

Technische Universität München
Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung

**Modellierung des Feuchte- und Salztransports unter Berücksichtigung der
Selbstabdichtung in zementgebundenen Baustoffen**

Petra Rucker-Gramm

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Peter Schießl, i.R.
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer,
Universität Stuttgart

Die Dissertation wurde am 05.06.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 27.10.2008
angenommen.

meiner Familie

VORWORT DER AUTORIN

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der Technischen Universität München.

Während dieser Tätigkeit bekam ich die Chance, ein Forschungsprojekt rund um die Thematik meiner Dissertation bearbeiten zu können. Dieses Projekt, in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik durchgeführt, wurde über einen Zeitraum von sechs Jahren von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziell unterstützt. Dafür möchte ich mich bei der DFG bedanken. Mein Dank gilt auch den Herren Dr. Robin Beddoe, Dr. Martin Krus und Dr. Karlheinz Wiegink für die Ausarbeitung des Forschungsantrags, der Voraussetzung zur Bewilligung der finanziellen Mittel war.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Peter Schießl für die Möglichkeit bei ihm promovieren zu dürfen. Viel mehr noch danke ich ihm, dass er mir während meiner Zeit am Institut ermöglichte, mir abseits von der Thematik meiner Dissertation einen breit gefächerten Wissens- und Erfahrungsschatz zu erarbeiten, der für meine berufliche Zukunft sehr wertvoll sein wird. Herr Professor Schießl gab mir stets das Vertrauen, Projekte und Entscheidungen mit einem hohen Maß an Freiraum zu gestalten, was ich nicht als selbstverständlich ansehe. Für die wesentliche Entscheidungen hat er stets richtungsweisende Hinweise und die erforderliche Unterstützung gegeben. Aber auch auf persönlicher Ebene war das Miteinander stets sehr herzlich und oft auch sehr lustig. Ich bin sehr stolz, eine solch herausragende Persönlichkeit als Doktorvater gehabt zu haben.

Für die Übernahme des Korreferates danke ich Herrn Professor Klaus Sedlbauer, stellt es doch eine schöne Abrundung der wunderbaren langjährigen Zusammenarbeit mit ihm und seinen Mitarbeitern am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen dar. Angefangen von meinen ersten Tagen als Diplomandin am Fraunhofer-Institut habe ich auch hier eine unerwartete Unterstützung für die Durchführung meiner Versuche bekommen, die hauptsächlich am Fraunhofer-Institut vorgenommen wurden. An dieser Stelle möchte ich mich ganz besonders bei Herrn Dr. Martin Krus, Frau Dr. Cornelia Fitz und Frau Annelie Burghardt für die wertvolle Unterstützung bedanken.

Nicht jeder Doktorand hat die Möglichkeit einen wissenschaftlichen Betreuer zu finden, mit dem er die Ergebnisse seiner Forschungsarbeit bis ins Kleinste diskutieren kann. Ich hatte das große Glück mit Dr. Robin Beddoe einen solchen zu haben, der es auf interessante, herausfordernde und freundschaftliche Art verstanden hat, einer Bauingenieurin wie mir, einen Einstieg in die Tiefen der Physik und Modellierung zu ermöglichen. Dr. Robin Beddoe

danke ich sehr herzlich für seinen uneingeschränkten Einsatz, der dazu geführt hat, dass ich dieses Thema mit sehr viel Freude und Engagement bearbeitet habe und dass die Arbeit zu dem werden konnte, was sie heute ist.

Die vorliegende Arbeit war mit einem hohen Versuchsaufwand verbunden. Hierbei haben mich meine wissenschaftlichen Hilfskräfte und meine Diplomanden mit großem persönlichen Einsatz, den ich sehr zu schätzen weiß, unterstützt. Ohne die Hilfe von Julia Becker, Christian Bludau, Michael Doehler, Eva Eberherr, Sonja Friedrich, Maximilian Fuchs, Bojan Mandic, Claudia Reitmeyer, Judith Schinabeck und Jens Skarabis wäre die Arbeit heute sicherlich noch nicht fertig gestellt.

Weiterhin gilt mein besonderer Dank allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, die mich in meiner Arbeit unterstützt haben. Die angenehme Arbeitsatmosphäre, die kollegiale Zusammenarbeit und der fachliche Erfahrungsaustausch haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Insbesondere möchte ich mich bei Doris Strehlein und meinem heutigen Geschäftspartner Christian Brandes für die schöne unvergessliche Zeit im gemeinsamen Büro bedanken. Vielen Dank für die fachliche und vor allem moralische Unterstützung während der ganzen Zeit. Ich hatte die besten Kollegen, die man sich vorstellen kann.

Meinem heutigen Geschäftspartner Dr. Sascha Lay danke ich zunächst dafür, dass er mir für meine Arbeit eine Vielzahl an Betonprobekörpern verschiedenster Betonrezepturen zur Verfügung gestellt hat. Dadurch war es möglich, mit überschaubarem Aufwand die Transportkenngrößen zur Anwendung des Modells für eine Vielzahl von Betonzusammensetzungen zu ermitteln. Weiterhin danke ich ihm herzlich für die vielen wertvollen Anregungen, die zur Verbesserung der vorliegenden Arbeit führten und für die Motivation, die er mir für die Fertigstellung der Arbeit durch sein großes Interesse daran gegeben hat.

Den entscheidenden Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit hat meine Familie geleistet. Durch die stetige Motivation, Unterstützung und das grenzenlose Verständnis für den andauernden Mangel an Freizeit und Verfügbarkeit ist mir das Gelingen dieser Arbeit deutlich erleichtert worden. Meinen Eltern und meiner Schwester Claudia danke ich deshalb von ganzem Herzen für die Basis, die sie mir für diese Arbeit geschaffen haben. Meinem lieben Mann danke ich sehr herzlich für seine Geduld und vor allem für die Zeit, die er mir mit einer unerwarteten Selbstverständlichkeit zur Verfügung gestellt hat, indem er mir nach besten Kräften viele Dinge abgenommen hat.

KURZFASSUNG

Hohe Feuchte- und Salzgehalte können in Stahlbetonbauteilen erhebliche Schäden verursachen. Um die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen abschätzen zu können, ist es nötig, den Feuchte- und Salzhaushalt in zementgebundenen Baustoffen realitätsnah zu berechnen.

Mit dem Ziel der Entwicklung eines Berechnungsmodells werden die maßgebenden Mechanismen und Wechselwirkungen, die beim Feuchte- und Salztransport in zementgebundenen Baustoffen eine Rolle spielen, ermittelt und beschrieben. Neben dem Einfluss der Salze auf die bereits bekannten Feuchtetransportphänomene liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Untersuchung der Ursache für die Selbstabdichtung zementgebundener Baustoffe gegenüber eindringendem Wasser.

Unter Berücksichtigung der Selbstabdichtung wird der Kapillartransport durch ein neues Modell beschrieben. Neben dem Feuchte- und Salztransport werden im Berechnungsmodell zusätzlich Temperatureinflüsse berücksichtigt.

ABSTRACT

High contents of moisture and salt in reinforced concrete structures can lead to considerable damage shortening service life. To estimate the durability of reinforced concrete structures, it is necessary to be able to calculate the moisture and salt content of cementitious building materials under field conditions.

The essential mechanisms and interactions governing moisture and salt transport in cementitious building materials have been determined and described with the aim of developing a numerical model. Besides the effect of salt on known transport phenomena, the work is focused on the cause of the self-sealing effect of cementitious building materials against penetrating water.

A new numerical model for capillary transport of moisture and salt is presented which takes the self-sealing effect into account. The effect of temperature is also included.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a_σ	[mN/(K·m)]	Konstante zur Näherung von σ
\bar{a}_m	[nm]	Molekülgröße
A	[kg/(m ² ·√s)]	Wasseraufnahmekoeffizient
b	[-]	Approximationsfaktor zur Näherung der Feuchtespeicherfunktion nach Künzel
b_w	[1/(kg/m ³)]	Feuchtezuschlag
c	[kg/m ³]	Konzentration
$c_{\text{Lösung}}$	[kg/m ³]	Salzkonzentration einer Lösung
c	[-]	Materialkonstante
c	[J/(kg·K)]	spezifischen Wärmekapazität
c_D	[Debye/nm ³]	Dipolkonzentration
d	[m]	Schichtdicke adsorbierter Wassermoleküle
d	[m]	Probekörperdicke
d_l	[m]	Dicke einer Wassermolekülschicht
D	[m ² /s]	Diffusionskoeffizient
D_{eff}	[m ² /s]	effektiver (Ionen-) Diffusionskoeffizient
D_{WD}	[kg/(m·s·Pa)]	Wasserdampfdiffusionskoeffizient $D_{WD,0}$: salzfrei; D_{WD}^* : salzbelastet
D_{OD}	[m ² /s]	Oberflächendiffusionskoeffizient
D_W	[m ² /s]	wassergehaltsabhängige Transportkoeffizienten (Index S: Saugen, Index W: Weiterleiten)
F	[(kg/m ³)/Signal _{NMR}], [M.-%/Signal _{NMR}]	Umrechnungsfaktor zur Berechnung des Wassergehalts aus dem gemessenen NMR-Signal
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
h	[m]	Höhe
h_v	[J/kg]	Latentwärme beim Phasenübergang
H	[J/m ³]	Enthalpie
k_s	[-]	Konstante (Bindungskinetik)
l	[m]	Länge
Δl_O	[m]	Längenänderung infolge Änderung der Oberflächenenergie
Δl_{Sp}	[m]	Längenänderung infolge Änderung des Spaltdrucks
m	[kg/m ²]	aufnehmbare Flüssigkeitsmenge
\dot{m}	[kg/(m ² ·s)]	pro Zeit- und Flächeneinheit transportierte Stoffmenge (Stromdichte)
\dot{m}_γ	[kg/(m ² ·s)]	Flüssigkeitsstrom über die Oberfläche
\dot{m}_{ID}	[kg/(m ² ·s)]	Ionendiffusionsstromdichte
\dot{m}_{OD}	[kg/(m ² ·s)]	Stromdichte infolge Oberflächendiffusion
\dot{m}_p	[kg/(m ² ·s)]	Flüssigkeitsstromdichte infolge Gesamtdruckgefälle

\dot{m}_{WDD}	[kg/(m ² ·s)]	Stromdichte infolge Wasserdampfdiffusion
n	[-]	Anzahl absorbierter Wassermoleküle
n_{H_2O}	[-]	Stoffmengenanteil des Wassers in einer Salzlösung
N	[cps]	Photonenanzahl (Zählrate)
N_A	[1/mol]	Avogadro Konstante
M	[g/mol]	Molmasse
O_G	[m ² /m ³]	spezifische Oberfläche der Gesteinskörnung
O_i	[m ² /g] bzw. [m ² /m ³]	innere Oberfläche
O_W	[m ² /g] bzw. [m ² /m ³]	innere Oberfläche, die ein Wassermolekül bedeckt
L	[mol ⁻¹]	Loschmidtsche Zahl
p_D	[Pa]	Wasserdampfpartialdruck
p_U	[Pa]	Wasserdampfpartialdruck der Umgebung
p_O	[Pa]	Wasserdampfpartialdruck an der Oberfläche
P	[Vol.-%]	Porosität (P_0 : salzfrei; P^* : salzbelastet; $P_{Transport}$: transportrelevant)
P_A	[Pa]	äußerer Druck
ΔP_G	[Pa]	Gesamtdruckdifferenz
P_H	[Pa]	hydrostatischer Druck
P_K	[Pa]	Kapillardruck
P_V	[Pa]	Strömungsdruck
P_L	[Pa]	mittlerer Gesamtdruck der Umgebungsluft
$P_{Partikel}$	[N/m ²]	hydrostatischer Druck auf Gelpartikel
P_T	[Pa]	Trägheitsdruck
q	[-]	Abdichtungskoeffizient (Selbstabdichtung)
\dot{q}	[W/m ²]	Wärmestromdichte
r	[m]	Porenradius (Index Zyl.: Zylinderkapillaren)
$r_{Partikel}$	[m]	Radius eines Gelteilchens
R_D	[J/(kg·K)]	universelle Gaskonstante
s_f	[mol/l] bzw. [kg/m ³], [M.-%]	Konzentration an freien Ionen
s_{ges}	[mol/l] bzw. [kg/m ³], [M.-%]	Konzentration an Ionen (frei und gebunden)
s_g	[mol/l] bzw. [kg/m ³], [M.-%]	Konzentration an gebundenen Ionen
$s_{g,max}$	[mol/l] bzw. [kg/m ³], [M.-%]	maximale Bindekapazität
$s_{Kristall}$	[mol/l] bzw. [kg/m ³], [M.-%]	Konzentration an kristallinem Salz
S_q	[J/m ³]	Wärmesenke/-quelle
t	[s] bzw. [h]	Zeit
t_k	[d]	Zeitkonstante (Bindungskinetik)
t_u	[h]	Zeitkonstante (Selbstabdichtung)
$\Delta\sqrt{t}$	[%]	Abweichung vom Eindringverhalten nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz
T	[K]	Temperatur in Kelvin
$v(t)$	[m/s]	Eindringgeschwindigkeit
V	[m ³]	Volumen
V_H	[-]	Verhältnis der Eindringtiefe mit und ohne Druck
V_m	[-]	Konstante zur Berücksichtigung des Wasservolumens

		bei monomolekularer Bedeckung der Oberfläche
$V_{0/4}$	[kg/m ³]	Volumen der Gesteinskörnung (0/4)
V_{ZL}	[kg/m ³]	Zementleimvolumen
w	[kg/(m ² ·√h)]	Wasseraufnahmekoeffizient „w-Wert“
w	[kg/m ³]	Wassergehalt
w_{ad}	[kg/m ³]	Wassergehalt infolge Adsorption
w_{in}	[kg/m ³]	Ausgangswassergehalt
w_f	[kg/m ³]	freie Wassersättigung
w_{kap}	[kg/m ³]	kapillaraktives Wasser
w_{Kk}	[kg/m ³]	Wassergehalt infolge Kapillarkondensation
w_u	[kg/m ³]	umstrukturiertes Wasser
$w_{u,max}$	[kg/m ³]	maximal umstrukturierbares Wasser
w_{80}	[kg/m ³]	Ausgleichsfeuchtegehalt bei 80 % r.F.
$w(\varphi)$	[kg/m ³]	Ausgleichsfeuchtegehalt bei der relativen Luftfeuchte φ
Δw	[kg/m ³]	Änderung des Wassergehalts
x	[m]	Weglänge
$x(t)$	[m]	Eindringtiefe in Abhängigkeit der Zeit
z	[kg/m ³]	Zementgehalt

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bezeichnung
α_η	[-]	Konstante zur Näherung von η
α_K	[W/(m ² ·K)]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
α	[W/(m ² ·K)]	Wärmeübergangskoeffizient
$1/\alpha$	[m ² ·K/W]	Wärmeübergangswiderstand
β	[kg/(m ² ·s·Pa)]	Wasserdampfübergangskoeffizienten
β	[m ² /kg]	Massenabschwächungskoeffizienten
δ	[kg/(m·s·Pa)]	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient
δ_a	[kg/(m·s·Pa)]	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft
γ	[m/s]	Übergangskoeffizient für kapillares Saugen
η	[kg/(m·s)] bzw. [Pa·s]	dynamische Viskosität
φ	[-]	relative Luftfeuchte
φ_h	[-]	Deliqueszenz-Luftfeuchte
ϑ	[°C]	Temperatur in Celsius
ϑ_o	[°C]	Oberflächentemperatur
ϑ_U	[°C]	Umgebungstemperatur
λ	[W/(m·K)]	Wärmeleitfähigkeit
μ	[-]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
μ_D	[Debye]	elektrisches Dipolmoment
θ	[°]	Randwinkel bzw. Benetzungswinkel
σ	[N/m]	Oberflächenenergie bzw. Oberflächenspannung
ρ	[kg/m ³]	Rohdichte
Ψ	[-]	Sättigungsgrad w/w_f

f	[l/m ²]	pro Flächeneinheit aufgenommenes Flüssigkeitsvolumen
f^*_{FK}	[l/m ²]	pro Flächeneinheit aufgenommenes Flüssigkeitsvolumen bezogen auf Hexan

Indizes

Symbol	Bezeichnung
0	Ausgangszustand
1	Zustand 1
50	Bezug auf Ausgleichsfeuchte von 50 % r.F.
Cl	Chlorid
BET	nach der Theorie von Brunauer, Emmett und Teller
$Beton$	Bezug auf die Gesamtmatrix des untersuchten Betons/Mörtels)
H_2O	Wasser
ini	Anfangsbedingungen
$Lsg.$	Lösung
$NaCl$	Natriumchlorid
Na_2SO_4	Natriumsulfat
QSD	Quecksilberdruckporosimetrie
max	Maximalwert
min	Minimalwert
Na	Natrium
NMR	aus Messungen mittels Kernspinresonanz
\sqrt{t}	entsprechend des Wurzel-Zeit-Gesetzes
tr	Bezug auf Ausgleichsfeuchte von 0 % r.F.
w	Wasser
$Zementstein$	Bezug auf das Zementsteinvolumen

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	13
1.1	Problemstellung und Zielsetzung.....	13
1.2	Vorgehensweise.....	15
2	GRUNDLAGEN.....	17
2.1	Gefüge zementgebundener Baustoffe.....	17
2.1.1	Gefüge des Zementsteins.....	17
2.1.2	Modelle zur Beschreibung des Gefüges zementgebundener Baustoffe.....	19
2.2	Feuchtehaushalt in porösen mineralischen Baustoffen.....	20
2.2.1	Sorptionsverhalten.....	20
2.2.2	Wechselwirkungen zwischen Wasser und Zementgel.....	22
2.2.3	Feuchtespeicherfunktion.....	23
2.3	Hygrische Dehnungen in porösen mineralischen Baustoffen.....	25
2.4	Feuchtetransport in Modellkapillaren.....	29
2.4.1	Allgemeines.....	29
2.4.2	Dampfdiffusion.....	31
2.4.3	Oberflächendiffusion.....	34
2.4.4	Kapillarleitung (Transport im teilgesättigten Porenraum).....	35
2.4.5	Einfluss äußeren Drucks auf die Kapillarleitung.....	41
2.4.6	Wechselwirkung zwischen Gefüge und Feuchte („Selbstabdichtung“).....	42
2.4.6.1	Definition des Begriffs Selbstabdichtung.....	42
2.4.6.2	Ursachen der Selbstabdichtung.....	43
2.4.6.3	Relevante Flüssigkeitseigenschaften.....	48
2.4.6.4	Darstellung in der Literatur beschriebener Versuche zur Selbstabdichtung.....	49
2.5	Einfluss der Temperatur auf den Feuchtetransport.....	53
2.6	Einfluss von Salzen auf die Feuchtespeicherung.....	55
2.7	Einfluss von Salzen auf die Transportmechanismen des Wassers.....	57
2.7.1	Salzeinfluss auf die Wasserdampfdiffusion.....	57
2.7.2	Einfluss von Salzen auf den Flüssigtransport.....	57
2.8	Salztransport in porösen Baustoffen.....	58
2.8.1	Transport von Salz mit der Flüssigkeit.....	58
2.8.2	Diffusion von Salzionen.....	59
2.8.3	Wechselwirkungen zwischen Matrix und Salzionen.....	60

2.8.3.1	Bindung von Chlorid.....	60
2.9	Wärmehaushalt	62
2.10	Wärme- und Feuchteübergang an der Bauteiloberfläche	63
2.11	Existierende Berechnungsmodelle.....	64
2.12	Zusammenfassung	66
3	BEOBACHTUNG DES FEUCHTE- UND SALZTRANSPORTS	67
3.1	Überblick	67
3.2	Untersuchte Materialien.....	68
3.3	Untersuchungen und zugehörige Untersuchungsmethoden.....	72
3.3.1	Gefügestruktur	72
3.3.1.1	Allgemeines	72
3.3.1.2	Porosität	72
3.3.1.3	Porengrößenverteilung	72
3.3.1.4	Innere Oberfläche.....	73
3.3.2	Bestimmung der Sorptionsisothermen.....	74
3.3.2.1	Versuchsbeschreibung	74
3.3.2.2	Ergebnisse und Interpretation	76
3.3.2.3	Beschreibung der Feuchtespeicherfunktion.....	79
3.3.3	Beobachtung des Kapillartransports	82
3.3.3.1	Allgemeines	82
3.3.3.2	Gravimetrische Bestimmung des integralen Lösungsgehalts	84
3.3.3.3	Bestimmung der Feuchteindringprofile mit Kernmagnetischer Resonanz	85
3.3.3.4	Bestimmung von Feuchteindringprofilen mit γ - Durchstrahlung	89
3.3.3.5	Interpretation der gemessenen Eindringprofile.....	91
3.3.3.6	Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten.....	93
3.3.3.7	Einfluss von Salzen auf den Kapillartransport.....	96
3.3.4	Ermittlung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	99
3.3.5	Diffusion gelöster Salze.....	102
3.3.6	Beobachtung der Chloridbindung.....	102
4	URSACHEN DER SELBSTABDICHTUNG	104
4.1	Versuchsmatrix	104
4.2	Einfluss durch die Eigenschaften der eindringenden Flüssigkeiten	107
4.2.1	Eindringen organischer Flüssigkeiten.....	107
4.2.2	Eindringen von Calciumhydroxidlösungen.....	110

4.2.3 Einfluss im Grundwasser enthaltener Ionen	112
4.2.4 Einfluss gelöster Salze auf die Selbstabdichtung	113
4.3 Eindringverhalten unter Druck	116
4.4 Einfluss der Vorlagerung	118
4.4.1 Einfluss des Feuchtegehalts	118
4.4.2 Überprüfung der Reversibilität der Selbstabdichtung	125
4.5 Einfluss der Gefügestruktur	126
4.6 Zusammenfassung	133
4.7 Schlussfolgerung und mathematische Beschreibung der Selbstabdichtung	135
5 ÜBERGANGSKOEFFIZIENT FÜR DIE KAPILLARE WASSERAUFNAHME	141
6 MODELLIERUNG DES GEKOPPELTEN WÄRME-, FEUCHTE- UND SALZTRANSPORTS	143
6.1 Transportgleichungen	143
6.2 Der Berechnungsalgorithmus	145
6.2.1 Allgemeines	145
6.2.2 Eingabeparameter	146
6.2.3 Berechnung	147
7 VALIDIERUNG DES MODELLS	148
8 NICHT BERÜCKSICHTIGTE MECHANISMEN	151
9 ZUSAMMENFASSUNG	153
10 LITERATUR	159

ANHANG

1 EINLEITUNG

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Bauwerksschäden treten häufig in Kombination mit einer hohen Bauteilfeuchte auf. Sollen Instandsetzungsmaßnahmen nachhaltig zum Erfolg führen, ist es zwingend erforderlich, sich nicht nur auf die Schadensbeseitigung zu beschränken, sondern die ursächlichen Mechanismen und Randbedingungen zu kennen, um vorbeugende Konzepte entwickeln zu können, die den Feuchteintrag möglichst verhindern oder deren Einfluss auf den Prozess der Schadensbildung minimieren. Da gewisse Feuchtesituationen in einem Bauteil das Entstehen von Schädigungsmechanismen erst ermöglichen, setzt die Planung geeigneter Maßnahmen die Kenntnis des Feuchtehaushalts voraus.

