtels und Ermittlung der Tiefe der Kontaktreakalisierung zu carbonatisieren.

Die **diffusionsgesteuerte Realkalisierung** stellt sich nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte in Abhängigkeit von der Luftfeuchte ein. Folgende Einflussfaktoren wurden aus den experimentellen Untersuchungen abgeleitet. Der Grad der Beeinflussung sinkt nach der nachfolgend aufgeführten Reihenfolge.

- Feuchteangebot
 - Eine Realkalisierung des Betonuntergrunds war ab einer relativen Luftfeuchte von ca. 95 % möglich.
 - Geringere relative Luftfeuchten (< 95 % r. F.) führten zu keiner signifikanten Erhöhung des Realkalisierungsfortschrittes. Zum Teil wurde ein Rückgang der anfänglichen Kontaktreakalisierung beobachtet.
- Kunststoffhaltige Zusätze der mineralischen Beschichtung (Mörteltyp)
 - Zwischen Typ 1 und Typ 2 Mörteln waren keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf das Realkalisierungspotenzial festzustellen.
 - Der untersuchte Typ 3 Mörtel wies ein geringeres Realkalisierungspotenzial als ein Typ 1 oder Typ 2 Mörtel auf.
 - Bei dem Typ 4 Mörtel war kein ausreichendes Realkalisierungspotenzial gegeben. Die Verwendung von Polymeren konnte zur teilweisen Füllung bzw.

Abdichtung des Porensystems führen, sodass der Transport der Alkalien in den Altbeton zurückgehalten wurde.

- Zementart des Untergrundbetons
 - Das Realkalisierungspotenzial war abhängig von der Zementart.
 - Das Realkalisierungspotenzial sinkt in folgender Reihenfolge: CEM I, CEM II/A-LL, CEM III
- Zementart der mineralischen Beschichtung
 - Im Allgemeinen behält die Porenlösung im Zementstein ihren Sättigungswert von etwa 20 mmol/L bei, solange ein C/S-Verhältnis von $> 1,5$ besteht und damit freies Portlandit vorhanden ist.
 - Ein vergleichbarer Realkalisierungsfortschritt war bei einem CEM I, CEM II oder CEM III mit hohem C/S-Verhältnis festzustellen.
 - Der Spezialzement mit einem geringen Anteil an Calciumhydroxid wies einen vergleichsweise geringen Realkalisierungsfortschritt auf.
- Porosität des Untergrunds
 - Die Gefügestruktur des Betons wirkte sich insbesondere auf die Kontaktreakalisierung aus.
 - Mit steigender Porosität nimmt das Realkalisierungspotenzial zu.

Die in Wasser gelösten Alkalien werden über Diffusion aus dem Mörtel in den Beton transportiert. Bei hohen relativen Luftfeuchten entsteht eine Diffusion innerhalb des Sorbatfilms an der Porenoberfläche oder bei dauerhafter Wasserbelastung im wassergesättigten Porenraum. Bei geringer relativer Luftfeuchte findet ausschließlich eine Dampfdiffusion statt. Der Sorbatfilm erreicht keine ausreichende Schichtdicke, damit eine ausreichende Menge an Alkalien für eine messbare Realkalisierung (oberhalb des Phenolphthaleinumschlagpunktes) transportiert werden kann. Da bei Trinkwasserbehältern im Betriebszustand die Bauteiloberflächen wassergesättigt sind und oberhalb von 95 % r. F. der gesamte Massenstrom in der Flüssigphase erfolgt, wird der Alkalientransport als Diffusionsmodell im vollständig wassergesättigten Porenraum abgebildet.

Das Modell wird auf Grundlage der bisherigen, vorgenannten Erkenntnisse zur Realkalisierung aufgestellt, wobei folgende Einschränkungen zu berücksichtigen sind:

- Mögliche Einflussfaktoren auf das Realkalisierungspotenzial wie Umgebungsfeuchte, Zementart und Porosität von Mörtel und Beton wurden als maßgebende Variablen aus den Untersuchungen ermittelt und können in die Modellbildung mit einfließen. Weitere Einflussgrößen, wie bspw. Bindemittelgehalt, w/z-Wert und Zusatzstoffe des Mörtels sowie die Umgebungs- und Bauteiltemperatur können bei dem Alkalientransport und somit auch bei der Realkalisierung eine Rolle spielen, konnten aber aufgrund fehlender Datengrundlage nicht berücksichtigt werden.
- Die kapillare Wasseraufnahme des Betons infolge Oberflächenspannungen an den Porenwandungen wird durch die „Selbstabdichtung“ in die Tiefe hin begrenzt. Bei hohen relativen Luftfeuchten nahm nach wenigen Wochen die Effektivität des Alkalientransports in die Tiefe ab. Der Einfluss der Selbstabdichtung konnte für hohe relative Luftfeuchten erfasst werden. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen (vgl. Abschnitt 3.3.5) konnte bei dauerhafter Wasserbeaufschlagung bis zu 120 Tagen keine Realkalisierungsfront ermittelt

werden, die infolge Selbstabdichtung begrenzt wurde. Wann und in welcher Tiefe die Selbstabdichtung bei dauerhafter Wasserlagerung den Alkalientransport beeinflusst, konnte aus den Untersuchungen nicht abgeleitet werden. Da eine Realkalisierung in Trinkwasserbehältern, wenn überhaupt, nur in den ersten Millimetern eine Rolle spielt, ist die Selbstabdichtung bei dauerhafter Wasserbeaufschlagung zu vernachlässigen.

- Anhand der Untersuchungen ließ sich kein signifikanter Unterschied bezüglich der Realkalisierung zwischen einem CEM I und CEM III Zement feststellen. Solange ein C/S-Verhältnis von $> 1,5$ besteht und damit freies Portlandit vorhanden ist, behält im Allgemeinen die Porenlösung im Zementstein ihren Sättigungswert von etwa 20 mmol/L bei. Innerhalb des Versuchszeitraums reichte der Alkalienpuffer eines CEM I und CEM III-Zementes aus, eine in die Tiefe fortschreitende Realkalisierung zu ermöglichen. Aus den Versuchen der Alkalienabgabe konnte abgeleitet werden, dass der Gesamtalkalienpuffer bzw. die Alkalienverfügbarkeit eines CEM III-Zementes geringer ist, als die eines CEM I-Zementes. Wann und in welcher Tiefe der möglicherweise geringere Alkalienpuffer einen Einfluss darstellt, konnte aus den Untersuchungen nicht abgeleitet werden.

Aus den Erkenntnissen der Arbeitsschwerpunkte 1 (vgl. Abschnitt 3.2) und 2 (vgl. Abschnitt 3.3), den Eingangsparametern und den Einschränkungen ergeben sich folgende Zielsetzungen bei der Modellbildung: Zunächst soll der physikalische Zusammenhang zum Ablauf der Realkalisierung hergestellt werden (Zielsetzung 7). Anschließend soll aus den Erkenntnissen der Untersuchungen ein vereinfachtes Berechnungsmodell aufgestellt werden. Anhand numerischer Simulationen wird dieses Modell überprüft (Zielsetzung 8). Des Weiteren sind die über Berechnungen und Simulationen vorhandenen Einflussfaktoren zu bewerten (Zielsetzung 9). Abschließend sollen anhand der Modellbildung weitere erfassbare Einflussfaktoren ermittelt werden (Zielsetzung 10).

4.2 Verlauf der diffusionsgesteuerten Realkalisierung

Zur Ableitung physikalischer Gesetzmäßigkeiten und Bewertung der Einflussfaktoren wurden die Realkisierungsverläufe der Untersuchungsreihen 1, 2, 3 und 6 (Wasserlagerung) miteinbezogen (vgl. Abschnitt 3.3.5). Die Ergebnisse der Realkisierungsuntersuchungen bei Wasserlagerung sind in Abbildung 4-2 bis Abbildung 4-4 dargestellt.

Der Transport von Alkalien im wassergesättigten Porenraum läuft über einen Diffusionsprozess ab. Aufgrund eines Konzentrationsunterschieds findet ein Diffusionsstrom vom Mörtel in den Beton statt. Ist die Dicke des porösen Feststoffs im Verhältnis zur Eindringtiefe des diffundierten Mediums groß, steigt dessen Konzentration in Abhängigkeit von der Eindringtiefe und der Eindringdauer an [Locher, 2000]. Aufgrund von zeitlich und örtlich variierenden Konzentrationen kann eine eindimensionale Diffusion über das 2. Fick'sche Diffusionsgesetz wie folgt beschrieben werden (vgl. Abschnitt 2.3.5).

$$x \sim \sqrt{D \cdot t} \quad (4-1)$$

mit

x	Eindringtiefe (Weg) [m]
D	Diffusionskoeffizient [m^2/s]
t	Zeit in [s]

Der Verlauf der diffusionsgesteuerten Realkalisierung bei Wassersättigung kann als Wurzel-Zeit-Gesetz beschrieben werden (vgl. Abbildung 4-2 bis Abbildung 4-4). Der Realkalisierungsfortschritt nimmt mit der Zeit ab. Aus der Literatur sind keine Diffusionskoeffizienten für bspw. Calciumhydroxid, Natriumhydroxid und Calciumhydroxid bekannt, die für eine Realkalisierung herangezogen werden könnten. Aus Untersuchungen zum Chloridtransport [Tang u. Nilsson, 1988] ist bekannt, dass sich die Diffusionsrate von Kationen und Anionen unterscheidet. Dies hat zur Folge, dass sich Anionen (wie bspw. auch Hydroxidionen) entlang eines Konzentrationsgradienten bewegen und durch das langsamere Kation (bspw. Calcium, Natrium und Kalium) ein elektrisches Gegenfeld erzeugt wird [Kapteina, 2011]. Eine Ableitung von Hydroxiddiffusionskoeffizienten aus bekannten Chloriddiffusionskoeffizienten ist nicht möglich, da die Kombination aus chemischem Potenzial und dem abbremsenden elektrischen Gegenfeld die Diffusion beeinflusst und hierzu keine gesicherten Erkenntnisse vorliegen.

Im Folgenden wird auf die aus den Untersuchungen abgeleiteten Faktoren eingegangen, die den Realkalisierungsverlauf beeinflussen. Dazu gehören die Zementart des Betons, der w/z-Wert des Betons und die Mörtelzusammensetzung (vgl. Abschnitt 3.3.5). Diese Beeinflussung spiegelt sich auch in den Verläufen bzw. der Steigung des Realkalisierungsfortschritts wider.

Der Realkalisierungsfortschritt bei Beton B1 zeigte in Abhängigkeit vom applizierten Instandsetzungsmörtel, dass aufgrund der Kontaktreakalisierung grundsätzlich ein zu unterscheidender Anfangswert vorliegt. Der zeitabhängige Realkalisierungsverlauf der Typ 1 und Typ 2 Mörtel (CEM I und CEM III) kann jedoch durch die gleiche Funktion beschrieben werden. Es ergibt sich eine Verschiebung der Funktionsverläufe, die im Wesentlichen durch den Wert der Kontaktreakalisierung bestimmt wird (vgl. Abbildung 4-2).

Bei dem Typ 3 Mörtel (M9) und dem Calcium-Aluminat-Mörtel (M5) ist eine effektive Anfangsreakalisierung in den ersten 14 Tagen festzustellen (Abweichung Wurzel-Zeit-Gesetz). Nach ca. 20 Tagen bis 30 Tagen scheint der Realkalisierungsverlauf einem Wurzel-Zeit-Gesetz zu entsprechen. Die Abweichung kann damit begründet werden, dass kein kontinuierlicher Fluss bzw. keine gleichbleibende Konzentration von Alkalien aus dem Instandsetzungsmörtel gewährleistet werden kann (vgl. Abschnitt 3.3.6).

Bei dem Typ 4 Mörtel (M10) ist eine deutlich geringere Kontakt- und diffusionsgesteuerte Realkalisierung festzustellen, die ebenso mit einem Wurzel-Zeit-Gesetz beschrieben werden kann. Die Verwendung von Polymeren führt jedoch zur teilweisen Füllung bzw. Abdichtung des Porensystems.

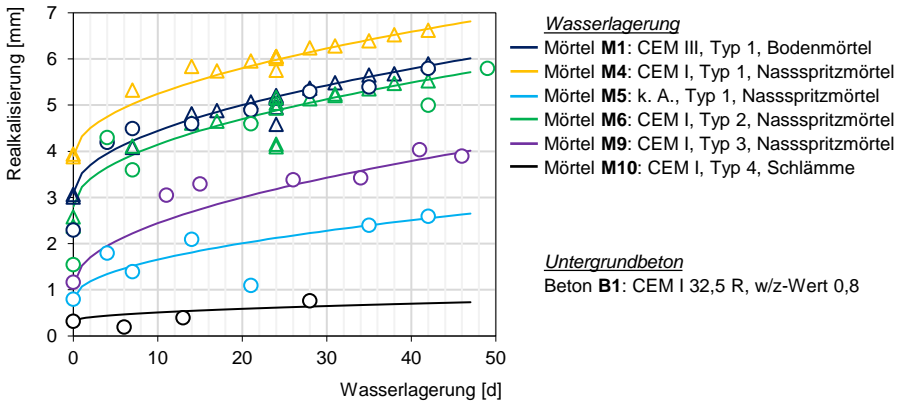


Abbildung 4-2: Anwendung des Wurzel-Zeit-Gesetzes für Beton B1 bei verschiedenen Mörtelsystemen (Versuchsreihe 2, 3 und 6)

Abbildung 4-3 zeigt den Einfluss der Zementart des Untergrundbetons. Eine Verschiebung der Funktionsverläufe mit Unterschieden in der Kontaktrealkalisierung, wie es bei den unterschiedlichen Zementarten der Instandsetzungsmörtel der Fall war, liegt nicht mehr vor. Der Untergrundbeton B2.3 (Hochofenzement) weist einen geringeren Realkalisierungsfortschritt als der Untergrundbeton B2.1 (Portlandzement) auf.

Es ist naheliegend, dass die Variation der Funktionsverläufe aus unterschiedlichen Diffusionskoeffizienten der Zementart resultiert. Der Transport von in Wasser gelösten Alkalien scheint vergleichbar mit dem Chloridtransport im Beton zu sein. Aus Chloridmigrationsversuchen [Gehlen, 2000] ist bekannt, dass ein Hochofenzement einen deutlich niedrigeren Chloridmigrationskoeffizienten aufweist als Portlandzement. Zurückgeführt wird das u. a. auf einen poröseren Zementstein eines Portlandzementes [Brodersen, 1982], eine höhere Bindekapazität und die Nachhydratation eines Hochofenzementes [Gehlen, 2000].

Die Untersuchungsergebnisse nach [Bier, 1988] zu einer langsamer voranschreitenden Realkalisierung eines Hochofenzementes bestätigen ebenfalls die vorliegenden Untersuchungsergebnisse. Begründet wurde das Ergebnis damit, dass bei der Carbonatisierung mit steigendem Hüttensandanteil der Silikatgelgehalt ansteigt. Mit wachsendem Silikatgelgehalt können mehr Alkalien in die carbonatisierte Matrix gebunden werden. Die Bindekapazität nach [Bier, 1988] wird sicherlich nicht der einzige Einflussfaktor sein. Vergleichbar mit der Chloriddiffusion ist der Transportraum und somit die Porosität und Tortuosität des Zementsteins eine weitere wichtige Einflussgröße.

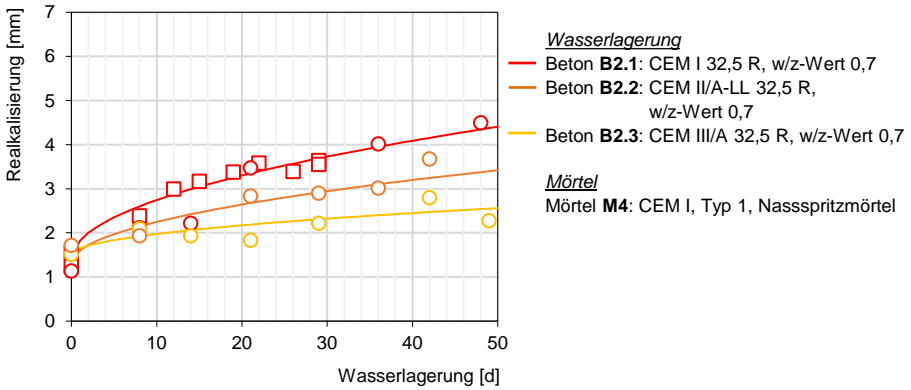


Abbildung 4-3: Anwendung des Wurzel-Zeit-Gesetzes für Beton B2 bei Anwendung verschiedener Zementarten des Untergrundbetons (Versuchsreihe 1 und 2)

Der w/z-Wert abhängige Verlauf (w/z-Wert 0,5 bis 0,8) ist in Abbildung 4-4 dargestellt. Nicht nur die Kontaktreakalisierung als Anfangswert des Realkalisierungsprozesses, sondern auch die Steigung der diffusionsgesteuerten Realkalisierung nimmt mit steigendem w/z-Wert zu. Hier können ebenfalls die Erkenntnisse zum Chloridtransport vergleichend in Ansatz gebracht werden. Bei niedrigem w/z-Wert werden die Verbindungen zwischen den Kapillarporen unterbrochen. Der Transport erfolgt zunehmend über die wesentlich kleineren Gelporen, sodass eine Reduktion des Chloridmigrationskoeffizienten entsteht [Wiens, 2005]. Die Abhängigkeit des w/z-Wertes auf den Chloridmigrationskoeffizienten wird auch in [Gehlen, 2000] beschrieben.

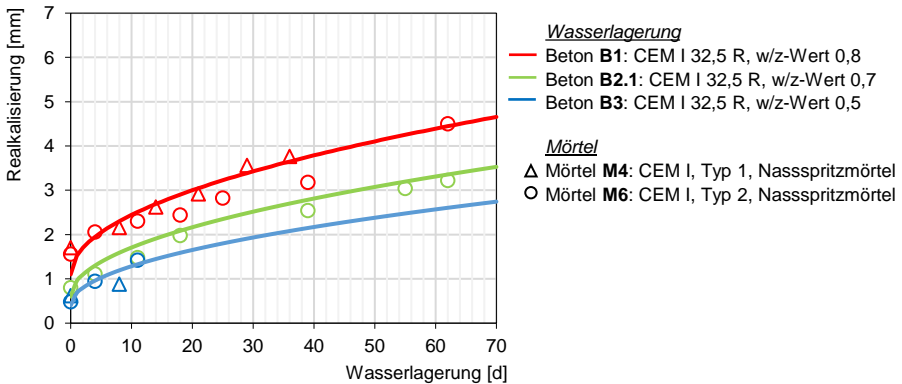


Abbildung 4-4: Anwendung des Wurzel-Zeit-Gesetzes für Beton B1, B2 und B3 (CEM I) bei unterschiedlichen w/z-Werten des Untergrundbetons (Versuchsreihe 1)

Im wassergesättigten Porenraum lässt sich anhand der Untersuchungsergebnisse in Kombination mit der bestehenden Wurzel-Zeit-Beziehung folgendes vereinfachtes Modell ableiten (vgl. Gleichung 4-2).

Die Realkalisierungstiefe (x_R) zum Zeitpunkt (t) ist abhängig von der Kontaktreakalisierung (R_K) als Anfangswert bzw. Materialparameter und der

diffusionsgesteuerten Realkalisierung (R_D) als Faktor zur \sqrt{t} -Funktion. Die Unterscheidung der beiden Mechanismen war bereits aus den Untersuchungen zum Realkalisierungspotenzial bekannt (vgl. Abschnitt 3.3). Die Regressionen der in Abbildung 4-2 bis Abbildung 4-4 dargestellten Realkisierungsverläufe wurden interaktiv bestimmt und basieren auf der nachfolgenden, vereinfachten Formel (4-2). Die im Rahmen der Regressionsberechnungen ermittelten Faktoren sind in Tabelle 4-1 aufgeführt. Die verwendete Funktion wird in Abschnitt 4.3 validiert.

$$x_R(t) = R_K + R_D \times \sqrt{t} \quad (4-2)$$

mit

- x_R Realkalisierungstiefe in [mm]
- R_K Kontaktrealkalisierung in [mm]
- R_D Faktor der diffusionsgesteuerten Realkalisierung in [mm/d^{0,5}]
- t Zeit in [d]

Tabelle 4-1: Faktoren der Kontaktrealkalisierung und diffusionsgesteuerten Realkalisierung der Abbildung 4-2 bis Abbildung 4-4

Beton	Zementart	Mörtel	Kontaktrealkalisierung R_K [mm]	Diffusionsgesteuerte Realkalisierung R_D [mm/d ^{0,5}]	Abbildung
B1	CEM I	M1	3,10	0,425	4-2
B1	CEM I	M4	3,90	0,425	4-2
B1	CEM I	M5	0,80	0,270	4-2
B1	CEM I	M6	2,80	0,425	4-2
B1	CEM I	M9	1,10	0,425	4-2
B1	CEM I	M10	0,32	0,060	4-2
B2.1	CEM I	M4	1,40	0,425	4-3
B2.2	CEM II/A-LL	M4	1,30	0,300	4-3
B2.3	CEM III	M4	1,50	0,150	4-3
B2.1	CEM I	M6	0,60	0,350	4-4
B1	CEM I	M4/M6 ¹⁾	1,10	0,425	4-4
B3	CEM I	M4/M6 ¹⁾	0,40	0,280	4-4

1) Messergebnisse von beiden Mörteln miteinbezogen

Im teilwassergesättigten Porenraum bzw. bei hohen relativen Luftfeuchten liegt ein abweichender Realkisierungsverlauf im Vergleich zum wassergesättigten Porenraum vor. Bei einer relativen Luftfeuchte zwischen 95 % und 100 % ist ausschließlich in den ersten 14 Tagen der Versuchsdauer ein Wurzel-Zeit-Gesetz anzusetzen. Anschließend nimmt die Effektivität des Alkalientransports in die Tiefe ab, sodass eine Abweichung des Wurzel-Zeit-Gesetzes stattfindet (vgl. Abbildung 4-5).

Wie in Abschnitt 3.3.6 beschrieben, flacht bei hohen relativen Luftfeuchten der Realkisierungsfortschritt mit zunehmender Zeit ab und nähert sich einer horizontalen Asymptote an. Dieser Verlauf ist mit der in die Tiefe begrenzten kapillaren Wasseraufnahme zu erklären. Des Weiteren wird das Porengefüge nicht so weit gefüllt wie bei einer dauerhaften Wasserbelastung. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, läuft der Transport der Alkalien über Diffusion im Sorbatfilm an der Porenoberfläche ab.