Bei Bauwerksanalysen ist neben der Aufnahme sichtbarer Schäden, die Erfassung der Umgebungsverhältnisse und die Zusammensetzung der im Bauteil verwendeten Stoffe sowie eine Bestimmung der Bauwerksfeuchte und Schadstoffbelastung nötig. Aufgrund instationärer Feuchtelasten und Trocknungsverhältnisse an den Oberflächen von Außenbauteilen sowie des komplexen Zusammenwirkens zwischen Feuchtespeicherung, Feuchte- und Schadstofftransport ist der Feuchtehaushalt anhand weniger stichprobenartiger Messergebnisse jedoch nur schwer abzuschätzen.

Mit Hilfe von Computer gestützten Simulationsmodellen ist es möglich, Feuchtevorgänge in Bauteilen abzuschätzen und zu bewerten. Für mineralische Baustoffe, die im Vergleich zu zementgebundenen Baustoffen ein grobporöses Porengefüge aufweisen, wie z.B. Ziegel und Natursandsteine, existieren eine Reihe von Berechnungsverfahren, die bereits mit großem Erfolg eingesetzt werden [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Für zementgebundene Baustoffe sind diese Ansätze jedoch nicht geeignet, da hier zusätzliche Mechanismen auftreten, die den Feuchtehaushalt entscheidend beeinflussen und somit in der numerischen Lösung der den Feuchtehaushalt des Bauteils beschreibenden Feuchtebilanzgleichung berücksichtigt werden müssen. Aufgrund ihrer feinporösen Struktur entstehen zwischen Wassermolekülen und der Festkörperoberfläche der Matrix zementgebundener Baustoffe Wechselwirkungen, die den Transport des Wassers durch den Werkstoff bedeutend einschränken können. In der Literatur wird diese Wechselwirkung, die in einem Wasseraufnahmeverhalten abweichend vom „Wurzel-Zeit-Gesetz“ resultiert, häufig als Selbstabdichtung bezeichnet. Für den Mechanismus der Selbstabdichtung gibt es eine Reihe von Erklärungsansätzen [z.B. 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15], eine mathematische Beschreibung, die es erlaubt, diesen Effekt in numerische Modelle zu integrieren, existiert jedoch nicht.

Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonkonstruktionen kommt neben dem Feuchtehaushalt, dem Salzgehalt, vor allem aber dem Chloridgehalt in der

Bewehrungslage eine entscheidende Bedeutung zu. Sobald in der Bewehrungslage ein kritischer Chloridgehalt erreicht wird, kann infolge Stahldepassivierung Korrosion ausgelöst werden [16, 17, 18, 19, 20].

Voraussetzung für das Eindringen von bauschädlichen Salzen, chloridhaltigen Salzen im Speziellen, ist die Gegenwart von Wasser als Lösungs- und Transportmittel. Die korrosionsauslösenden Chloridverbindungen können entweder aus den verwendeten Ausgangsstoffen stammen oder werden von außen eingetragen. Dies geschieht durch im Wasser gelöste Chloridverbindungen oder durch solche, die im feuchten Boden gelöst wurden und durch kapillares Saugen oder Diffusion in das Bauteil transportiert werden.

Modelle, mit denen gegenwärtig in der Baupraxis der Chloridgehalt in Höhe der Bewehrungslage abgeschätzt wird, beinhalten häufig eine Vielzahl von Parametern, die den Einfluss der Betonzusammensetzung und des Betonalters empirisch abbilden. Die tatsächlichen Transportmechanismen, über die die Chloride in das Innere der Bauteile gelangen, bleiben dabei meist unberücksichtigt [21]. In der Regel wird der Chloridtransport über einen reinen Diffusionsansatz beschrieben. Unter realen Klimabedingungen mit zyklischen Feucht-Trockenwechseln erfolgt der Transport jedoch nicht nur über Diffusion, sondern zusätzlich über die wesentlich leistungsfähigere Kapillarleitung. Die im Wasser gelösten Chloride werden konvektiv mittransportiert und verändern gleichzeitig die für die Transportmechanismen maßgebenden physikalischen Eigenschaften des Wassers.

Mit Modellen, die auf analytische Lösungen der Transport beschreibenden Differentialgleichungen zurück greifen, kann die Lebensdauer unter Berücksichtigung eines gewissen Sicherheitsniveaus berechnet werden [22, 23]. Ein numerisches Modell, mit welchem unter Berücksichtigung instationärer Randbedingungen und der wesentlichen Mechanismen, vor allem des Selbstabdichtungseffekts, zeitabhängig Wärme-, Feuchte- und Chloridverteilungen berechnet werden können, existiert nicht.

Ausgehend von dem Berechnungsverfahren nach Künzel [2] wird ein numerisches Modell entwickelt, das die Simulation des gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Salztransports in mineralischen Baustoffen unter instationären Randbedingungen ermöglicht. Der Mechanismus und die Wirkung der Selbstabdichtung in zementgebundenen Baustoffen wird durch einen neuen Modellansatz beschrieben. Des Weiteren wird neben den Wechselwirkungen zwischen Werkstoff und Wasser der zusätzliche Einfluss der Salze auf beide Komponenten untersucht und die Mechanismen werden modelliert. Die für die Anwendung des Berechnungsmodells erforderlichen materialabhängigen Speicher- und Transportkenngrößen können durch experimentelle Versuche im Labor bestimmt werden. Für

eine Vielzahl von Betonrezepturen werden mit dieser Arbeit Transportkenngrößen bereitgestellt.

Auf Grundlage des neuen Berechnungsverfahrens und der bereitgestellten Speicher- und Transportkoeffizienten kann das Eindringen von Wasser und Salz in mineralische Baustoffe unter verschiedensten Randbedingungen berechnet werden. Diese können wiederum für verschiedenste darauf aufbauende Anwendungen von Bedeutung sein, wie beispielsweise der Prognose und Bewertung von Schädigungsprozessen infolge eindringender Feuchte und Chloride, dem Vergleich verschiedener Rezepturvarianten im Hinblick auf ihren Widerstand gegen eindringende Feuchte, der Dimensionierung von erforderlichen Wandstärken bei WU-Bauteilen oder der Abschätzung von Spannungen infolge von Schwinden.

1.2 Vorgehensweise

Der Transport von Wasser und Salzen durch zementgebundene Baustoffe ist von sämtlichen Parametern abhängig, die die Entstehung und Veränderung des Porengefüges beeinflussen. Die Struktur des Porengefüges ist dabei von einer Vielzahl von Parametern, wie zum Beispiel Wasserzementwert, Bindemittelart- und -menge, Betonalter oder Carbonatisierungsfortschritt, abhängig. Aus der Vielzahl der möglichen Einflussparameter, allein auf die Struktur des zementgebundenen Baustoffs, wird deutlich, dass eine exakte mathematische Formulierung eines jeden stattfindenden Prozesses, der die Veränderung des Porengefüges und somit die Wechselwirkungen mit im Porengefüge enthaltenem Wasser und Salz beeinflusst, sehr komplex ist. Selbst bei ausreichender Kenntnis der genauen mathematischen Formulierungen und der zugehörigen Koeffizienten und maßgebenden Parameter wäre aber die praktische Bedeutung solcher Modelle fraglich, da dies eine genaue Kenntnis der Eingangsgrößen eines Materials unter bestimmten Randbedingungen voraussetzt. Die exakte Bestimmung jedes einzelnen Kennwerts ist jedoch, wenn überhaupt, nur mit sehr großem Aufwand möglich. Außerdem macht eine Vielzahl von Eingangsgrößen eine nachvollziehbare Berechnung der tatsächlich stattfindenden Mechanismen schwer möglich.

Aus diesem Grund erscheint es vor allem im Bezug auf eine Praxisrelevanz nötig, ein Modell zu entwickeln, welches es erlaubt, den Feuchte- und Salzhalt in einem Baustoff auf Grundlage der tatsächlich auftretenden Mechanismen, jedoch unter Berücksichtigung einer möglichst geringen Anzahl an frei wählbaren Parametern zu betrachten. Um die Anzahl der frei wählbaren Parameter bei der Berechnung des Feuchtehaushalts und der Salzgehaltsverteilung in zementgebundenen Baustoffen gering zu halten, wird daher als Basis für die Modellierung ein System bestehend aus einer Kombination eines Werkstoffes mit definierter Porenstruktur und Materialzusammensetzung sowie Wasser und Salz vorausgesetzt.

Das Modell soll die in Abbildung 1 dargestellten Transportmechanismen sowie die Wechselwirkungen, die zwischen den einzelnen Komponenten Werkstoff (zementgebundener mineralischer Baustoff), Wasser und Salz auftreten, berücksichtigen.

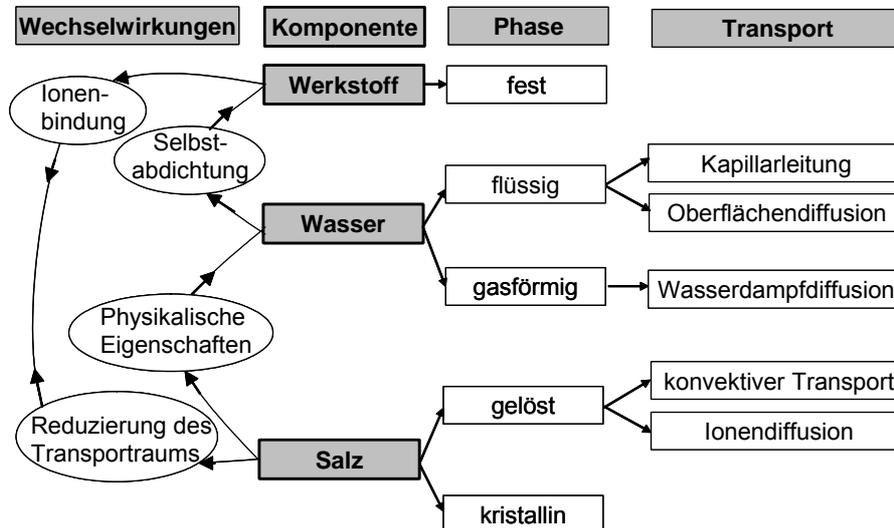


Abbildung 1: Transport- und Wechselwirkungsmechanismen in zementgebundenen mineralischen Baustoffen

In einem ersten Schritt wird das System, bestehend aus Material, Wasser und Salz in Form einer Literaturstudie näher beleuchtet und die Wechselwirkungen entsprechend des derzeitigen Wissensstands zusammenfassend dargestellt.

Abbildung 2 zeigt die weitere Vorgehensweise, die zur Entwicklung des numerischen Berechnungsmodells führt. Anhand von Laborversuchen werden die einzelnen Wechselwirkungs- und Transportmechanismen zwischen Wasser, Salz und einem weitgehend aushydratisierten Mörtel bekannter Zusammensetzung untersucht. Zur Beobachtung des Kapillart transports und der Selbstabdichtung des Betons gegen eindringendes Wasser werden beispielsweise mit Hilfe eines Messsystems, basierend auf einer Kombination aus kernmagnetischer Resonanz (NMR) und Gammastrahlenabsorption, die Verteilungen von eindringenden Salzen und Feuchte im Beton gemessen.

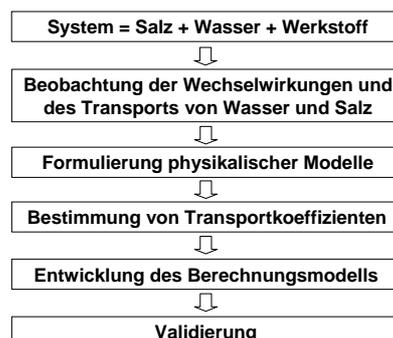


Abbildung 2: Vorgehensweise bei der Entwicklung des Berechnungsmodells

Auf Basis der Versuchsergebnisse, sowie den Erkenntnissen aus der Literaturlauswertung werden die Mechanismen mit Hilfe physikalischer Modellansätze beschrieben und die zugehörigen Transportkoeffizienten anhand der Versuchsergebnisse bestimmt.

Nach der Zusammenführung der einzelnen Mechanismen in ein Berechnungsmodell werden die physikalischen Modellansätze mit Validierungsversuchen, bei denen sämtliche Mechanismen zusammenwirken, überprüft und bestätigt.

2 GRUNDLAGEN

2.1 Gefüge zementgebundener Baustoffe

2.1.1 Gefüge des Zementsteins

Zementstein ist ein heterogenes System, das im Allgemeinen aus den Hydratationsprodukten, Poren mit darin enthaltener Porenflüssigkeit sowie aus Resten unhydratisierten Zementklinkers besteht (Abbildung 3).

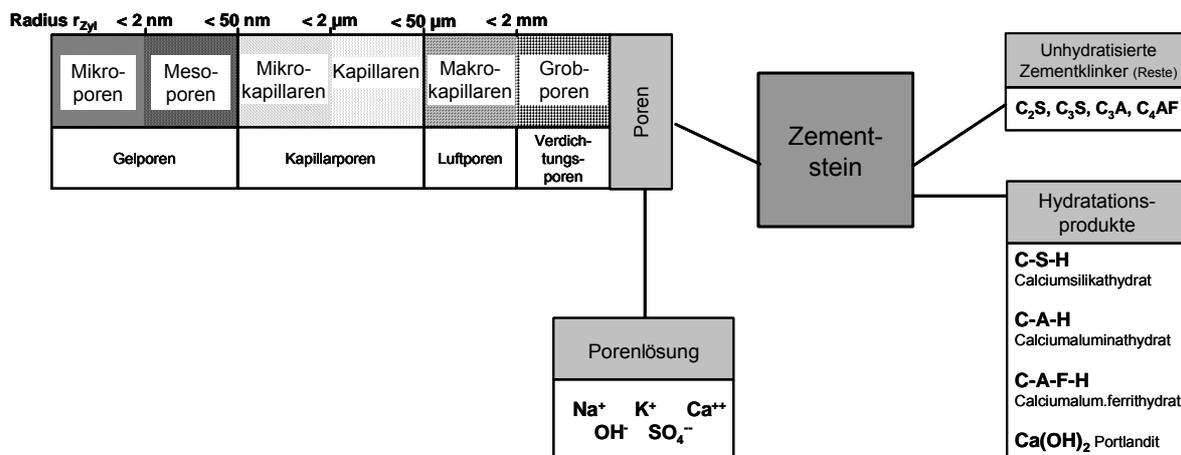


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Bestandteile des erhärteten Zementsteins

Die Porengrößen in zementgebundenen Baustoffen reichen von einigen Nanometern bis zu einigen Millimetern. Die IUPAC¹ teilt Poren in drei Klassen ein: Mikroporen (< 2 nm), Mesoporen (2-50 nm) und Makroporen (> 50 nm) [24]. Setzer schlägt für zementgebundene Baustoffe eine Erweiterung dieser Klassifizierung entsprechend Abbildung 3 vor [25]. In Abhängigkeit der Zusammensetzung der Ausgangsstoffe und des Hydratationsfortschritts ergeben sich unterschiedliche Porenradienverteilungen im Zementstein. Bezeichnend für zementgebundene Werkstoffe ist die Vielzahl an Poren im Nanometerbereich, wodurch diese bei vergleichbarer Gesamtporosität im Vergleich zu anderen mineralischen Baustoffen, wie Kalksandstein oder Ziegel, sehr große innere Oberflächen aufweisen. Diese große innere

¹ IUPAC: International Union of Pure and Applied Chemistry

Oberfläche von bis zu $600 \text{ m}^2/\text{g}$ ist maßgebend für die mechanischen, aber auch die hygrischen Eigenschaften zementgebundener Baustoffe und bewirkt, dass der Zementstein charakteristische Eigenschaften kolloidaler Stoffe (hohe Teilchenanzahl im Größenbereich von 1 bis 100 nm, die fein verteilt sind) zeigt.

Infolge der chemischen Reaktion mit Wasser an der Oberfläche der Klinkerphasen entstehen die Hydratationsprodukte. Während des Hydratationsfortschritts diffundiert das Anmachwasser durch die bereits gebildeten Hydratphasen hindurch und bewirkt ein Wachstum der Hydratationsprodukte nach Innen.

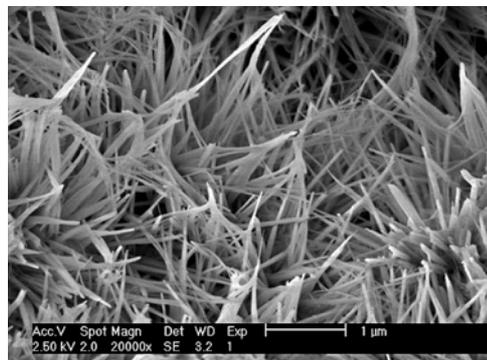


Abbildung 4: CSH-Phasen infolge Hydratation von C_3S (Länge der Faser bis zu $1,5 \mu\text{m}$ nach vollständiger Hydratation [26])

Mit fortschreitender Hydratation wandeln sich die Zementkörner in Zementgel um. Infolge der engen Verzahnung der spitznadeligen CSH-Phasen (vgl. Abbildung 4), deren Nadelspitzen einen Durchmesser von rd. 10 nm aufweisen, bilden sich Gelporen. Zusätzlich entsteht ein Porenraum zwischen benachbarten Hydratphasen.

Das Mikrogel, mit Porendurchmessern von weniger als einem Nanometer, stellt den Raum zwischen den Spitzen der sich verzahnenden CSH-Phasen dar. Das Mesogel, mit Porenraumgrößen zwischen einem und fünfzig Nanometern, ist der Porenraum, der zwischen den CSH-Phasen bzw. zwischen den CSH-Phasen und anderen Hydratphasen (CAH, CAFH) entsteht [26, 27].

Bei Wasserzementwerten unter rd. 0,4 enthält der Zementstein auch nach abgeschlossener Hydratation unhydratisierte Reste Zementklinker. Mit zunehmendem Wasserzementwert führt verbleibendes Überschusswasser zu größeren Porenräumen, die nicht durch Hydratationsprodukte gefüllt werden. Die so entstehenden Kapillarporen stellen die Transportwege im Zementstein dar. Ihre Porenradien sind um rd. drei Größenordnungen größer als die Radien der Gelporen, die vor allem Eigenschaften wie Schwinden, Quellen und Kriechen beeinflussen. Aufgrund der geringen Durchmesser wirken in den Gelporen starke chemische und physikalische Wechselwirkungen zwischen der Gelporenlösung und Feststoff.

Die Gel- und Kapillarporen des Zementsteins sind mit einer wässrigen Porenlösung gefüllt, in der hauptsächlich die Kationen Na^+ , K^+ , Ca^{++} und die Anionen OH^- und SO_4^{--} gelöst sind [28]. Diese Porenlösung steht in einem chemischen Gleichgewicht mit den festen Phasen, das sich im Laufe der Hydratation verschiebt [29]. Die Porenlösung stellt ein alkalisches Milieu mit einem pH-Wert von größer 13,0 dar.

2.1.2 Modelle zur Beschreibung des Gefüges zementgebundener Baustoffe

Zur Verdeutlichung der Mechanismen, die in mineralischen Baustoffen stattfinden, eignen sich verschiedene Modelle, den Porenraum zu beschreiben, wobei die Modelle nicht konkurrieren, sondern lediglich andere Porengrößenbereiche fokussieren. In Abbildung 5, links ist das Zylinderkapillarporenmodell zur Beschreibung der Transportvorgänge in porösen Baustoffen schematisch dargestellt. Abbildung 5, rechts zeigt das Münchner Modell, mit welchem die Wechselwirkungen zwischen der Oberfläche des Feststoffs und Wasser beschrieben werden. Dies dient beispielsweise zur Erläuterung des Einflusses des Wassergehalts auf das Schwinden, Quellen, Kriechen und die Festigkeit [30].

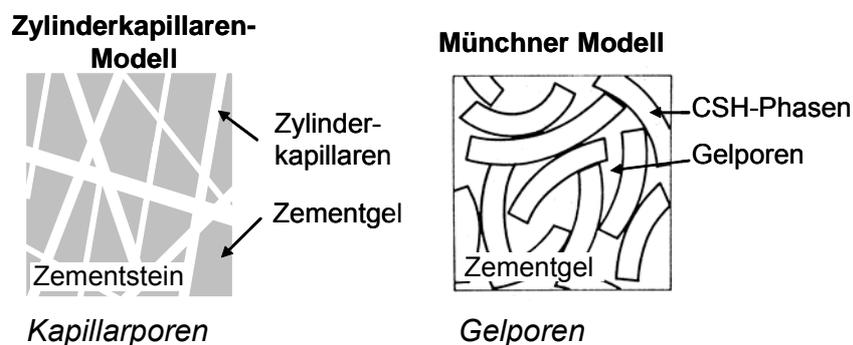


Abbildung 5: links, Zylinderkapillarenmodell, System aus miteinander vernetzten Einzelkapillaren unterschiedlicher Radien, rechts, Münchner Modell zur Veranschaulichung der im Zementgel wirkenden Oberflächenkräfte nach Wittmann [30]

Mit Hilfe der Modellvorstellung des Werkstoffs bestehend aus einem System vernetzter Zylinderkapillaren unterschiedlichen Durchmessers lassen sich vor allem Transportphänomene, wie Diffusion, Kapillarleitung oder Permeation, die in Poren > 50 nm stattfinden, veranschaulichen. Für Materialien wie Ziegel, Sandstein oder Kalksandstein, die hauptsächlich aus groben Poren bestehen, ist diese Betrachtung des Porensystems allein ausreichend.

In zementgebundenen Baustoffen, die ein wesentlich feinporöseres Gefüge aufweisen, sind eine Vielzahl an Poren im Porengrößenbereich zwischen 2 und 3 nm. Aus dieser Vielzahl an Poren kleinsten Durchmessers ergibt sich eine innere Oberfläche des Zementsteins im Bereich

zwischen $100 \text{ m}^2/\text{g}$ und $600 \text{ m}^2/\text{g}$. Auf diese innere Oberfläche im Porenraum wirken starke Oberflächenkräfte, die zum einen durch adsorbiertes Wasser verändert werden, zum anderen aber auch die Eigenschaften des adsorbierten Wassers beeinflussen. Zur Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen eignet sich die Beschreibung des Porensystems durch die Form und die Lage von Partikeln, die in einem porösen Werkstoff zusammengepackt sind. Auf Grundlage der Zementsteinmodelle nach Powers, Feldmann, Serada und Bazant entwickelten Wittmann und Setzer das „Münchner Modell“ [30, 31]. Das Zementgel wird hier als kolloidales System betrachtet, in welchem Oberflächenkräfte zwischen den einzelnen Gelteilchen wirken. Die hierdurch verursachten Wechselwirkungen zwischen Zementgel und adsorbiertem Wasser lassen sich mit dieser Modellvorstellung beschreiben.

2.2 Feuchtehaushalt in porösen mineralischen Baustoffen

2.2.1 Sorptionsverhalten

Steht eine Oberfläche im thermodynamischen Gleichgewicht mit wasserdampfhaltiger Luft, stoßen pro Zeiteinheit genauso viele Moleküle auf die Oberfläche wie nach dem Stoß wieder in den Gasraum zurückkehren. Die Wassermoleküle werden von der Oberfläche eingefangen und nach einer von der Temperatur abhängigen Verweilzeit wieder an die Umgebung freigegeben werden. Mit steigendem Wasserdampfpartialdruck der Luft steigt die an der Oberfläche eingefangene Menge an Wassermolekülen, so dass die Dicke des Films von adsorbierten Wassermolekülen auf der Oberfläche zunimmt.

Porenräume poröser Baustoffe streben diesen Gleichgewichtszustand an und binden durch van der Waal'sche Anziehungskräfte entsprechend den Feuchteverhältnissen der Umgebungsluft Wassermoleküle an den Porenwandoberflächen. Die Anlagerung der Wassermoleküle erfolgt zunächst in Form einer monomolekularen Belegung der inneren Oberfläche des Porensystems. Ab einer relativen Luftfeuchte von rd. 25 % r.F. geht man nach der BET-Theorie davon aus, dass alle freien Oberflächen mit einer monomolekularen Wasserschicht besetzt sind und mit zunehmender relativer Luftfeuchte weitere Molekülschichten adsorbiert werden (multimolekulare Belegung) [30].

Für die Abhängigkeit der adsorbierten Schichtdicke d [m] von der relativen Luftfeuchte φ [-] leitete Badmann folgende Beziehung her [32]:

$$d(\varphi) = (3,85 - 1,89 \cdot \ln(-\ln \varphi)) \cdot 10^{-10}$$

Gleichung 1

Bei Luftfeuchten oberhalb von 50 % r.F. kommt es zur verstärkten Feuchteaufnahme infolge Kapillarkondensation. In Poren mit einem Radius $r > 1$ nm bildet sich durch das adsorbierte Wasser in den Poren ein Flüssigkeitsfilm mit einem je nach Porengröße mehr oder weniger stark gekrümmten Meniskus. Diese Krümmung des Meniskus bewirkt eine Erniedrigung des Sättigungsdampfdrucks über der Oberfläche der Flüssigkeit. Das Überschreiten des Sättigungsdampfdrucks infolge zunehmender Luftfeuchte hat eine Porenfüllung mit Wasser zur Folge. Mit zunehmendem Porendurchmesser nimmt die Krümmung des Flüssigkeitsmeniskus und somit die Dampfdruckerniedrigung ab, d.h. Poren mit einem größeren Durchmesser werden erst bei höheren Luftfeuchten durch Kapillarkondensation gefüllt. Unter Annahme thermodynamischer Gleichgewichtsbedingungen in zylindrischen Poren kann die Kelvin-Thomson-Beziehung zwischen der relativen Luftfeuchte φ und dem Radius r der Poren, die über Kapillarkondensation gefüllt sind, wie in [1] beschrieben, hergeleitet werden.

$$\varphi = e^{-\left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r \cdot \rho_w \cdot R_D \cdot T}\right)}$$

Gleichung 2

σ [N/m] ist die Oberflächenenergie des Wassers mit der Dichte ρ_w [kg/m³], welches die Wände der Poren mit dem Radius r [m] mit einer Ausbildung eines Randwinkels θ [°] benetzt. R_D [N·m/(kg·K)] ist die universelle Gaskonstante und T [K] die absolute Temperatur. Gleichung 2 ist für Porenradien in den Grenzen zwischen 1 nm und 0,1 µm gültig. Da ein Wassermolekül einen Durchmesser von 0,28 nm hat, kann sich in Porenvolumen mit Radien unterhalb dieses Grenzwerts keine ausreichend große Flüssigkeitsschicht mit einem entsprechenden Meniskus ausbilden. In Poren mit einem Porenradius über 0,1 µm findet keine Kapillarkondensation mehr statt, da hier die Krümmung des Flüssigkeitsmeniskus aufgrund der großen Porenweiten so gering ist, dass sich keine Dampfdruckerniedrigung über dem Flüssigkeitsspiegel einstellt. Abbildung 6 (oben) zeigt die Feuchtespeichermechanismen im Porensystem in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte.

Oberhalb einer relativen Luftfeuchte von rund 99 % r.F. füllen sich die Poren mit einem Radius in der Größenordnung von 0,1 µm nach der Kelvin-Thomson-Beziehung nicht mehr infolge Kapillarkondensation. In diesen Poren befindet sich lediglich das sorptiv gebundene Wasser. Diese Poren werden erst durch kapillare Kräfte in den Poren infolge einer Wasserzufuhr von außen bzw. durch drückendes Wasser vollständig gefüllt.

Für die Wasseraufnahme oberhalb von 50 % r.F. ist aufgrund der Kapillarkondensation die Porenradienverteilung im porösen System maßgebend. Unterhalb dieser relativen Luftfeuchte ist die innere Oberfläche des Gelporenraums für die Wechselwirkungen zwischen Wasser und Zementgel von entscheidender Bedeutung.

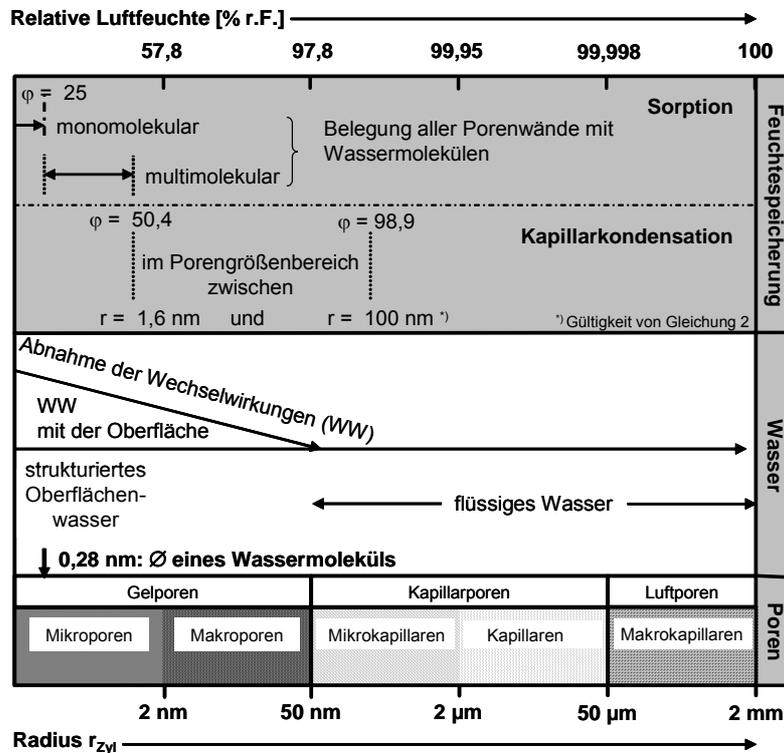


Abbildung 6: Feuchtespeichermechanismen im Porensystem des Zementsteins (oben) und Modifikation des Wassers (unten) in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte und des Porenradius

2.2.2 Wechselwirkungen zwischen Wasser und Zementgel

Die in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte an die Feststoffoberfläche angelagerten Wassermoleküle sind durch die Wechselwirkungen mit der Feststoffoberfläche (van der Waals Kräfte) vorstrukturiert [31, 33].

Mit zunehmender Schichtdicke der adsorbierten Wassermoleküle, d.h. mit zunehmender relativer Luftfeuchte, nimmt die Stärke der Wechselwirkung zwischen den Wassermolekülen und der Feststoffoberfläche ab. Nach Krupp [34] kann die van der Waals-Kraft in guter Näherung proportional zur Oberflächenspannung gesetzt werden, die sich mit zunehmender Schichtdicke des Adsorbats verringert [31]. Dies bedeutet, dass sich mit zunehmender Schichtdicke des adsorbiertes Wassers der Einfluss der van der Waals Kräfte auf die Struktur des Wassers verringert. Die Eigenschaften des vorstrukturierten Wassers gehen demzufolge mit zunehmendem Porenradius und steigender Filmdicke des adsorbierten Flüssigkeitsfilms (multimolekulare Belegung) in die Eigenschaften des flüssigen Wassers über [30]. Nach Untersuchungen von Beddoe und Setzer [35] ist auch das Porenwasser, welches infolge von

Kapillarkondensation bei 50, 70 und 88 % r.F. den Porenraum füllt, durch die Oberflächenkräfte noch deutlich beeinflusst.

Abbildung 6 zeigt die entsprechenden Zusammenhänge zwischen relativer Luftfeuchte und Wassermodifikation im Porensystem.

In Untersuchungen mittels NMR (Nuclear Magnetic Resonance) konnten die unterschiedlichen Modifikationen des Wassers im Zementstein infolge der Oberflächenkräfte nachgewiesen werden [30, 35, 36, 37, 38]. Englert [37] führte Sorptionsversuche im Luftfeuchtebereich zwischen 0 und 100 % relativer Feuchte durch und konnte drei Wassermodifikationen anhand der Signale aus den NMR-Messungen herausfiltern. Das kapillarkondensierte, verhältnismäßig freie Wasser, das in den Mikrokapillaren adsorbierte Wasser, welches durch zwei sich gegenüberliegende Festkörperflächen stark beeinflusst wird und das in den Makrokapillaren adsorbierte Wasser.

In neuesten Untersuchungen von Setzer et al. [39] konnte die Dichte der unterschiedlichen Wassermodifikationen ermittelt werden. Während die Dichte für normales Wasser bei $1,0 \text{ g/cm}^3$ liegt, wurde für das vorstrukturierte Wasser eine Dichte zwischen $1,15$ und $1,25 \text{ g/cm}^3$ ermittelt.

Besonders deutlich wird der Einfluss der Oberflächenkräfte in den Gelporen des Zementsteins beim Phasenübergang von Wasser zu Eis. Während das Wasser in den Kapillarporen zwischen $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ und $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ gefriert, wurde in [40] gezeigt, dass das Wasser, welches infolge der Oberflächenkräfte vorstrukturiert oder sogar strukturiert ist, erst bei Temperaturen unter $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ gefriert. Weiter wurde gezeigt, dass bei einem Natriumchloridgehalt des Wassers von 3 M.-% der Gefrierpunkt des Wassers, welches sich im Einflussbereich der Gelporen befindet, weiter sinkt, was darauf schließen lässt, dass die Oberflächenkräfte infolge der vorhandenen Salze verstärkt werden. Auch in [41] beschriebene Untersuchungen von Beddoe und Setzer bestätigen dies.

2.2.3 Feuchtespeicherfunktion

Der Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte und der möglichen Gleichgewichtsfeuchte (hygroskopische Feuchte) eines Baustoffs wird in Form einer Sorptionsisotherme bzw. Feuchtespeicherfunktion zusammengefasst. Die Feuchtespeicherfunktion stellt einen für den jeweiligen Baustoff charakteristischen funktionalen Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt des Baustoffs und der relativen Luftfeuchte dar. Abbildung 7 zeigt skizzenhaft zwei Feuchtespeicherfunktionen für Betone mit unterschiedlichem w/z-Wert [42]. Bei einem niedrigen Wasserzementwert liegt die aufnehmbare Wassermenge infolge der geringeren

Gesamtporosität deutlich unterhalb eines Betons mit einem Wasserzementwert von 0,65. Während bei Betonen mit einem hohen Wasserzementwert ($w/z = 0,65$) ein Großteil des Porenraums, der einen hohen Anteil an Kapillarporen hat, erst oberhalb einer Luftfeuchte von 50 % r.F. durch Kapillarkondensation und kapillare Wasseraufnahme gefüllt wird, ist bei niedrigem Wasserzementwert ($w/z = 0,30$) der Großteil des Porenraums, der hauptsächlich aus Gelporen besteht, schon durch die reine Adsorption gefüllt. Die Feuchtespeicherfunktion wird demnach durch die Porengrößenverteilung und die innere Oberfläche des Materials bestimmt.

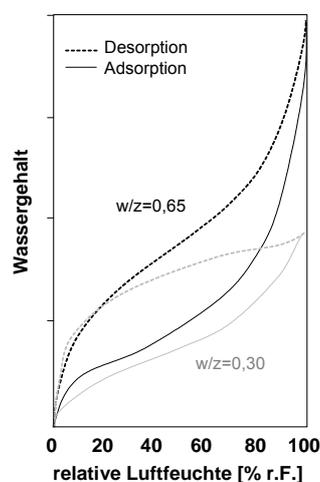


Abbildung 7: Ad- und Desorptionsisotherme für einen Beton mit einem w/z -Wert von 0,65 im Vergleich zu einem Beton mit einem w/z -Wert von 0,30, Verläufe aus [42]

Zwischen den Isothermen für die Wasseraufnahme (Adsorptionsisotherme) und für die Wasserabgabe (Desorptionsisotherme) wird bei einigen Baustoffen ein Hystereseeffekt festgestellt. Der Grund dafür liegt in der Verknüpfung der Poren untereinander. Poren mit einem engen Porenzugang werden während der Adsorption stetig mit Wasser gefüllt. Bei der Desorption hingegen kann das Wasser aus diesen Poren erst dann geleert werden, wenn der Wasserdampfdruck so niedrig ist, dass auch das kapillarkondensierte Wasser im Porenzugang verdunstet (Flaschenhalseffekt) [43, 44]. Ein weiterer Effekt, der die Hysterese beeinflusst, ist die Tatsache, dass bei der Adsorption die Poren von der Oberfläche des Feststoffs aus gefüllt werden. Bei der Desorption hingegen bestimmt der Meniskus in den Kapillaren die Trocknung.

Während der Wassergehalt in der Luft stark von der Temperatur abhängt, ist der Verlauf der Sorptionsisotherme poröser mineralischer Baustoffe so wenig temperaturabhängig, dass diese für baupraktische Belange nicht berücksichtigt werden muss [45, 46]. Je tiefer die Temperatur im Porenraum ist, umso weniger relative Luftfeuchte ist nötig, dass Wasser in Poren eines bestimmten Durchmessers kondensiert.

Approximationsverfahren zur Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion auf Basis einfach zu ermittelnder Kennwerte sind in der Literatur häufig zu finden [47, 48, 49, 50, 51]. Einige dieser Ansätze sind rein empirischer Natur, andere werden direkt aus der BET-Theorie [52] hergeleitet. Folgende Näherung von Künzel [2] berücksichtigt beispielsweise den versuchs-technisch ermittelten Wert der freien kapillaren Wassersättigung w_f und den Ausgleichsfeuchtegehalt w_{80} bei einer relativen Luftfeuchte von 80 % r.F.:

$$w(\varphi) = w_f \cdot \frac{(b-1) \cdot \varphi}{b - \varphi}$$

Gleichung 3

Der Approximationsfaktor b [-] ergibt sich aus der Ausgleichsfeuchte $w(\varphi)$ [kg/m³] bei 80 % relativer Luftfeuchte (= w_{80}).

2.3 Hygrische Dehnungen in porösen mineralischen Baustoffen

Wechselwirkungen zwischen dem Porenwasser und dem Feststoffsystem des Zementsteins bewirken eine makroskopisch messbare Formänderung in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte der Umgebung. Diese wird in Abhängigkeit der Gleichgewichtsfeuchte auf eine Partikeldehnung, das Entstehen eines Kapillarzugs und eine Spaltdruckentwicklung zurückgeführt. Besondere Relevanz für den baupraktischen Bereich hat dabei die Veränderung des Spaltdrucks, da dieser unter üblichen Umgebungsbedingungen der maßgebliche Einflussparameter für hygrische Dehnungen des Betons ist (Schwinden und Quellen). Das Münchner Modell führt das Schwinden und Quellen des Betons auf die Partikeldehnung und die Dehnung infolge Spaltdruck zurück [30, 31].

Partikeldehnung

Das Zementgel des Zementsteins hat eine sehr große innere Oberfläche, die entsprechend der relativen Luftfeuchte mit adsorbierten Wassermolekülen bedeckt ist (vgl. Kapitel 2.2.1, Gleichung 1). Diese Wassermoleküle beeinflussen die Oberflächenspannung der Gelteilchen.

Nach dem Münchner Modell wirkt ein hydrostatischer Druck $P_{Partikel}$ auf die Oberfläche der Gelteilchen, der mit steigender Oberflächenspannung zunimmt und mit der Partikelgröße abnimmt. Der Druck bewirkt, dass die Gelteilchen komprimiert werden. Mit zunehmender Luftfeuchte werden verstärkt Wassermoleküle adsorbiert, wodurch die Oberflächenspannung abnimmt. Durch die Abnahme der Oberflächenspannung infolge der Adsorption verringert sich der Druck auf die Oberfläche des Gelteilchens und das Gelteilchen expandiert.

Aufgrund der Vielzahl an Gelpartikeln im Zementstein wirkt sich die Expansion der Gelteilchen in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte unmittelbar auf das Gelgerüst aus. Die Ausdehnung des Gels bewirkt auf makroskopischer Ebene eine Längenänderung des gesamten Gefüges [30]. Diese Längenänderung ist von den Materialeigenschaften abhängig. Nach [30] nimmt die Längenänderung mit zunehmender innerer Oberfläche des Zementgels und Dichte des Materials zu und sinkt mit zunehmendem E-Modul des Materials.

Diese Zusammenhänge lassen sich, wie in Abbildung 8 dargestellt, zusammenfassend veranschaulichen. Mit zunehmender relativer Luftfeuchte verringert sich die Oberflächenspannung vor allem im Bereich niedriger Luftfeuchten schnell. Bei monomolekularer Belegung der Porenwände mit einer Sorbatschicht, die nach der BET-Theorie bei ca. 25 % r.F. erreicht ist, ist die Oberflächenspannung nach [31] bis auf ein Viertel des ursprünglichen Wertes gefallen. Die daraus resultierende Dehnung der Gelteilchen bewirkt eine Dehnung des Gesamtgefüges, wie in Abbildung 8, rechts beispielhaft dargestellt ist.

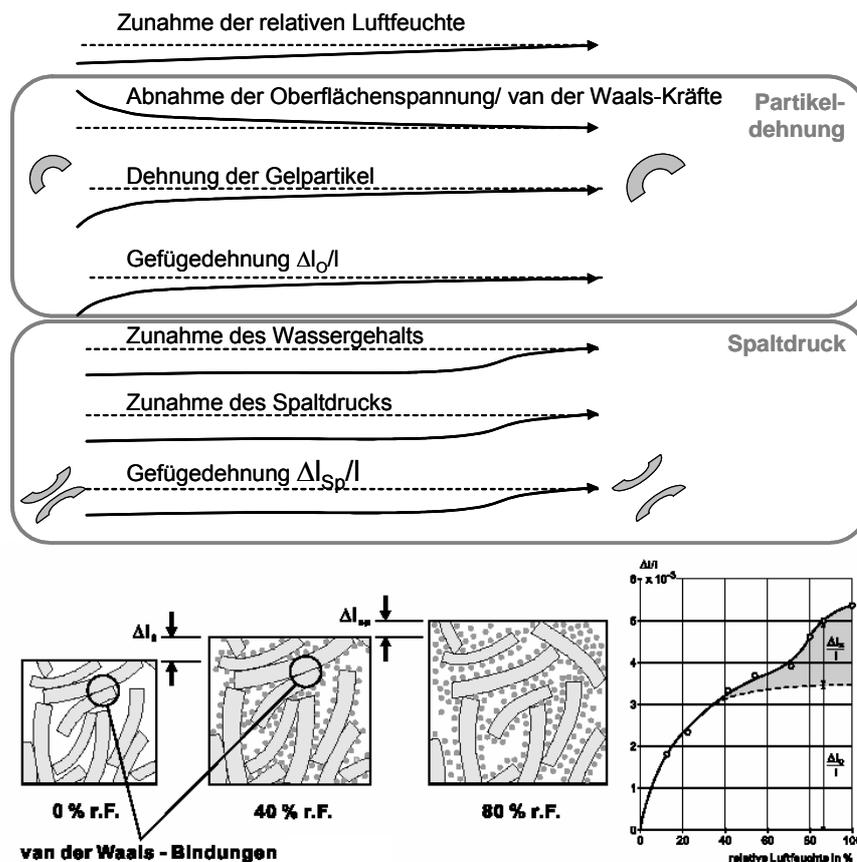


Abbildung 8: Münchner Modell [30], links: Schematische Darstellung der hygrischen Dehnung des Zementgels, rechts: hygrische Dehnung in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte, unterteilt nach Einfluss der Oberflächenenergie Δl_0 (Partikeldehnung) und des Spaltdrucks Δl_{Sp}

Kapillarzug

Im Bereich der Kapillarkondensation ab einer Luftfeuchte von 50 % r.F. ändert sich die Oberflächenspannung nur noch geringfügig und beeinflusst die weitere makroskopische Dehnung des Zementsteingefüges in geringem Maße. Die hier zu beobachtenden makroskopischen Dehnungen führt Fagerlund auf die Abnahme der Spannungen infolge Kapillarzugs in den Poren zurück, die infolge Kapillarkondensation gefüllt werden. Durch die Füllung der Poren wird der Kapillarzug verringert [31]. Einer Ausdehnung infolge Abbau des Kapillarzugs müsste jedoch zuvor eine Kontraktion infolge der Ausbildung der Menisken vorangegangen sein, die anhand von Messergebnissen nicht beobachtet werden konnte [31]. Dieser Effekt ist demnach von untergeordneter Bedeutung und wird durch die Dehnungen infolge der Entstehung des Spaltdrucks, der im Folgenden beschrieben wird, überdeckt. Für die Betrachtung der hygri-schen Dehnungen im Porensystem sowie im Münchner Modell hat der Kapillarzug keine Relevanz [57].