Dieser Transport ist insgesamt ineffektiver als die Diffusion von Alkalien im wassergesättigten Porenraum.

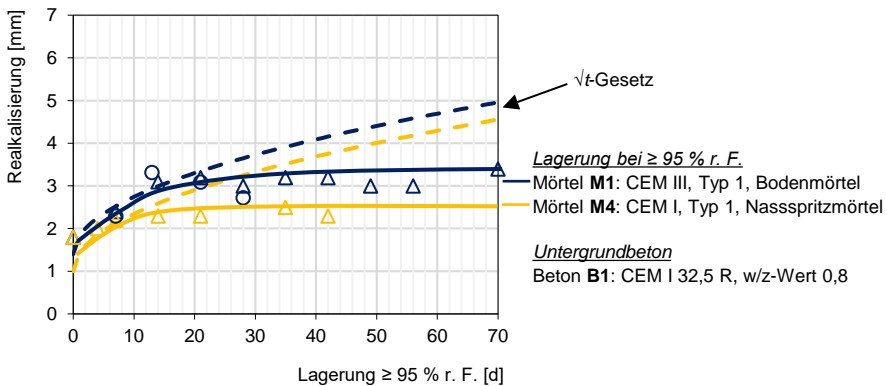


Abbildung 4-5: Anwendung eines Wurzel-Zeit-Gesetzes bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 95 % r. F. (Versuchsreihe 3 und 4)

4.3 Numerische Modellierung des Alkalientransports

Der Alkalientransport im wassergesättigten Beton wird im Folgenden anhand einer numerischen Simulation verifiziert. Hierzu wurde mit Hilfe der Software COMSOL Multiphysics® ein FEM-Modell nachgebildet.

Im ersten Schritt wurde der im Labormaßstab durchgeführte Realkalisierungsversuch (2-Schicht-System) als 2D-Aufbau modelliert (vgl. Abbildung 4-6). Zur Berechnung der Konzentrationsverteilung der im Wasser gelösten Alkalien wird das Modul „Transport verdünnter Spezies“ verwendet. Aufgrund der Abdichtung der Seitenflächen mit Epoxidharz, des Auftrags einer mineralischen Beschichtung auf der Oberseite und des wassergesättigten Zustands des Betons kann eine Konvektion bzw. eine konvektive Strömung weitestgehend ausgeschlossen werden. Dieser Transportmechanismus wurde bei der Modellbildung nicht weiter betrachtet.

Die Software modelliert und verknüpft die physikalischen Prozesse anhand von Differentialgleichungen. Die Lösung erfolgt numerisch anhand der Finite-Elemente-Methode über Näherungslösungen und Randwertbetrachtungen an einem vordefinierten Netz aus endlich vielen Teilgebieten. Im numerischen Modell kann ausschließlich die diffusionsgesteuerte Realkalisierung abgeleitet werden (vgl. Abschnitt 4.1). Die Kontaktrealkalisierung kann auf Basis des aufgestellten Modells nicht erfasst werden und ist durch Applikationsuntersuchungen zu ermitteln.

Der Transportmechanismus beruht auf dem Fick'schen Diffusionsgesetz unter Berücksichtigung des Porengefüges. Aufgrund der Tortuosität der Transportwege wird nach [Millington u. Quirk - 1961] der Diffusionskoeffizient mit einem Tortuositätsfaktor τ_F korrigiert. Der Diffusionskoeffizient entspricht dabei dem effektiven Diffusionskoeffizienten D_e . Für die Modellierung wird angenommen, dass solange ein

C/S-Verhältnis > 1,5 besteht, die Porenlösung im Zementstein einen Sättigungswert von 20 mmol/L behält. Die Konzentration c wird dementsprechend konstant mit 20 mol/m³ angesetzt (vgl. Abbildung 4-6).

Die Porosität ε_p wird aus der Charakterisierung der Untergrundbetone (90 d) als Eingangsparameter der Modellierung verwendet. Der Fluid Diffusionskoeffizient (Alkaliendiffusion im wassergesättigten Porenraum) konnte nicht als bekannte Größe verwendet werden. Dieser musste anhand der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen abgeleitet werden.

$$\tau_F = \varepsilon_p^{-\frac{1}{3}} \tag{4-3}$$

mit

τ_F Tortuositätsfaktor [-]
 ε_p Porosität [-]

$$D_e = \frac{\varepsilon_p}{\tau_F} D_F \tag{4-4}$$

mit

D_e effektiver Diffusionskoeffizient in [m²/s]
 D_F Fluid Diffusionskoeffizient in [m²/s]

$$R = \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla(-D_e \nabla c) \tag{4-5}$$

mit

R Reaktionsrate [mol/(m³/s)]
 c Konzentration in [mol/m³]
 t Zeit in [s]

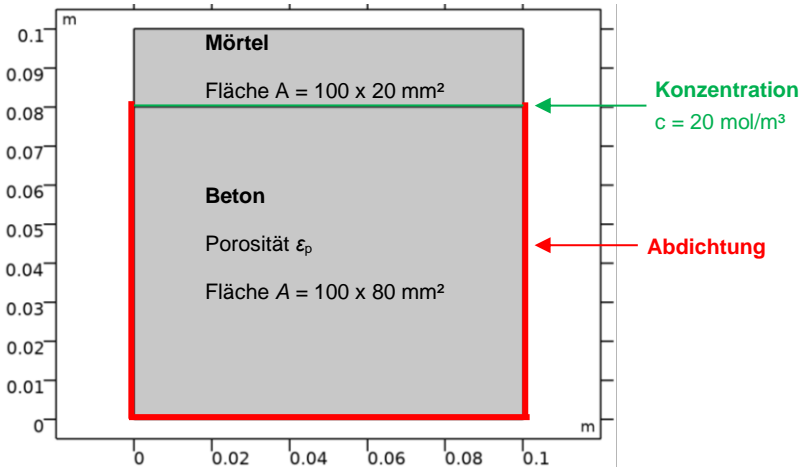


Abbildung 4-6: Verbundprobekörper als 2D-Modell

Als Ergebnis der Simulation wird die Konzentrationsänderung in Abhängigkeit von der Probentiefe und der Versuchszeit wiedergegeben. Als Eingangsparameter wird angenommen, dass bei dem carbonatisierten Betonuntergrund sämtliches

Calciumhydroxid in gelöster Form umgesetzt wurde. Vereinfacht wird eine Calciumkonzentration im Betonuntergrund von $c = 0$ mmol/L angenommen. Aus Abbildung 4-7 geht hervor, wie sich durch die Alkalieneinfuhr aus dem Mörtel mit einer Calciumsättigungskonzentration von $c = 20$ mmol/L die Calciumkonzentration im Beton verändert.

Die Visualisierung des Konzentrationsverlaufs in Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8 zeigt, dass 20 mmol/L als Eingangswert der Konzentration ausschließlich im direkten Kontaktbereich zwischen Mörtel und Beton über den gesamten Simulationszeitraum (bis zu 100 Tage) besteht. Die Ergebnisse aus Abschnitt 3.3.6 werden dahingehend bestätigt, dass ein hoher pH-Wert der Porenlösung mit > 10 ausschließlich im Kontaktbereich zwischen Mörtel und Beton erreicht wird. Der pH-Wert des Betons ist somit direkt mit der Calciumkonzentration der Porenlösung verknüpft. Außerhalb des Kontaktbereichs liegt die Calciumkonzentration < 20 mmol/l und führt zu einem pH-Wert < 10 .

Die weitere Alkalieneverteilung in die Tiefe (vgl. Abbildung 4-7) spiegelt die Erkenntnisse aus Abschnitt 3.3.5.7 wider. Ein Alkaliene transport findet auch in größere Tiefen statt, ohne dass die Calciumkonzentration für einen Farbumschlag des Indikators Phenolphthalein ausreicht. Die Realkalisierungsgrenze als Umschlagpunkt einer Phenolphthaleinlösung geht mit einer Mindestkonzentration der Alkalien in der Porenlösung einher. Aus der Literatur sind keine Calciumkonzentrationen der Porenlösung bezogen auf den Umschlagpunkt eines Indikators bekannt, sodass für die weitere Simulation nur Annahmen getroffen werden können. Für die weitere Auswertung bzw. Bewertung wird daher angenommen, dass zum Erreichen des Phenolphthaleinumschlagpunktes ein Wertebereich zwischen $c > 18$ mmol/L und $c < 21$ mmol/L maßgebend ist.

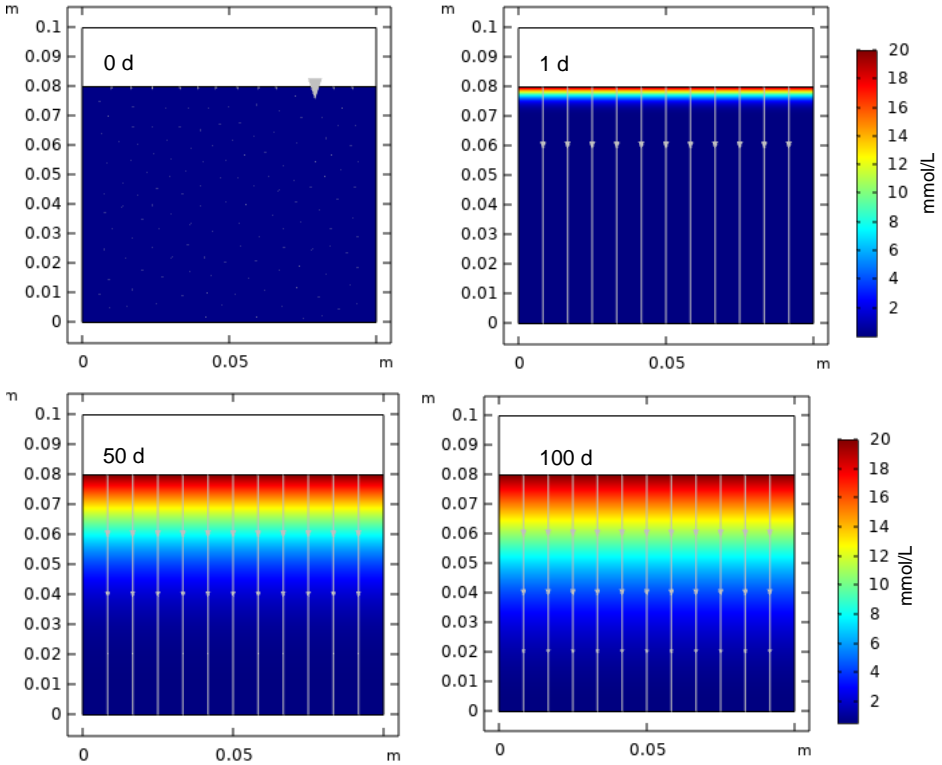


Abbildung 4-7: 2D-Visualisierung der Konzentrationsänderung für ausgewählte Versuchszeitpunkte

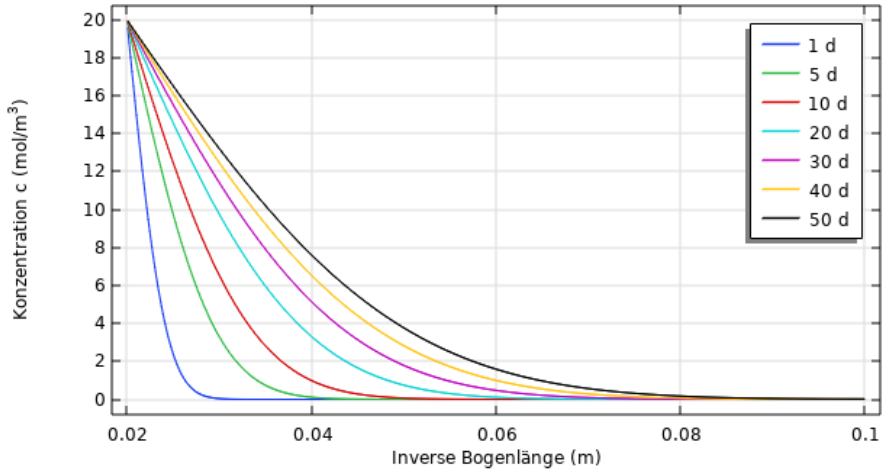


Abbildung 4-8: 1D-Visualisierung der tiefenabhängigen Konzentrationsveränderung für ausgewählte Versuchszeitpunkte

Damit die numerische Simulation mit dem untersuchten Realkalisierungsfortschritt als Bereich des Phenolphthaleinumschlags verglichen werden kann, wurde für den angenommenen Konzentrationsbereich ($c > 18$ mmol/L und $c < 21$ mmol/L) über die

Tiefe eine Linienintegration durchgeführt (vgl. Abbildung 4-9). Diese Art der Auswertung ermöglicht einen direkten Vergleich der Prüfergebnisse aus Abschnitt 3.3 und Verifizierung des in Abschnitt 4.2 aufgestellten Modells.

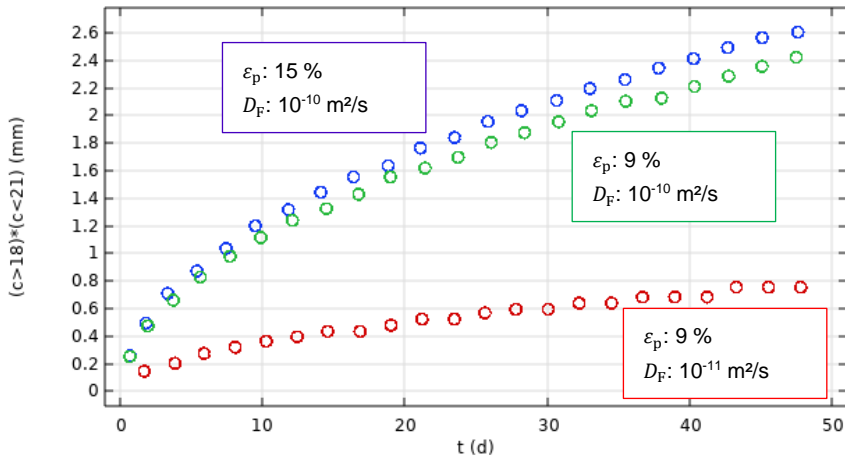


Abbildung 4-9: Exemplarische Auswertung der tiefenabhängigen Linienintegration bei Variation der Porosität und des Diffusionskoeffizienten

Bei einer konstanten Calciumsättigungskonzentration von 20 mmol/L stellen die Parameter Porosität des Betons und Diffusionskoeffizient (Fluid) die Variablen des numerischen Modells dar. Durch Variation der Variablen kann der jeweilige Einflussbereich abgeschätzt werden.

Folgende Rückschlüsse können daraus gezogen werden (vgl. Abbildung 4-9): Eine Porositätsänderung von $\varepsilon_p = 15\%$ (für Beton B2.1) auf $\varepsilon_p = 9\%$ (für Beton B2.3), bei gleichem Fluid Diffusionskoeffizienten führt erwartungsgemäß zu einem geringeren, zeitabhängigen Konzentrationsanstieg des definierten Konzentrationsbereiches. Die Abweichung der Ergebnisverläufe liegt nach ca. 50 d bei 0,2 mm.

Der Diffusionskoeffizient in Abhängigkeit von der Zementart stellt im Vergleich zur Porosität einen größeren Einfluss auf den Ergebnisverlauf der Simulation und somit auf den Realkalisierungsfortschritt dar. Eine Verringerung des Diffusionskoeffizienten von $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ auf $1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ führt bei gleicher Porosität zu einer Abweichung nach ca. 50 d um 1,6 mm. Wie in Abschnitt 2.3.5. beschrieben, ist der Diffusionswiderstand im wassergesättigten Porenraum von den geometrischen Eigenschaften der Betonstruktur, den Eigenschaften der Lösung und der Interaktion von Lösung und Beton abhängig.

Die Porosität des Betons ist aus der Charakterisierung des Betons (vgl. Abschnitt 3.3.3) bekannt. Somit verbleibt der Diffusionskoeffizient als unbekannte Variable. Über einen Abgleich der Linienintegration des Konzentrationsbereiches ($c > 18 \text{ mmol/L}$ und $c < 21 \text{ mmol/L}$) und der Realkalisierungsverläufe aus Abschnitt 4.2 kann auf die unbekannt Diffusionskoeffizienten geschlossen werden (vgl. Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Eingangsparameter der numerischen Simulation

Beton	Zementart	Porosität ¹⁾ ϵ_p [%]	D_F [m ² /s]	D_E [m ² /s]	Kontakt-realkalisierung ²⁾ [-]	Konzentration [mol/m ³]
B2.1	CEM I	15	unbekannte Variable	ergibt sich aus Gleichung (4-4)	0,017	c < 21 bis c > 18
B2.2	CEM II/A-LL	12				
B2.3	CEM III	9				
B1	CEM I	16			0,027	
B3	CEM I	10			0,007	

1) Gesamtporosität der charakterisierten Betone aus Abschnitt 3.3.3

2) Angenommene Faktoren, abgeleitet aus den experimentellen Untersuchungen

Ableitung der Diffusionskoeffizienten und Abgleich des numerischen Modells

In Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11 ist der zuvor beschriebene Abgleich des in Abschnitt 4.2 aufgestellten Modells und des numerischen Diffusionsmodells dargestellt. Anhand der sich überlappenden Ergebnisverläufe wird bestätigt, dass die Realkalisierung erwartungsgemäß über das 2. Fick'sche Diffusionsgesetz (Wurzel-Zeit-Gesetz) beschrieben werden kann. Die unter Abschnitt 4.2 aufgeführte, vereinfachte Berechnungsmethode wird dadurch im Rahmen der getroffenen Vereinfachungen und Annahmen validiert.

Die Eingangsparameter der numerischen Simulation zu den Ergebnisverläufen in Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11 sind in Tabelle 4-3 aufgeführt. Daraus ergibt sich, dass die für eine Realkalisierung verantwortlichen Alkalien bei den Betonen B1 bis B3 (w/z-Wert 0,8 bis 0,5) einen effektiven Diffusionskoeffizienten (Beton) zwischen ca. $1 \cdot 10^{-11}$ bis $0,5 \cdot 10^{-13}$ m²/s aufweisen (vgl. Tabelle 4-3, blau hinterlegt). Für B3 wurde nur anhand der ersten Messwerte der Verlauf für die numerische Modellierung abgeleitet, sodass eine gewisse Unsicherheit innerhalb des angesetzten Simulationszeitraums herrscht.

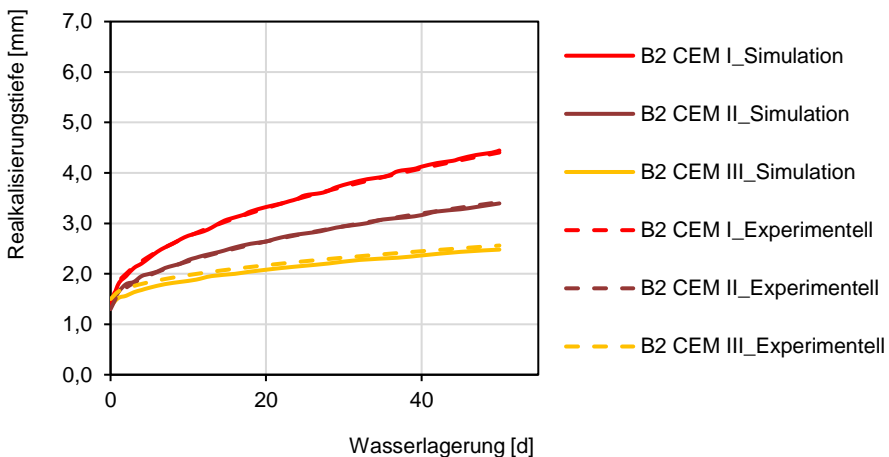


Abbildung 4-10: Ergebnisse der numerischen Simulation und experimentellen Untersuchungen zum Einfluss der Zementart, Beton B2

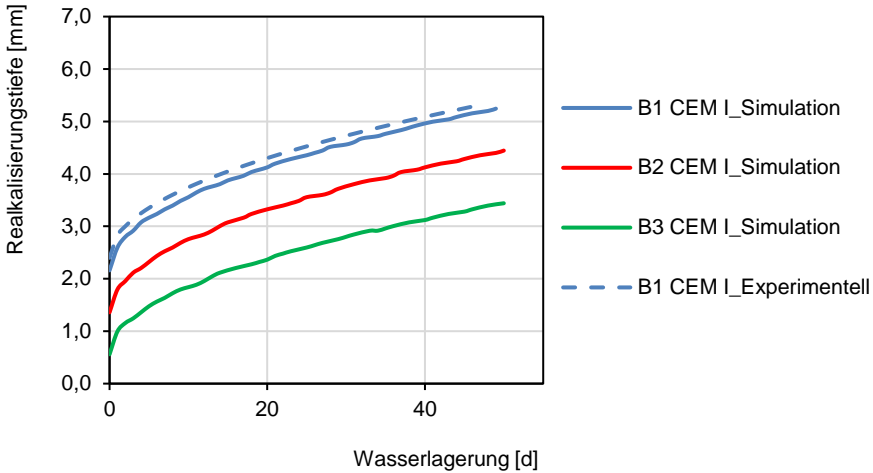


Abbildung 4-11: Numerische Simulation und experimentelle Untersuchungen zum Einfluss des w/z-Wertes

Tabelle 4-3: Auswertung von D_F und D_E anhand der numerischen Simulation

Beton	Zementart	Porosität	D_F [m ² /s]	D_E [m ² /s]	Kontakt- realkalisierung [-]	Konzentration [mol/m ³]
		ε_p [%]				
B2_1	CEM I	15	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$1,036 \cdot 10^{-11}$	0,017	c < 21 bis c > 18
B2_2	CEM II/A-LL	12	$0,6 \cdot 10^{-10}$	$0,355 \cdot 10^{-11}$		
B2_3	CEM III	9	$0,2 \cdot 10^{-10}$	$0,008 \cdot 10^{-11}$		
B1	CEM I	16	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$1,129 \cdot 10^{-11}$	0,027	c > 18
B3	CEM I	10		$0,005 \cdot 10^{-11}$	0,007	

Eine Plausibilitätsprüfung für die aus den numerischen Simulationen ermittelten effektiven Diffusionskoeffizienten der für die Realkalisierung verantwortlichen Alkalien kann derzeit nicht erfolgen. Aus der Literatur sind keine Diffusionskoeffizienten der für die Realkalisierung relevanten Alkalien bekannt. Auch ein Vergleich mit den Diffusionskoeffizienten für Chloride ist aus den folgenden Gründen nicht möglich bzw. zielführend:

- Die Bestimmung des Chlorideindringwiderstandes wird mit Hilfe des Schnellmigrationsverfahrens (RCM – Rapid Chlorid Migration) ermöglicht. Als Materialvariable wird der Chloridmigrationskoeffizient $D_{RCM,0}$ aus Laborversuchen herangezogen. Die direkte Korrelation zwischen dem Chloridmigrationskoeffizienten D_{RCM} und dem nicht stationären Diffusionskoeffizienten D_{nss} wurde in der Literatur nachgewiesen (vgl. [Gehlen, 2000; Tang et. al, 2010; u.a.]). Die Ionenbeweglichkeit wird hierbei durch ein elektrisches Feld beeinflusst und beschleunigt. Die Lösungszusammensetzung übt einen Einfluss auf die ermittelten Diffusionskoeffizienten aus [Snyder u. Marchand, 2001]. Die Diffusionsrate des Kations und Anions im Zementstein ist unterschiedlich. Wenn sich ein Chloridion (Anion) entlang des Konzentrationsgradienten bewegt, wird

durch das langsamere Kation ein elektrisches Gegenfeld erzeugt. Dieser physikalische Zusammenhang gilt auch für bspw. Calciumhydroxid. Hydroxidionen als Anion und Calcium als Kation beeinflussen sich gegenseitig und somit auch die Diffusionsrate. Inwieweit eine Übertragbarkeit des Schnellmigrationsverfahrens auf die Diffusionskoeffizienten von Alkalien gegeben ist, ist nicht bekannt.