Spaltdruck

Die in Abbildung 8 dargestellten Dehnungen im Bereich von relativen Luftfeuchten über 40 % r.F. lassen sich durch einen Spaltdruck erklären, der in den feinen Gelporen bei höheren relativen Luftfeuchten entsteht [30, 31, 53, 54, 55, 56].

Abbildung 9 skizziert die Zusammenhänge, die für die Entstehung der Dehnung infolge Spaltdruck von Bedeutung sind. Zwischen den eng beieinander liegenden Gelteilchen des Zementsteins wirken van der Waals Kräfte mit einer Bindungsenergie von rd. 20 kJ/mol. Zwei gegenüberliegende Gelteilchen, deren Abstand im Bereich der Reichweite der van der Waal'schen Bindungsenergien liegt, werden angezogen. Trotz der geringen Bindungsenergie wirkt sie im Bereich zwischen zwei gegenüberliegenden Flächen mit einem Abstand von 1 bis 2 nm noch ganz beträchtlich. Im Porengrößenbereich der Gelporen mit einer Vielzahl an Poren mit einer Größe von rd. 2 nm kommt der Einfluss der van der Waals-Bindung besonders zum Tragen. Neben diesen anziehenden Kräften wirken zwischen den Gelteilchen elektrostatische und sterische Kräfte, die der anziehenden van der Waalskraft entgegen wirken [57]. Im luftgefüllten Porenraum sind diese Kräfte Null, während die van der Waal'schen Anziehungskräfte auch hier wirken.

Mit zunehmender Dicke der adsorbierten Molekülschicht fällt die Reichweite der van der Waal'schen Bindungsenergie zwischen den Gelteilchen, so dass die anziehende Kraft der Gelteilchen untereinander verringert wird. Entspricht der Abstand der Gelteilchen gerade der gesamten Dicke der adsorbierten Molekülschichten auf den Oberflächen der Teilchen, wirken die abstoßenden (elektrostatischen und sterischen) Kräfte als Spaltdruck. Dieser bewirkt, dass sich der Abstand der Gelteilchen erhöht. Bei weiterer Erhöhung des Dampfdrucks, d.h. der relativen Luftfeuchte, können sich zwei gegenüberliegende adsorbierte Molekülschichten

nicht mehr voll ausbilden. Infolge dessen entsteht ein Spaltdruck, der die Gelteilchen weiter voneinander entfernt. Die Polarität des Wassers ist der Grund dafür, dass weitere Wassermoleküle bestrebt sind, sich in Form von Wasserstoffbrückenbindungen an die adsorbierten Schichten anzulagern. Ab einem bestimmten Dampfdruck ist der Spaltdruck des Wassers größer, als die Anziehungskraft der van der Waals-Kraft zwischen den Teilchen, so dass die Bindung der Teilchen gelöst wird. Der Spaltdruck des sich bildenden Flüssigkeitsfilms bewirkt eine Gefügedehnung.

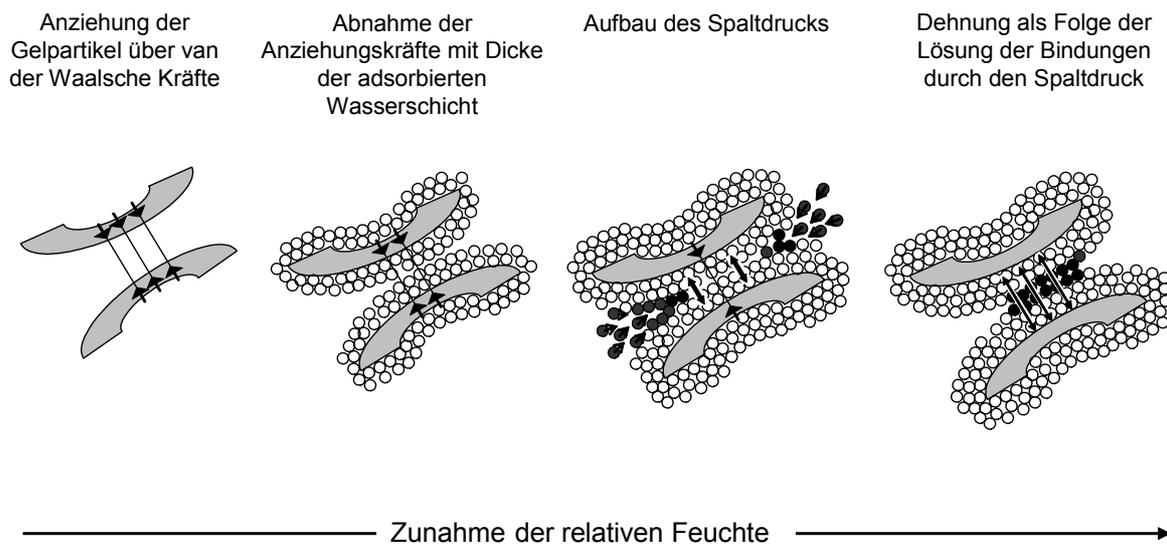


Abbildung 9: Entstehung des Spaltdrucks im Zementgel zementgebundener Werkstoffe

Das aus dem Spaltdruck im Zementgel resultierende Quellen verursacht die in Abbildung 9 dargestellte makroskopische Dehnung. Untersuchungen von Badmann et al. [32] zeigen, dass der Spaltdruck bis in Porengrößen von rund 20 nm wirkt (vgl. auch Abbildung 8, Dehnung bei Luftfeuchte von rd. 94 %).

Neueste Untersuchungen [57] deuten darauf hin, dass auch im niedrigen Luftfeuchtebereich der Spaltdruck die maßgebende Größe für die hygrischen Dehnungen ist. Dies bedeutet, dass der Hauptgrund für die Formänderungen bei niedrigen Luftfeuchten nicht wie mit dem Münchner Modell beschrieben, eine Komprimierung der Gelpartikel ist, sondern eine Reduktion des Porenvolumens. Ursache für die Reduktion des Porenvolumens mit abnehmender Luftfeuchte ist, dass in luftgefüllten Poren die abstossenden Kräfte, die neben den anziehenden Kräften zwischen den Gelteilchen wirken, verschwinden und die anziehenden Kräfte allein wirken. Hierdurch rücken die Gelteilchen näher aneinander.

Anhand Untersuchungen an Quarzblättchen zeigen Beltzung et al. [58], dass der Spaltdruck bei der Anwesenheit von Natriumchlorid verstärkt wird. Dies wird auf die Bildung von

Solvathüllen und die Zunahme der abstoßenden Wechselwirkungskräfte zwischen den Gelteilchen mit Zunahme der Ionenkonzentration zurückgeführt.

2.4 Feuchtetransport in Modellkapillaren

2.4.1 Allgemeines

Der Feuchtehaushalt eines porösen mineralischen Materials ist von den klimatischen Umgebungsbedingungen abhängig. Sobald diese sich ändern, ist das Gleichgewicht im Baustoff gestört und Feuchte wird vom Porengefüge aufgenommen oder an die Umgebung abgegeben. Je nach Veränderung werden unterschiedliche Feuchtetransportmechanismen wirksam. Für die Baupraxis sind im Wesentlichen die Wasserdampfdiffusion, die Kapillarleitung und die Permeation als Flüssigtransportmechanismen in den Porenräumen und die Oberflächendiffusion als Flüssigtransportmechanismus an den Porenoberflächen maßgebend. Abbildung 10 gibt einen Überblick über die bisher bekannten Transportphänomene, deren Ursache und deren baupraktische Bedeutung.

	Mechanismus	Ursache	Relevanz
Wasserdampftransport	Effusion	Dampfdruck	+
	Gasdiffusion	Dampfdruck	+
	Lösungsdiffusion	H ₂ O-Konzentration	+
	Konvektion feuchter Luft	Gesamtdruck Dichte	- (nur 2-dim.)
Flüssigtransport	Oberflächendiffusion	relative Feuchte	+
	Kapillarleitung	Kapillarer Unterdruck	+
	Sickerströmung	Gravitation	- (nur 2-dim.)
	Hydraulische Strömung	Gesamtdruck	+
	Elektrokinese	elektrische Felder	-
	Osmose	Ionenkonzentration	-

Abbildung 10: Übersicht über die Feuchtetransportvorgänge in porösen mineralischen Baustoffen mit Angabe der treibenden Potentiale. Eine baupraktische Bedeutung ist mit „+“ gekennzeichnet, vernachlässigbare Effekte mit einem „-“, in Anlehnung an [59].

Die Permeation im gesättigten Porenraum wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter behandelt. Voraussetzung für die reine Permeation ist eine vollständige Sättigung des Porenraums, so dass sich im Porenraum kein kapillarer Unterdruck infolge Randwinkelbildung ausbilden kann und somit eine laminare, stationäre, hydraulische Strömung vorliegt.

Konvektion feuchter Luft durch Hohlräume und Undichtigkeitsstellen von Bauteilen aufgrund von Luftdruckunterschieden bewirkt meist mehrdimensionale Transportvorgänge [59] und ist ebenso nicht Gegenstand dieser Arbeit. Die Sickerströmung infolge Gravitation kann ebenfalls bei der eindimensionalen Betrachtung des Feuchtetransports nicht berücksichtigt werden. Ebenso wird der Transport von Wassermolekülen infolge elektrischer Felder oder Osmose nicht berücksichtigt, da diese Mechanismen nur in Ausnahmefällen eine Rolle spielen.

Zur Erläuterung der Mechanismen eignet sich das Modell einer Zylinderkapillare, da so die grundlegenden Zusammenhänge verdeutlicht werden können. Zusätzliche Mechanismen, die auf Oberflächenkräfte zurückzuführen sind, werden hier jedoch in die Betrachtungen nicht einbezogen und müssen zusätzlich berücksichtigt werden.

Das Zusammenspiel der dominierenden Feuchtetransportmechanismen wird in Abbildung 11 am Beispiel eines Wandausschnitts einer Außenwand unter Klimabedingungen, wie sie sich im Winter einstellen, dargestellt. An der Außenseite der Wand ist der Dampfdruck aufgrund der geringen Temperatur im Vergleich zum Innenraum geringer. Der Gradient der Luftfeuchte bzw. des Wassergehalts verläuft in entgegengesetzter Richtung. Im Falle von beispielsweise anstehendem Grundwasser entsteht zusätzlich ein Gesamtdruckgradient.

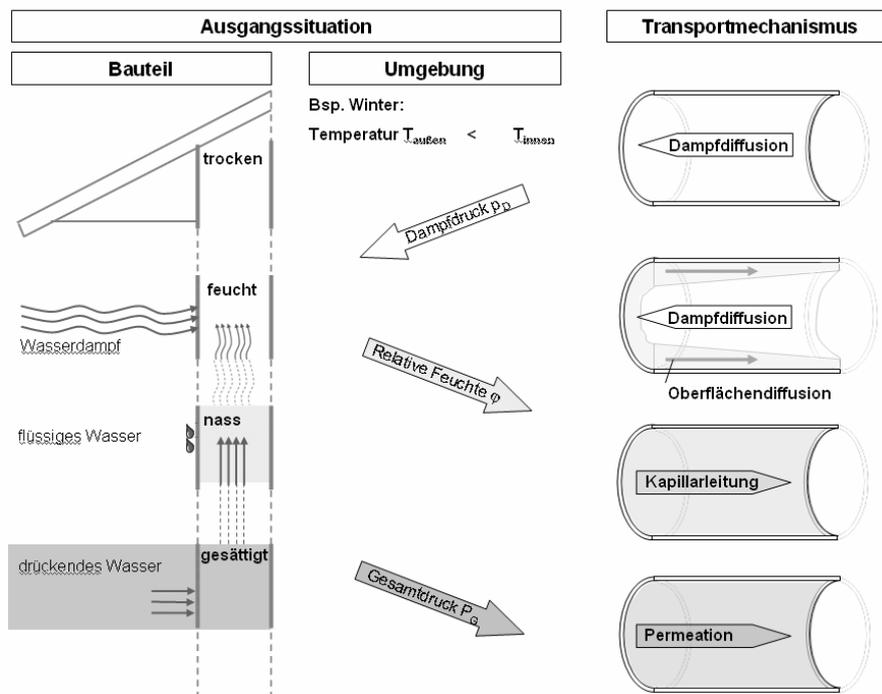


Abbildung 11: Schematische Darstellungen der maßgebenden Feuchtetransportmechanismen und der zugehörigen treibenden Kräfte in Abhängigkeit der Stofffeuchte am Beispiel einer Außenwand im Winter

Ist das Bauteil trocken, findet entsprechend des Dampfdruckgefälles ein Diffusionstransport der Wassermoleküle von innen nach außen statt. Das an den Porenwänden durch Adsorption gespeicherte Wasser bleibt aufgrund hoher Adhäsionskräfte unbeweglich. Je höher die Stofffeuchte im Bauteil ist, umso größer wird der Einfluss des Flüssigtransports (Kapillarttransport und Oberflächendiffusion) gegenüber dem Dampftransport. Entsprechend der relativen Feuchteverteilung über den Bauteilquerschnitt bilden sich an den Porenwänden Sorbatfilme unterschiedlicher Dicke (vgl. „Oberflächendiffusion“ in Abbildung 11). Mit zunehmender Dicke des Sorbatfilms werden die Wassermoleküle beweglicher und bewegen sich von Bereichen höherer Schichtdicken in Bereiche niedriger Schichtdicken. Dieser Flüssigtransport entlang der Oberflächen wird mit Oberflächendiffusion bezeichnet und ist dem Wasserdampftransport entgegen gerichtet. Bei weiterer Zunahme der Stofffeuchte setzt die Kapillarleitung ein, die nach der Permeation infolge eines Gesamtdruckgradienten den effektivsten Wassertransportmechanismus darstellt.

2.4.2 Dampfdiffusion

Wasserdampfmoleküle haben aufgrund thermischer Energie eine Eigenbeweglichkeit und bewegen sich mit gleicher statistischer Wahrscheinlichkeit in alle Raumrichtungen. Bei örtlichen Konzentrationsunterschieden der Teilchen findet ein Massenstrom in Richtung geringerer Konzentration statt. Die durch Unterschiede in der Konzentration hervorgerufene Diffusion wird als Fick'sche Diffusion bezeichnet, der das 1. Fick'sche Gesetz zugrunde gelegt wird.

$$\dot{m} = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial x}$$

Gleichung 4

Die pro Zeit- und Flächeneinheit transportierte Stoffmenge ist durch die Stromdichte \dot{m} [kg/(m²·s)] definiert. Der Diffusionskoeffizient D [m²/s] ist das Maß für die Durchlässigkeit eines Mediums gegenüber den darin diffundierenden Teilchen, c [kg/m³] die Konzentration und x [m] der Diffusionsweg.

Da zwischen dem Massenanteil der Wasserdampfmoleküle und dem Gesamtdruck bei idealen Gasen ein linearer Zusammenhang besteht, kann die Wasserdampfdiffusion in Luft durch Gleichung 5 beschrieben werden [60, 61]. Hierbei liegt die Annahme zugrunde, dass Luft im baupraktischen Bereich als ideales Gas angesehen werden kann.

$$\dot{m} = -\delta_a \cdot \frac{\partial p_D}{\partial x}$$

Gleichung 5

Die treibende Kraft für den Transport stellt hierbei der Gradient des Wasserdampfpartialdrucks p_D [Pa] dar. Der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft δ_a [kg/(m·s·Pa)] kann nach DIN 52615 in Abhängigkeit von der absoluten Temperatur T [K] und vom mittleren Gesamtdruck der Umgebungsluft P_L [Pa] nach folgender Gleichung berechnet werden.

$$\delta_a = 2,0 \times 10^{-7} \frac{T^{0,81}}{P_L}$$

Gleichung 6

Die Dampfdiffusion in Baustoffen ist nur in großen Poren mit der Diffusion von Wasserdampf in Luft vergleichbar. Je nachdem welcher Raum den diffundierenden Wassermolekülen zur Verfügung steht, variiert die Diffusionsgeschwindigkeit. Man unterscheidet daher zwischen Wasserdampfdiffusion, Effusion und Lösungsdiffusion, deren Geschwindigkeiten in dieser Reihenfolge abnehmen.

Diffundierende Wassermoleküle stoßen nach einer bestimmten Weglänge entweder mit anderen Teilchen zusammen (freie Weglänge), oder sie stoßen an die Porenwandungen. Die freie Weglänge ist sowohl von der Temperatur als auch vom Gesamtdruck abhängig [62]. Nur wenn der Weg durch den Porenraum vom Aneinanderstoßen der Teilchen untereinander bestimmt wird, spricht man von Wasserdampfdiffusion. Unter Normalbedingungen (20 °C/1 bar Gesamtdruck) liegt die freie Weglänge für Gase und für Luft in der Größenordnung von 10 nm. Dies bedeutet, dass der Porenraum, in welchem Wasserdampfdiffusion stattfinden kann, mindestens einen Porendurchmesser in dieser Größenordnung haben muss. Ist die mittlere freie Weglänge größer als der Porenraumdurchmesser, liegt Effusion vor. Sie ist überwiegend für den Transport in den kleineren Poren (Porenradius < 10 nm) verantwortlich. Der Transport wird hier durch die Stöße der Wassermoleküle mit der Porenwand bestimmt. Nach [63] kann für die Effusion durch eine Zylinderkapillare der folgende Transportansatz, der den Porengrößenradius r [m] berücksichtigt, verwendet werden:

$$\dot{m} = -\frac{8}{3} \cdot r \cdot \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \cdot \frac{\partial p_D}{\partial x}$$

Gleichung 7

\dot{m} [kg/(m²·s)] ist die Effusionsstromdichte, M [kg/mol] das Molekulargewicht, R [J/mol·K] die universale Gaskonstante und T [K] die absolute Temperatur. Wie bei der reinen Wasserdampfdiffusion ist auch bei der Effusion der Gradient des Wasserdampfpartialdrucks p_D [Pa] über die Weglänge x [m] für den Transport ausschlaggebend.

Da die meisten porösen mineralischen Baustoffe ein breites Porenspektrum aufweisen, ist eine klare Abgrenzung zwischen den Mechanismen Effusion und reiner Wasserdampfdiffusion nicht möglich. Es findet ein Mischtransport statt, der bei der Beschreibung des Diffusionstransports durch einen gemeinsamen Diffusionskoeffizienten berücksichtigt wird.

Im Bauteil steht sowohl dem Effusionsstrom wie auch dem reinen Wasserdampfdiffusionsstrom ein Widerstand entgegen, der durch die infolge der Porenstruktur erzwungenen Umwege und Querschnittsveränderungen (Tortuosität) bestimmt wird. Dieser wird durch einen konstanten Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor μ berücksichtigt, der ausdrückt, um welchen Faktor der Diffusionswiderstand einer Materialschicht größer ist als der einer gleich dicken Luftschicht. Daraus ergibt sich für den Wasserdampfdiffusions- und Effusionstransport durch ein poröses Material folgende Transportgleichung.

$$\dot{m}_{WDD} = -\frac{\delta_a}{\mu} \cdot \frac{\partial p_D}{\partial x}$$

Gleichung 8

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ [-] wird nach DIN EN ISO 12572:2001 experimentell bestimmt. Für hygroskopische Materialien zeigt sich dabei eine Abhängigkeit des gemessenen Diffusionswiderstands von der relativen Luftfeuchte. Die Wasserdampfdurchlässigkeit steigt nach [64] mit zunehmender Ausgleichsfeuchte der experimentell untersuchten Probe stark an. Abbildung 12 zeigt entsprechende Versuchsergebnisse.

Krus hat anhand umfangreicher Diffusionsversuche mit Temperatur- und Feuchtegefälle nachweisen können, dass diese Feuchteabhängigkeit auf eine Überlagerung von Dampftransport und Oberflächendiffusion zurückzuführen ist [65], wobei die Oberflächendiffusion in der flüssigen Phase stattfindet. Demnach werden in Modellen, denen ein feuchteabhängiger Diffusionswiderstand zu Beschreibung des Dampftransports zugrunde liegt, die Mechanismen Dampf- und Flüssigtransport nicht sauber getrennt. Dies ist jedoch für eine korrekte physikalische Beschreibung der Mechanismen zwingend erforderlich, da der Dampf- und Flüssigtransport durch unterschiedliche treibende Potentiale verursacht werden, welche unter bestimmten Randbedingungen (vgl. Abbildung 11, Außenwand im Winter) einen Transport in entgegengesetzte Richtungen auslösen können.

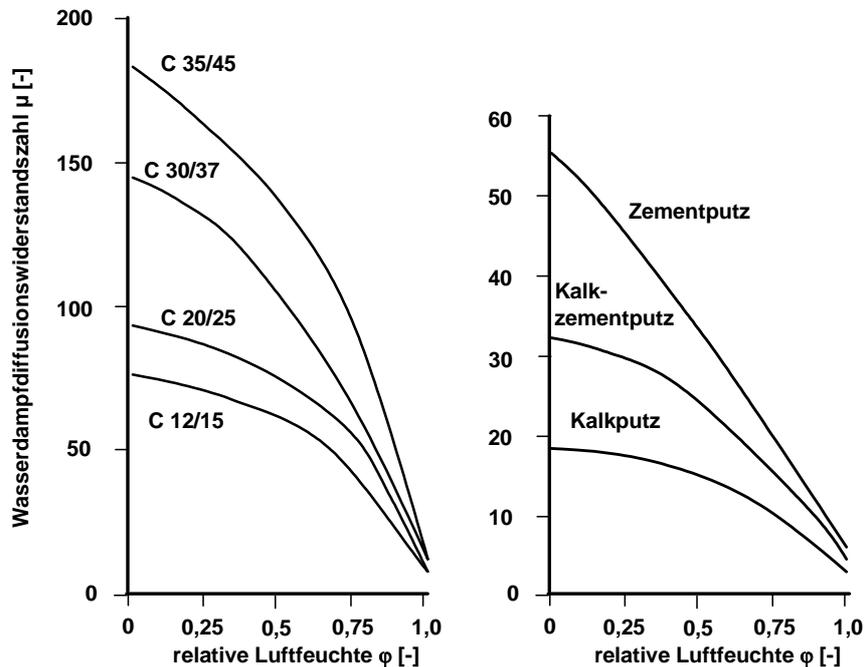


Abbildung 12: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen für unterschiedliche mineralische Baustoffe in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte, Daten aus [66]

Die Lösungsdiffusion ist ein Transportmechanismus, der im baupraktischen Bereich in organischen Polymeren, wie Abdichtungen und Beschichtungen, stattfindet. Dieser ist nicht Gegenstand dieser Arbeit, da hier zementgebundene mineralische Baustoffe betrachtet werden.

2.4.3 Oberflächendiffusion

Entsprechend den Sorptionsvorgängen werden mit zunehmender relativer Luftfeuchte so viele Wassermoleküle an den Porenwänden angelagert, dass sich ein mehr oder weniger starker Sorbatfilm bildet. Die Dicke dieses Sorbatfilms nimmt mit steigender relativer Luftfeuchte zu und kann in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte nach Gleichung 1 berechnet werden. Mit zunehmender Schichtdicke verringern sich die Oberflächenkräfte, die auf den Sorbatfilm einwirken, so dass die Mobilität der vielschichtig adsorbierten Wassermoleküle steigt. Liegt ein Gradient der relativen Luftfeuchte vor, tritt ein Massenstrom im Flüssigkeitsfilm an der Porenwand auf, der durch die Schichtdickenunterschiede des sorbierten Filmes ausgelöst wird. Nach Wittmann [30] besitzt das Wasser in der sorbierten Schicht zwar eine Orientierung, dennoch handelt es sich um eine bewegliche Phase.

Bei hohen relativen Luftfeuchten ist dieser Transportmechanismus in porösen Baustoffen wesentlich leistungsfähiger, als die reine Dampfdiffusion [65]. Bei einer Betrachtung des

realen Porenraums (vgl. Abbildung 4) wird deutlich, dass es sich dabei nicht um eine Vernetzung glattwandiger, kreisrunder Zylinderkapillaren handelt, sondern um ein System von Poren deren Oberflächen von Zwickeln und Hohlräumen unterschiedlichster Form und Größe gestaltet ist. Neben dem Sorbatfilm, der sich auf dieser Oberfläche mit zunehmender Luftfeuchte ausbildet, entstehen in den Zwickeln infolge Kapillarkondensation dicke bewegliche Wasserfilme, die im Vergleich zu den nur einige Molekülschichten starken, fest gebundenen Sorbatfilmen einen Feuchtetransport entlang der Porenoberflächen größerer Poren bewirken.

Unter der Annahme, dass der Massenstrom bei der Oberflächendiffusion proportional dem Schichtdickengefälle, d.h. dem Wassergehalt an den Porenoberflächen und damit dem Konzentrationsgefälle ist, lässt sich dieser Transport mit einem Diffusionsansatz für den Flüssigkeitstransport analog dem 1. Fick'schen Gesetz beschreiben [65].

$$\dot{m}_{OD} = -D_{OD} \cdot \frac{\partial w}{\partial x}$$

Gleichung 9

Die Oberflächendiffusionsmassenstromdichte \dot{m}_{OD} [kg/(m²·s)] wird durch einen Wassergehaltsgradienten bestimmt. Entscheidend ist, dass es sich hierbei nicht um einen Dampftransport in der Gasphase handelt, sondern um einen reinen Flüssigtransport. In Gleichung 9 ist D_{OD} [m²/s] der Oberflächendiffusionskoeffizient, w [kg/m³] der Wassergehalt und x [m] die betrachtete Weglänge.

2.4.4 Kapillarleitung (Transport im teilgesättigten Porenraum)

Das kapillare Steigvermögen wird durch die Oberflächenspannung beeinflusst. Ursache sind spezifische Wechselwirkungskräfte zwischen Molekülen der Flüssigkeit und der Oberfläche der Kapillaren (Adhäsionskräfte). Je nachdem, wie stark die Adhäsionskräfte sich im Vergleich zu den Kohäsionskräften zwischen den Flüssigkeitsmolekülen ausbilden, wird die Oberfläche unterschiedlich stark benetzt. Sind die Adhäsionskräfte zwischen Oberfläche und Flüssigkeit größer als die Kohäsionskräfte der Flüssigkeit, bildet sich, wie beispielsweise bei Wasser, eine konkave (nach innen gewölbte) Oberfläche aus, vgl. Abbildung 13. Die Flüssigkeit ist bestrebt, so viel wie möglich von der Festkörperoberfläche zu benetzen. Sind hingegen die Adhäsionskräfte kleiner als die Kohäsionskräfte der Flüssigkeit, so möchte die Flüssigkeit den Kontakt zur Oberfläche minimieren und es bildet sich eine konvexe, nach außen gewölbte Oberfläche aus [67].

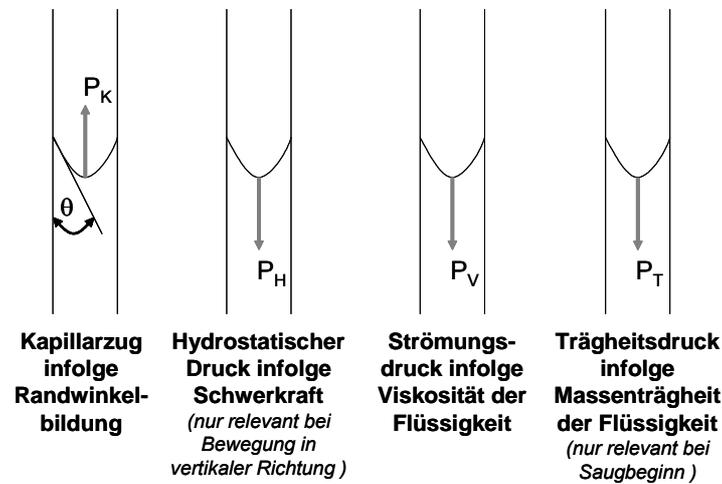


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Kräfte, die auf eine Flüssigkeit wirken, welche in einer Zylinderkapillare empor steigt

In Abhängigkeit der Oberflächenenergie zwischen den einzelnen Phasen stellt sich an der Dreiphasengrenzlinie (Wasser, Porenwand, Luft) ein Randwinkel θ [°] ein. Die Randwinkelbildung verursacht in engen Kapillaren die Ausbildung eines Flüssigkeitsmeniskus, der für Wasser einen nach innen gerichteten Kapillarzug P_K [Pa] bewirkt, Abbildung 13. Diese Zusammenhänge lassen sich über die Gleichung von Young und Laplace für eine Zylinderkapillare mit einem Radius r [m] wie folgt beschreiben [68].

$$P_K = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r}$$

Gleichung 10

Die kapillare Zugkraft P_K [Pa] verursacht, dass die Flüssigkeit in der Kapillare ansteigt [69, 70, 71].

Dem Kapillarzug, der die Ursache für den Transport in den Kapillaren darstellt, wirken weitere Kräfte entgegen, die den Transport einschränken. Die Schwerkraft bewirkt einen hydrostatischen Druck P_H [Pa] in Abhängigkeit der Höhe des Flüssigkeitsmeniskus.

$$P_H = \rho_F \cdot g \cdot h$$

Gleichung 11

In Gleichung 11 ist ρ_F [kg/m³] die Dichte der Flüssigkeit, g die Erdbeschleunigung (= 9,81 m/s²) und h [m] die Höhenlage des Meniskus.

Aufgrund der Viskosität η [kg/(m·s)] von Flüssigkeiten wirkt dem Flüssigkeitstransport durch eine Kapillare ein viskoser Widerstand entgegen, der auch als Strömungsdruck P_V bezeichnet werden kann. Bei laminarer Strömung, die beim Kapillartransport in Baustoffen meist gegeben ist [72], ist der Strömungswiderstand proportional zur Eindringtiefe $x(t)$ und zur Fließgeschwindigkeit (Hagen-Poiseuille-Gesetz [73]).

$$P_V = \frac{8 \cdot \eta}{r^2} \cdot x(t) \cdot \frac{\Delta x(t)}{\Delta t}$$

Gleichung 12

Durch Gleichung 12 wird der Druck P_V [Pa] angegeben, der sich dem Strömen der Flüssigkeit an der Stelle entgegen stellt, wo das Strömen erzwungen wird, d.h. am Flüssigkeitsmeniskus. Mit zunehmendem Radius der Kapillare r [m] nimmt der Strömungswiderstand überproportional ab.

Bei Beschleunigung muss zusätzlich die Massenträgheit des Kapillarwassers überwunden werden. Der Trägheitsdruck P_T ist dabei proportional zu der Masse (Dichte ρ_F [kg/m³]) der Flüssigkeit und der Änderung der Fließgeschwindigkeit.

$$P_T = \frac{\Delta(\rho_F \cdot x(t) \cdot \frac{\Delta x(t)}{\Delta t})}{\Delta t}$$

Gleichung 13

Die Druckkomponente P_T , welche die Massenträgheit bei Geschwindigkeitsänderung berücksichtigt, kann in der Regel vernachlässigt werden, da diese nur bei einem Saugbeginn zum Tragen kommt, wenn nach Benetzung mit Flüssigkeit die Änderung der Eindringgeschwindigkeit sehr groß ist [1, 74].

Alle vorstehend aufgezählten Druckkomponenten können gleichzeitig wirken. Unabhängig von der Höhenlage des Meniskus beim Aufsteigen wirken auf die Flüssigkeit in einer Kapillare die gleichen Druckkomponenten, deren Größe dabei jedoch von der Höhenlage abhängig ist. Der Kapillarzyug wirkt in gleicher Größe in die Pore hinein, die Schwerkraft und der viskose Widerstand wirken je nach Höhenlage des Meniskus in unterschiedlicher Größe dem Kapillarzyug entgegen.

Die beim kapillaren Saugen im Kontakt mit Wasser zeitlich veränderliche Eindringtiefe x lässt sich für eine zylindrische Kapillare (waagrecht) ausgehend von den zuvor aufgeführten Zusammenhängen unter Vernachlässigung der Schwerkraft und der Beschleunigung, die lediglich bei Saugbeginn von Bedeutung ist, berechnen [42, 64, 74]. Dabei wird das

Kräftegleichgewicht zwischen dem Kapillarzug P_K und dem Strömungswiderstand P_V gebildet.

$$x(t) = \sqrt{\frac{\sigma \cdot r \cdot \cos \theta}{2 \cdot \eta}} \cdot \sqrt{t}$$

Gleichung 14

Die Eindringtiefe $x(t)$ [m] wird dabei vom Kapillarradius r [m], der Oberflächenspannung der Flüssigkeit σ [N/m], dem Benetzungswinkel θ [°] und der dynamischen Viskosität der Flüssigkeit η [kg/(m·s)] bestimmt. Die Eindringtiefe nimmt mit fortschreitender Saugzeit t [s] langsamer zu. Diese Beziehung, die in der Literatur als \sqrt{t} -Gesetz bezeichnet wird, zeigt sich genauso bei der kapillaren Wasseraufnahme poröser Baustoffe mit unterschiedlicher Porenstruktur [71, 75]. Für mineralische Baustoffe bei der Benetzung mit Wasser wird dabei üblicherweise ein Benetzungswinkel von $\theta = 0^\circ$ angenommen. Für die Zeitabhängigkeit der Eindringtiefe von Flüssigkeiten in poröse Baustoffe gilt unter Annahme eines Randwinkels von $\theta = 0^\circ$ folgender Zusammenhang:

$$x(t) = c \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}} \cdot \sqrt{t}$$

Gleichung 15

Die Materialkonstante c ist dabei von der Porosität, Porengrößenverteilung und Tortuosität des Baustoffs abhängig. In Analogie zu Gleichung 14 leitet Schwarz [71] den materialspezifischen Wasseraufnahmekoeffizienten A bzw. w ab, der wie folgt definiert ist und in die Norm DIN EN ISO 15148:2002 eingegangen ist.

$$m = A \cdot \sqrt{t} = w \cdot \sqrt{t}$$

Gleichung 16

Mit Hilfe des Wasseraufnahmekoeffizienten A [kg/(m²·√s)] bzw. w [kg/(m²·√h)] lässt sich die bei Kontakt mit Wasser aufnehmbare Flüssigkeitsmenge m [kg/m²] berechnen, Aussagen über die Wassergehaltsverteilungen lassen sich jedoch nicht treffen.

In realen Porensystemen bilden sich beim Eindringen von Flüssigkeiten in das Porensystem Wassergehaltsgradienten aus, die auf die unterschiedlich hohen kapillaren Zugkräfte P_K und Strömungswiderstände P_V der miteinander vernetzten Poren zurückzuführen sind. Die Flüssigkeit in den Poren wird durch die kapillaren Zugkräfte solange beschleunigt, bis sich ein Gleichgewicht mit dem Strömungswiderstand einstellt. Der Einfluss der Schwerkraft sei

hierbei vernachlässigt. Die kapillare Zugkraft P_K ist nach Gleichung 10 proportional zum Radius der Kapillaren, der entgegen gerichtete Strömungswiderstand P_V ist entsprechend Gleichung 12 proportional zum Kehrwert des Radius im Quadrat. Dies führt dazu, dass das Wasser in den größeren Poren trotz niedrigerem Kapillarzyug schneller transportiert wird als in kleineren Poren. Aus dem Kräftegleichgewicht ($P_K = P_V$) kann die Eindringgeschwindigkeit der Flüssigkeit in Abhängigkeit der Porengröße abgeschätzt werden.

$$v(t) = \frac{\Delta x(t)}{\Delta t} = \frac{r \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{4 \cdot \eta \cdot x(t)} = \frac{P_K \cdot r^2}{8 \cdot \eta \cdot x(t)}$$

Gleichung 17

Entsprechend der Abhängigkeit der Eindringgeschwindigkeit $v(t)$ [m/s] von der Porengröße stellt sich in einem Baustoff mit vernetzten Poren unterschiedlicher Größe in Saugrichtung ein Wassergehaltsgradient ein. In der Literatur wird dieser Effekt häufig als Dispersion bezeichnet [23, 76, 77, 78]. Je breiter das Porenspektrum ist, umso größer ist der sich dabei einstellende Wassergehaltsgradient. Je größer die Porengröße ist, umso schneller wird das Wasser transportiert.

Beim Kapillartransport handelt es sich zwar tatsächlich um eine Strömungserscheinung, dennoch hat es sich in der Modellierung des Kapillartransports durchgesetzt [z.B. 1, 2, 3, 65, 62, 79, 80], entsprechend der Dampf- und Oberflächendiffusion auch für den Kapillartransport einen Diffusionsansatz zu wählen.

$$\dot{m}_F = -D_W(w) \cdot \frac{\Delta w}{\Delta x}$$

Gleichung 18

Der Kapillartransport wird dementsprechend von einem Wassergehaltsgradienten ausgelöst, wobei der Transportkoeffizienten D_W [m²/s] stark wassergehaltsabhängig ist.

Die theoretischen Grundlagen, die für die Verwendbarkeit eines Diffusionsansatzes, der eine Proportionalität zwischen Massenstrom und Gradient des Transport auslösenden Potentials erfordert, lieferte Krischer [63]. Er leitete auf Basis eines Porenmodells, in welchem parallel geschaltete Zylinderkapillaren unterschiedlichen Durchmessers widerstandslos miteinander verbunden sind, den Wassergehalt als treibendes Potential her. Es wird vorausgesetzt, dass in allen gefüllten Kapillaren eines Querschnitts ein Druckausgleich herrscht. Die Größe des kapillaren Unterdrucks (Kapillarzyugs) in der Flüssigkeit wird dabei von der größten unter den gegebenen Feuchtebedingungen (relative Luftfeuchte φ) gefüllten Pore in diesem Querschnitt bestimmt. Die Zusammenhänge zwischen relativer Luftfeuchte über dem Meniskus, dem

größten gefüllten Porenradius und dem Kapillarzyg sind durch die Kelvin-Thomson-Beziehung gegeben (Gleichung 2). Über die Feuchtespeicherfunktion kann so einem bestimmten Wassergehalt ein kapillarer Unterdruck (Kapillarzyg) zugeordnet werden. Der Zusammenhang zwischen dem in einem Querschnitt vorliegenden kapillaren Zug und dem Wassergehalt führt zu einem stark wassergehaltsabhängigen Transportkoeffizienten D_W .

Die tatsächlich für den Kapillartransport im Porenraum verantwortlichen kapillaren Zugkräfte werden zwar durch diesen Ansatz nicht berücksichtigt, da ihre messbaren Auswirkungen, d.h. die Wassergehaltsgradienten aber in einem funktionalen Zusammenhang dazu stehen müssen, erscheint dieser Ansatz als geeignet. In zahlreichen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich mit diesem Diffusionsansatz und zugehörigen wassergehaltsabhängigen Diffusionskoeffizienten die gleiche Abhängigkeit der Massenzunahme vom \sqrt{t} -Gesetz ergibt wie bei einem Saugversuch [2, 61, 81].

Dennoch sind bei der Anwendung des Diffusionsansatzes Randbedingungen für die Transportkoeffizienten D_W zu berücksichtigen [1, 2, 65], die die Kenntnis über die beschriebenen Zusammenhänge zwischen Porengeometrie und auftretenden Kräften voraussetzen. Wird die Wasserzufuhr unterbrochen, bilden sich an der ehemals benetzten Oberfläche Menisken. Die Zugspannung dieser Menisken und der kapillare Unterdruck im Bereich der Wasserfront sind entgegengerichtet und heben sich annähernd auf. In den großen Kapillaren, die die Transportgeschwindigkeit bei der Benetzung maßgeblich bestimmen, kann kein Transport mehr stattfinden. Nach Beendigung der Wasserzufuhr wird der Transport von den kleineren Poren bestimmt, die aufgrund des höheren kapillaren Unterdrucks das Wasser aus den großen Poren saugen und weitertransportieren. Zur Berücksichtigung dieser von den äußeren Randbedingungen abhängigen Transportmechanismen führte Künzel [2] zwei Transportkoeffizienten ein: Der Flüssigtransportkoeffizient für das Saugen D_{WS} beschreibt die kapillare Wasseraufnahme bei vollständiger Benetzung der Baustoffoberfläche. Dies entspricht in baupraktischem Zusammenhang der Befeuchtung der Baustoffoberfläche, z.B. durch Regen, oder bei einem Saugversuch im Labor. Der Flüssigtransportkoeffizient für das Weiterleiten D_{WW} beschreibt die Umverteilung des aufgesaugten Wassers, wenn nach Beendigung der Benetzung der Oberfläche kein weiteres Wasser eindringt. Im Bauteil entspricht dies der Feuchteverteilung im Baustoff, z.B. nach einem Regenereignis. Da das Weiterleiten von den kleineren Kapillaren bestimmt wird, ist die Geschwindigkeit infolge des höheren Strömungswiderstandes in der Regel um ein Vielfaches geringer als die Sauggeschwindigkeit während einer Benetzung.

Die wassergehaltsabhängigen Transportkoeffizienten lassen sich aus gemessenen Wassergehaltsprofilen mathematisch bestimmen [Bsp.: 66]. Einige Autoren [z.B. 1, 2, 82, 83, 84, 85] haben Näherungsansätze entwickelt, die es erlauben, anhand bekannter material-

spezifischer Kenngrößen wie beispielsweise Porenradienverteilung, Porosität oder Wasseraufnahmekoeffizient w , die Flüssigtransportkoeffizienten D_W abzuleiten.

2.4.5 Einfluss äußeren Drucks auf die Kapillarleitung

Wirkt neben dem Kapillarzyg P_K zusätzlich ein äußerer Druck P_A auf eine Flüssigkeit in einer Zylinderkapillare, muss der Kapillardruck aus Gleichung 10 um den äußeren Druck P_A ergänzt werden. Es ergibt sich der Gesamtdruck P_G :

$$P_G = P_K + P_A = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r} + P_A$$

Gleichung 19

Anstelle von Gleichung 14 ergibt sich nun folgender Zusammenhang.

$$x(t) = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r} + P_A \right) \cdot \frac{r^2}{4 \cdot \eta} \cdot \sqrt{t}}$$

Gleichung 20

Aus Gleichung 20 wird deutlich, dass der Einfluss eines konstanten äußeren Drucks mit kleiner werdendem Radius der Kapillaren kleiner wird. Abbildung 14 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Hier wird das Verhältnis V_H der Eindringtiefen mit und ohne Druck in Abhängigkeit der Porengröße bei äußeren Drücken unterschiedlicher Größe dargestellt.

Demnach haben Winddrücke in der Größenordnung von 0,01 bar (10 cm Wassersäule) keinen weiteren Einfluss auf das kapillare Eindringverhalten in Porengrößen kleiner als 100 μm . Dagegen lassen sich durch höhere Drücke, wie sie beispielsweise beim Verpressen von Rissen ausgeübt werden, oder bei drückendem Grundwasser durchaus Steigerungen in der Eindringtiefe erreichen.