Aus der Literatur sind keine Chloridmigrationskoeffizienten für vollständig carbonatisierte Betone mit einer für diese Arbeit vergleichbaren Betonzusammensetzung bekannt. Die Carbonatisierung des Betons übt einen Einfluss auf die Mikrostruktur des Zementsteins und deren Porenradienverteilung aus. In Abhängigkeit von der Zementart wird die Gesamtporosität verringert und der Gelporenanteil reduziert (vgl. Abschnitt 2.2.3). Die Diffusionskoeffizienten für den Transport der in Wasser gelösten Alkalien verändern sich entsprechend. Wie hoch diese Beeinflussung ist, kann aktuell nicht abgeschätzt werden. Für eine Vergleichbarkeit könnte der Chloridmigrationskoeffizient der für diese Arbeit verwendeten Altbetone ermittelt werden. Mit diesen Kennwerten wäre eine Bewertung bzw. Ableitung eines effektiven Diffusionskoeffizienten für Alkalien denkbar.

- Nach [Bier, 1988] werden die Alkalien in der carbonatisierten Zementsteinmatrix gebunden. Die Bindekapazität ist u. a. abhängig vom Silikatgehalt des carbonatisierten Zementsteins. Für Chloride ist bekannt, dass eine Carbonatisierung die Bindekapazität reduziert [Dahme, 2006]. Zuvor gebundene Chloride werden dadurch frei beweglich. Für die Alkalien- bzw. Chloriddiffusion stellt sich somit ein gegenteiliger Effekt ein.

Folgende Schlussfolgerungen sind zum Alkaliendiffusionskoeffizienten anhand der numerischen Simulation ableitbar. Hierbei können auch die Erkenntnisse zur Chloriddiffusion von Beton im wassergesättigten Zustand miteinbezogen werden.

- Der Alkalientransport innerhalb des Porenraums ist von der Porosität des Zementsteins und der Tortuosität des Porensystems abhängig. Höhere Porositäten führen zu einem höheren Realkalisierungspotenzial.
 - Die Porosität wird im Wesentlichen durch die Zementart, die Zugabe von Zusatzstoffen, dem w/z-Wert und der Hydratation beeinflusst.
- Das Realkalisierungspotenzial und der Diffusionskoeffizient der Alkalien sind abhängig von der Zementart des zu beschichtenden Untergrunds.
 - Vergleichbar mit einer Chloriddiffusion weist ein Portlandzement (CEM I) generell die größten Diffusionskoeffizienten auf. Die relativ hohe Durchlässigkeit [Page et al.; 1981] wird auf die hohe Porosität sowie die geringe Bindekapazität von Chloriden [Frey, 1991; Tang u. Nilsson, 1988] zurückgeführt. Hochofenzementhaltige Betone (CEM III) weisen tendenziell die niedrigsten Diffusionskoeffizienten auf [Rahimi, 2017; Raupach, 1992; Gehlen, 2000a].

4.4 Diskussion der Ergebnisse

Für die Modellbildung wurden vier verschiedene Zielsetzungen formuliert, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Zielsetzung 7: Physikalischer Zusammenhang zum Ablauf der Realkalisierung

Im wassergesättigten Beton kann die Realkalisierung über das 2. Fick'sche Diffusionsgesetz (Wurzel-Zeit-Gesetz) beschrieben werden. Über die Modellbildung (experimentell und numerisch) konnte der Verlauf der Realkalisierung abgeleitet und im Rahmen der getroffenen Vereinfachungen und Annahmen validiert werden.

Die kapillare Wasseraufnahme des Betons wird durch die „Selbstabdichtung“ in die Tiefe hin begrenzt. Wann und in welcher Tiefe die Selbstabdichtung den Alkalientransport beeinflusst, konnte aus den Untersuchungen und aus dem Modell nicht abgeleitet werden.

Im teilwassergesättigten Porenraum, wie bspw. bei einer hohen relativen Luftfeuchte (95 % r. F. bis 100 % r. F.), besteht nur anfänglich ein Wurzel-Zeit-Gesetz bei der Realkalisierung des Betons. Mit zunehmender Zeit flacht der Verlauf ab und nähert sich einer horizontalen Asymptote an. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, läuft der Transport der Alkalien über Diffusion im Sorbatfilm an der Porenoberfläche ab. Die kapillare Wasseraufnahme und somit auch eine Realkalisierung sind in die Tiefe begrenzt. Dieser Transport ist insgesamt ineffektiver als die Diffusion von Alkalien im wassergesättigten Porenraum. Ein teilwassergesättigter Porenraum wurde nur anhand der experimentellen Untersuchungen betrachtet. Die Untersuchungen zeigten, dass nach ca. zwei Wochen ein weiterer Realkalisierungsfortschritt zum Erliegen kam.

Der Mörtel M9 (Typ 3) und der Mörtel M5 (Calcium-Aluminat-Zement) zeigten ebenfalls eine anfängliche Abweichung vom Wurzel-Zeit-Gesetz. Bei beiden Mörteln war eine effektivere Anfangsrealkalisierung in den ersten 14 Tagen festzustellen. Anschließend flachte der weitere Realkalisierungsfortschritt ab. Die Abweichung kann damit begründet werden, dass kein kontinuierlicher Fluss bzw. keine gleichbleibende Konzentration von Alkalien aus dem Instandsetzungsmörtel besteht und der Alkalitätspuffer zu gering ist (vgl. Abschnitt 3.3.6).

Zielsetzung 8: Vereinfachtes Modell zum Realkalisierungsfortschritt

Im wassergesättigten Porenraum konnte anhand der Untersuchungsergebnisse in Kombination mit der bestehenden Wurzel-Zeit-Beziehung ein vereinfachtes Modell abgeleitet werden (vgl. Abschnitt 4.2). Durch die numerische Modellierung konnte das Modell im Rahmen der getroffenen Vereinfachungen und Annahmen validiert werden.

Zielsetzung 9/10: Bewertung der bestehenden Einflussfaktoren und Abgrenzung weiterer Einflussfaktoren

Die aus dem Arbeitsschwerpunkt 2 (vgl. Abschnitt 3.3.) beschriebenen Einflussfaktoren wie Feuchteangebot, kunststoffhaltige Zusätze des Mörtels, Zementart des Untergrundbetons und Zementart der mineralischen Beschichtung sowie Porosität des Untergrundbetons bestehen weiterhin. Die numerische Modellierung bestätigte, dass die Porosität des Untergrundbetons einen geringeren Einfluss auf den Verlauf der Realkalisierung ausübt als die Zementart des Untergrundbetons.

Als übergeordneter Parameter für alle Einflussfaktoren im wassergesättigten Porenraum ist der effektive Diffusionskoeffizient zu definieren. Der Diffusionswiderstand des Betons setzt sich dabei aus einer Interaktion von

geometrischen Eigenschaften der Betonstruktur, der Lösungszusammensetzung, der Interaktion von Lösung und Beton und der Eigenbeweglichkeit der Moleküle zusammen (vgl. Abschnitt 2.3.5).

Für den Nachweis der Realkalisierung als Umschlagbereich des Indikators Phenolphthalein ist die verantwortliche Calciumkonzentration relevant. Als Annahme der Modellierung wurde ein Konzentrationsbereich von ($c > 18$ mmol/L und $c < 21$ mmol/L) angenommen. Die Richtigkeit dieser Annahme konnte im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht überprüft werden.

Transfer zur Praxis

Das aufgestellte Modell und die daraus ermittelten effektiven Diffusionskoeffizienten gelten nur bei Wassersättigung des Porenraums und bei zuvor carbonatisierten Betonuntergründen. Die experimentellen Untersuchungen (vgl. Abschnitt 3.3) haben gezeigt, dass eine diffusionsgesteuerte Realkalisierung nur bei Wassersättigung möglich ist. Bei geringeren relativen Luftfeuchten wie bspw. 60 % r. F. oder 80 % r. F. findet infolge der Diffusion von Alkalien keine messbare Realkalisierung als Umschlagpunkt des Indikators Phenolphthalein statt. Eine Carbonatisierung ist bei einer relativen Luftfeuchte von 100 % oder bei Wassersättigung des Porengefüges nicht zu erwarten, da kein CO₂ in den Beton eindringt.

Sollte eine Carbonatisierung des Betons vorliegen und eine Realkalisierung des Betons auf Grundlage des Auskleidungsprinzips A1 nach DVGW-Arbeitsblatt W 300-3 gewünscht werden, kann aufgrund der Umgebungsbedingungen, die eine Carbonatisierung ermöglicht haben, im Umkehrschluss auch keine Realkalisierung gewährleistet werden. Für die Instandsetzung von Trinkwasserbehältern besteht daher nur ein Sonderfall, der eine grundsätzliche Realkalisierung der Betonrandzone ermöglichen könnte. Die Carbonatisierung des Betons müsste durch eine längere Außerbetriebnahme des Behälters hervorgerufen werden. Nach der Instandsetzung müsste der Behälter wieder in Betrieb genommen werden und die vorherrschenden Umgebungsbedingungen müssten so beschaffen sein, dass eine Realkalisierung gewährleistet wird.

Für eine Instandsetzung im Hochbau kann das aufgestellte Modell nicht angewendet werden. Auch im Hochbau ist nach der Applikation des Instandsetzungsmörtels von keiner dauerhaften Wassersättigung des Porenraums auszugehen. Die Realkalisierung der Betonrandzone wird nur den Bereich der Kontaktreakalisierung betreffen. Sobald sich eine Ausgleichsfeuchte einstellt, wird die diffusionsgesteuerte Realkalisierung zum Erliegen kommen. Für die weitere Bewertung ist kein Modell notwendig, da keine nennenswerte Realkalisierung stattfinden wird.

5 Mögliche Regelwerksanpassungen im Trinkwasserbereich

5.1 Zielsetzung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden in zwei Untersuchungsschwerpunkten die Alkalienabgabe und die damit verbundene Beständigkeit gegenüber Auslaugung (vgl. Abschnitt 3.2) und das Realkalisierungspotenzial (vgl. Abschnitt 3.3) von mineralischen Beschichtungen experimentell untersucht und ausgewertet. In dem folgenden Abschnitt sollen die Ergebnisse hinsichtlich der Verwertung in der Praxis bewertet und Vorschläge zu möglichen Regelwerksanpassungen aufgezeigt werden. Die Bewertung bezieht sich ausschließlich auf die Anwendung im Trinkwasserbereich und auf die hierfür maßgebenden Regelwerke.

5.2 Anpassungen der Auskleidungsprinzipien

Im DVGW-Arbeitsblatt W 300-3 konnte bisher das „Realkalisierungsdepot“ nicht ausreichend spezifiziert werden. Grundsätzliche Voraussetzungen, Anwendungsgrenzen oder die Beschreibung der technischen Grundsätze werden im Regelwerk nicht weiter erläutert. Auf Grundlage der Ergebnisse aus Kapitel 3 sollen im Folgenden Anpassungsmöglichkeiten der aktuell formulierten Auskleidungsprinzipien bei Verwendung von zementgebundenen Beschichtungen aufgezeigt werden. Die grundlegenden Anwendungsregeln von zementgebundenen Beschichtungen als Auskleidungen sind in Abschnitt 1.2 beschrieben.

Bei der Überarbeitung des Regelwerks wird empfohlen, ein anwendungsfreundliches Ablaufschema für die Instandsetzung mit zementgebundenen Beschichtungen aufzunehmen (vgl. Abbildung 5-1). Eine Abfrage von insgesamt vier Unterscheidungskriterien ermöglicht dem Anwender auf vereinfachte Weise die Ermittlung des Instandsetzungsbedarfs. Folgende Unterscheidungskriterien werden hierbei zugrunde gelegt.

- **Unterscheidung der Bauteillage** in Abhängigkeit von der maximalen Einstauhöhe: Unterschiedliche Schadensmechanismen können zu einer Beton- und/oder Bewehrungskorrosion führen. Die Auswahl der Instandsetzungsprinzipien soll unabhängig von der Bauteillage möglich sein. Im Folgenden wird der Zusammenhang der unterschiedlichen Schadensmechanismen in Bezug auf die Bauteillage informativ beschrieben.

Unterhalb der Wasserwechselzone ist von einer dauerhaften Wassersättigung der Bauteilrandzone auszugehen. Eine Carbonatisierung ist demnach zu vernachlässigen (vgl. Abschnitt 2.2.3) und muss daher als Instandsetzungsvariante nicht betrachtet werden. Eine Auslaugung als ungestörter Lösungsprozess tritt nur bei mineralstoffarmem bzw. mineralstofffreiem Wasser auf. Unter Einhaltung der in der Trinkwasserverordnung definierten Grenzwerte ist über die Betriebszeit eine Auslaugung und damit verbundene Werkstoffzerstörung, wenn überhaupt, ausschließlich in der Bauteilrandzone (wenige Millimeter) möglich. Ein Hinweis

darauf, dass aggressivere Bedingungen (hohe Calcitlösekapazität und sehr weiches Wasser) zur Zementsteinzerstörung führen können, sollte im Regelwerk mit aufgenommen werden. Im Rahmen der Ist-Zustandsbewertung sollte die Wasseranalyse des Trinkwassers für die Auswahl des Auskleidungsprinzips mit aufgenommen und bewertet werden. Die Ergebnisse aus Abschnitt 3.2 zeigen, dass beispielsweise ein Typ 3 bzw. Typ 4 Mörtel oder ein Sonderzement einen höheren Auslaugwiderstand aufweisen. Davon ausgenommen ist der Schadensmechanismus der hydrolytischen Korrosion, der in Abhängigkeit von der Porosität des Werkstoffs und des betriebsbedingten „Pumpeffekts“ [Boos u. Breit, 2010] entstehen kann. Dieser kann unabhängig von der Wasserqualität auftreten.

Oberhalb der Wasserwechselzone herrscht i. d. R. eine hohe Luftfeuchtigkeit ($\geq 95\%$), sodass eine Carbonatisierung der Betonrandzone zu vernachlässigen ist (vgl. Abschnitt 2.2.3). An der Deckenfläche der Wasserkammer können sich aufgrund der hohen Luftfeuchtigkeit ($\sim 100\%$ r. F.) im Behälter Kondensattropfen an der Mörtel- bzw. Betonoberfläche bilden. Die Zusammensetzung des Kondenswassers unterscheidet sich vom Trinkwasser, da ein Wechsel des Aggregatzustandes eine Destillation bewirkt und somit einen geringeren Mineralstoff- und Ionenanteil aufweist (vgl. Abschnitt 2.1.6). Eine Auslaugung, wie sie in Abschnitt 3.2.6 beschrieben wird, kann stattfinden. Sollte betriebsbedingt eine gute Belüftung oberhalb der Wasserwechselzone bestehen, kann eine CO_2 -Diffusion zu einer Carbonatisierung der Betonrandzone führen.

- **Visuelle Auffälligkeiten und Mindestbetondeckung:** zwischen $c_{\min} \geq 25$ mm und $c_{\min} < 25$ mm: I. d. R. besteht bei einer Betondeckung $c_{\min} \geq 25$ mm kein Instandsetzungsbedarf in Hinblick auf eine mögliche Bewehrungskorrosion. Findet jedoch eine hydrolytische Korrosion des Betons statt oder liegt ein gestörtes Betongefüge (Kiesnester, Fehlstellen etc.) vor, ist im Einzelfall zu überprüfen, ob eine Instandsetzung in Betracht gezogen werden sollte. Sind visuelle Auffälligkeiten der Wasserkammer bekannt, ist grundsätzlich von einem Instandsetzungsbedarf auszugehen. Im Rahmen einer Ist-Zustandsanalyse ist zu überprüfen, welche Betondeckungen vorliegen, damit die vorliegende Mindestbetondeckung bewertet werden kann. Wie bereits beschrieben sollte in Anlehnung an das DBV-Merkblatt „Betondeckung und Bewehrung“ die Mindestbetondeckung c_{\min} als 5 %-Quantil definiert werden. In den Unterscheidungskriterien wird bewusst die Mindestbetondeckung nicht aufgeführt, da insbesondere alte Behälter trotz zu geringer Betondeckung im Einzelfall keinen kurzfristigen Instandsetzungsbedarf aufweisen, solange keine visuellen Auffälligkeiten bestehen und eine ausreichende Alkalitätsgrenze zur Bewehrung vorliegt.
- **Unterscheidung bei einer geschädigten Betonrandzone:** Bisher stand die Sicherstellung des Korrosionsschutzes (Bewehrungskorrosion) bei der Instandsetzung von Trinkwasserbehältern im Vordergrund. Sollte eine geschädigte Betonrandzone vorliegen, besteht ebenfalls ein Instandsetzungsbedarf. Dazu zählt nicht nur ein Alkalitätsabfall, sondern ebenso die Zementsteinzerstörung im Fall einer Auslaugung oder hydrolytischen

Korrosion oder auch eine qualitativ unzureichende Beton- und Mörtelrandzone (Fehlstellen, Kiesnester, Porositäten etc.). Eine Instandsetzung dieser Bereiche ist erforderlich, unabhängig davon, ob bereits eine unzureichende Betonqualität bei der Errichtung nach heutigem Stand der Technik vorlag oder ob eine durch einen Schadensmechanismus ausgelöste Werkstoffveränderung stattfand.

- **Unterscheidung der Alkalitätsgrenze:** Zur Sicherstellung des Korrosionsschutzes der Bewehrung ist ein ausreichendes alkalisches Milieu um die Bewehrung erforderlich. Für die Ermittlung des Instandsetzungsbedarfs werden drei Unterscheidungsvarianten ausgewiesen, damit das mögliche Instandsetzungsprinzip ausgewählt werden kann ($d_{a,min} \geq 10$ mm bzw. $d_{a,min} \geq d_{Stahl}$, 10 mm $\geq d_{a,min} \geq 5$ mm und $d_{a,min} < 5$ mm). Wenn die Alkalitätsgrenze $d_{a,min} \geq 10$ mm bzw. $d_{a,min} \geq d_{Stahl}$ ist, kann eine mineralische Auskleidung vom Typ 1 bis Typ 4 mit ausgewählten Zementen zum Einsatz kommen. Die mineralische Auskleidung braucht in diesem Fall keinen definierten Alkalitätspuffer oder Einschränkungen bzgl. der Zusammensetzung, da das Prinzip A2 ausschließlich die Oberfläche verbessern soll und die noch vorliegende Alkalitätsgrenze die Passivität des Bewehrungsstahls sicherstellt. Ein weiterer Alkalitätsabfall ist, solange die mineralische Auskleidung intakt ist, nicht zu befürchten.

Sobald die Alkalitätsgrenze $d_{a,min} < 10$ mm beträgt, liegt i. d. R. auch eine zu geringe Betondeckung vor. Ab dieser Grenze ist mit einem Betonersatzsystem (Prinzip A1) instand zu setzen. Damit ein ausreichender Alkalitätspuffer des Betonersatzes gewährleistet wird, sind Einschränkungen bzgl. Zementart und Typ zu berücksichtigen. Eine Realkalisierung einer möglicherweise carbonatisierten oder ausgelaugten Betonrandzone wird nicht zu Grunde gelegt, da das neue alkalische Milieu ausschließlich einen pH-Wert nahe des Phenolphthaleinumschlagpunktes darstellt und die Beständigkeit der Realkalisierung hauptsächlich von der Umgebungsfeuchte abhängt. Insbesondere bei einer carbonatisierten Betonrandzone kann nicht erwartet werden, dass eine Realkalisierung eintritt. Ein weiterer Alkalitätsabfall ist bei einem intakten Betonersatz nicht zu befürchten. Der Zustand wird demnach „eingefroren“.

Bei einer Alkalitätsgrenze von $d_{a,min} < 5$ mm reicht das alkalische Milieu nicht mehr zur Sicherstellung der Passivität des Bewehrungsstahls für die weitere Nutzung aus. Die carbonatisierte oder ausgelaugte Betonrandzone ist abzutragen und mit einem Betonersatzsystem zu ersetzen.

- **Für alle Prinzipien:** Die Anforderungen an die Zusammensetzung der zementgebundenen Beschichtung (Zementart und Mörteltyp) sind in Tabelle 5-1 und Tabelle 5-2 zusammengefasst. Die im DVGW-Arbeitsblatt W 300-5 festgelegten Anforderungen (bspw. Druckfestigkeit, Porosität) bleiben weiterhin bestehen.
- **Prinzip A1:** Das Prinzip A1 umfasst Maßnahmen zum Erhalt der Passivität oder Wiederherstellung der Passivität des Bewehrungsstahls sowie zur Erhöhung der

Betondeckung. Sollte eine geschädigte Betonrandzone vorliegen, ist der geschädigte Bereich abzutragen und zu ersetzen. Wenn kein ausreichendes alkalisches Milieu vorliegt, ist der Beton im geschädigten bzw. ausgelaugten und/oder carbonatisierten Bereich zu ersetzen. Der Betonersatz kann über die gesamte Tiefe des Abtrags oder in Kombination mit einer mineralischen Beschichtung erfolgen.

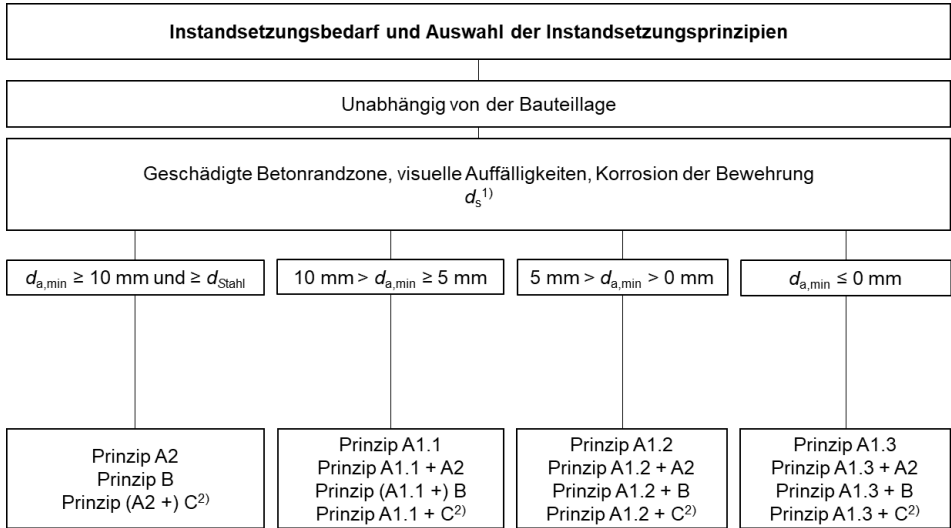
Prinzip A1.1: Die Schädigungstiefe hat die Bewehrung nicht erreicht. Die vorliegende Alkalitätsgrenze ist zur Sicherstellung des Korrosionsschutzes ausreichend. Es ist nachzuweisen, dass ein Teilbereich der geschädigten Betonrandzone verbleiben kann (bspw. Carbonatisierung mit ausreichend tragfähigem Untergrund). Die Anwendungsgrenzen sind in Abbildung 5-3 dargestellt.

Prinzip A1.2: Die Schädigungstiefe hat die Bewehrung noch nicht erreicht. Bewehrungskorrosion ist bisher noch nicht aufgetreten. Bei der Schädigungstiefe ist nicht relevant, ob ausschließlich ein Alkalitätsabfall und/oder eine geschädigte Betonrandzone vorliegt. Der geschädigte Beton ist abzutragen und zu ersetzen, da der bestehende Alkalitätspuffer zur Sicherstellung der Passivität des Bewehrungsstahls nicht ausreicht. Bei der Schädigungstiefe ist nicht relevant, ob ausschließlich ein Alkalitätsabfall und/oder eine geschädigte Betonrandzone vorliegt. Die Anwendungsgrenzen sind in Abbildung 5-4 dargestellt.

Prinzip A1.3: Die Schädigungstiefe reicht bis zur Bewehrung. I. d. R. liegt eine Bewehrungskorrosion aufgrund einer zerstörten Passivschicht vor. Bei der Schädigungstiefe ist nicht relevant, ob ausschließlich ein Alkalitätsabfall und/oder eine geschädigte Betonrandzone vorliegt. Der Beton ist bis hinter die Bewehrung zu entfernen und zu ersetzen, damit die Passivität des Bewehrungsstahls wiederhergestellt werden kann. Das Prinzip A1.3 ist als lokale Instandsetzung zu sehen, bei der bspw. zu geringe Betondeckungen in Verbindung mit einer Auslaugung bzw. Carbonatisierung zur Bewehrungskorrosion geführt haben. Sollte eine flächige Korrosion auftreten, ist eine Gutachterlösung erforderlich. Die Anwendungsgrenzen sind in Abbildung 5-5 dargestellt.

- **Prinzip A2:** Das Prinzip A2 umfasst Maßnahmen zum Erhalt der Passivität des Bewehrungsstahls und Verbesserung der Betonoberflächen. Sollte eine geschädigte Betonrandzone vorliegen, ist der geschädigte Bereich abzutragen und zu ersetzen. Eine Anrechnung auf die Betondeckung ist möglich, wenn die definierten Einschränkungen des Typs und der Zementart angewendet werden. Es ist nachzuweisen, dass ein Teilbereich der geschädigten Betonrandzone verbleiben kann (bspw. Carbonatisierung mit ausreichend tragfähigem Untergrund). Die Anwendungsgrenzen sind in Abbildung 5-2 dargestellt.

Kapitel 5: Anpassungen im Umgang mit mineralischen Beschichtungen



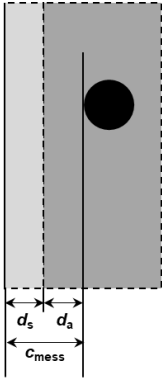
1) Dazu zählen u. a.: gestörtes oder aufgeweichtes Betongefüge, Festigkeitsverluste, hydrolytische Korrosion, Hohlräume im Bereich der Bewehrung, Kiesnester

2) Bei Anwendung des Prinzip C sind zusätzliche Randbedingungen zu beachten.

Abbildung 5-1: Ermittlung des Instandsetzungsbedarfs und Auswahl der Instandsetzungsprinzipien mit zementgebundenen Beschichtungen

$d_{a,min} \geq 10 \text{ mm}$ und $\geq d_{Stahl}$

VOR INSTANDSETZUNG



c_{mess} = ermittelte Betondeckung

mit

$d_s + d_a$ in mm

d_s = Schädigungstiefe¹⁾

d_a = Alkalitätsgrenze

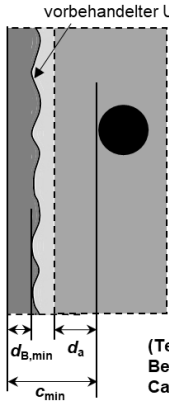
mit

$d_{a,min} \geq 10 \text{ mm}$

1) Bei einem Alkalitätsabfall der Betonrandzone ohne Beeinträchtigungen des Betongefüges wie bspw. bei einer Carbonatisierung ist die Qualität der Betondeckung bis zur Alkalitätsgrenze zu überprüfen. Bei ausreichender Qualität kann im Einzelfall die Betondeckung erhalten bleiben und muss nicht abgetragen werden.

Mindestvoraussetzung zum Erhalt der Betonrandzone: Oberflächenzugfestigkeit von 1,0 N/mm² (kleinster Einzelwert) und Mittelwert 1,5 N/mm², keine Gefügeschädigungen, Kiesnester etc.

NACH INSTANDSETZUNG – Prinzip A2 (mineralische Beschichtungen)



vorbehandelter Untergrund³⁾⁴⁾

c_{min} = Mindestbetondeckung

mit

$c_{min} \geq 20 \text{ mm}$ ¹⁾²⁾

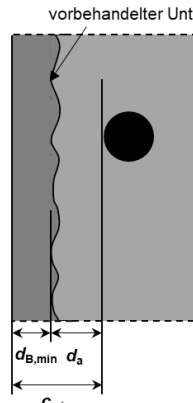
$d_{B,min}$ = Dicke der mineralischen Beschichtung

mit

$d_{B,min} \geq 5 \text{ mm}$ oder

$d_{B,min} \geq c_{min} - d_{a,min}$

(Teilabtrag der geschädigten Betonrandzone bspw. bei Carbonatisierung)



vorbehandelter Untergrund⁴⁾

c_{min} = Mindestbetondeckung

mit

$c_{min} \geq 20 \text{ mm}$ ¹⁾²⁾

$d_{B,min}$ = Dicke der mineralischen Beschichtung

mit

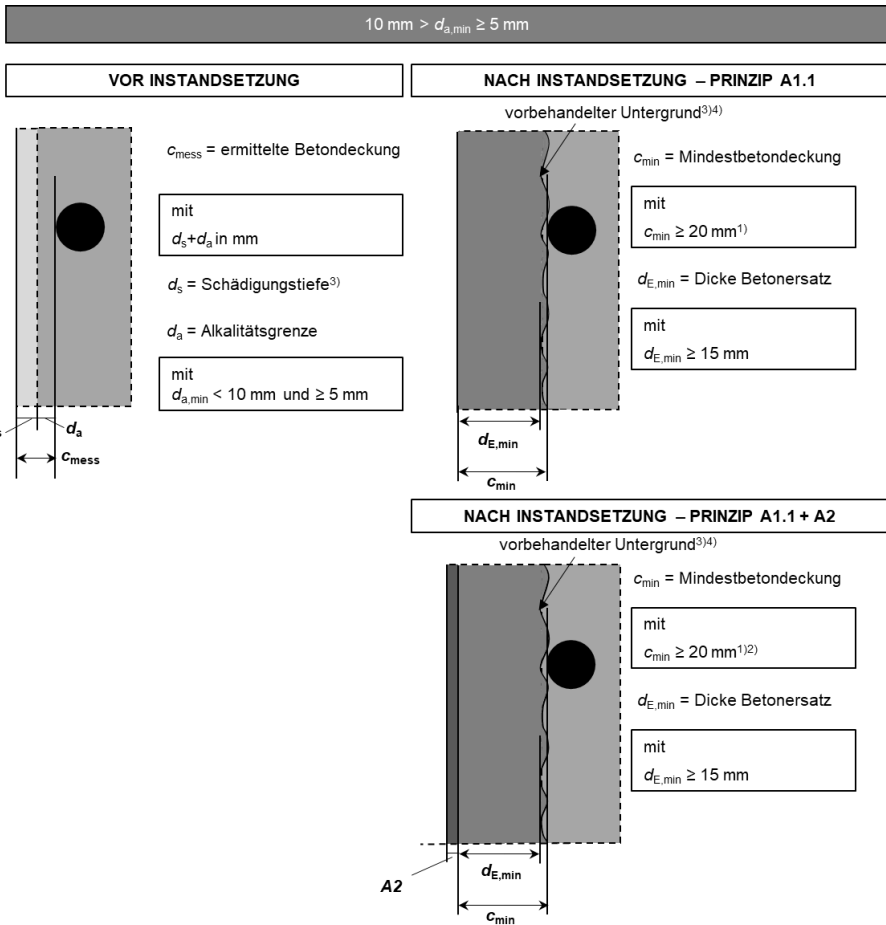
$d_{B,min} \geq 5 \text{ mm}$ oder

$d_{B,min} \geq c_{min} - d_{a,min}$

(vollständiger Abtrag der geschädigten Betonrandzone bspw. bei Auslaugung mit Absandungserscheinungen)

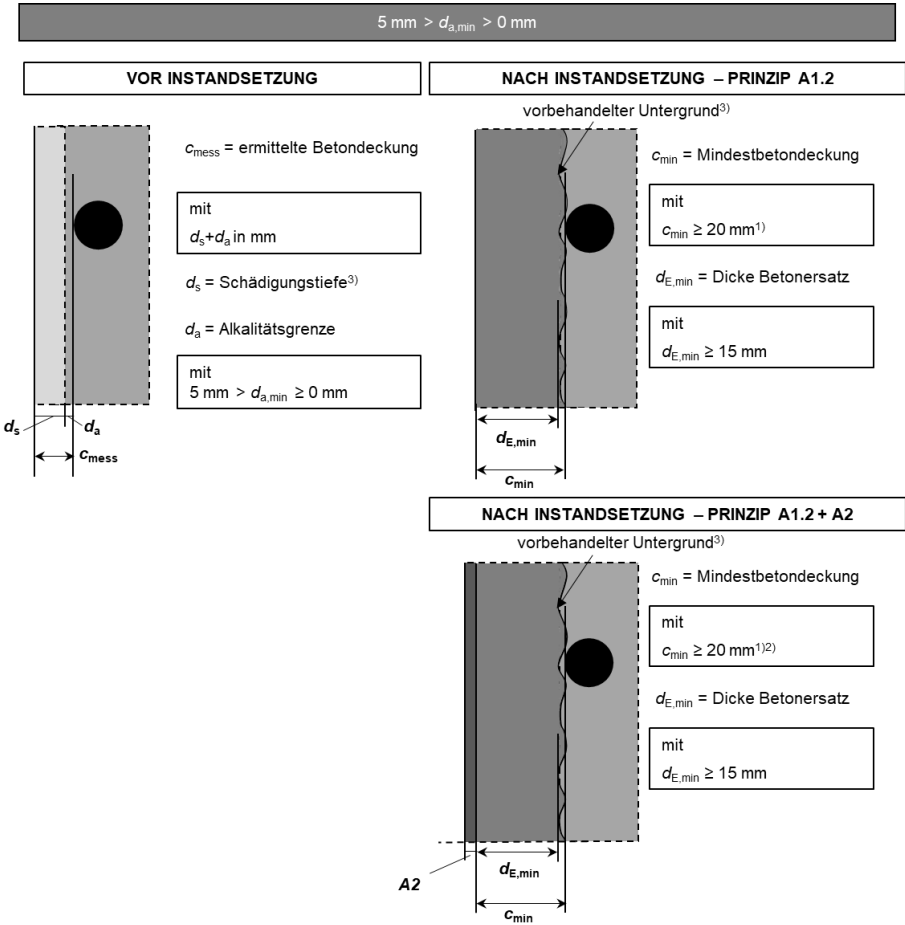
- 1) Mineralische Beschichtung darf auf die Betondeckung angerechnet werden, wenn Tabelle 5.1 und 5.2 Spalte 2 eingehalten.
- 2) Abminderung der Betondeckung von $c_{min} \geq 25 \text{ mm}$ auf $c_{min} \geq 20$ bzw. $c_{min} \geq c_{Stahl}$ mm mit nachgewiesenem Hydrolysewiderstand der mineralischen Beschichtung (siehe DVGW-Arbeitsblatt W 300-5)
- 3) Geschädigte Betonrandzone (d_s) darf auf die Betondeckung angerechnet werden und erhalten bleiben, wenn die Qualität bis zur Alkalitätsgrenze (d_a) nachgewiesen wurde.
- 4) Im Rahmen der Untergrundvorbereitung ist eine Rautiefenklasse RT 1,0 zu erzielen. Sollte ein Beton nach DVGW-Arbeitsblatt W 300-1 zum Einsatz kommen, ist eine Rautiefenklasse RT 1,5 nachzuweisen. Die Herstellerangaben sind zu beachten.

Abbildung 5-2: Instandsetzungsprinzip A2 bei $d_{a,min} \geq 10 \text{ mm}$ bzw. $d_{a,min} \geq d_{Stahl}$



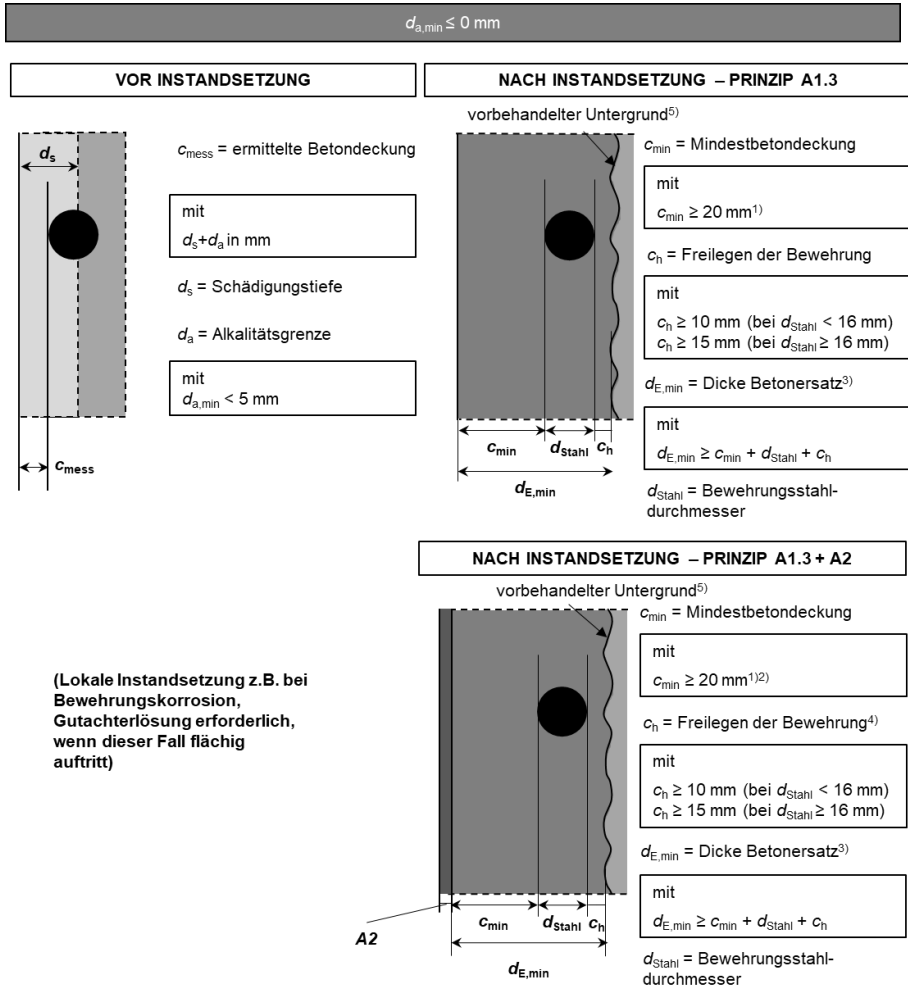
- 1) Abminderung der Betondeckung von $c_{\text{min}} \geq 25 \text{ mm}$ auf $c_{\text{min}} \geq 20 \text{ mm}$ mit nachgewiesenen Hydrolysewiderstand des Betonersatzes (siehe DVGW-Arbeitsblatt W 300-5)
- 2) Deckschicht mit mineralischer Beschichtung: Abminderung der Betondeckung von $c_{\text{min}} \geq 25 \text{ mm}$ auf $c_{\text{min}} \geq 20 \text{ mm}$ und $c_{\text{min}} \geq c_{\text{Stahl}}$ mit nachgewiesenen Hydrolysewiderstand der mineralischen Beschichtung – Prinzip A2 (siehe DVGW-Arbeitsblatt W 300-5). Mineralische Beschichtung darf auf die Betondeckung angerechnet werden, wenn Tabelle 5.1 und 5.2 Spalte 2 eingehalten wird.
- 3) Im Rahmen der Untergrundvorbereitung ist eine Rautiefenklasse RT 1,0 zu erzielen. Sollte ein Beton nach DVGW-Arbeitsblatt W 300-1 zum Einsatz kommen, ist eine Rautiefenklasse RT 1,5 nachzuweisen. Die Herstellerangaben sind zu beachten.
- 4) Lösung im Einzelfall, ausschließlich bei Alkalitätsabfall durch Carbonatisierung: Bei ausreichender Qualität kann im Einzelfall für die Prinzipien A und B die carbonatisierte Betondeckung erhalten bleiben und muss nicht abgetragen werden. Mindestvoraussetzung: Mindestoberflächenzugfestigkeit von $1,5 \text{ N/mm}^2$, keine Gefügeschädigungen, Kiesnester etc. Qualität der Betondeckung bis zur Alkalitätsgrenze ist zu überprüfen.

Abbildung 5-3: Instandsetzungsprinzip A1.1 und A1.1 + A2 bei $10 \text{ mm} \geq d_{a,\min} \geq 5 \text{ mm}$



- 1) Abminderung der Betondeckung von $c_{\text{min}} \geq 25 \text{ mm}$ auf $c_{\text{min}} \geq 20 \text{ mm}$ mit nachgewiesenen Hydrolysewiderstand des Betonersatzes (siehe DVGW-Arbeitsblatt W 300-5)
- 2) Deckschicht mit mineralischer Beschichtung: Abminderung der Betondeckung von $c_{\text{min}} \geq 25 \text{ mm}$ auf $c_{\text{min}} \geq 20 \text{ mm}$ und $c_{\text{min}} \geq c_{\text{Stahl}}$ mit nachgewiesenen Hydrolysewiderstand der mineralischen Beschichtung – Prinzip A2 (siehe DVGW-Arbeitsblatt W 300-5). Mineralische Beschichtung darf auf die Betondeckung angerechnet werden, wenn Tabelle 5.1 und 5.2 Spalte 2 eingehalten wird.
- 3) Im Rahmen der Untergrundvorbereitung ist eine Rautiefenklasse RT 1,0 zu erzielen. Sollte ein Beton nach DVGW-Arbeitsblatt W 300-1 zum Einsatz kommen, ist eine Rautiefenklasse RT 1,5 nachzuweisen. Die Herstellerangaben sind zu beachten.

Abbildung 5-4: Instandsetzungsprinzip A1.2 und A1.2 + A2 bei $5 \text{ mm} > d_{a,\text{min}} \geq 0 \text{ mm}$



- 1) Abminderung der Betondeckung von $c_{min} \geq 25 \text{ mm}$ auf $c_{min} \geq 20 \text{ mm}$ mit nachgewiesenen Hydrolysewiderstand des Betonersatzes (siehe DVGW-Arbeitsblatt W 300-5)
- 2) Deckschicht mit mineralischer Beschichtung: Abminderung der Betondeckung von $c_{min} \geq 25 \text{ mm}$ auf $c_{min} \geq 20 \text{ mm}$ mit nachgewiesenen Hydrolysewiderstand der mineralischen Beschichtung – Prinzip A2 (siehe DVGW-Arbeitsblatt W 300-5). Mineralische Beschichtung darf auf die Betondeckung angerechnet werden, wenn Tabelle 5.1 und 5.2 Spalte 2 eingehalten.
- 3) Statische Ertüchtigung muss sichergestellt werden.
- 4) Mindestschichtdicke hinter der Bewehrung richtet sich zusätzlich nach dem Größtkorn des Betonersatzsystems Die Herstellerangaben sind zu beachten. abhängig von Größtkorn des Betonersatzes – Herstellerangaben beachten
- 5) Im Rahmen der Untergrundvorbereitung ist eine Rautiefenklasse RT 1,0 zu erzielen. Sollte ein Beton nach DVGW-Arbeitsblatt W 300-1 zum Einsatz kommen, ist eine Rautiefenklasse RT 1,5 nachzuweisen. Die Herstellerangaben sind zu beachten.