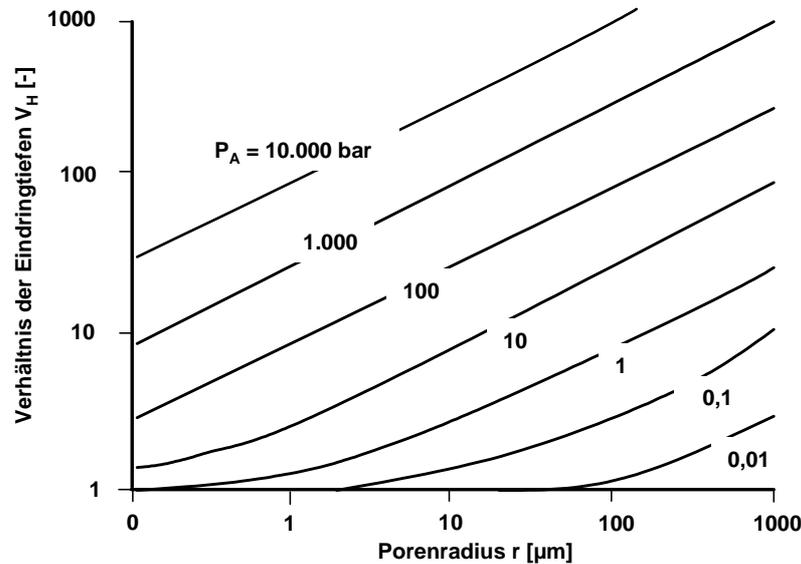


Abbildung 14: Beeinflussung der Eindringtiefe von Kapillarwasser durch einen äußeren Druck ($V_H = x(t, \text{ mit Druck}) / x(t, \text{ ohne Druck})$), Daten aus [74]

2.4.6 Wechselwirkung zwischen Gefüge und Feuchte („Selbstabdichtung“)

2.4.6.1 Definition des Begriffs Selbstabdichtung

Anders als bei den meisten porösen mineralischen Baustoffen wie z.B. Ziegel, Kalksandstein oder Natursandstein, bei welchen die Aufnahme von Wasser proportional zur Wurzel der Zeit verläuft, zeigt sich für zementgebundene Baustoffe ein abweichendes Verhalten. Abbildung 15, links zeigt die Wasseraufnahme einiger Baustoffe während eines Saugversuchs, bei welchem die kapillare Wasseraufnahme über einen gewissen Zeitraum gemessen wurde. Während bei den grobporigen Materialien das Wurzel-Zeit-Gesetz gilt, dringt das Wasser in das feinporige Gefüge des Betons mit zunehmender Zeit deutlich langsamer ein, als es nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz zu erwarten wäre.

Auch bei Permeabilitätsmessungen im Druckgefälle zeigt Wasser ein Durchlässigkeitsverhalten, welches von dem anderer Flüssigkeiten abweicht. Die Durchlässigkeit für Wasser sinkt mit zunehmender Versuchsdauer während die Durchflussrate für unpolare organische Flüssigkeiten konstant ist. Der Mechanismus, der zu diesem für zementgebundene Baustoffe charakteristischen Wasseraufnahme- bzw. Durchlässigkeitsverhalten führt, wird im Folgenden mit dem Begriff „Selbstabdichtung“ bezeichnet.

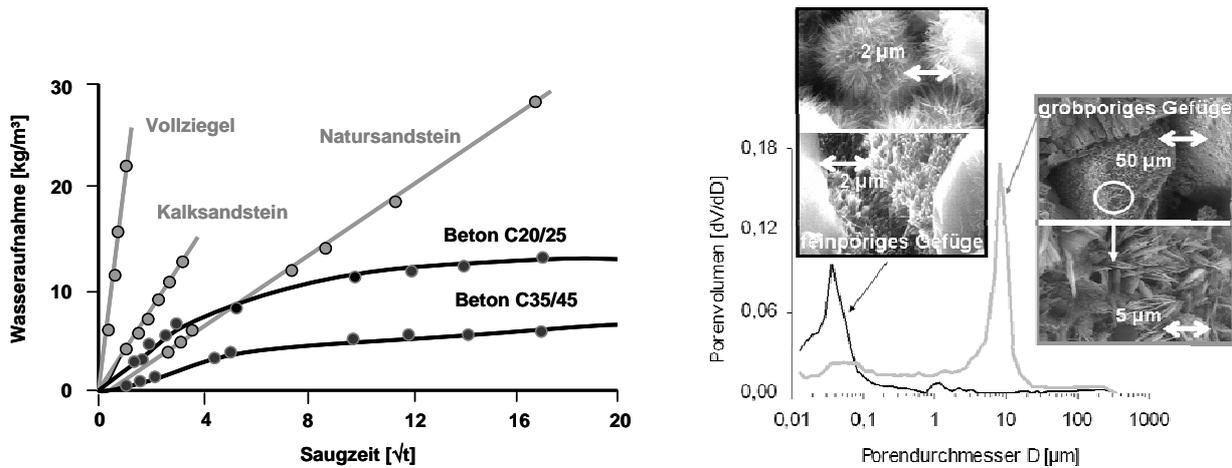


Abbildung 15: links: kapillare Wasseraufnahme verschiedener poröser Stoffe, Daten aus [86], rechts Porengrößenverteilung eines feinporösen Gefüges im Vergleich zu einem grobporösen Gefüge

2.4.6.2 Ursachen der Selbstabdichtung

Die genaue Ursache für die Selbstabdichtung ist bis heute nicht eindeutig geklärt. Berechnungsansätze, die die bei diesem Phänomen auftretenden Mechanismen berücksichtigen, existieren nicht, so dass eine rechnerische Abschätzung des Feuchte- transports unter Berücksichtigung sämtlicher auftretender Mechanismen nicht möglich ist. Die in Kapitel 2.4.2-2.4.5 beschriebenen Transportgesetze setzen jeweils voraus, dass keine Wechselwirkungen zwischen Porengefüge und eindringendem Wasser stattfinden.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Klärung der Ursachen für den Selbstabdichtungseffekt in zementgebundenen Baustoffen, sowie der Modellierung der maßgebenden Mechanismen, um eine Berechnung des Feuchtehaushalts auch im Beton zu ermöglichen. Grundlage für die hierzu durchgeführten Untersuchungen sind die im Folgenden näher durchleuchteten Ergebnisse und Interpretationen verschiedener Wissenschaftler. Abbildung 16 gibt einen kurzen Überblick über die in der Literatur diskutierten Ursachen der Selbstabdichtung.

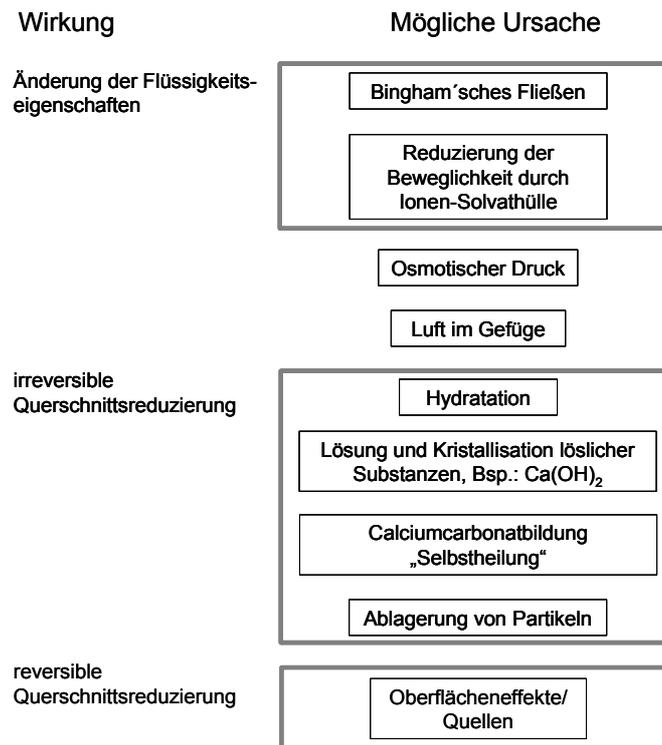


Abbildung 16: Überblick über die in der Literatur diskutierten möglichen Ursachen für die Selbstabdichtung von Beton

Bingham'sches Fließen

Wasser verändert in Abhängigkeit der wirkenden Oberflächenkräfte seine Struktur und somit auch seine Beweglichkeit. In den sehr kleinen Poren des Zementgels ist das Wasser, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, strukturiert. Aus diesem Grund muss man nach Volkwein [76] davon ausgehen, dass sich das dort enthaltene Wasser nicht wie eine Newton'sche Flüssigkeit verhält, so dass die in Kapitel 2.4.4 beschriebenen Gleichgewichtsbedingungen und Kräfte gelten. Das Wasser in den sehr kleinen Poren verhält sich wie ein Bingham-Medium. Erst nach Überschreiten einer Mindestfließspannung kann ein Transport in den sehr kleinen Poren des Zementgels stattfinden. Dass das Wasser in den sehr kleinen Poren des Zementsteins strukturiert ist, wurde hinreichend bestätigt [z.B. 35-41].

Reduzierung der Beweglichkeit durch Ionen-Solvathülle

Einen weiteren Grund für die Reduzierung der Transportgeschwindigkeit in zementgebundenen Baustoffen sieht Volkwein [76] in der eingeschränkten Beweglichkeit der Wassermoleküle infolge der im Porenwasser gelösten Ionen. Durch Anlagerung der Wassermoleküle an die Ionen sind sie nicht mehr mit freiem Wasser vergleichbar, sondern verlieren mit zunehmender Größe der um das Ion gebildeten Solvathülle ihre Beweglichkeit. Nach [76] zeigen Baustoffe, wie zum Beispiel Sandsteine, die keine löslichen Ionen enthalten, jedoch auch eine Abweichung vom Wurzel-Zeit-Gesetz.

Osmotischer Druck

Die Lösung der Alkalien aus der Zementsteinmatrix verursacht, wie von Sosoro [87] beschrieben, einen Konzentrationsgradienten von der Flüssigkeitsfront hin zur Beaufschlagungsfront, wodurch sich ein osmotischer Druck ausbildet, der dem Flüssigtransport entgegen wirkt und ihn somit einschränkt. Powers [88] schätzte, dass dies einen Einfluss von weniger als 10 % auf die Durchlässigkeit hat. Hearn ermittelte anhand von Porenwasseruntersuchungen für einen maximalen Konzentrationsgradienten gelöster Alkalien einen osmotischen Druck von 0,14 bar [11]. Dieser osmotische Druck stand einem von außen aufgebrachtem Druck von 7 bar entgegen, was einem Widerstand von etwa 2 % entspricht und somit den in den Permeabilitätsuntersuchungen beobachteten Selbstabdichtungsmechanismus nicht maßgeblich verursachen kann.

Lufteinschlüsse

In den Poren eingeschlossene Luft infolge unvollständiger Sättigung bewirkt die Ausbildung von Flüssigkeitsmenisken. Dadurch ist bei Permeabilitätsmessungen im gesättigten Bereich nicht mehr alleine ein Druckgradient für den Transport der Flüssigkeit verantwortlich, sondern Kapillarkräfte bestimmen den Transport durch das Porengefüge so lange, bis sich die Luft im Wasser langsam auflöst oder die Luft langsam entweicht. Erst dann wird der Transport unabhängig von Kapillarkräften durch den äußeren Druckgradienten bestimmt und deutlich leistungsstärker. Einige Autoren [z.B. 89, 90, 91] sehen in diesen Zusammenhängen die Ursache für die Abnahme der Permeabilität von Wasser durch Beton. Eine dauerhafte Selbstabdichtung, wie sie in der Praxis und in Versuchen nachgewiesen wurde, kann jedoch durch diesen Mechanismus nicht erklärt werden, da hier mit der Zeit der Selbstabdichtungseffekt geringer werden müsste, bevor er völlig entfällt. Weiterhin müsste dieser Effekt beim Eindringen sämtlicher Flüssigkeiten beobachtet werden können. Die Aufnahme von Hexan beispielsweise verläuft jedoch auch in zementgebundenen Baustoffen entsprechend des Wurzel-Zeit-Gesetzes.

irreversible Querschnittsreduzierung

Chemische Wechselwirkungen zwischen Zementstein, Wasser und Luft können zu einer irreversiblen Reduzierung des Porenraums führen, die durch eine fortschreitende Hydratation [92, 93], die Lösung und Ablagerung löslicher Substanzen, wie $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [11, 14, 91], Carbonatisierung des gelösten $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [92] oder durch die Verstopfung des Porenraums durch lose Partikel [91, 92, 93] verursacht werden kann.

Hydratation

Mit fortschreitender Hydratation wird das Gefüge des Zementsteins verdichtet. Hohlräume werden gefüllt bzw. verkleinert. Zudem entstehen Alkalien, die im Porenwasser in Lösung

gehen. Versuche von Bonzel [94] zeigten eindeutig die Altersabhängigkeit der Durchlässigkeit von Beton, die durch den Hydratationsfortschritt begründet ist.

Nachhydratation

In der Regel enthält der Zementstein in Abhängigkeit von Nachbehandlung und Hydratationsfortschritt auch in sehr hohem Alter des Zementsteins Reste unhydratisierten Zements. Nach einer Mikrorissbildung, wodurch die reaktive Oberfläche des unhydratisierten Zementkorns freigelegt wird, können diese unhydratisierten Reste bei Wasserzufuhr reagieren und das Gefüge innerhalb kurzer Zeit verdichten, bzw. die Mikrorisse schließen [10, 95].

Lösungs- und Ablagerungsvorgänge

Auch die Theorie der „Lösungs- und Ablagerungsvorgänge“ beruht auf einer Verengung des kapillaraktiven Porenraums und einer damit verbundenen Reduzierung der Transportgeschwindigkeit mit der Zeit. Dem im Zementstein vorhandenen kristallinen Calciumhydroxid kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu [11, 14, 91]. Lieferanten für das im Zementstein vorhandene Calciumhydroxid sind das bei der Hydratation direkt gebildete freie kristalline Calciumhydroxid sowie das in den CSH-Phasen eingebaute Calciumhydroxid. Die Löslichkeit des Calciumhydroxids ist zwar gering, dennoch kann es sich bei Wasserzufuhr lösen. Im Wasser enthaltene Natrium- und Kaliumionen beeinflussen die Löslichkeit in besonderem Maße. Während die Löslichkeit von Calciumhydroxid in reinem Wasser rd. $1,5 \times 10^{-2}$ mol/Liter beträgt (pH der Lösung = 12,4), nimmt die Löslichkeit mit zunehmendem Gehalt an Natrium und Kalium in der Lösung ab. Eine 0,5 molare NaOH-Lösung reduziert die Löslichkeit von Calciumhydroxid bereits auf rd. $3,4 \times 10^{-4}$ mol/Liter (pH der Lösung = 13,5). Durch eine 1 molare NaOH-Lösung wird die Löslichkeit auf rd. $1,6 \times 10^{-4}$ reduziert (pH der Lösung = 13,8; Berechnungen mit PHREEQC [96]).

Weitere mögliche lösliche Stoffe sind andere Alkaliionen, wie Magnesium-, Kalium-, und Natrium-Ionen. Diese Bestandteile des Zementsteins können durch eindringendes Wasser herausgelöst und mittransportiert werden. Eine Lösung von Ionen aus der Zementsteinmatrix findet dabei auch nach vollständiger Hydratation solange statt, bis keine löslichen Partikel mehr vorhanden sind. Tritt eine Übersättigung der Porenlösung ein, fallen diese Ionen aus und bilden Kristalle, die sich an den Porenwandungen ablagern. Durch die Ablagerung verringert sich der Porenradius und somit der Transportraum für die Flüssigkeit, was nach der Theorie der Lösungs- und Ablagerungsvorgänge die maßgebliche Ursache für die Selbstabdichtung darstellt.

Calciumcarbonatbildung „Selbsteilung“

In der Baupraxis vorkommenden Wässer enthalten durch den Kontakt mit CO₂-haltiger Außenluft gelöstes Kohlendioxid. Dies führt zur Carbonatisierung bzw. zur Calciumcarbonat-

bildung. Je nach Gehalt an gelöstem Kohlendioxid kann es zu einer Porenraumverengung infolge der Bildung von schwer löslichem Calciumcarbonat (CaCO_3) oder zu einer Weitung des Gefüges infolge der Bildung von wasserlöslichem Calciumhydrogencarbonat ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) kommen (Löslichkeit CaCO_3 : $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 = 1:13000$) [67, 95]. Das leicht lösliche Calciumhydrogencarbonat entsteht nach der Bildung von Calciumcarbonat, wenn eine weitere Zufuhr von gelöstem Kohlendioxid erfolgt. Untersuchungen von Edvardsen [95] deuten auf eine Calciumcarbonatbildung als Hauptursache für die Selbstheilung von Rissen im Beton hin. Dass dieser Mechanismus auf die Selbstabdichtung im ungerissenen Beton übertragbar ist, ist jedoch unwahrscheinlich, da die Voraussetzung für die Porenraumverengende Reaktion das Vorhandensein von gelöstem Kohlendioxid im Wasser ist. Während diese Voraussetzung bei Rissen durch den direkten Kontakt der Rissflanken mit der CO_2 -haltigen Außenluft gegeben ist, kann diese Reaktion aufgrund des Mangels an Nachschub des gelösten Kohlendioxid im Wasser des Porenraums nur in sehr begrenztem Maße auftreten und lediglich Auswirkungen auf den oberflächennahen Bereich haben. Zudem tritt der Selbstabdichtungseffekt auch beim Eindringen von Wasser auf, welches kein gelöstes Kohlendioxid enthält, so dass dies nicht die maßgebliche Ursache sein kann.

Verstopfung durch lose Partikel

Neben der Funktion als Lösemittel für die chemischen Reaktionspartner dient das Wasser als Transportmedium für natürliche Wasserinhaltsstoffe und feine Partikel. Die Migration der feinen Partikel ist von der Geschwindigkeit des Wassers, der Viskosität und der Dichte abhängig, eine Ablagerung der Partikel im Porenraum würde ebenso eine Reduzierung des Transportraums bewirken. Anhand von Permeabilitätsmessungen zeigte Hearn [11] jedoch, dass dieser Mechanismus nicht für den beobachteten Selbstabdichtungseffekt maßgebend sein kann. Nach dem Entfernen der oberflächennahen Schicht einer Betonprobe, an welcher die Permeabilität gemessen wurde, konnte bei erneuten Permeabilitätsmessungen keine wesentliche Zunahme der Wasserdurchlässigkeit beobachtet werden.

Oberflächenkräfte/ Quellen

In Kapitel 2.3 wurde bereits dargestellt, in welcher Art und Weise die Wechselwirkung zwischen Wasser und Zementgel zu einer Volumendehnung des Zementsteins führen. Diese Volumendehnung ist nach der Theorie des „Inneren Quellens“ die Hauptursache für die Reduzierung des kapillaraktiven Porenraums, so dass die Transportwege für das Wasser mit zunehmendem Feuchtegehalt in den Gelporen stärker eingeschränkt werden.

Aus der Darstellung der hier beschriebenen möglichen Ursachen für den Selbstabdichtungseffekt geht hervor, dass die Hydratation, die Ablagerung von infolge von Wassereintritt gelösten Bestandteilen des Zementsteins im Porenraum und das innere Quellen als maßgebende Mechanismen in Betracht kommen. Des Weiteren kann die Änderung der

physikalischen Eigenschaften des Wassers in den Poren kleinen Durchmessers diesen Effekt beeinflussen (vgl. Kapitel 2.2.2). Da der Selbstabdichtungseffekt auch in gealtertem und ungerissenem Beton auftritt und der Transport unter diesen Bedingungen modelliert werden soll, wird auf Grundlage der im Folgenden beschriebenen Versuche die Relevanz der altersunabhängigen Mechanismen „Quellen“ und „Lösung und Ablagerung“ genauer beleuchtet.

2.4.6.3 Relevante Flüssigkeitseigenschaften

Sowohl das Quellen wie auch das Lösen von Bestandteilen aus der Zementsteinmatrix sind von den Eigenschaften der aufgenommenen Flüssigkeit abhängig. Maßgebende Parameter sind dabei die Polarität der Moleküle in der Flüssigkeit, die Anordnung der einzelnen Atome der Flüssigkeit sowie die Atomart und -größe.

Polarität/ Dipolmoment

Die hohe Polarität des Wassers zum Beispiel resultiert in einem ausgeprägten Lösungsvermögen für Salze. Aus dem elektrischen Dipolmoment, der Maßgröße für die Polarität, resultiert die statische Anziehungskraft zwischen Molekülen untereinander sowie zwischen Molekülen und Ionen. Die Anziehungskraft zwischen einem Dipol und einem Ion liegt in der Größenordnung von 250 kJ/mol. Mit zunehmendem Dipolmoment sind die anziehenden Kräfte stärker.

Beim Lösungsvorgang von Salzen in Flüssigkeiten spielt die Ion-Dipol-Anziehung eine große Rolle. Die Wassermoleküle lagern sich wegen der negativen Ladung des Sauerstoffatoms an die Kationen des Salzes an (Hydratation) und somit wird verhindert, dass sich Kationen und Anionen zu einem Gitterverband zusammenfügen.

Alkalilöslichkeit

Die Lösung von Alkalimetallen (Na^+ , K^+) ist von der Anordnung der Molekülgruppen in der Flüssigkeit abhängig. Nur Verbindungen, die ein aktives H-Atom besitzen, können mit den Alkalien des Zementsteins reagieren. Aktive H-Atome sind solche, die an Sauerstoff gebunden sind (vgl. Wasser). Durch die Polarität der Bindung wird die Ablösung infolge der Reaktion mit einem Alkalimetall-Atom begünstigt. Die Ursache liegt in der energetisch besonders stabilen Situation des Sauerstoff-Anions bzw. des Alkalimetall-Kations. An C-Atome gebundene H-Atome können also nicht mit Alkalimetallen reagieren (z.B. Hexan).

Molekülgröße

Die Molekülgröße ist vor allem im Hinblick auf das innere Quellen von Bedeutung, da die Moleküle mit zunehmender Größe schlechter in die kleinen Poren des Zementgels, welche für

diesen Mechanismus maßgebend sind, eindringen können. Genauso nimmt jedoch auch die Lösung im Zementstein enthaltener Alkaliionen mit zunehmender Molekülgröße der eindringenden Flüssigkeit ab, da die kleinen Porengrößen den Großteil der zur Reaktion zur Verfügung stehenden inneren Oberfläche bieten.

2.4.6.4 Darstellung in der Literatur beschriebener Versuche zur Selbstabdichtung

Aufnahme von unpolarem Hexan

Für das Quellen des Zementsteins wie auch für das Lösen des Calciumhydroxids aus der Zementsteinmatrix durch das eindringende Wasser sind die Polarität des Wassers und die Vielzahl der OH-Gruppen im Wasser maßgebend.