Abbildung 5-5: Instandsetzungsprinzip A1.3 und A1.3 + A2 bei $d_{a,min} < 0 \text{ mm}$

Tabelle 5-1: Prinzip A1 und A2, Anwendungsgrenzen für Zemente

Anwendungsbereich für Zemente X = gültiger Anwendungsbereich O = für die Herstellung nicht anwendbar			Prinzip A2	Prinzip A2	Prinzip A1
			Beschichtung	Beschichtung mit Anrechnung auf die Betondeckung	Betonersatz
CEM I			X	X	X
CEM II	A/B	S	X	X	X
	A	D	O	O	O
	A/B	P/Q	O	O	O
	A/B	V	O	O	O
	A/B	W	O	O	O
	A/B	T	O	O	O
	A	LL	X	X	X
	B		O	O	O
	A/B	L	O	O	O
	A/B	M	O	O	O
	C	O	O	O	
CEM III	A		X	X	X
	B		X	X	X
	C		O	O	O
CEM IV	A		O	O	O
	B		O	O	O
CEM V	A		O	O	O
	B		O	O	O
CAC			X	O	O

Tabelle 5-2: Prinzip A1 und A2, Anwendungsgrenzen der Typ 1 bis Typ 4 Mörtel

Typ nach DVGW-Arbeitsblatt W300-5	Prinzip A2	Prinzip A2	Prinzip A1
	Beschichtung	Beschichtung mit Anrechnung auf die Betondeckung	Betonersatz
Typ 1	X	X	X
Typ 2	X	X	X
Typ 3	X	X	O
Typ 4	X	O	O

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Bei der Instandsetzung von Trinkwasserbehältern wird die Realkalisierung eines ausgelaugten oder carbonatisierten Betons durch Applikation einer mineralischen Beschichtung mit Realkalisierungsdepot als Instandsetzungsziel zu Grunde gelegt. Das Realkalisierungsdepot wird im DVGW-Arbeitsblatt W 300-3 ausschließlich als Fähigkeit zur Erhöhung der Alkalität des Altbetons definiert, jedoch fehlen bisher hinreichende wissenschaftliche Erkenntnisse zum Mechanismus der Realkalisierung, zur Definition des Realkalisierungsdepots, zu den maßgebenden Einflussfaktoren und der Anwendbarkeit. Grundsätzliche Voraussetzungen, Anwendungsgrenzen oder die Beschreibung der technischen Grundsätze sollten daher für den Anwender im Trinkwasserbereich erläutert werden.

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, das Realkalisierungsvermögen von Instandsetzungsmörteln im Trinkwasserbereich genauer zu spezifizieren. Dazu wurden das Alkalitätsdepot eines Instandsetzungsmörtels sowie das Realkalisierungspotenzial des Mörtels und des Betonuntergrunds systematisch untersucht und die notwendigen Randbedingungen für eine Realkalisierung des Betonuntergrunds erfasst. Mögliche Regelwerk bedingte Änderungen in Bezug auf die Anwendung der Realkalisierung als Instandsetzungsziel wurden herausgearbeitet und der Umgang mit der Realkalisierung in der Praxis beschrieben.

Zur Umsetzung der formulierten Ziele wurden zwei Arbeitsschwerpunkte bearbeitet. Im ersten Arbeitsschwerpunkt wurden anhand von Laborversuchen die zeitabhängige Alkalienabgabe, das grundlegende Lösungsvermögen und die Eigenschaftsveränderungen von Instandsetzungsmörteln in demineralisiertem Wasser erfasst und bewertet.

Im zweiten Arbeitsschwerpunkt wurde das Realkalisierungsvermögen von ausgewählten Mörteln untersucht. Dazu wurden Verbundkörper bestehend aus ausgelaugtem oder carbonatisiertem Beton mit für Trinkwasser zugelassenen Mörteln beschichtet. Die tatsächlich ablaufende Realkalisierung konnte mit diesem Versuchsaufbau erfasst werden. Mögliche Einflussfaktoren, die den zeitlichen Verlauf der Realkalisierung und das grundsätzliche Realkalisierungspotenzial beeinflussen, wurden ermittelt und bewertet.

Aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen wurde ein Modell zur Beschreibung des Realkalisierungsfortschritts abgeleitet und mit numerischen Simulationen im Rahmen der getroffenen Vereinfachungen und Annahmen validiert. Darüber hinaus wurden Anpassungsmöglichkeiten bei der Instandsetzung von Trinkwasserbehältern aufgezeigt.

Erkenntnisse zur Alkalienabgabe von mineralischen Beschichtungen in Bezug auf die Auslaugung und Realkalisierung

Die Alkalienabgabe in „mineralstoffarmem“ Wasser und die damit verbundene Auslaugung der alkalischen Bestandteile des Porengefüges sowie der Zementsteinphasen von mineralischen Werkstoffen folgt bei einem ungestörten

Lösungsprozess einem dreigeteilten Mechanismus. Im ersten Stadium werden die oberflächennahen alkalischen Anteile (u. a. Calcium, Natrium-, Kalium- und Hydroxidionen) aus dem Porensystem der Zementsteinmatrix gelöst. Dabei findet zunächst - vergleichbar zum Säureangriff - ein reaktionskontrollierter Prozess statt. Anschließend beginnen die Zementsteinphasen zu zerfallen. Im zweiten Stadium geht das Calcium der Zementsteinphasen in Lösung und es verbleiben lediglich amorphe und wasserhaltige Hydroxidgele (Silizium-, Aluminium- und Eisenhydroxidgele) auf der Werkstoffoberfläche. Im letzten Stadium wird die Zementsteinmatrix vollständig aufgelöst, sodass die Gesteinskörnung oberflächennah freiliegt.

Die Abgrenzung zwischen dem zweiten und dritten Stadium (Beginn bis zur vollständigen Zersetzung des Zementsteins) folgte zeitlich dicht aufeinander. Nur geringe Übergangsbereiche konnten zwischen intakter Gefügestruktur, Auflösung des Zementsteins bis hin zum vollständigen Abtrag ausgemacht werden. Eine vorauslaufende, tiefgehende Auslaugung des Zementsteins und damit verbundene pH-Wert Erniedrigung bestand nicht. Zum Teil ist direkt nach dem abgetragenen Zementstein ein pH-Wert oberhalb des Phenolphthaleinumschlagpunktes festzustellen.

Folgende Erkenntnisse zum Auslaugungswiderstand konnten aus den experimentellen Untersuchungen abgeleitet werden:

- Alle untersuchten, für den Trinkwasserbereich zugelassenen Mörtel zeigten ausschließlich eine Auslaugung bis hin zur vollständigen Zerstörung der Zementsteinmatrix im oberflächennahen Bereich (< 1 mm).
- Eine tiefgehende Auslaugung ohne Zementsteinzerstörung ist in der Regel nicht möglich. Abweichungen können sich durch andersartige Zemente, wie Calcium-Aluminat-Zemente, ergeben. Dieser zeigt eine messbare Auslaugung ohne Ablösungserscheinungen des Zementsteins oder Absanden der Gesteinskörnung.
- Eine dichte Gefügestruktur ist für den Auslaugungswiderstand entscheidend. Ein ausgeprägter Porenraum (Verdichtungs- und Luftporen) führt zu einer partiellen, tiefgehenden Auslaugung.
- Die Beständigkeit gegenüber einem lösenden Angriff ist bei einem Calcium-Aluminat-Zement, einem Typ 3 und einem Typ 4 Mörtel höher, als bei einem Typ 1 oder Typ 2 Mörtel mit einem CEM I, CEM II oder CEM III als Zementart. Nach sechs Monaten Lagerung in demineralisiertem Wasser lag die Tiefe der Zementsteinzerstörung des Typ 3 und Typ 4 Mörtels bei $< 0,1$ mm. Die Typ 1 Mörtel hingegen wiesen zum Teil eine Zementsteinzerstörung $\geq 0,5$ mm auf.
- Kunststofffasern im Mörtelgefüge sind korrosionsbeständiger gegenüber einer Auslaugungsbelastung. Somit verbleiben z. B. freiliegende Kunststofffasern so lange an der Oberfläche, bis sie aus der Zementsteinmatrix vollständig herausgelöst werden. Sofern die Stoffe organisch verfügbar sind, können hygienische Beeinträchtigungen bestehen.

Folgende Erkenntnisse zur Alkalienabgabe und zur Alkalienverfügbarkeit von Instandsetzungsmörteln konnten abgeleitet werden.

- Ein Calcium-Aluminat-Zement wies einen deutlich geringeren Alkalienpuffer auf als ein Portlandzement oder Portlandkalksteinzement. Nach ca. 180 Tagen Auslaugungsdauer lag die kumulierte Leitfähigkeit bei ca. $26 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2 \cdot \text{L}$. Die

Portlandzemente wiesen im Mittel eine kumulierte Leitfähigkeit von ca. $100 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2\cdot\text{L}$ auf. Daraus resultiert, über den gesamten Versuchszeitraum gesehen, eine vierfach höhere Alkalienabgabe eines Portlandzementes gegenüber einem Calcium-Aluminat-Zement.

- Ein Hochofenzement wies trotz ähnlichem C/S-Verhältnis einen geringeren Alkalienpuffer auf als ein Portlandzement oder Portlandkalksteinzement. Nach ca. 180 Tagen Auslaugungsdauer lag die kumulierte Leitfähigkeit bei ca. $46 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{cm}^2\cdot\text{L}$. Daraus resultiert, über den gesamten Versuchszeitraum betrachtet, ein ca. doppelt so hohes Alkalienabgabevermögen eines Portlandzementes gegenüber einem Hochofenzement.
- Der Alkalienpuffer eines Typ 1 und Typ 2 Mörtels sind höher als die eines Typ 3 Mörtels. Der Typ 3 Mörtel wies zunächst eine vergleichbare Alkalienabgabe in den ersten 50 Tagen wie ein Typ 1 und Typ 2 Mörtel auf. Anschließend war nicht - wie bei den Typ 1 und Typ 2 Mörteln - ein annähernd linearer Messwerteverlauf zu beobachten, sondern die kumulierten Verläufe flachten mit zunehmender Versuchsdauer deutlich ab. Zum Ende der Versuchsdauer lag das Alkalienabgabevermögen bei ca. 70 % gegenüber dem eines Typ 1/ Typ 2 Mörtels.
- Eine mineralische Dichtungsschlämme (Typ 4) weist im Vergleich zu den Typ 1 bis Typ 3 Mörteln den geringsten Alkalienpuffer auf. Nach ca. zwei Wochen flachten die kumulierten Ergebnisverläufe ab. Das Alkalienabgabevermögen über die gesamte Versuchsdauer liegt bei ca. 30 % gegenüber dem eines Typ 1/ Typ 2 Mörtels.

Erkenntnisse zur Realkalisierung mineralischer Beschichtungen

Aus dem zweiten Arbeitsschwerpunkt konnte abgeleitet werden, dass der Realkalisierungsprozess in zwei Bereiche unterteilt werden muss. Dazu gehören die sogenannte Kontaktreakalisierung und die diffusionsgesteuerte Realkalisierung. Unter der Kontaktreakalisierung ist die Anfangsreakalisierung der Betonrandzone zu verstehen, deren Tiefenwirkung und Dauer von unterschiedlichen Einflussfaktoren abhängig ist. Die Alkalien werden während der Applikation und Erhärtung mittels Konvektion „huckepack“ in den Beton transportiert. Die Kontaktreakalisierung folgt nicht einem Wurzel-Zeit-Gesetz. Folgende Einflussparameter spielen hierbei eine maßgebende Rolle:

- anfängliche Feuchtigkeit aus dem Vornässen, Mörtelfeuchte und Untergrundeuchte
- Erhärtungsgeschwindigkeit des Mörtels sowie der Zeitpunkt und die Art der Nachbehandlung
- Alkalienabgabe des Frischmörtels, Wasserrückhaltevermögen
- Alkalienaufnahme des Betons
- Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise Luftfeuchtigkeit, spielen in diesem Stadium eine untergeordnete Rolle

Die diffusionsgesteuerte Realkalisierung stellt sich nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte in Abhängigkeit von der Luftfeuchte ein. Folgende Einflussfaktoren sind zu unterscheiden. Der Grad der Beeinflussung sinkt nach der nachfolgend aufgeführten Reihenfolge.

- **Feuchteangebot:** Im wassergesättigten Beton kann die Realkalisierung über das 2. Fick'sche Diffusionsgesetz (Wurzel-Zeit-Gesetz) beschrieben werden. Über die Modellbildung (experimentell und numerisch) konnte der Verlauf der Realkalisierung abgeleitet und im Rahmen der getroffenen Vereinfachungen und Annahmen validiert werden. Die Tiefenwirkung ist jedoch durch die Interaktion von Lösung und Beton und dem tiefenabhängigen Wassereintrag (Selbstabdichtung) begrenzt.

Grundsätzlich ist eine diffusionsgesteuerte Realkalisierung erst ab 95 % relativer Luftfeuchte zu erwarten. Bei hohen relativen Luftfeuchten findet der Transport von den in Wasser gelösten Alkalien innerhalb des Sorbatfilms auf der Porenoberfläche über Diffusion statt. Im teilwassergesättigten Porenraum besteht nur anfänglich ein Wurzel-Zeit-Gesetz bei der Realkalisierung des Betons. Mit zunehmender Zeit flacht der Verlauf ab und nähert sich einer horizontalen Asymptote an.

Kleinere relative Luftfeuchten (< 95 % r. F.) führen zu keiner signifikanten Erhöhung des Realkalisierungsfortschritts. Der Sorbatfilm erreicht keine ausreichende Schichtdicke, damit eine ausreichende Menge an Alkalien für eine messbare Realkalisierung (oberhalb des Phenolphthaleinumschlagpunktes) transportiert werden kann. Zum Teil ist mit einem Rückgang der anfänglichen Kontaktreakalisierung zu rechnen.

- **Kunststoffhaltige Zusätze der mineralischen Beschichtung (Mörteltyp):** Zwischen Typ 1 und Typ 2 Mörteln sind keine signifikanten Unterschiede auf das Realkalisierungspotenzial festzustellen. Ein Typ 3 Mörtel weist ein geringeres Realkalisierungspotenzial auf. In den ersten 14 Tagen der Versuchsdauer war eine Abweichung vom Wurzel-Zeit-Gesetz festzustellen. Bei einem Typ 4 Mörtel ist kein ausreichendes Realkalisierungspotenzial gegeben. Die Verwendung von Polymeren kann zur teilweisen Füllung bzw. Abdichtung des Porensystems führen, sodass ein höheres Wasserrückhaltevermögen entsteht und der Transport der Alkalien in den Altbeton zurückgehalten wird.
- **Zementart des Untergrunds:** Das Realkalisierungspotenzial und der Diffusionskoeffizient der Alkalien sind abhängig von der Zementart des Betonuntergrunds. Durch die Zugabe von Zusatzstoffen kann die Kontaktzone verdichtet werden, was zu einer Verlangsamung der Diffusionsgeschwindigkeit führt. Die Alkalienbindung der Zementsteinmatrix übt einen zusätzlichen Einfluss aus. Mit wachsendem Silikatgelgehalt können verstärkt Alkalien in der carbonatisierten Matrix gebunden werden. Für die Erhöhung des pH-Wertes der Porenlösung stehen diese nicht mehr zur Verfügung. Vergleichbar mit einer Chloriddiffusion weist ein Portlandzement (CEM I) generell die größten Diffusionskoeffizienten auf. Hochofenzementhaltige Betone (CEM III) weisen tendenziell die niedrigsten Diffusionskoeffizienten auf. Das Realkalisierungspotenzial sinkt in folgender Reihenfolge: CEM I, CEM II/A-LL, CEM III.
- **Zementart der mineralischen Beschichtung:** Im Allgemeinen behält die Porenlösung im Zementstein ihren Sättigungswert von etwa 20 mmol/L bei,

solange ein C/S-Verhältnis von $> 1,5$ besteht und damit freies Portlandit vorhanden ist. Aus diesem Grund sind vergleichbare Realkalisierungsfortschritte bei einem CEM I, CEM II oder CEM III mit hohem C/S-Verhältnis zu erwarten. Aus den Versuchen zur Alkalienabgabe konnte abgeleitet werden, dass der Gesamtalkalienpuffer bzw. die Alkalienverfügbarkeit eines CEM III Zementes geringer ist als die eines CEM I Zementes. Wann und in welcher Tiefe der möglicherweise geringere Alkalienpuffer einen Einfluss darstellt, konnte aus den Untersuchungen nicht abgeleitet werden.

Spezialzemente wie bspw. ein Calcium-Aluminat-Zement können einen geringen Anteil an Calciumhydroxid und damit ein geringeres Realkalisierungspotenzial aufweisen.

- **Porosität und Tortuosität des Untergrunds:** Die Gefügestruktur des Betons wirkt sich insbesondere auf die Kontaktreakalisierung aus. Die Porosität und Tortuosität des Betons übt einen Einfluss auf den Diffusionskoeffizienten aus. Mit einer steigenden Porosität nimmt die Alkaliendiffusion im Beton zu.

Der Alkalientransport findet im Porensystem des Altbetons statt und eine pH-Wert Erhöhung stellt sich ausschließlich in der wässrigen Lösung ein. Noch während der Applikation des Instandsetzungsmörtels findet ein Alkalientransport in den Untergrund statt (Stadium der Kontaktreakalisierung). In den ersten Stunden der Hydratation überschreitet die Calcium-Ionenkonzentration die Sättigungskonzentration von Calciumhydroxid in Wasser. Dadurch wird zunächst ein pH-Wert Anstieg des realkalisierten Bereiches > 10 (Umschlagpunkt Thymolphthalein) ermöglicht. Diese Phase der Realkalisierung umfasst ausschließlich die ersten Stunden bis ca. 24 Stunden der Hydratation, bis sich in der Porenlösung eine konstante Calciumsättigungskonzentration von ca. 20 mmol/l einstellt.

Während der diffusionsgesteuerten Realkalisierung kann ein alkalisches Milieu mit einem pH-Wert > 10 nicht mehr gebildet werden. Aus den Indikatorversuchen war abzuleiten, dass der pH-Wert der realkalisierten Betonrandzone nahe des Phenolphthaleinumschlagpunktes von pH-Wert ~ 8 liegen muss. Die Menge der gelösten und transportierten Alkalien reicht nicht aus, um den pH-Wert > 10 zu erhalten.

Der neu gebildete Alkalienpuffer erreicht somit nicht den pH-Wert eines intakten alkalischen Zementsteingefüges (pH-Wert > 12). Die Pufferwirkung der Realkalisierung ist damit wesentlich geringer als die Ausgangssituation vor der Carbonatisierung des Zementsteins.

Sobald die relative Luftfeuchte der Umgebung so weit absinkt, dass ein weiterer Alkalientransport in den Altbeton stark verlangsamt bzw. unterbunden wird, könnten die Alkalienbindung und Interaktion zwischen Lösung und Beton zu einer Erniedrigung des pH-Wertes unterhalb des Phenolphthaleinumschlagpunktes auch im zuvor realkalisierten Bereich führen. Ebenso kann es durch die Verlangsamung des Alkaliennachschubs zu einer Umverteilung der Alkalien kommen. Die Menge der Alkalien reicht in diesem Moment nicht mehr aus, um den Phenolphthaleinumschlagpunkt zu erreichen. Da der Alkalienpuffer der Realkalisierung wesentlich geringer ist als vor der Carbonatisierung, kann nicht

ausgeschlossen werden, dass eine sofortige Carbonatisierung der freigelegten Bruchfläche eintritt.

Aus den Schlussfolgerungen ergibt sich ein nur begrenztes Anwendungsgebiet für die Realkalisierung in einem Trinkwasserbehälter. Sollte eine Auslaugung der Betonrandzone unterhalb des Wasserstands erfolgen, so geht mit der Lösung der Alkalien auch eine zeitlich und räumlich dicht gefolgte Zersetzung des Zementsteins einher. Eine tiefreichende pH-Wert Erniedrigung ohne ein Absanden der Betonoberfläche und Herauslösen des Zementsteins ist nicht zu erwarten. Aus diesem Grund ist eine klassische Realkalisierung, wie sie im Hochbau Stand der Technik ist, nicht anwendbar. Eine durch die Zementsteinzerstörung geschädigte Betonoberfläche stellt keinen tragfähigen Untergrund für die Applikation eines Instandsetzungsmörtels dar. Im Rahmen einer Untergrundvorbereitung würde die geschädigte und ausgelaugte Betonrandzone abgetragen werden.

Oberhalb des maximalen Wasserstands herrscht eine hohe relative Luftfeuchte. Die Kondensatbildung, insbesondere an den Deckenflächen, führt zu einer Auslaugung der Betonrandzone, die nur wenige Millimeter umfasst. Eine Realkalisierung dieses Bereiches erreicht ausschließlich einen pH-Wert nahe des Phenolphthaleinumschlagpunktes (pH-Wert ~8). Der neu gebildete Alkalitätspuffer ist wesentlich geringer als die eines intakten, alkalischen Betons. Inwieweit eine stabile, langfristige Repassivierung des Bewehrungsstahls in diesem Bereich entstehen kann, ist fraglich. Zur Einschätzung der Korrosionsaktivität sind weitere Untersuchungen notwendig. Der mineralische Mörtel würde in diesem Fall nicht für eine Realkalisierung appliziert werden, sondern ausschließlich als Schutzschicht fungieren. Die baupraktische Relevanz für eine Realkalisierung von wenigen Millimetern ist nicht gegeben.

Sollte bei einer guten Belüftung der Wasserkammer eine Carbonatisierung der Betonrandzone entstehen, besteht im Umkehrschluss kein ausreichendes Feuchteangebot für eine Realkalisierung. In diesem Zuge sind auch die Möglichkeiten der Realkalisierung im Hochbau zu hinterfragen, da deutlich geringere relative Luftfeuchten i. d. R. vorherrschen.

Die Anpassungsmöglichkeiten im Trinkwasserbereich und Regelwerk bedingte Änderungen im DVGW-Arbeitsblatt W 300 wurden in dieser Arbeit aufgezeigt. Die Realkalisierung der Betonrandzone soll nicht mehr als Instandsetzungsprinzip weiterverfolgt werden (vgl. Kapitel 5).

Zusammenhang zwischen Alkalienabgabe und Realkalisierung

Die in Abschnitt 3.3.1 aufgelisteten Eingangsparameter aus den Auslaugungsversuchen zur Abschätzung des Realkalisierungspotenzials haben sich bis auf den Hochofenzement größtenteils bestätigt. Folgende Rückschlüsse sind möglich:

- Die für diese Arbeit untersuchten Typ 1 und Typ 2 Mörtel (CEM I) wiesen den höchsten Alkalitätspuffer im Rahmen der Alkalienabgaberversuche auf. Auch bei der Realkalisierung wiesen die Typ 1 und Typ 2 Mörtel (CEM I) erwartungsgemäß höhere Realkalisierungstiefen im Vergleich zu Typ 3 und Typ 4 Mörteln auf.