In einer Versuchsreihe von Krus [13] wurde die kapillare Wasseraufnahme (polar, OH-Gruppe vorhanden) mit der Aufnahme von Hexan (unpolar, keine OH-Gruppe vorhanden) eines Mörtels mit einem w/z-Wert von 0,35 verglichen. Während die Wasseraufnahme ein vom Wurzel-Zeit-Gesetz abweichendes Verhalten zeigt, erfolgt die Aufnahme von Hexan proportional zur Wurzel der Zeit. Übereinstimmende Ergebnisse wurden auch in [10] erreicht.

Zusätzlich zu der Massenzunahme wurde beim in [13] beschriebenen Saugversuch mit Hexan die makroskopische Dehnung der Proben gemessen. Die mit Wasser beaufschlagten Proben zeigten eine deutliche Feuchtedehnung. Bei einer Wasseraufnahme von rd. 3,5 l/m² wurde eine Dehnung von rd. 4 ‰ gemessen, während die im gleichen Zeitraum aufgenommene Menge an Hexan von rd. 13,5 l/m² kein Quellen verursachte.

Aufnahme unpolarer Flüssigkeiten

In Untersuchungen von Hall et al. [10] wurden an Mörtelprismen die Dehnungen während der kapillaren Aufnahme unterschiedlicher Flüssigkeiten zeitabhängig gemessen. Die Flüssigkeitsaufnahme (Abbildung 17, links) erfolgte für den Mörtel mit einem Wasserzementwert von 0,7 innerhalb des kurzen Untersuchungszeitraums proportional zur Wurzel der Zeit. Die entsprechende Dehnung während des Saugversuchs mit Wasser erfolgte ebenfalls proportional zur Wurzel der Zeit. Abbildung 17, rechts zeigt die entsprechenden Ergebnisse. Im Vergleich zu den hier parallel untersuchten unpolaren Flüssigkeiten ist die Dehnung des Mörtels bei Wasserbeaufschlagung um eine Größenordnung größer. Die Dehnungen der Mörtel, die mit den unpolaren Flüssigkeiten beaufschlagt wurden, nehmen mit zunehmender Molekülgröße bzw. zunehmender Oberfläche der Moleküle zu. Grund dafür sind van der Waals-Kräfte geringer Reichweite, die sich zwischen den Molekülen ausbilden.

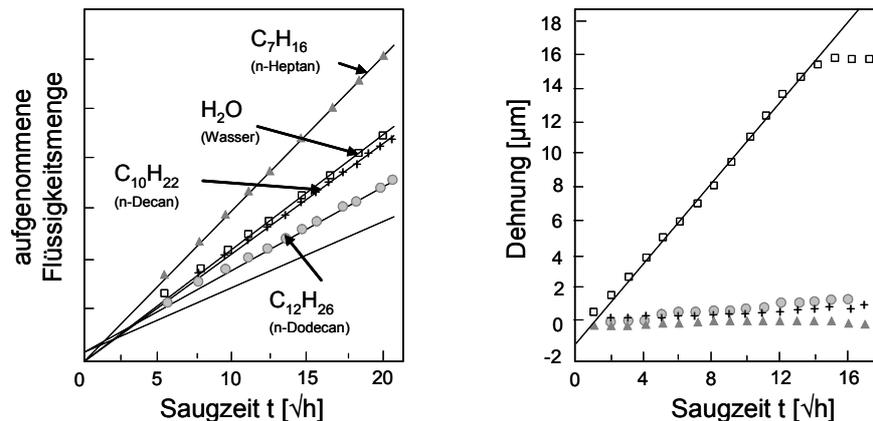


Abbildung 17: Aufnahme von Wasser und den unpolare Flüssigkeiten n-Heptan, n-Decan und n-Dodecan in eine Probe aus Portlandzement (w/z -Wert = 0,7), links: aufgenommene Flüssigkeitsmenge in Abhängigkeit der Wurzel der Zeit, rechts: Dehnung der Proben in Abhängigkeit der Wurzel der Zeit, Daten aus [10]

Dehnungsmessungen nach Aufnahme polarer und unpolarer Flüssigkeiten

Dehnungsmessungen an Zementstein-Hohlzylindern, die vor der Messung der freien Dehnung 24 Stunden in verschiedenen Flüssigkeiten gelagert wurden, zeigten ähnliche Ergebnisse [97]. Der hier untersuchte Zementstein aus CEM I 32,5 R hatte einen w/z -Wert von 0,4, die Wandstärke der Hohlzylinder betrug 2,5 mm. Das innere Quellen wird den Ergebnissen zufolge bei der Aufnahme von Flüssigkeiten von dem Dipolmoment, der Löslichkeit von Wasser in der Flüssigkeit und der Molekülgröße bestimmt. Je größer das Dipolmoment der eingedrungenen Flüssigkeit, desto größer ist die potentielle Quellkraft aufgrund der intermolekularen Kräfte zwischen Flüssigkeit und Zementsteinmatrix. Nichtpolare Flüssigkeiten erzeugen keine nennenswerten Dehnungen und Quellspannungen in Zementstein. Je höher das Molekulgewicht bzw. je größer die Moleküle sind, desto schlechter diffundieren sie in die Gelporen hinein und desto geringer ist die Dehnung und Quellspannung aufgrund vorhandener Dipolmomente. Bei wasserlöslichen Flüssigkeiten wirkt ein Entzug von Wasser aus dem Zementsteingefüge der Quellkraft entgegen. Die Dehnung kann dabei negativ werden (z. Bsp. 1-Propanol).

Dehnungsmessungen nach Steigerung der relativen Feuchte

In weiteren Untersuchungen [97] wurde die Zunahme der Dehnung mit steigender relativer Feuchte der Lagerungsatmosphäre untersucht. Die freien Dehnungen nach 5-tägiger Lagerung der untersuchten Zementstein-Hohlzylinder aus CEM I 32,5 R mit Wasserzementwerten von 0,4 und 0,55 und einer Wandstärke von 2,5 mm sind in Abbildung 18 dargestellt. Aus der Abhängigkeit der freien Dehnung von der relativen Luftfeuchte kann abgeleitet werden, dass in einem Luftfeuchtebereich zwischen 3 % r.F. und 96 % r.F. ca. 65 % ($w/z = 0,4$) bzw. 75 % ($w/z = 0,55$) der freien Dehnung auf die Änderung der Grenzflächenenergie (Partikeldehnung) zwischen dem dispersen Gelfestkörper und dem Gelporenwasser zurückzuführen ist, vgl.

Kapitel 2.3. Die Wirkung des Spaltdrucks infolge wassergefüllter Poren beträgt ca. 35 % ($w/z = 0,4$) bzw. 25 % ($w/z = 0,55$) der in diesem Luftfeuchtebereich stattfindenden freien Gesamtdehnung.

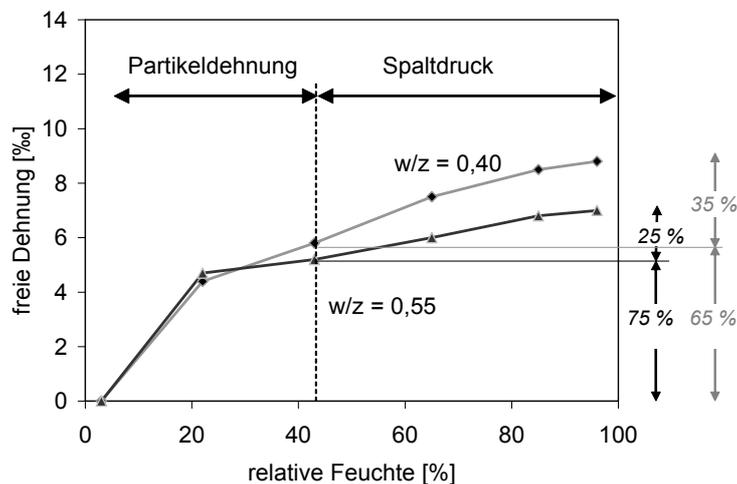


Abbildung 18: Entwicklung der freien Dehnung von Zementsteinproben aus CEM I 32,5 R mit Wasserzementwerten von 0,4 und 0,55 in Abhängigkeit der relativen Feuchte der Umgebung, Daten aus [97]

Zugänglichkeit des Porenraums für verschiedene Medien

Untersuchungen des Porenraums mittels Heliumpyknometrie, Quecksilberdruckporosimetrie und Wassersättigung zeigten, dass für die untersuchten Betone der durch die Wassersättigung ermittelte Wert der Porosität rund 20 % über den Werten der beiden anderen Verfahren lag [13]. Die Wassermoleküle (Molekülradius rd. 140 pm) können demnach in Bereiche eindringen, die den Heliumatomen (Atomradius rd. 128 pm) trotz geringerer Größe nicht zugänglich sind. Organische Flüssigkeiten (Bsp.: Hexan, n-Heptan, n-Decan, etc.) oder inerte Gase (Bsp.: Helium) können aufgrund ihrer Unpolarität nicht in dem Maße in das Zementgel eindringen wie polare Flüssigkeiten (Bsp.: Wasser, Methanol, etc.).

Eindringverhalten nach Vorlagerung bei verschiedenen Luftfeuchten

Neben Dilatations- und Sättigungsmessungen scheinen auch Versuchsergebnisse zum Eindringverhalten von Wasser im Vergleich zu Cyclohexan nach Vorlagerung bei unterschiedlichen Luftfeuchten [98] die Theorie des Quellens zu unterstützen. Mit zunehmender Höhe der Ausgleichsfeuchte nach Vorlagerung nimmt die Aufnahmegeschwindigkeit sowohl für Wasser wie auch für Cyclohexan ab. Durch das Quellen des Gelporenraums während der Vorlagerung wird der kapillaraktive Porenraum und die Vernetzung der Poren untereinander reduziert. Durch die Reduzierung der Porenradien wird zwar der Kapillarzug größer, dennoch nimmt die Transportgeschwindigkeit der Flüssigkeit ab, da entsprechend Gleichung 12 der viskose Widerstand, der dem Kapillarzug entgegenwirkt mit abnehmendem Porenradius quadratisch zunimmt. Da der Porenradius sich

jedoch nur minimal reduziert, ist davon auszugehen, dass die Hauptursache in der Reduzierung der Konnektivität der Poren durch das Quellen liegt. Im niedrigen Feuchtebereich wirkt sich die Variation der Vorlagerung besonders stark auf die Flüssigkeitsaufnahme aus. Dies lässt sich mit dem in Abbildung 8 und Abbildung 18 dargestellten Dehnungsverhalten des Zementsteins in Abhängigkeit der relativen Feuchte korrelieren. Im Bereich geringer Luftfeuchten ($< 50\%$ r.F.) wird der Gelporenraum durch die Reduzierung der zwischen den Gelpartikeln wirkenden Oberflächenkräfte bei zunehmender Luftfeuchte maßgeblich gedehnt. Cyclohexan zeigt hier eine deutlich langsamere Eindringgeschwindigkeit als Wasser, was auf den infolge geringerer Oberflächenspannung reduzierten Kapillarzug zurückzuführen ist.

In weiteren Untersuchungen wird deutlich, dass die Abweichung vom Wurzel-Zeit-Gesetz für das Eindringverhalten von Wasser mit zunehmendem Ausgleichsfeuchtegehalt der Proben vor der Wasserbeaufschlagung geringer wird [99]. Der Gelporenraum hat mit zunehmender Ausgleichsfeuchte weniger Kapazitäten, neue Wassermengen aufzunehmen. Infolge dessen ist das abweichende Eindringverhalten, welches an die Porenverengung infolge Wasseraufnahme im Gelporenraum gekoppelt ist, mit zunehmender Ausgleichsfeuchte weniger ausgeprägt.

Eindringverhalten von Wasser in ein frei bewittertes Betonprisma

Besonders deutlich wird der Effekt der Vorlagerung am Beispiel eines einseitig bewitterten Betonprismas [100]. Die relative Feuchte der Außenluft betrug im Mittel 85% r.F., die Innenseite hatte eine relative Luftfeuchte von rd. 65% r.F.. Nach zweijähriger Lagerung wurde der Probekörper zunächst von der frei bewitterten Seite (Vorlagerung ca. 85% r.F.) kapillarem Saugen ausgesetzt. Der Beton füllte sich sehr langsam mit Wasser, auch nach langen Saugzeiten ging das Wasser nicht weit in den Probekörper hinein. Nach über 450 Stunden Saugzeit waren nur rd. 50 mm des insgesamt rd. 120 mm langen Probekörpers mit Wasser gesättigt. Anschließend wurde der Probekörper von der unbewitterten Seite (Vorlagerung 65% r.F.) mit Wasser benetzt. Das Wasser drang hier mit einer wesentlich schnelleren Eindringgeschwindigkeit in den Probekörper ein. Nach einer Saugzeit von rd. 50 Stunden war der gesamte Probekörper nahezu gesättigt. Eine Erklärung für dieses beobachtete Phänomen ist sowohl mit Hilfe der Theorie des „inneren Quellens“ wie auch durch Lösungs- und Ablagerungsvorgänge möglich, die eine Verengung des Porenraums im vorderen Bereich (85% r.F. Vorlagerung) bewirken. Im hinteren, trockenen Bereich (65% r.F.), in welchem das Quellen infolge Spaltdruck geringer war, bzw. keine Lösungs- und Ablagerungsvorgänge stattgefunden haben, ist der Radius sowie die Konnektivität der Poren zunächst nicht reduziert. Bei Benetzung von der anderen Probekörperseite verengt sich zwar auch dieser Porenraum, dennoch kann ein Transport von Bereichen mit größerem Porendurchmesser in Bereiche mit kleinem Porenraumdurchmesser stattfinden.

Reversibilität des Selbstabdichtungseffekts

Versuchsergebnisse von Holm [100] scheinen die Ablagerungstheorie zumindest für kurze Saugzeiten zu entkräften. Eine mehrfache Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten (w -Wert) nach erneuter Trocknung deutet auf ein nahezu unverändertes Wasseraufnahmeverhalten des untersuchten Betons hin. Bei einer Porenraumreduzierung infolge Ablagerungsvorgängen müsste die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme bei wiederholter Versuchsdurchführung von Beginn an deutlich geringer ausfallen.

Den dargestellten Versuchsergebnissen zufolge scheint zumindest der bei geringen Saugzeiten im Eindringversuch zu beobachtende Selbstabdichtungseffekt auf das innere Quellen des Zementgels infolge physikalischer Wechselwirkungen zurückzuführen zu sein. Dennoch scheint aufgrund der Zusammensetzung zementgebundener Baustoffe eine zusätzliche Selbstabdichtung infolge Lösung und Ablagerung im Zementstein enthaltener Bestandteile möglich. Auch eine Reduzierung der Transportgeschwindigkeit durch die Veränderung der physikalischen Eigenschaften des Wassers in kleinen Poren (vgl. Bingham Medium) kann eine Reduzierung der Transportgeschwindigkeit mit Füllung des Gelporenraums bewirken. Ob und inwieweit diese Prozesse maßgebend für das Eindringverhalten von Flüssigkeiten sind, wird im Rahmen dieser Arbeit anhand weiterer Versuche überprüft.

2.5 Einfluss der Temperatur auf den Feuchtetransport

Mit zunehmender Temperatur erhöht sich die Mobilität der Teilchen einer Flüssigkeit, gleichzeitig wird die Zähigkeit (Viskosität) der Flüssigkeit kleiner. Wertet man die entsprechenden physikalischen Zusammenhänge hinsichtlich des Einflusses der Temperaturen auf die Stoffeigenschaften aus, ergeben sich folgende Verhältnisse [72].

- Diffusionskoeffizient D :

$$D \sim \sqrt{T}$$

Gleichung 21

- Dynamische Viskosität einer Flüssigkeit η :

$$\frac{\eta_0}{\eta_1} = e^{\left[\alpha_\eta \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right) \right]}$$

Gleichung 22

α_η liegt dabei für Wasser in der Größenordnung von 2200 K.

- Oberflächenspannung einer Flüssigkeit σ .

$$\sigma(T_1) = \sigma_0 - a_\sigma \cdot (T_1 - T_0)$$

Gleichung 23

Für Wasser hat a_σ einen Wert von rd. 0,15 mN/(K·m).

- Dampfdruck einer Flüssigkeit

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = f(T) \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

Gleichung 24

$f(T)$ ist eine mit der Temperatur monoton abnehmende Funktion (vgl. Abbildung 19).

Den in Gleichung 21 bis Gleichung 24 dargestellten Beziehungen zufolge nehmen der Diffusionskoeffizient und der Dampfdruck einer Flüssigkeit mit steigender Temperatur zu, während die Viskosität und die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit abnehmen. Abbildung 19 zeigt die Temperaturabhängigkeit der maßgebenden physikalischen Größen des Wassers und des Wasserdampfpartialdrucks p_D .

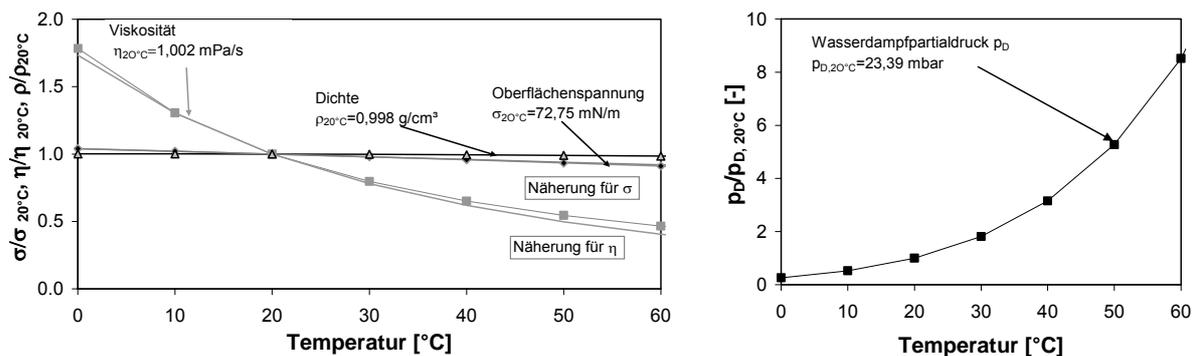


Abbildung 19: links: Dichte, dynamische Viskosität und Oberflächenspannung in Abhängigkeit der Temperatur im Verhältnis zur entsprechenden Größe bei 20 °C, Daten aus [101], Näherungskurven für η und σ nach Gleichung 22 und Gleichung 23, rechts: Wasserdampfpartialdruck p_D in Abhängigkeit der Temperatur im Verhältnis zu 20°C, Daten aus [67], Näherung mit $f(T)=-2,6 \cdot T+6100$ (nicht dargestellt)

Der Einfluss der Temperatur auf den Kapillartransport kann nach [1, 2] aus der Temperaturabhängigkeit der Viskosität des Wassers abgeleitet werden. Die Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung ist sehr gering und aus diesem Grund

vernachlässigbar (vgl. Abbildung 19). Entsprechend der Temperaturabhängigkeit der Viskosität $\eta(\vartheta)$ wird der Transportkoeffizienten $D_w(\vartheta)$ [m²/s] wie folgt abgeleitet.

$$D_w(\vartheta_1) = \frac{\eta(\vartheta_0)}{\eta(\vartheta_1)} \cdot D_w(\vartheta_0)$$

Gleichung 25

2.6 Einfluss von Salzen auf die Feuchtespeicherung

Salze beeinflussen den Sorptionsfeuchtegehalt der Baustoffe in entscheidendem Maße. Sind Salze wie Natriumchlorid im Porengefüge vorhanden, lagern sich Wasserdipole an den äußeren Ionen des Kristallgitters an, da hier die geringsten Gitterkräfte wirken. Die elektrischen Felder im Kristallgitter werden geschwächt und die elektrostatische Bindung zwischen Anion und Kation gelockert. Die Ion-Dipol-Kräfte sind stark genug, um die Teilchen aus dem Ionenkristall zu lösen. Das Kristallgitter zerfällt und die einzelnen Ionen gehen als hydratisierte Ionen in Lösung. Die relative Luftfeuchte, bei der die hygroskopische Wirkung einsetzt, d.h. die Kristallauflösung stattfindet, wird mit Deliqueszenz-Luftfeuchte φ_h bezeichnet. Bei Natriumchlorid setzt die hygroskopische Wirkung ab einer relativen Feuchte von $\varphi_h = 75$ % r.F. ein.

Das gelöste Salz besetzt einen Teil der Flüssigkeitsoberfläche und hindert die Lösungsmoleküle daran, aus der Lösung in den Gasraum überzugehen, was eine Dampfdruckerniedrigung über der Lösung zur Folge hat. In Abhängigkeit des Wasserdampfpartialdampfdrucks bzw. der relativen Feuchte der Luft werden so viele Wassermoleküle aus der Umgebungsluft in die entstandene Lösung aufgenommen, bis der Partialdruck über der Lösung dem Wasserdampfpartialdruck der Luft entspricht. Das Ausmaß der Dampfdruckerniedrigung hängt dabei nur von der Konzentration der gelösten Teilchen pro Volumeneinheit ab und kann nach dem Raoult'schen Gesetz berechnet werden [67]. Abbildung 20 zeigt das Verhältnis des Dampfdrucks über einer Natriumchloridlösung zum Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit der Konzentration.