- Bei Typ 4 zeigten die Alkalienabgabeversuche, dass die Alkalienabgabe mit zunehmender Zeit abflacht und sich nach ca. 50 Tagen einer horizontalen Asymptote annähert. Der Typ 4 wies von allen untersuchten Mörteln erwartungsgemäß das kleinste Realkalisierungspotenzial auf.
- Die Ergebnisse zur geringen Alkalienabgabe und zum Alkalienpuffer eines Calcium-Aluminat-Zementes stimmen ebenfalls mit dem geringeren Realkalisierungspotenzial überein.
- Der Hochofenzement wies in den ersten zwei Wochen der Auslaugungsversuche eine vergleichbare Alkalienabgabe wie die Portlandzemente auf. Im weiteren Verlauf war eine abgeschwächte, aber dennoch stetige Alkalienabgabe festzustellen. Daraus resultierte ein geringer Gesamtalkalienpuffer. Bei der Realkalisierung konnte der Hochofenzement vergleichende Ergebnisse zum Realkalisierungsfortschritt liefern wie ein Portlandzement. Die Ersteinschätzung des geringen Gesamtalkalienpuffers konnte für den betrachteten Untersuchungszeitraum nicht bestätigt werden. Dennoch könnte sich der für die Auslaugung ermittelte, geringere Gesamtalkalienpuffer langfristig ungünstig auf eine Realkalisierung auswirken.

Für die Bewertung des Realkalisierungspotenzials ist es naheliegend, dass zunächst die Alkalienabgabe in den ersten Wochen relevant ist. Das bedeutet, dass das zuvor beschriebene, erste Stadium der Freisetzung und Lösung der Alkalien eine übergeordnete Rolle einnimmt. Alle Mörtel zeigten in den ersten Tagen eine mögliche Alkalienabgabe, jedoch variierte das langfristige Alkalitätsdepot und somit auch der Verlauf der weiteren Realkalisierung. Mörtel, wie bspw. ein Typ 4 Mörtel, die sich bei ihrer Alkalienabgabe einer horizontalen Asymptote annähern, führen dazu, dass der Transport von Alkalien zum Erliegen kommt. Eine Realkalisierung ist ab diesem Zeitpunkt nicht mehr zu erwarten.

6.2 Ausblick

Ausgehend von dem entwickelten Modellansatz zur Beschreibung der Realkalisierungsprozesse sollten zukünftige Forschungen zum Ziel haben, die Kontaktrealkalisierung und diffusionsgesteuerte Realkalisierung genauer zu erfassen. Anhand weiterer Untersuchungen könnte ein analytisches Berechnungsmodell aufgestellt werden. Im Modell wurde ausschließlich der Transport von Alkalien im wassergesättigten Porenraum betrachtet, da in Trinkwasserbehältern i. d. R. eine wassergesättigte Betonrandzone vorliegt. Für den Hochbau wären ebenfalls numerische und analytische Ansätze sinnvoll, die einen Transport bei Teilwassersättigung bzw. bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten betrachten. Der Einfluss der Selbstabdichtung und der dadurch endliche Verlauf der Realkalisierung wurde theoretisch abgeleitet. Weitere Untersuchungen sollten darauf abzielen, den tiefen- und zeitbedingten Prozess auf den Realkalisierungsfortschritt zu beziehen.

Schwerpunktmäßig wurden die Einflussgrößen der Realkalisierung und der praktische Umgang mit diesen abgeleitet. Zukünftig sollten anhand von Untersuchungen die materialbedingten Veränderungen, wie beispielsweise das Bindungsvermögen von Alkalien in die Zementsteinmatrix, sowie Wechselwirkungen zwischen Lösung und Beton näher betrachtet werden.

Die Anwendung unterschiedlicher Indikatoren konnte erste Erkenntnisse zum pH-Wert des realkalisierten Bereichs liefern. Nachfolgende Untersuchungen sollten darauf abzielen, die Alkalität des Betons bzw. die Alkalienkonzentration präziser beschreiben zu können. In diesem Zusammenhang sollte die Repassivierung des Bewehrungsstahls in dem neu gebildeten alkalischen Milieu untersucht werden. Der Korrosionsschutz der Bewehrung wurde zwar in dieser Arbeit nicht thematisiert, ist jedoch für die Praxis ein wichtiger Entscheidungsfaktor, inwieweit der Beton zum Schutz der Bewehrung tatsächlich abgetragen und erneuert werden muss.

In Bezug auf die Alkalienabgabe von mineralischen Beschichtungen konnten Einflussfaktoren auf die Auslaugung von Instandsetzungsmörteln eingegrenzt werden. Für die Abschätzung der Beständigkeit von Instandsetzungsmörteln in der Trinkwasserspeicherung, mit dem Ziel, die Dauerhaftigkeit der Auskleidung auf einen praxisnahen Nutzungszeitraum prognostizieren zu können, sollte daher eine geeignete Prüfgrundlage mit kurzen Prüfzeiträumen entwickelt werden.

Die Lebenszeitprognose und die Abschätzung der Restnutzungsdauer von Bauwerken sowie die Einplanung von Instandhaltungsmaßnahmen für den Bauherrn werden immer relevanter. Der Teil 5 der nicht veröffentlichten Instandhaltungsrichtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton greift genau diese Aspekte auf und ermöglicht sachkundigen Planern anhand vereinfachter Berechnungsmodelle die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen im Hochbau abzuschätzen. Die Instandhaltungsrichtlinie beinhaltet jedoch keine Ansätze zur Berechnung und Abschätzung der relevanten Schadensmechanismen, die in Trinkwasserbehältern vorherrschen. Ebenso sind keine Berechnungsmethoden in Bezug auf die Realkalisierung hinterlegt. Vor dem Hintergrund, die Dauerhaftigkeit von Trinkwasserbehältern und deren Lebensdauer für Anwender besser abschätzen zu können, sollten weitere Forschungen genau auf diese Fragestellungen abzielen.

Abschließend sollten auch die Möglichkeiten einer Realkalisierung des Betons im Hochbau näher untersucht werden. Die Untersuchungen dieser Arbeit zeigten, dass der Transport der Alkalien ausschließlich im wassergesättigten Porenraum und unter einer hohen relativen Luftfeuchte zu einem Fortschreiten der Realkalisierung geführt haben. Bei geringen relativen Luftfeuchten von ca. 65 % war sogar ein Rückgang der Realkalisierungsfront zu beobachten. Ob sich aufgrund der Zusammensetzung und Dichtigkeit die für den Trinkwasserbereich zugelassenen Mörtel von den Instandsetzungsmörteln im Hochbau maßgeblich unterscheiden, ist anhand weiterer Untersuchungen zu prüfen.

*Die Qualität eines Forschers misst sich nicht an der Zahl der Antworten, die er gibt,
sondern an der Qualität der Fragen, die er stellt.*

*Aba Assa (*1974)*

7 Literaturverzeichnis

- [Adenot u. Buil, 1992] Adenot, F.; Buil, M. (1992): *Modelling of the corrosion of the cement paste be deionized water*. Cement and Concrete Research 22. S. 489-496.
- [Bamforth, 2004] Bamforth, P. B. (2004): *Enhancing reinforced concrete durability. Guidance on selecting measures for minmising the risk of corrosion of reinforcement in concrete*. Technical Report No. 61, Concrete Society.
- [Bastert et al., 2011] Bastert, H.; Dickhaut, H. D.; Eßer, A.; Hintzen, W.; Hohberg, I.; Kühne, H.-C. (2011): *Überarbeitung der DAfStb-Richtlinie Instandsetzung - Statusbericht*. Beton- und Stahlbetonbau 7 (106). S. 501-510.
- [Beddoe u. Springenschmid, 1999] Beddoe, R.; Springenschmid, R. (1999): *Feuchtetransport durch Bauteile aus Beton*. Beton- und Stahlbetonbau 4 (94). S. 158-166.
- [Bier, 1986] Bier, T. (1986): *Influence of Type of Cement and Curing on Carbonation Progress and Pore Structure of Hydated Cement Pastes*. Material Research Society Fall Meeting, S. 123-134.
- [Bier, 1988] Bier, T. (1988): *Karbonatisierung und Realkalisierung von Zementstein und Beton*. Dissertation. Karlsruhe.
- [Boos, 2003] Boos, P. (2003): *Herstellung dauerhafter zementgebundener Oberflächen im Trinkwasserbereich - Korrosionsanalyse und technische Grundanforderungen*. Dissertation. Schriftenreihe der Zementindustrie Heft 64.
- [Boos u. Breit, 2003] Boos, P.; Breit, W. (2007): *Trinkwasserbehälter aus Beton*. Energie - Wasser Praxis 58. S. 8-14.

- [Boos u. Breit, 2010] Boos, P.; Breit, W. (2010): *Hydrolysebeständigkeit und Dauerhaftigkeitsprognosen für zementgebundene Auskleidungen in Trinkwasserbehältern*. Tagungsband -1. Kolloquium Betonbauwerke in der Trinkwasserspeicherung. S. 39-45. Esslingen.
- [Brameshuber et al., 2000] Brameshuber, W.; Wiens, U.; Schröder, P.; Meins, A. (2000): *Einfluss von Steinkohleflugasche auf den Frost-Tausalz-Widerstand von karbonatisiertem Beton*. Tagungsband - 14. Internationale Baustofftagung - ibausil. S. 1.0785-1.0796. Weimar.
- [Breit, 2014] Breit, W. (2014): *Betontechnologische Grundsätze bei Planung, Bau und Instandsetzung von Trinkwasserbehältern*. Fachaufsicht für die Instandsetzung von Trinkwasserbehältern - Beiträge zu Technische Regeln, DVGW-Arbeitsblatt W 316-2. Frankfurt.
- [Breit u. Merkel, 2014] Breit, W.; Merkel, M. (2018): *Dauerhaftigkeit von Trinkwasserbehälterbeschichtungen - Realkalisierungspotenzial auf dem Prüfstand*. Tagungsband - 5. Kolloquium Betonbauwerke in der Trinkwasserspeicherung. S. 41-47. Esslingen.
- [Breitbach, 2006] Breitbach, M. (2006): *Instandsetzung von Trinkwasserbehältern - Möglichkeiten und Risiken*. GWF Wasser Abwasser 13, S. 50-57.
- [Breitbach, 2007] Breitbach, M. (2007): *Gütesicherung bei der Instandsetzung von Trinkwasserbehältern*. Gütegemeinschaft Schutz und Instandsetzung für Trinkwasserbehälter e. V. S.I.T.W.

- [Breitbach, 2018] Breitbach, M. (2018): *Anforderungen an die Qualitätssicherung für Trinkwasserbehälter aus Stahlbeton nach der Normreihe W 300*. Tagungsband - 5. Kolloquium Betonbauwerke in der Trinkwasserspeicherung. S. 31-40. Esslingen.
- [Breitenbücher u. Solacolu, 1995] Breitenbücher, R.; Solacolu, C. (1995): *Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Realkalisierung von carbonatisiertem Beton*. Beton- und Stahlbetonbau 5 (90). S.116-119.
- [Brodersen, 1982] Brodersen, H. (1982): *Zur Abhängigkeit der Transportvorgänge verschiedener Ionen im Beton von Struktur und Zusammensetzung des Zementsteins*. Dissertation, Technische Hochschule Aachen.
- [Budnik et al., 1993] Budnik, J.; Laakkonen, T.; Maass, A.; Grossmann, F.; BAST (1993): *Realkalisierung karbonatisierter Betonrandzonen*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach.
- [Crank, 1975] Crank, J. (1975): *The Mathematics of Diffusion*. Oxford Science Publication.
- [Dahme, 2006] Dahme, U. (2006): *Chlorid in karbonatisierendem Beton, Speicher- und Transportmechanismen*. Dissertation, Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft der Universität Duisburg Essen, Heft 12. Cuvillier Verlag Göttingen.
- [Franke u. Wesselmann, 1992] Franke, L.; Wesselmann, M. (1992): *Zur Frage der Realkalisierung von Beton*. Beiträge zum 27. Forschungskolloquium. Technischen Universität Hamburg-Harburg. 6 Seiten

- [Frey, 1991] Frey, R. (1991): *Untersuchung des Wanderungsmechanismus und Ermittlung der Kenngrößen von Streusalz-Chlorid in Betonen*. TIZ 115 (10). S. 405–414.
- [Gehlen, 2000] Gehlen, C. (2000): *Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton Heft 510.
- [Gerard et al., 2002] Gerard, B.; Le Bellego, C.; Bernard, O. (2002): *Simplified modelling of calcium leaching of concrete in various environments*. Materials and Structures 35. S. 632-640.
- [Gerdes u. Wittmann, 1999] Gerdes, A.; Wittmann, F. H. (1999): *Reaktionen in der Porenlösung während der Realkalisierung von Beton*. WTA Schriftenreihe Heft 19. S.183–193.
- [Gerlach, 2017] Gerlach, J. (2017): *Ein performance-basiertes Konzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung chemisch beanspruchter Betonbauteile*. Dissertation. Hannover.
- [Goto u. Roy, 1981] Goto, S.; Roy, D. M. (1981): *Diffusion of Ions through Hardened Cement Pastes*. Cement and Concrete Research 11. S. 751-757.
- [Gunkel, 1983] Gunkel, Peter (1983): *Die Zusammensetzung der flüssigen Phasen erstarrender und erhärtender Zemente*. Beton-Informationen 1, 23. Jahrgang. S 3-8.

- [Guse et al., 1994] Guse, U.; Hilsdorf, H. K.; Haardt, P. (1994): *Realkalisierung carbonatisierter Betonrandzonen durch großflächigen Auftrag zementgebundener Reperatursysteme als Sanierungsprinzip zur Wiederherstellung des Korrosionsschutzes der Stahlbewehrung im Beton*. Bericht Projekt Nr.: F 5.6/11 B. Universität Karlsruhe. Institut für Massivbau und Baustofftechnologie.
- [Härdtl, 1995] Härdtl, R. (1995): *Veränderung des Betongefüges durch die Wirkung von Steinkohleflugasche und ihr Einfluss auf die Betoneigenschaften*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton Nr. 448.
- [Hearn u. Morley, 1997] Hearn, N.; Morley, C. T. (1997): *Self-Sealing Property of Concrete - Experimental Evidence*. Materials and Structures 30. S. 404-411.
- [Hedenblad, 1997] Hedenblad, G. (1997): *The Use of Mercury Intrusion Porosimetry or Helium Porosity to Predict the Moisture Transport Properties of Hardened Cement Paste*. Advanced Cement Based Materials 6 (3-4). S. 123-129.
- [Hohberg, 2002] Hohberg, I. (2002): *Charakterisierung, Modellierung und Bewertung des Auslaugverhaltens umweltrelevanter, anorganischer Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen*. Dissertation. Aachen.
- [Houst u. Wittmann, 1994] Houst, Y. F.; Wittmann, F. H. (1994): *Influence of porosity and water content of the diffusivity of CO₂ and O₂, through hydrated cement paste*. Cement and Concrete Research 24 (6). S. 1165-1176.

- [Hunkeler, 2012] Hunkeler, F. (2012): *Einfluss des CO₂-Gehaltes, der Nach- und Vorbehandlung sowie der Luftfeuchtigkeit auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit von Beton*. Beton- und Stahlbetonbau 107 (9). S. 613-624.
- [Inzenhofer, 1988] Inzenhofer, J. (1988): *Untersuchungen zum Eindringen von Wasser in Beton in Abhängigkeit vom Druck*. Diplomarbeit. München.
- [Jander u. Jahr, 1973] Jander, G.; Jahr, K. F. (1973): *Maßanalyse - Theorie und Praxis der klassischen und der elektrochemischen Titrierverfahren*. Sammlung Göschen Band 8221. Walter de Gruyter & Co. Verlag. Berlin.
- [Jungermann, 1982] Jungermann, B. (1982): *Der Chemismus der Carbonatisierung von Beton*. Betonwerk + Fertigteil-Technik 6. S. 358-362.
- [Kahlert u. Scholz, 2014] Kahlert, H.; Scholz, F. (2014): *Säure-Base-Diagramme – Ein Leitfaden für die Praxis und für Studierende*. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg.
- [Kapteina, 2011] Kapteina, G. (2011): *Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Verkehrsbauwerken*. Dissertation. München.
- [Kaufmann u. Studer, 1995] Kaufmann, J.; Studer, W. (1995): *Wasserhaushalt von Bauwerksbeton*. Fachberichte aus dem Bereich Baustoffe/Bauwesen, EMPA. S. 17-20.
- [Kießl, 1983] Kießl, K. (1983): *Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen*. Dissertation. Essen.

- [Kießl u. Gertis, 1980] Kießl, K.; Gertis, K. (1980): *Feuchttransport in Baustoffen. Eine Literaturoauswertung zur rechnerischen Erfassung hygrischer Transportphänomene*. Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen 13. Universität Essen.
- [Klopfer, 1974] Klopfer, H. (1974): *Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen*. Bau-Verlag. Wiesbaden, Berlin.
- [Krischer u. Kast, 1978] Krischer, O.; Kast, W. (1978): *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. Springer Verlag. Berlin.
- [Kropp, 1983] Kropp, J. (1983): *Karbonatisierung und Transportvorgänge in Zementstein*. Dissertation. Karlsruhe.
- [Krus et al., 1997] Krus, M.; Hansen, K. K.; Künzel, H. M. (1997): *Porosity and Liquid Absorption of Cement Paste*. Materials and Structures 30. S. 394-398.
- [Krus u. Künzel, 1995] Krus, M.; Künzel, H. M. (1995): *Das Wasseraufnahmeverhalten von Betonbaustoffen*. IBP Mittlung 273, Fraunhofer-Institut für Bauphysik 22.
- [Krus, 1995] Krus, M. (1995): *Feuchttransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralische Baustoffe - Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken*. Dissertation. Stuttgart.
- [Künzel, 1994] Künzel, H. M. (1994): *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchttransport in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Dissertation. Stuttgart.

- [Küster u. Thiel, 2011] Küster, F. W.; Thiel, A. (2011): *Rechentafeln für die chemische Analytik - Basiswissen für die analytische Chemie*. Walter de Gruyter & Co. KG Verlag. Berlin, New York.
- [Le Bellégo et al., 2000] Le Bellégo, C.; Gérard, B.; Pijaudier-Cabot, G. (2000): *Chemo-mechanical effects in mortar beams subjected to water hydrolysis*. Journal of engineering mechanics 126 (3). S. 266-272.
- [Leißner u. Weber, 1994] Leißner, J.; Weber, J. U. (1994): *Realkalisierung von Stahlbetonbauteilen, die mit Spritzbeton instandgesetzt wurden, unter Praxisbedingungen*. Abschlussbericht F 458. Institut für Bauforschung der RWTH Aachen.
- [Lindvall, 2001] Lindvall, A. (2001): *Environmental action and response - Reinforced concrete structures exposed in road and marine environments*. Dissertation. Chalmers University of Technology.
- [Locher, 2000] Locher, F. W. (2000): *Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung*. Verlag Bau + Technik. Düsseldorf.
- [Lutz et al., 1985] Lutz, P.; Jenisch, R.; Klopfer, H.; Freymuth, H.; Krampf, L. (1985): *Lehrbuch der Bauphysik*. Teubner Verlag. Stuttgart:
- [Matsusato et al., 1992] Matsusato, H.; Ogawa, M.; Funato, M.; Sato, T. (1992): *Studies on the carbonation of hydrated cement and its effects on microstructure and strength*. 9th International Congress on the Chemistry of Cement 5. S. 363-369. New Dehli.
- [Maultzsch, 1984] Maultzsch, M. (1984): *Vorgänge beim Angriff von Chloridlösungen auf Zementstein und Beton*. Material und Technik 12 (3). S. 83-90.

- [Millington u. Quirk, 1961] Millington, R. J.; Quirk, J. P. (1961): *Permeability of porous solids*. In: *Transactions of the Faraday Society* 57, S. 1200-1207
- [Page et al., 1981] Page, C. L.; Short, N. R.; El Tarras, A. (1981): *Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Pastes*. *Cement and concrete research* 11 (3). S. 395-406.
- [Papadakis, 2000] Papadakis, V. G. (2000): *Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress*. *Cement and concrete research* 30 (2). S. 291-299.
- [Parrot, 1992] Parrot, L. J. (1992): *Variations of water absorption rate and porosity with depth from an exposed concrete surface - effects of exposure conditions and cement type*. *Cement and concrete research* 22 (6). S. 1077-1088.
- [Penko, 1983] Penko, M. (1983): *Some early hydration process in cement paste as monitored by liquid phase composition measurements*. Dissertation. Purdue University
- [Rahimi, 2017] Rahimi, A. (2017): *Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton Heft 626.
- [Raupach, 1992] Raupach, M. (1992): *Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. Heft 433.
- [Raupach u. Orlowski, 2008] Raupach, M.; Orlowski, J. (2008): *Schutz und Instandsetzung von Betontragwerken*. Bau+Technik Verlag. Düsseldorf.

- [Rechenberg u. Sprung, 1983] Rechenberg, W.; Sprung, S. (1983): *Composition of the solution in the hydration of cement*. Cement and concrete research 13 (1). S. 119-126.
- [Ritter u. Drake, 1945] Ritter, H. L.; Drake, L. C. (1945): *Pressure porosimeter and determination of complete macropore-size distributions*. Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition 17 (12). S. 782-786.
- [Romberg, 1978] Romberg, H. (1978): *Zementsteinporen und Betoneigenschaften*. Beton-Informationen 18 (5). S. 50-55.
- [Rucker et al., 2006] Rucker, P.; Beddoe, R.; Schießl, P. (2006): *Wasser- und Salzhaushalt im Gefüge zementgebundener Baustoffe. Modellierung der auftretenden Mechanismen*. Beton- und Stahlbetonbau 101 (6). S. 402-412.
- [Rucker-Gramm, 2010] Rucker-Gramm, P. (2008): *Modellierung des Feuchte- und Salztransports unter Berücksichtigung der Selbstabdichtung in zementgebundenen Baustoffen*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 579.
- [Rucker-Gramm, 2018] Rucker-Gramm, P. (2018): *Bauphysikalische Aspekte bei Ausführung von hochwertig genutzten Weißen Wannen*. Beton- und Stahlbetonbau 113. S. 100-115.
- [Schäfer, 2004] Schäfer, E. (2004): *Einfluss der Reaktionen verschiedener Zementhauptbestandteile auf den Alkalihaushalt der Porenlösung des Zementsteins*. Dissertation. Clausthal.
- [Scheibel, 1990] Scheibel, S. (1990): *Austauschreaktion an Zementstein*. Schlussbericht der Amtlichen Materialprüfanstalt für das Bauwesen.

- [Schießl et al., 1994] Schießl, P.; Breit, W.; Raupach, M. (1994): Investigations into the effect of coatings on water distribution in concrete using multi-ring electrodes. Special Publication 151. S. 119-134.
- [Schießl u. Raupach, 1994] Schießl, P.; Raupach, M. (1994): *Durability of local repair measures on concrete structures damaged by reinforcement corrosion*. Special Publication 145. S. 1195–1216.
- [Snyder u. Marchand, 2001] Snyder, K. A.; Marchand, J. (2001): *Effect of speciation on the apparent diffusion coefficient in nonreactive porous systems*. Cement and Concrete Research, Vol. 31. S. 1837-1845.
- [Schulte Holthausen et al., 2016] Schulte Holthausen, R.; Merkel, M.; Raupach, M.; Breit, W. (2016): *Auslaugung und Realkalisierung von mineralischen Beschichtungen in Trinkwasserbehältern*. Energie - Wasser Praxis, 12. S. 90-94.
- [Schulte Holthausen et al., 2020a] Schulte Holthausen, R.; Raupach, M.; Merkel, M.; Breit, W. (2020): *Auslaugungswiderstand von Betonoberflächen in Trinkwasserbehältern*. Bautechnik 97 (6). S. 368-376.
- [Schulte Holthausen et al., 2020b] Schulte Holthausen, R.; Raupach, M.; Merkel, M.; Breit, W. (2020): *Zerstörungsfreie Bestimmung der Auslaugung von Beton mittels einseitiger Wasserstoff-Kernspinresonanz*. Bautechnik 97 (10). S. 679-687
- [Schwiete et al., 1968] Schwiete, H. E.; Böhme, H.-J.; Ludwig, U. (1968): *Messungen der Gasdiffusion zur Beurteilung der offenen Porosität von Mörteln und Betonen*. Beton-Informationen 2 (8). S. 22–26.

- [Schwotzer, 2008] Schwotzer, M. (2008): *Zur Wechselwirkung zementgebundener Werkstoffe mit Wässern unterschiedlicher Zusammensetzung am Beispiel von Trinkwasserbehälterbeschichtungen*. Dissertation. Karlsruhe.
- [Setzer, 1976] Setzer, M. J. (1976): *Einfluss des Wassergehaltes auf die Eigenschaften des erhärteten Betons*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton 280.
- [Setzer, 1991] Setzer, M. J. (1991): *Interaction of water with hardened cement paste*. Advanced Cement Based Materials, Ceramic Transactions, American Ceramic Society 16. S. 415-439.
- [Smolczyk, 1976] Smolczyk, H. G. (1976): *Physical and chemical phenomena of carbonation*. RILEM international symposium on carbonation of concrete 10.
- [Smolczyk, 1984] Smolczyk, H. G. (1984): *Flüssigkeit in den Poren des Betons - Zusammensetzung und Transportvorgänge in der flüssigen Phase des Zementsteins*. Beton-Informationen 1 (24). S. 3-11.
- [Smolczyk u. Romberg, 1976] Smolczyk, H. G.; Romberg, H. (1976): *Der Einfluss der Nachbehandlung und der Lagerung auf die Nacherhärtung und Porenverteilung von Beton*. Tonindustrie-Zeitung 100 (10). S. 349-357.
- [Stark u. Wicht, 2013] Stark, J.; Wicht, B. (2013): *Dauerhaftigkeit von Beton*. Springer Vieweg. Berlin, Heidelberg.
- [Strohbauch u. Kuzel, 1988] Strohbauch, G.; Kuzel, H.-J. (1988): *Carbonatisierungsreaktionen als Ursache von Schäden an wärmebehandelten Betonfertigteilen*. Zement-Kalk-Gips 41 (7). S. 358-360.

- [Tang u. Nilsson, 1988] Tang, L.; Nilsson, L. (1991): *Chloride Binding Capacity, Penetration and Pore Structures of Blended Cement Pastes with Slag and Flyash*. International Conference University of Sheffield. S. 377-388.
- [Tang et. al., 2010] Tang, L.; Utgenannt, P.; Lindvall, A.; Boubitsas, D. (2010): *Validation of models and test methods for assessment of durability of concrete structures in road environment*. Uppdragsrapport No. P802606, CBI Betonginstitutet AB, Stockholm.
- [Verbeck, 1988] Verbeck, G. (1958): *Carbonation of hydrated Portland cement*. In: Cement and Concrete. S. 17-36.
- [VDZ, 2002] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2002): *Zement-Taschenbuch*. Verlag Bau+Technik.
- [Volkwein, 1993] Volkwein, A. (1993): *Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton*. Beton und Stahlbetonbau 88 (8). S.223-226.
- [Wedler u. Freund, 2012] Wedler, G.; Freund, H.-J. (2012): *Lehrbuch der Physikalischen Chemie*. Wiley-VCH Verlag. Weinheim.
- [Wiegrink, 2002] Wiegrink, K.-H. (2002): *Modellierung des Austrocknungsverhaltens von Calciumsulfat-Fließestrichen und der resultierenden Spannungen und Verformungen*. Dissertation. München.
- [Wiens, 2005] Wiens, U. (2005): *Zur Wirkung von Steinkohlenflugasche auf die chlorid-induzierte Korrosion von Stahl in Beton*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 551.

- [Wiens u. Alfes, 2007] Wiens, U.; Alfes, C. (2007):
*Feuchtetransport in Bauteilen aus
wasserundurchlässigem Beton -
Grundlagen und Praxisbetrachtungen.*
Beton- und Stahlbetonbau 102 (6). S. 380-
387.
- [Wittmann, 1977] Wittmann, F. H. (1977): *Grundlagen eines
Modells zur Beschreibung
charakteristischer Eigenschaften des
Betons.* Schriftenreihe des Deutschen
Ausschusses für Stahlbeton 290, S. 45-95.
- [Wittmann u. Prim, 1996] Wittmann, F. H.; Prim, P. (1996): *Einfluss
des Feuchtigkeitsgehalts auf das kapillare
Saugen.* Internationale Zeitschrift für
Bauinstandsetzen 2 (5). S. 415-426.

8 Liste der verwendeten Technischen Regelwerke

[Instandsetzungs-Richtlinie]	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ (Instandsetzungs-Richtlinie), Ausgabe Oktober 2001
[Instandhaltungs-Richtlinie]	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie „Instandhaltung von Betonbauteilen“ (Instandhaltungs-Richtlinie), Entwurf, Ausgabe Juni 2018
[Trockenbeton-Richtlinie]	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie „Herstellung und Verwendung von Trockenbeton und Trockenmörtel“ (Trockenbeton-Richtlinie), Ausgabe Juni 2005
[TR-Instandhaltung]	Deutsches Institut für Bautechnik: Technische Regel „Instandhaltung von Betonbauwerken“ (TR-Instandhaltung), Teil 1 - Anwendungsbereich und Planung der Instandhaltung, Ausgabe Mai 2020
[Richtlinie Vergussbeton]	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie „Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel“, Ausgabe Juli 2019
[DBV-Merkblatt Betondeckung]	Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.: DBV-Merkblatt „Betondeckung und Bewehrung - Sicherung der Betondeckung beim Entwerfen, Herstellen und Einbau der Bewehrung sowie des Betons nach Eurocode 2“, Ausgabe Dezember 2015
DIN 1045-2	DIN 1045-2:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
DIN 4030-1	DIN 4030-1:2008-06 Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase - Teil 1: Grundlagen und Grenzwerte
DIN 18551	DIN 18551:2014-08 Spritzbeton - Nationale Anwendungsregeln zur Reihe DIN EN 14487 und Regeln für die Bemessung von Spritzbetonkonstruktionen

DIN 66133	DIN 66133:1993-06 Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion
DIN EN 196-2	DIN EN 196-2:2013-10 Prüfverfahren für Zement - Teil 2: Chemische Analyse von Zement
DIN EN 206-1	DIN EN 206-1:2001-07 Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
DIN EN 933-1	DIN EN 933-1:2012-3 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren
DIN EN 1504-9	DIN EN 1504-9:2008-11 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität - Teil 9: Allgemeine Grundsätze für die Anwendung von Produkten und Systemen
DIN EN 1542	DIN EN 1542:1999-07 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch
DIN EN 1992-1-1	DIN EN 1992-1-1:2011-01 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
DIN EN 1992-1-1/NA	DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04 Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
DIN EN 12190	DIN EN 12190:1998-12 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Bestimmung der Druckfestigkeit von Reparaturmörteln

DIN EN 13412	DIN EN 13412:2006-11 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Bestimmung des Elastizitätsmoduls im Druckversuch
DIN EN 14487-1	DIN EN 14487-1:2006-03 Spritzbeton - Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität
DIN EN 14487-2	DIN EN 14487-2:2007-01 Spritzbeton - Teil 2: Ausführung
DIN EN 14630	DIN EN 14630:2007-01 Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Bestimmung der Karbonatisierungstiefe im Festbeton mit der Phenolphthalein-Prüfung
DIN EN 27888	DIN EN 27888:1993-11 Wasserbeschaffenheit; Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (ISO 7888:1985)
DIN EN ISO 12571	DIN EN ISO 12571:2013-12 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften (ISO 12571:2013)
DIN EN ISO 12572	DIN EN ISO 12572:2017-05 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Verfahren mit einem Prüfgefäß (ISO 12572:2016)
DIN EN ISO 15148	DIN EN ISO 15148:2018-12 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen (ISO 15148:2002 + Amd 1:2016)
DIN ISO 15901-1	DIN ISO 15901-1:2019-03 Bewertung der Porengrößenverteilung und Porosität von Feststoffen mittels Quecksilberporosimetrie und Gasadsorption - Teil 1: Quecksilberporosimetrie (ISO 15901-1:2016)
DVGW W 270	DVGW-Arbeitsblatt W 270 (A):2007-11 Vermehrung von Mikroorganismen auf Werkstoffen für den Trinkwasserbereich – Prüfung und Bewertung
DVGW W 300-1	DVGW-Arbeitsblatt W 300-1 (A):2014-10 Trinkwasserbehälter; Teil 1: Planung und Bau

DVGW W 300-2	DVGW-Arbeitsblatt W 300-2 (A):2014-10 Trinkwasserbehälter; Teil 2: Betrieb und Instandhaltung
DVGW W 300-3	DVGW-Arbeitsblatt W 300-3 (A):2014-10 Trinkwasserbehälter; Teil 3: Instandsetzung und Verbesserung
DVGW W 300-4	DVGW-Arbeitsblatt W 300-4 (A):2014-10 Trinkwasserbehälter; Teil 4: Werkstoffe, Auskleidungs- und Beschichtungssysteme – Grundsätze und Qualitätssicherung auf der Baustelle
DVGW W 300-5	DVGW-Arbeitsblatt W 300-5 (A):2014-10 Trinkwasserbehälter; Teil 5: Werkstoffe, Auskleidungs- und Beschichtungssysteme – Anforderungen und Prüfung
DVGW W 300-6	DVGW-Arbeitsblatt W 300-6 (A):2016-09 Trinkwasserbehälter, Teil 6: Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung von System- und Fertigteilbehältern
DVGW W 300-7	DVGW-Arbeitsblatt W 300-7 (A):2016-09 Trinkwasserbehälter; Teil 7: Praxishinweise Reinigungs- und Desinfektionskonzept
DVGW W 300-8	DVGW-Arbeitsblatt W 300-8 (A):2016-10 Trinkwasserbehälter; Teil 8: Praxishinweise Hygienekonzept: Neubau und Instandsetzung
DVGW W 347	DVGW-Arbeitsblatt W 347 (A):2006-05 Hygienische Anforderungen an zementgebundene Werkstoffe im Trinkwasserbereich - Prüfung und Bewertung

9 Lebenslauf der Verfasserin

Persönliche Daten

Name	Melanie Merkel
Staatsangehörigkeit	deutsch

Beruflicher Werdegang

03/2013 – 09/2015	Projektleiterin Massenberg GmbH, Niederlassung Bürstadt
10/2015 – 12/2017	Technische Mitarbeiterin Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen, Technische Universität Kaiserslautern
01/2018 – 10/2020	Wissenschaftliche Mitarbeiterin Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen, Technische Universität Kaiserslautern
02/2019 – 11/2019	Geschäftsführende Gesellschafterin Ingenieurgesellschaft bsm ² GmbH, Kaiserslautern
seit 11/2020	Partnerin Formwechsel der Ingenieurgesellschaft bsm ² GmbH in die bsm ² Breit · Schuler · Merkel Beratende Ingenieure PartGmbH, Kaiserslautern

Ausbildung

06/2007	Mittlere Reife
06/2009	Fachhochschulreife (Fachabitur)
03/2010 – 03/2013	Studium an der Fachhochschule Frankfurt am Main Studienrichtung: Bauingenieurwesen Fachrichtung: Baubetrieb, Instandsetzung und Betontechnologie
10/2015 – 10/2017	Studium an der Hochschule Kaiserslautern Technische Akademie Süd-West Studienrichtung: Bauingenieurwesen Fachrichtung: Bauschäden, Baumängel und Instandsetzungsplanung

Anhang

A Anhang A – Messwerte Alkalitätsgrenze

Tabelle A-1: Auslaugungstiefe nach 2 Monaten

Probe	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Min	Max	Mittel	-	+
M1G	0,04	0,12	0,04	0,11	0,21	0,25	0,04	0,25	0,13	0,09	0,12
M1O	0,52	0,55	0,57	0,56	0,45	0,38	0,38	0,57	0,51	0,13	0,06
M1O nB	0,52	0,45	0,71	0,39	0,43	0,45	0,39	0,71	0,49	0,10	0,22
M2G	0,42	0,37	0,34	0,43	0,39	0,43	0,34	0,43	0,40	0,06	0,03
M2O	0,34	0,10	0,11	0,15	0,04	0,08	0,04	0,34	0,14	0,10	0,20
M3G	0,39	0,18	0,34	0,18	0,35	0,46	0,18	0,46	0,32	0,14	0,14
M3O	0,08	0,05	0,09	0,06	0,08	0,04	0,04	0,09	0,07	0,03	0,02
M4O	0,40	0,22	0,33	0,32	0,44	0,47	0,22	0,47	0,36	0,14	0,11
M4U	0,23	0,28	0,38	0,33	0,40	0,57	0,23	0,57	0,37	0,14	0,21
M5G	0,40	0,36	0,21	0,42	0,30	0,52	0,21	0,52	0,37	0,16	0,15
M5G nB	1,17	0,77	1,39	1,39	1,54	1,28	0,77	1,54	1,26	0,49	0,28
M5O	0,43	0,44	0,28	0,32	0,29	0,27	0,27	0,44	0,34	0,07	0,10
M5R	1,00	0,68	0,82	0,71	0,81	1,33	0,68	1,33	0,89	0,21	0,44
M5U	0,21	0,28	0,39	0,30	0,16	0,31	0,16	0,39	0,28	0,12	0,12
M6G	0,14	0,10	0,22	0,14	0,21	0,08	0,08	0,22	0,15	0,07	0,07
M6G nB	0,16	0,45	0,55	0,51	0,31	0,28	0,16	0,55	0,38	0,22	0,17
M6O	0,35	0,32	0,29	0,28	0,40	0,34	0,28	0,40	0,33	0,05	0,07
M6R	0,14	0,17	0,15	0,60	0,73	0,16	0,14	0,73	0,33	0,19	0,41
M6U	0,08	0,12	0,15	0,10	0,18	0,12	0,08	0,18	0,13	0,05	0,06
M7G	0,52	0,47	0,54	0,59	0,62	0,59	0,47	0,62	0,56	0,09	0,06
M7O	0,45	0,35	0,34	0,41	0,46	0,29	0,29	0,46	0,38	0,09	0,08
M7O nB	0,65	0,42	0,37	0,35	0,59	0,28	0,28	0,65	0,44	0,16	0,21
M8O	0,32	0,32	0,42	0,33	0,18	0,21	0,18	0,42	0,30	0,12	0,12
M9G	0,28	0,00	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	0,09	0,09	0,19
M9O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M9U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M10O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M10U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

O: Oberfläche Geglättet, G: Oberfläche Geschnitten, U: Unterseite der Probe, nB: nicht gebürstete Probe, T: Einzelmessung (Tiefe), -: Fehlerindikator in negative Richtung, +: Fehlerindikator in positive Richtung

Tabelle A-2: Auslaugungstiefe nach 4 Monaten

Probe	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Min	Max	Mittel	-	+
M1G	0,73	0,56	0,33	1,32	0,79	0,23	0,23	1,32	0,66	0,43	0,66
M1O	0,65	0,51	0,45	0,50	0,44	0,43	0,43	0,65	0,50	0,07	0,15
M1O nB	0,42	0,37	0,46	0,55	0,45	0,46	0,37	0,55	0,45	0,08	0,10
M2G	0,35	0,39	0,28	0,33	0,34	0,62	0,28	0,62	0,39	0,11	0,24
M2O	0,33	0,28	0,27	0,33	0,41	0,54	0,27	0,54	0,36	0,09	0,18
M3G	0,40	0,28	0,31	0,45	0,44	0,39	0,28	0,45	0,38	0,10	0,07
M3O	0,21	0,25	0,24	0,20	0,23	0,22	0,20	0,25	0,23	0,03	0,03
M4O	0,49	0,52	0,57	0,56	0,48	0,59	0,48	0,59	0,54	0,06	0,05
M4U	0,52	0,54	0,49	0,51	0,61	0,55	0,49	0,61	0,54	0,05	0,07
M5G	0,55	0,61	0,83	0,94	0,91	0,91	0,55	0,94	0,79	0,24	0,15
M5G nB	0,48	0,76	1,02	0,88	1,50	1,94	0,48	1,94	1,10	0,62	0,84
M5O	0,34	0,42	0,35	0,32	0,34	0,47	0,32	0,47	0,37	0,05	0,10
M5R	0,58	0,74	0,55	0,76	0,77	0,98	0,55	0,98	0,73	0,18	0,25
M5U	0,51	0,54	0,48	0,38	0,52	0,46	0,38	0,54	0,48	0,10	0,06
M6G	0,34	0,37	0,38	0,35	0,50	0,62	0,34	0,62	0,43	0,09	0,19
M6G nB	0,53	0,60	0,44	0,56	0,53	0,55	0,44	0,60	0,54	0,10	0,06
M6O	0,68	0,49	0,58	0,58	0,66	0,63	0,49	0,68	0,60	0,11	0,08
M6R	0,58	0,69	0,72	0,66	0,46	0,38	0,38	0,72	0,58	0,20	0,14
M6U	0,18	0,18	0,29	0,18	0,16	0,08	0,08	0,29	0,18	0,10	0,11
M7G	0,61	0,55	0,50	0,79	0,74	0,60	0,50	0,79	0,63	0,13	0,16
M7O nB	0,45	0,44	0,44	0,28	0,41	0,25	0,25	0,45	0,38	0,13	0,07
M8O	0,58	0,51	0,58	0,57	0,58	0,52	0,51	0,58	0,56	0,05	0,02
M9G	0,40	0,20	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,40	0,15	0,15	0,25
M9O	0,20	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,10	0,10	0,20
M9U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M10O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M10U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

O: Oberfläche Geglättet, **G:** Oberfläche Geschnitten, **U:** Unterseite der Probe, **nB:** nicht gebürstete Probe, **T:** Einzelmessung (Tiefe), **-:** Fehlerindikator in negative Richtung, **+**: Fehlerindikator in positive Richtung

Tabelle A-3: Auslaugungstiefe nach 6 Monaten

Probe	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Min	Max	Mittel	-	+
M1G	3,06	0,93	0,94	0,89	0,67	1,03	0,67	3,06	1,25	0,58	1,81
M1O	0,51	0,54	0,51	0,55	0,58	0,67	0,51	0,67	0,56	0,05	0,11
M1O nB	0,74	0,83	0,96	0,68	0,74	0,77	0,68	0,96	0,79	0,11	0,17
M2G	0,87	0,79	0,78	0,65	0,75	0,67	0,65	0,87	0,75	0,10	0,12
M2O	0,56	0,79	0,69	0,76	0,64	0,78	0,56	0,79	0,70	0,14	0,09
M3G	0,69	0,67	0,50	0,55	0,74	0,56	0,50	0,74	0,62	0,12	0,12
M3O	0,45	0,41	0,45	0,45	0,58	0,49	0,41	0,58	0,47	0,06	0,11
M4O	0,69	0,69	0,69	0,67	0,81	0,78	0,67	0,81	0,72	0,05	0,09
M4U	0,74	0,82	0,81	0,84	0,81	0,77	0,74	0,84	0,80	0,06	0,04
M5G	0,45	0,71	0,97	0,68	0,91	0,79	0,45	0,97	0,75	0,30	0,22
M5G nB	0,40	0,77	1,18	1,32	1,24	1,29	0,40	1,32	1,03	0,63	0,29
M5O	0,49	0,49	0,65	0,59	0,57	0,80	0,49	0,80	0,60	0,11	0,20
M5R	1,49	1,56	0,88	0,93	0,90	0,80	0,80	1,56	1,09	0,29	0,47
M5U	0,51	0,72	0,47	0,79	0,97	0,98	0,47	0,98	0,74	0,27	0,24
M6G	0,58	0,74	0,67	0,62	0,73	0,62	0,58	0,74	0,66	0,08	0,08
M6G nB	0,58	0,56	0,52	0,57	0,58	0,59	0,52	0,59	0,57	0,05	0,02
M6O	0,74	0,62	0,57	0,66	0,67	0,71	0,57	0,74	0,66	0,09	0,08
M6R	0,89	0,83	0,46	0,59	0,70	0,53	0,46	0,89	0,67	0,21	0,22
M6U	0,52	0,72	0,55	0,47	0,54	0,57	0,47	0,72	0,56	0,09	0,16
M7G	1,06	1,22	1,05	0,98	0,97	0,75	0,75	1,22	1,01	0,26	0,22
M7O	0,84	0,74	0,74	0,72	0,79	0,74	0,72	0,84	0,76	0,04	0,08
M7O nB	0,37	0,52	0,55	0,59	0,60	0,81	0,37	0,81	0,57	0,20	0,24
M8O	0,86	0,67	0,64	0,52	0,52	0,50	0,50	0,86	0,62	0,12	0,24
M9G	0,10	0,30	0,40	0,60	0,00	0,00	0,00	0,60	0,23	0,23	0,37
M9O	0,10	0,30	0,40	0,00	0,10	0,00	0,00	0,40	0,18	0,18	0,22
M9U	0,20	0,30	0,00	0,20	0,10	0,00	0,00	0,30	0,16	0,16	0,14
M10O	0,00	0,10	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,20	0,06	0,06	0,14
M10U	0,10	0,00	0,04	0,00	0,10	0,00	0,00	0,10	0,05	0,05	0,05

O: Oberfläche Geglättet, **G:** Oberfläche Geschnitten, **U:** Unterseite der Probe, **nB:** nicht gebürstete Probe, **T:** Einzelmessung (Tiefe), **-:** Fehlerindikator in negative Richtung, **+**: Fehlerindikator in positive Richtung

Tabelle A-4: Tiefe der Zementsteinzerstörung nach 2 Monaten

Probe	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Min	Max	Mittel
M1G	0,04	0,12	0,04	0,11	0,21	0,25	0,04	0,25	0,13
M1O	0,18	0,13	0,11	0,28	0,21	0,17	0,11	0,28	0,18
M1O nB	0,11	0,16	0,10	0,10	0,11	0,13	0,10	0,16	0,12
M2G	0,19	0,16	0,16	0,16	0,23	0,21	0,16	0,23	0,19
M2O	0,34	0,10	0,11	0,15	0,04	0,08	0,04	0,34	0,14
M3G	0,13	0,15	0,17	0,20	0,16	0,21	0,13	0,21	0,17
M3O	0,08	0,05	0,09	0,06	0,08	0,04	0,04	0,09	0,07
M4O	0,28	0,25	0,27	0,23	0,27	0,31	0,23	0,31	0,27
M4U	0,15	0,12	0,21	0,20	0,16	0,25	0,12	0,25	0,18
M5G	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M5G nB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M5O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M5U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M6G	0,14	0,10	0,22	0,14	0,21	0,08	0,08	0,22	0,15
M6G nB	0,18	0,10	0,17	0,21	0,13	0,10	0,10	0,21	0,15
M6O	0,15	0,18	0,20	0,22	0,19	0,18	0,15	0,22	0,19
M6U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M7G	0,25	0,23	0,24	0,13	0,08	0,16	0,08	0,25	0,18
M7O	0,22	0,19	0,15	0,18	0,16	0,16	0,15	0,22	0,18
M7O nB	0,12	0,11	0,07	0,11	0,13	0,05	0,05	0,13	0,10
M8O	0,19	0,14	0,25	0,18	0,19	0,09	0,09	0,25	0,17
M9G	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M9O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M9U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M10O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M10U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

O: Oberfläche Geglättet, **G:** Oberfläche Geschnitten, **U:** Unterseite der Probe, **nB:** nicht gebürstete Probe, **T:** Einzelmessung (Tiefe), **-:** Fehlerindikator in negative Richtung, **+**: Fehlerindikator in positive Richtung

Tabelle A-5: Tiefe der Zementsteinzerstörung nach 4 Monaten

Probe	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Min	Max	Mittel
M1G	0,42	0,27	0,47	0,50	0,47	0,47	0,27	0,50	0,43
M1O	0,65	0,51	0,45	0,50	0,44	0,43	0,43	0,65	0,50
M1O nB	0,25	0,24	0,32	0,23	0,33	0,20	0,20	0,33	0,26
M2G	0,35	0,39	0,28	0,33	0,34	0,62	0,28	0,62	0,39
M2O	0,33	0,28	0,27	0,33	0,41	0,54	0,27	0,54	0,36
M3G	0,23	0,21	0,21	0,22	0,24	0,20	0,20	0,24	0,22
M3O	0,11	0,13	0,17	0,20	0,12	0,12	0,11	0,20	0,14
M4O	0,34	0,27	0,28	0,34	0,28	0,32	0,27	0,34	0,31
M4U	0,28	0,31	0,30	0,28	0,30	0,30	0,28	0,31	0,30
M5G	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M5G nB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M5O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M5U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M6G	0,34	0,37	0,38	0,35	0,50	0,62	0,34	0,62	0,43
M6G nB	0,23	0,26	0,23	0,33	0,27	0,27	0,23	0,33	0,27
M6O	0,39	0,40	0,32	0,33	0,41	0,27	0,27	0,41	0,35
M6U	0,18	0,18	0,29	0,18	0,16	0,08	0,08	0,29	0,18
M7G	0,30	0,27	0,30	0,32	0,27	0,31	0,27	0,32	0,30
M7O nB	0,17	0,23	0,11	0,18	0,10	0,20	0,10	0,23	0,17
M8O	0,27	0,25	0,23	0,23	0,30	0,28	0,23	0,30	0,26
M9G	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M9O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M9U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M10O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M10U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

O: Oberfläche Geglättet, **G:** Oberfläche Geschnitten, **U:** Unterseite der Probe, **nB:** nicht gebürstete Probe, **T:** Einzelmessung (Tiefe), **-:** Fehlerindikator in negative Richtung, **+**: Fehlerindikator in positive Richtung

Tabelle A-6: Tiefe der Zementsteinzerstörung nach 6 Monaten

Probe	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Min	Max	Mittel
M1G	0,57	0,60	0,55	0,47	0,42	0,54	0,42	0,60	0,53
M1O	0,52	0,40	0,47	0,67	0,58	0,59	0,40	0,67	0,54
M1O nB	0,35	0,40	0,38	0,31	0,28	0,30	0,28	0,40	0,34
M2G	0,52	0,55	0,47	0,33	0,54	0,55	0,33	0,55	0,49
M2O	0,45	0,42	0,47	0,52	0,43	0,42	0,42	0,52	0,45
M3G	0,41	0,32	0,40	0,33	0,32	0,43	0,32	0,43	0,37
M3O	0,26	0,34	0,29	0,40	0,39	0,39	0,26	0,40	0,35
M4O	0,58	0,50	0,42	0,49	0,55	0,45	0,42	0,58	0,50
M4U	0,50	0,49	0,55	0,51	0,56	0,56	0,49	0,56	0,53
M5G	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M5G nB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M5O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M5U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M6G	0,45	0,40	0,84	0,47	0,50	0,43	0,40	0,84	0,52
M6G nB	0,25	0,25	0,34	0,32	0,32	0,32	0,25	0,34	0,30
M6O	0,38	0,39	0,44	0,47	0,49	0,50	0,38	0,50	0,45
M6U	0,39	0,37	0,29	0,35	0,35	0,33	0,29	0,39	0,35
M7G	0,72	0,62	0,74	0,64	0,74	0,62	0,62	0,74	0,68
M7O	0,60	0,55	0,54	0,59	0,55	0,67	0,54	0,67	0,58
M7O nB	0,13	0,16	0,21	0,45	0,35	0,13	0,13	0,45	0,24
M8O	0,28	0,42	0,39	0,11	0,26	0,22	0,11	0,42	0,28
M9G	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M9O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M9U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M10O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M10U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

O: Oberfläche Geglättet, **G:** Oberfläche Geschnitten, **U:** Unterseite der Probe, **nB:** nicht gebürstete Probe, **T:** Einzelmessung (Tiefe), **-:** Fehlerindikator in negative Richtung, **+**: Fehlerindikator in positive Richtung

B Anhang B – Messwerte zur Porosität

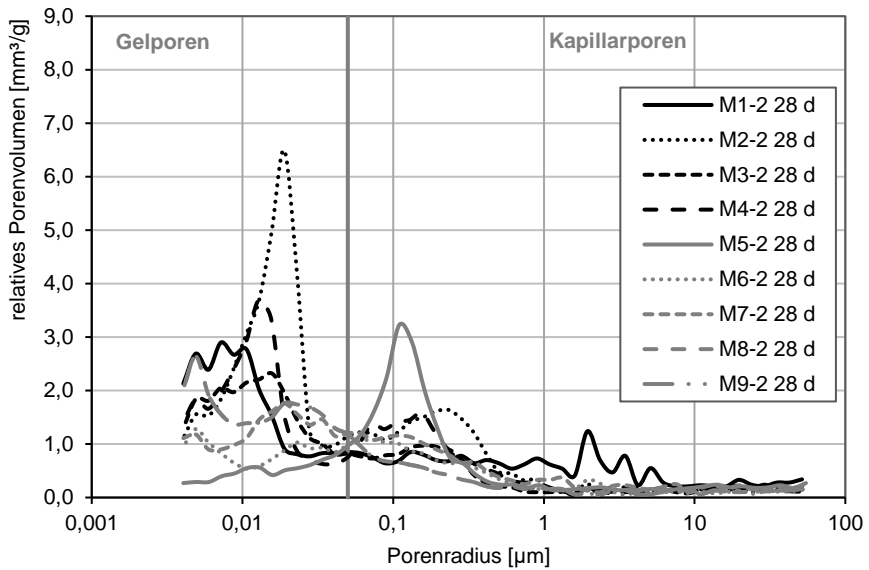
Tabelle B-1: Ergebnisse der Quecksilberdruckporosimetrie der Mörtel M1 bis M10

Mörtel	Probentiefe	Porosität in [%]		scheinbare Dichte in [g/cm ³]	
		> 28 d	> 90 d	> 28 d	> 90 d
M1	O ¹⁾	9,05	6,44	2,47	2,44
	K ²⁾	9,67	6,94	2,46	2,70
	U ³⁾	9,55	6,94	2,52	2,64
M2	O ¹⁾	10,99	6,96	2,38	2,34
	K ²⁾	11,54	6,11	2,41	2,33
	U ³⁾	10,14	7,37	2,40	2,38
M3	O ¹⁾	9,50	6,91	2,46	2,42
	K ²⁾	7,90	6,99	2,47	2,42
	U ³⁾	9,43	7,18	2,43	2,43
M4	O ¹⁾	7,83	4,71	2,37	2,41
	K ²⁾	9,09	5,18	2,42	2,27
	U ³⁾	9,22	6,29	2,33	2,33
M5	O ¹⁾	6,72	6,03	2,51	2,45
	K ²⁾	6,74	2,81	2,52	2,38
	U ³⁾	7,70	3,69	2,47	2,40
M6	O ¹⁾	7,14	4,89	2,46	2,43
	K ²⁾	5,72	5,47	2,44	2,43
	U ³⁾	8,43	6,46	2,46	2,25
M7	O ¹⁾	9,40	7,23	2,51	2,48
	K ²⁾	7,72	6,26	2,49	2,45
	U ³⁾	9,41	8,52	2,46	2,45
M8	O ¹⁾	12,21	6,40	2,49	2,41
	K ²⁾	7,23	4,45	2,41	2,39
	U ³⁾	9,49	6,27	2,43	2,41
M9	O ¹⁾	16,03	15,94	2,42	2,37
	K ²⁾	14,91	18,14	2,47	2,40
	U ³⁾	17,01	18,15	2,46	2,42
M10	O ¹⁾	8,64	7,71	2,31	2,25
	U ³⁾	8,45	7,42	2,30	2,24

1) Oberseite des Prüfkörpers (bis 5 mm Tiefe)

2) Kernbereich des Prüfkörpers

3) Unterseite des Prüfkörpers (bis 5 mm Tiefe)



Legende:

- | | |
|--|---|
| CEM I, Typ 1: M3, M4, M8 (Nassspritzmörtel) | CEM I, Typ 2: M2, M6 (Nassspritzmörtel) |
| CEM I, Typ 3: M9 (Nassspritzmörtel) | CEM II A/LL, Typ 1: M7 (Trockenspritzmörtel) |
| CEM III, Typ 1: M1 (Bodenmörtel) | |

Abbildung B-1: Darstellung der Porenradienverteilung > 28 d, Kernbereich der Mörtel M1 bis M9

Tabelle B-2: Messwerte zur Gesamtporosität nach sechs Monaten Auslaugung (Endporosität) und nach > 90 d (Anfangsporosität)

Mörtel	Probenfläche	Probenbezeichnung	Endporosität in [%]	Anfangsporosität in [%]	Δ 90 d in [%]
M1	Oberfläche	M1O P2	7,60	6,44	1,2
	Geschnitten	M1G P2	7,95	6,94	1,0
M2	Oberfläche	M2O P1	6,29	6,96	-0,7
	Geschnitten	M2G P2	6,90	6,11	0,8
M3	Oberfläche	M3O P2	7,87	6,91	1,0
	Geschnitten	M3G P2	7,35	6,99	0,4
M4	Oberfläche	M4O P2	4,86	4,71	0,2
	Unterseite	M4U P2	7,19	6,29	0,9
M5	Oberfläche	M5O P2	8,51	6,03	2,5
	Geschnitten	M5G P2	5,30	3,51	1,8
	Unterseite	M5U P2	8,43	2,81	5,6
M6	Oberfläche	M6O P2	7,31	4,89	2,4
	Geschnitten	M6G P2	5,81	5,47	0,3
	Unterseite	M6U P2	5,28	6,46	-1,2
M7	Oberfläche	M7O P2	8,22	7,23	1,0
	Geschnitten	M7G P2	7,78	6,26	1,5
M8	Oberfläche	M8O P2	7,90	6,40	1,5
M9	Oberfläche	M9O P1	12,58	15,94	-3,4
	Geschnitten	M9G P1	16,13	18,14	-2,0
	Unterseite	M9U P1	17,24	18,15	-0,9
M10	Oberfläche	M10O P1	8,77	7,71	1,1
	Unterseite	M10P P2	8,06	7,42	0,6

O: Oberfläche Geglättet, **G:** Oberfläche Geschnitten, **U:** Unterseite der Probe

Tabelle B-3: Differenzierte Betrachtung des Kapillar- und Gelporenvolumens nach > 90 d und nach sechs Monaten Auslaugung

Mörtel	Probenfläche	> 90 d		6 Monate		Differenz	
		Kapillarporenvolumen in [mm ³ /g]	Gelporenvolumen in [mm ³ /g]	Kapillarporenvolumen in [mm ³ /g]	Gelporenvolumen in [mm ³ /g]	Kapillarporenvolumen in [mm ³ /g]	Gelporenvolumen in [mm ³ /g]
M1	O	11,60	16,27	15,73	17,58	4,13	1,31
	G	17,15	10,31	15,80	19,03	-1,35	8,72
M2	O	13,76	17,74	10,02	17,89	-3,74	0,15
	G	14,23	13,42	11,05	19,72	-3,18	6,30
M3	O	7,72	22,77	9,95	25,35	2,23	2,58
	G	14,60	16,28	12,17	20,02	-2,43	3,74
M4	O	9,63	10,58	9,22	12,04	-0,41	1,46
	U	11,12	17,08	13,39	18,60	2,27	1,52
M5	O	14,76	11,38	22,45	14,98	7,69	3,60
	G	6,68	7,84	8,63	13,67	1,95	5,83
	U	4,93	6,71	21,35	15,77	16,42	9,06
M6	O	6,43	14,31	13,46	18,73	7,03	4,42
	G	16,05	7,52	9,26	15,75	-6,79	8,23
	U	9,49	18,08	8,99	13,8	-0,50	-4,28
M7	O	11,63	19,62	13,22	23,07	1,59	3,45
	G	14,78	12,06	12,65	21,28	-2,13	9,22
M8	O	11,63	19,62	10,81	24,58	-0,82	4,96
M9	O	37,02	41,14	24,80	35,41	-12,22	-.5,73
	G	50,75	40,95	26,68	36,53	-24,07	-4,42
	U	45,09	45,70	51,83	35,48	6,74	-10,22

O: Oberfläche Geglättet, **G:** Oberfläche Geschnitten, **U:** Unterseite der Probe

C Anhang C – Abhängigkeit von Porosität zu Auslaugungstiefe

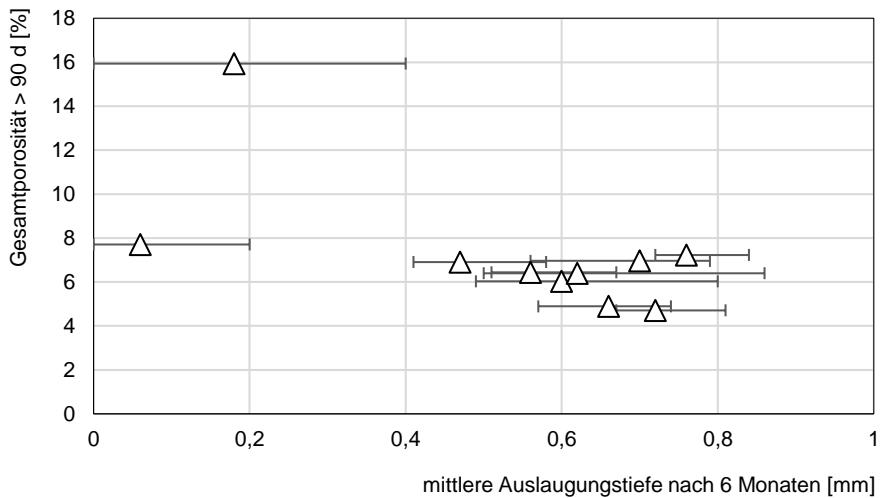


Abbildung C-1: Mögliche Abhängigkeiten zwischen Kapillarporenvolumen (Charakterisierung > 90 d) und mittlerer Auslaugungstiefe nach 6 Monaten Auslaugung, Mörtel M10 bis M90

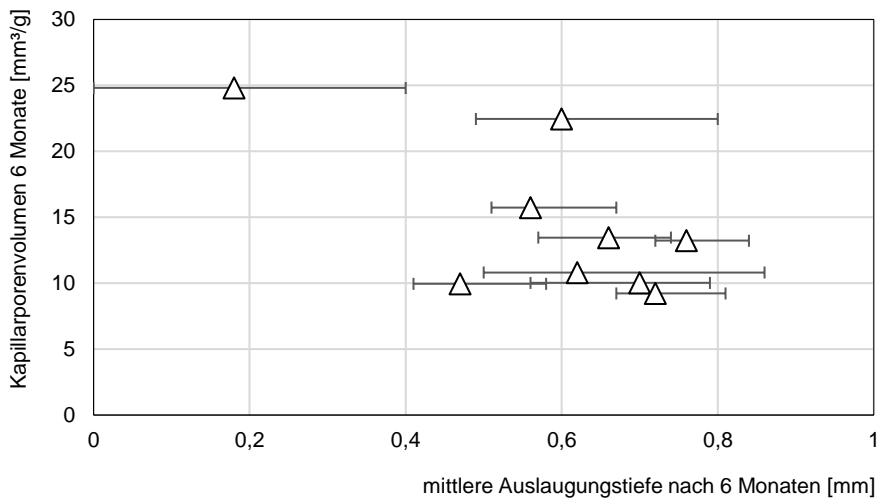


Abbildung C-2: Mögliche Abhängigkeiten zwischen Kapillarporenvolumen (Porenvolumen nach 6 Monaten Auslaugung) und mittlerer Auslaugungstiefe nach 6 Monaten Auslaugung, Mörtel M10 bis M90

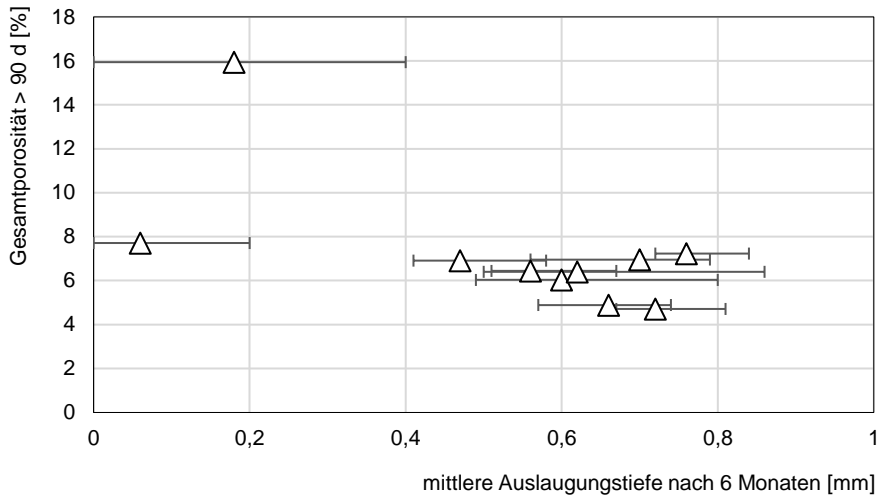


Abbildung C-3: Mögliche Abhängigkeiten zwischen Gesamtporosität (Charakterisierung > 90 d) und mittlerer Auslaugungstiefe nach 6 Monaten Auslaugung, Mörtel M10 bis M100

D Anhang D – Verfahrensbeschreibung Porosität und Porenradienverteilung

Die Messung der Porenvolumenverteilung von porösen Feststoffen erfolgte mittels Quecksilberdruckporosimetrie gemäß DIN 66133 (DIN 66133 wurde zurückgezogen und 2019 durch DIN ISO 15901-1 ersetzt). Das Verfahren nach [Ritter u. Drake, 1945] basiert auf der Messung des eingepressten Quecksilbervolumens in Abhängigkeit vom aufgetragenen Druck. Der Zusammenhang zwischen Porenradius und Druck kann unter Annahme des Zylinderkapillarmodells durch die Washburn-Gleichung angegeben werden.

Bevor die Messung mittels Quecksilberdruckporosimetrie erfolgen konnte, wurde die Probe für 24 h im Vakuum entgast, im Anschluss gewogen und in die Messapparatur eingebaut. Mit der Gerätekombination Pascal 140 und 440 der Firma Porotec konnte ein Druck von bis zu 400 MPa aufgebaut werden. Dabei konnten Porenradien zwischen 2 nm bis 56 μm erfasst werden. Aus der Volumenänderung der Quecksilbersäule in der Kapillare erhält man in Abhängigkeit vom aufgetragenen Druck die Porenvolumenverteilung. Der in den Versuchen aufgetragene Druck wurde gemäß DVGW-Arbeitsblatt W 300-5 auf ~ 200 MPa begrenzt.

Die Auswertung erfolgte automatisch über ein an das Quecksilberdruckporosimeter angeschlossenes Rechnersystem unter Verwendung des zylindrischen Porenmodells. Bei den Auswertungen wurden folgende Annahmen getroffen: Grenzflächenwinkel Quecksilber-Probenoberfläche $\theta = 141,3^\circ$; Oberflächenspannung des Quecksilbers $\sigma = 0,480$ N/m.

Da vor allem die Kapillarporen für den Transport der Alkalien maßgeblich sind, wurde eine differenzierte Betrachtung zwischen Kapillar- und Gelporen getroffen (vgl. Abbildung B1, Anhang B). Als Unterscheidung zwischen Gel- und Kapillarporen wurde ein Porenradius von 0,05 μm als Grenzwert festgesetzt.

Im Rahmen der Mörtelcharakterisierung wurde die Porosität nach > 28 d und > 90 d, die scheinbare Dichte sowie die Porenradienverteilung der Mörtelproben geprüft. Der 90 d Wert galt für die Untersuchungen als Referenzwert. Unterschieden wurden die Prüfbereiche in Kernbereich, Oberseite und Unterseite (vgl. Abbildung D-1), damit der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit untersucht werden konnte.

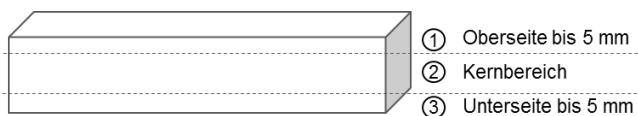


Abbildung D-1: Darstellung der Prüfbereiche für die Untersuchungen mittels Quecksilberdruckporosimetrie