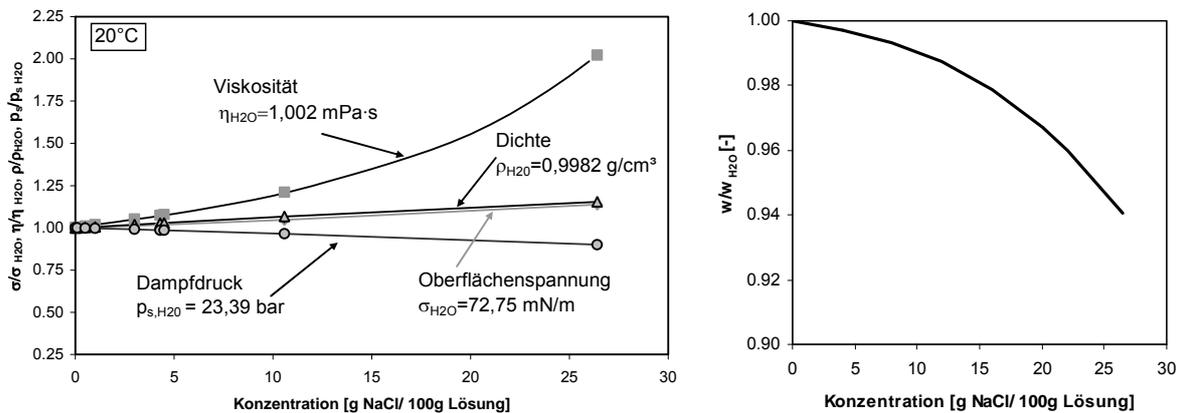


Abbildung 20: links: Dichte, dynamische Viskosität und Oberflächenspannung in Abhängigkeit der Natriumchloridkonzentration im Verhältnis zur entsprechenden Größe bei Wasser, Daten aus [101], Wasserdampfpartialdruck p_D in Abhängigkeit der Natriumchloridkonzentration im Verhältnis zum Sättigungsdampfdruck von Wasser bei 20°C, Dampfdruckerniedrigung nach Raoult [67], rechts: Verhältnis des Aufnahme-koeffizienten w in Abhängigkeit der Natriumchloridkonzentration zum Wasser-aufnahmekoeffizienten w_{H_2O} , berechnet aus Gleichung 27 mit Gleichung 26

Salze, die keine Hydratstufen ausbilden (Bsp.: Natriumchlorid), beeinflussen den Feuchtehaushalt in porösen Materialien mit Einsetzen der hygroskopischen Wirkung. Untersuchungen von Larsen ergaben dabei allerdings, dass der Materialfeuchtegehalt sich nicht sprunghaft ändert, sondern die Änderung sich stetig vollzieht [102]. Unterhalb einer relativen Luftfeuchte φ_h entsprechen die Sorptionsisothermen salzbelasteter Porengefüge den Isothermen der salzfreien Gefüge. Das Salz liegt im Porenraum in kristalliner Form vor. Der Feuchtegehalt der Proben wird folglich nur durch die sorptive Anlagerung an den Porenwänden und der sich in feinen Porenräumen einstellenden Kapillarkondensation bestimmt. Anders ist dies bei Salzen, die eine Hydratstufe ausbilden. Die Kristallauflösung findet hier zwar auch erst mit Erreichen der Deliqueszenz-Luftfeuchte statt, dennoch wird auch schon bei niedrigeren Luftfeuchten Wasser in das Salzgitter eingelagert.

Nach Nielsen [103] kann man die Sorptionsisotherme des salzhaltigen Materials bestimmen, indem man die einzelnen Sorptionsisothermen des Baustoffes und des Salzes addiert. Hierbei müsste jedoch davon ausgegangen werden, dass sich die hygroskopische Wasseraufnahme des Baustoffes und die hygroskopische Wasseraufnahme des Salzes nicht gegenseitig beeinflussen.

2.7 Einfluss von Salzen auf die Transportmechanismen des Wassers

2.7.1 Salzeinfluss auf die Wasserdampfdiffusion

Liegen in einem Baustoff Salze in kristalliner Form im Porenraum vor, so wird der Diffusionsprozess infolge der Reduzierung des zur Verfügung stehenden Transportraumvolumens behindert. In Luftfeuchtebereichen oberhalb der Deliqueszenz-Luftfeuchte φ_h des im Porengefüge enthaltenen Salzes werden die Wassermoleküle von den Salzionen gebunden, zusätzlich diffundieren weitere Wassermoleküle aus der Umgebung in die Salzlösung bis der Partialdruck der Lösung dem Wasserdampfpartialdruck der Luft entspricht. Der Einfluss der Dampfdruckerniedrigung kommt, wie in Kapitel 2.6 beschrieben, hinzu. Je nach Salzart und -verteilung und in Abhängigkeit der Partialdampfdruckverhältnisse der Umgebung kommt es zu einer örtlich gesehenen unterschiedlichen Wasserdampfdurchlässigkeit des Porengefüges [104].

2.7.2 Einfluss von Salzen auf den Flüssigtransport

Sind Baustoffe mit löslichen Salzen belastet, gehen diese bei Aufnahme einer polaren Flüssigkeit infolge der in Kapitel 2.6 beschriebenen Zusammenhänge in Lösung und werden mit der Flüssigkeit durch das Porengefüge transportiert. Gelöste Salze verändern dabei die für das Eindringverhalten relevanten physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit: Oberflächenspannung, Viskosität und den Benetzungswinkel der Flüssigkeit. Auch die Dichte von Salzlösungen ist von der Konzentration abhängig. Abbildung 20 zeigt die Abhängigkeit der Oberflächenspannung, Viskosität und der Dichte von der Konzentration der Salzlösung (hier Natriumchlorid). Mit zunehmender Konzentration der Natriumchloridlösung erhöht sich die Oberflächenspannung σ und die Dichte ρ annähernd linear. Die Viskosität η hingegen erhöht sich überproportional mit zunehmender Konzentration. Angaben zur Änderung des Randwinkels θ von der Salzkonzentration einer benetzenden Lösung werden in der Literatur nur selten gegeben, da eine experimentelle Bestimmung kaum oder nur mit großem Aufwand möglich ist. Für mineralische Werkstoffe wird für eine Benetzung mit Wasser üblicherweise ein Benetzungswinkel $\theta = 0^\circ$ angenommen. Nach Garrecht [3] und Lunk [77] kann der Benetzungswinkel näherungsweise nach Gleichung 26 mit der Oberflächenspannung des Wassers σ_{H_2O} und der Lösung $\sigma_{Lsg.}$ beschrieben werden. Garrecht erhält für eine gesättigte Natriumchloridlösung einen Randwinkel von $\theta_{Lsg.} = 28^\circ$. Dieser Wert liegt im Bereich der stark streuenden Randwinkelangaben der Literatur von $15^\circ < \theta < 35^\circ$ [77].

$$\cos \theta_{Lsg.} = \frac{\sigma_{H_2O}}{\sigma_{Lsg.}}$$

Die physikalischen Eigenschaften bewirken, dass der Wasseraufnahmekoeffizient w nach Gleichung 16 mit zunehmendem Salzgehalt abnimmt, die Flüssigkeitstransportkoeffizienten D_W , mit welchen sich die Flüssigstromdichte nach Gleichung 18 beschreiben lässt, nimmt ebenfalls mit zunehmender Salzkonzentration ab. Für das Verhältnis des kapillaren Aufnahmekoeffizienten für Wasser und Lösung bzw. für das Verhältnis des Transportkoeffizienten leitete Garrecht [3] folgende Beziehungen her:

$$\frac{w_{Lsg.}}{w_{H_2O}} = \frac{\rho_{Lsg.}}{\rho_{H_2O}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\sigma_{Lsg.} \cdot \cos \theta_{Lsg.}}{\sigma_{H_2O} \cdot \cos \theta_{H_2O}}}{\frac{\eta_{Lsg.}}{\eta_{H_2O}}}}$$

Gleichung 27

$$\frac{D_{W,Lsg.}}{D_{W,H_2O}} = \frac{\frac{\sigma_{Lsg.} \cdot \cos \theta_{Lsg.}}{\sigma_{H_2O} \cdot \cos \theta_{H_2O}}}{\frac{\eta_{Lsg.}}{\eta_{H_2O}}}$$

Gleichung 28

Abbildung 20, rechts stellt grafisch dar, inwieweit die Veränderung der physikalischen Eigenschaften das Verhältnis der Wasseraufnahmekoeffizienten $w_{Lsg.}/w_{H_2O}$ nach Gleichung 27 beeinflusst. Mit zunehmender Lösungskonzentration wird die Lösungsaufnahme verringert.

Für den Flüssigtransport im teilgesättigten Porenraum bei äußerem Druck gelten die gleichen Zusammenhänge wie für den reinen Kapillartransport. Gleichung 20 zeigt wie die physikalischen Eigenschaften Einfluss auf das Eindringverhalten nehmen.

2.8 Salztransport in porösen Baustoffen

2.8.1 Transport von Salz mit der Flüssigkeit

Unter realen Bedingungen mit Feucht-Trockenwechseln erfolgt der Transport von gelösten Ionen „huckepack“ (Konvektion) mit dem kapillar eindringenden Wasser [105]. Dieser Transport ist um Größenordnungen schneller als der Transport über die reine Ionendiffusion. Die Ionen werden durch den kapillaren Saugvorgang während der Befeuchtung von außen in den Baustoff transportiert. Während der Trockenphasen kann ein konvektiver Salztransport in der flüssigen Phase durch die Weiterverteilung des Kapillarwassers stattfinden. Die

Transportgeschwindigkeit der freien – d.h. gelösten - Ionen hängt dabei im Wesentlichen von der Ionenkonzentration und damit verbunden von den physikalischen Eigenschaften der transportierenden Flüssigkeit ab (vgl. Kapitel 2.7.2). Die in der Baupraxis zu beobachtenden Chromatografieeffekte zwischen der eindringenden Wasserfront und der Chloridfront in zementgebundene Baustoffe ist auf die Bindung von Chlorid in der Zementsteinmatrix zurückzuführen. Dieser Mechanismus wird in Kapitel 2.8.3.1 näher beschrieben.

2.8.2 Diffusion von Salzionen

Konzentrationsunterschiede in der Porenlösung bewirken einen Diffusionsstrom gelöster Ionen von Bereichen höherer Konzentration in Bereiche niedriger Konzentration. Der Diffusionsstrom der Ionen in der Porenlösung wird mit dem ersten Fick'schen Gesetz nach Gleichung 29 beschrieben.

$$\dot{m}_{ID} = -D_{eff} \cdot \frac{\partial s_f}{\partial x}$$

Gleichung 29

Hierbei bestimmt der lokale Konzentrationsgradient über die Weglänge x [m] der im Porenwasser gelösten Ionen s_f [kg/m³] als treibendes Potential die lokale Ionendiffusionsstromdichte \dot{m}_{ID} [kg/(m²·s)]. Der effektive Diffusionskoeffizient D_{eff} [m²/s] des Baustoffs hängt dabei, wie die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ , vom Porengefüge ab und beinhaltet Einflüsse aus Porosität und Porenvernetzung (Tortuosität).

Diffundiert eine Salzlösung wie Natriumchlorid im Porengefüge, haben die Ionen des Salzes verschiedene Beweglichkeit im Porenraum. Die Durchlässigkeit des Betons für Na-Ionen ist nur rd. halb so groß wie die für Cl-Ionen [106]. Eine Trennung der Ionen ist aber nicht ohne weiteres möglich, da die Elektroneutralität erhalten bleiben muss. Wenn die Cl-Ionen schneller eindringen als die dazugehörigen Na-Ionen, müssen andere Ionen zur Neutralisierung durch Ionenaustausch sowohl der schnelleren Chlorids als auch der langsameren Na-Ionen vorhanden sein oder gelöst werden [76] oder die Cl-Ionen müssen auf die langsameren Na-Ionen „warten“. Letztlich führt das assoziierte Kation stets zu einer Verlangsamung der Diffusionsgeschwindigkeit. Goto [107] gibt beispielsweise für Mörtel aus CEM I mit Wasserzementwerten zwischen 0,30 und 0,45 ein Verhältnis von $D_{eff, Na} / D_{eff, Cl}$ an, welches zwischen 0,19 und 0,85 variiert. In [108] ist für Versuche an Proben aus Portlandzement ein Verhältnis von $D_{eff, Na} / D_{eff, Cl} = 0,27$ genannt. Brodersen [109] gibt für das Verhältnis von $D_{eff, Na} / D_{eff, Cl}$ von Betonen aus Portlandzement und Hochofenzement Werte zwischen 0,3 und 0,6 an, wobei die Zementfestigkeitsklasse seinen Untersuchungen zufolge

keinen Einfluss auf die Eindringgeschwindigkeit der Ionen hat. An Zementsteinscheiben aus Portlandzement mit einem Wasserzementwert von 0,55 ermittelte er einen Verhältniswert $D_{eff, Na} / D_{eff, Cl}$ von 0,41. Mit zunehmendem Wasserzementwert erhöhte sich das Verhältnis von 0,51 ($w/z=0,60$) auf 0,56 ($w/z=0,65$).

2.8.3 Wechselwirkungen zwischen Matrix und Salzionen

2.8.3.1 Bindung von Chlorid

Bei der Aufnahme von Chloridlösungen in Beton schreitet die Wasserfront schneller voran als die Chloridfront. Aufgrund dieses Chromatographieeffekts ist eine direkte Übertragung der Transportgeschwindigkeit des kapillaren Wassertransports auf den kapillaren Salztransport nicht möglich. Maßgebende Ursache für den Chromatographieeffekt ist die teilweise chemische und physikalische Bindung der Chloride an die Bestandteile der Zementmatrix [109, 110, 111, 112, 113].

Die chemische Bindung erfolgt vor allem durch die Calciumaluminatphasen im Zementstein unter Bildung von Friedel'schem Salz und ist im Wesentlichen irreversibel [114, 115]. In geringem Maße können Chloride auch in den CSH-Phasen chemisch gebunden werden [44]. Die eingedrungenen Chlorionen werden gegen in den Zementsteinphasen gebundene Anionen ausgetauscht. In erster Linie lösen sich dabei die Hydroxid-Ionen. Von Tuutti [113] wurde eine Auslaugung von Hydroxid (OH^- -Ionen) fast in dem Maß festgestellt, wie Cl^- -Ionen in die Probe eingedrungen sind. Das Friedel'sche Salz ist im Porenwasser bis zu hohen Temperaturen stabil [110, 116], durch Einwirkung von CO_2 wird es jedoch unter Bildung von Calciumcarbonat zersetzt, so dass die Chloride wieder frei werden [110]. Unter Einwirkung von Sulfat bildet sich unter Freisetzung der gebundenen Chlorionen Ettringit [117, 118]. Die Stabilität wie auch das Bindevermögen sinken mit zunehmender Carbonatisierung, zunehmendem pH-Wert (Gehalt an OH^- -Ionen) und zunehmendem Feuchtegehalt [77, 112, 115, 117, 119, 120].

Die physikalische Bindung erfolgt durch Adsorption infolge von van der Waals-Kräften in der elektrochemischen Doppelschicht zwischen den Oberflächen der Hydratphasen des Zementsteins [118, 121]. Die Kationen Natrium (Na^+), Kalium (K^+) und Calcium (Ca^{++}) lagern sich an die Oberfläche des Zementsteins an, da diese aufgrund des hohen pH-Werts der Porenlösung negativ geladen ist. Bevorzugt wird das Ca -Ion angelagert, da es eine wesentlich größere Ladungsdichte hat als das Na - oder K -Ion. In der angliedernden diffusen Schicht lagern sich die Chloride an. Aufgrund der großen inneren Oberfläche im Gefüge des Zementsteins hat die physikalische Bindung im Zementstein vor allem bei nachträglichem Chlorideintrag im Vergleich zur chemischen Bindung den maßgebenden Einfluss [114, 118].

Die Wechselwirkungen an der elektrochemischen Doppelschicht ändern sich mit einer Veränderung der Eigenschaften der Porenlösung [118]. Somit kann die Bindung gelöst und das Chlorid in freier Form in das Porenwasser zurückkehren. Wird durch fortschreitende Carbonatisierung der pH-Wert der Porenlösung reduziert, wird die negative Ladung der Geloberfläche reduziert, so dass weniger Ca-Ionen und somit weniger Chlorid in der diffusen Schicht gebunden werden können [118].

Mit zunehmendem Angebot an Chloriden erhöht sich die Menge der im Gefüge der Zementsteinmatrix gebundenen Chloride [112, 118]. Zur Beschreibung der Bindekapazität in Abhängigkeit der Chloridkonzentration werden lineare Ansätze, Freundlich-, Langmuir-, und BET-Isothermen herangezogen [113, 122, 123]. Die Freundlich-Isotherme beschreibt mit den variablen Konstanten a und b die maximale Bindekapazität $s_{g,max}$ nach Gleichung 30:

$$s_{g,max} = 10^{a \log s_f + b}$$

Gleichung 30

Für eine freie Chloridkonzentration s_f größer 0,01 mmol/l stellt die Freundlich-Isotherme eine recht gute Annäherung dar. Für eine Konzentration an freien Chloriden kleiner 0,05 mmol/l lässt sich das Bindungsverhalten relativ gut mit der Langmuir-Isotherme beschreiben [122]. Bei diesen Ansätzen wird stets ein Gleichgewicht von gebundenen und freien Chloriden vorausgesetzt, d.h. die Bindung erfolgt spontan.

Wenn Beton einer Natriumchloridlösung ausgesetzt wird, stellt sich jedoch erst nach einer Zeit von ca. 7 Tagen [122] ein Gleichgewicht zwischen der Konzentration an gelöstem Salz in der Porenlösung und der Salzmenge, die durch die Hydratationsprodukte gebunden wird, ein. Für die zeitabhängige Bindung von Chlorid in Beton leitet Volkwein die folgende Beziehung ab [76]:

$$s_g = s_{g,max} \left[1 - \exp\left(-k_s \frac{s_f}{s_{g,max}}\right) \right] \left[1 - \exp(-t/t_k) \right]$$

Gleichung 31

Neben dem Bindvermögen des Betons $s_{g,max}$ wird hier auch die Reaktionskinetik der Bindung (t_k [d] = Zeitkonstante) berücksichtigt. Die Konstante k_s [-] beschreibt die Zunahme des gebundenen Salzes in Abhängigkeit der Konzentration der Porenlösung s_f . Die Bindekapazität $s_{g,max}$ der üblichen Zementarten liegt im Mittel zwischen 0,2 und 1,3 M.-% bezogen auf den wasserfreien Zement. Jede Änderung der Zementzusammensetzung und der Chloridkonzentration bedeutet eine Änderung der Bindekapazität. Somit gibt es für jedes Zement-Chlorid-System eine andere Bindungsisotherme. Flugasche und Hüttensand erhöhen die

Bindekapazität, Silica, sulfatbeständige und C₃A-arme Zemente haben eine niedrige Bindekapazität [77, 117, 124, 125].

2.9 Wärmehaushalt

Die Temperaturverteilung in porösen Baustoffen beeinflusst sowohl den Feuchtehaushalt als auch den Transport und die Löslichkeit im Baustoff enthaltener Salze. In gleicher Weise hängt der Wärmehaushalt vom lokalen Feuchtegehalt ab, der wiederum vom lokalen Salzgehalt beeinflusst wird.

In Abhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität c_{tr} [J/(kg·K)] speichert ein trockener Baustoff eine gewisse Wärmemenge, die unter isobaren Verhältnissen (d.h. gleichbleibender Druck) als Enthalpie H_{tr} [J/m³] bezeichnet wird und bezogen auf die Enthalpie bei einer Temperatur ϑ [°C] von 0 °C nach Gleichung 32 beschrieben werden kann.

$$H_{tr} = \rho_{tr} \cdot c_{tr} \cdot \vartheta$$

Gleichung 32

Bei feuchten Baustoffen addiert sich zu dieser Enthalpie des trockenen Baustoffs die Enthalpie des darin enthaltenen Wassers. Nimmt das Wasser verschiedene Aggregatzustände an, hat dies einen Einfluss auf die Enthalpie des Wassers und somit auf den Wärmeinhalt des Baustoffs [2]. Die im porösen Feststoff gespeicherte Wärmemenge setzt sich demnach aus dem Wärmeinhalt des Feststoffs, des flüssigen Wassers, des Wasserdampfes und der Luft zusammen.

Neben der Wärmeleitung ist die Wärmemitführung infolge Dampfdiffusion mit Phasenänderung, d.h. Tauen bzw. Verdunsten ein maßgebender Mechanismus. Die Wärmestromdichte \dot{q} [W/m²] ist proportional zur feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)] und wird nach Gleichung 33 vom Gradienten der Temperatur ϑ [°C] über die Weglänge x [m] bestimmt.

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x}$$

Gleichung 33

Die Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit kann nach [126] näherungsweise nach Gleichung 34 über einen Feuchtezuschlag b_w [%/M.-%] berücksichtigt werden:

$$\lambda(w) = \lambda_{tr} \left(1 + b_w \frac{w}{\rho_{tr}} \right)$$

Gleichung 34

λ_{tr} [W/(m·K)] ist dabei die Wärmeleitfähigkeit des trockenen Baustoffs, w der Wassergehalt [kg/m³] und ρ_{tr} [kg/m³] die Rohdichte des trockenen Baustoffs.

Der Enthalpiestrom durch Dampfdiffusion mit gleichzeitiger Phasenumwandlung, die sich in Form einer Wärmequelle (Tauen) bzw. einer Wärmesenke (Verdunsten) S_q [J/m³] auswirkt, kann mit Gleichung 35 beschrieben werden.

$$S_q = -h_v \frac{\partial \dot{m}_{WDD}}{\partial x}$$

Gleichung 35

Die Latentwärme beim Phasenübergang h_v [J/kg] setzt sich aus der spezifischen Verdunstungsenthalpie des reinen Wassers (= 2,5 J/kg) und der baustoffabhängigen Sorptionsenthalpie zusammen, wobei diese nach [2] oberhalb einer relativen Feuchte von 50 % r.F. vernachlässigbar ist.

2.10 Wärme- und Feuchteübergang an der Bauteiloberfläche

Unmittelbar am Bauteil nimmt die Luft die Temperatur der Bauteiloberfläche an. In zunehmender Entfernung von der Oberfläche führt die konvektive Durchmischung der Luft zu einer gleichmäßigeren Temperaturverteilung, die der Lufttemperatur entspricht. Beim Wärmeübergang von der Bauteiloberfläche in die bauteilnahe Luft ist nicht die Differenz zwischen der Oberflächentemperatur und der Lufttemperatur ausschlaggebend, sondern die geringere Differenz zwischen der Oberflächentemperatur und der Temperatur der Grenzschicht (bauteilnahe Luft). Der Wärmestrom fällt daher geringer aus als bei Betrachtung der Lufttemperatur zu erwarten wäre. Diese Verringerung des Wärmestroms kann durch Einführung des Wärmeübergangswiderstandes $1/\alpha$ berücksichtigt werden. Der Zahlenwert des Wärmeübergangswiderstandes hängt von Temperatur, der Stärke und Richtung der Luftströmung und der Beschaffenheit der Bauteiloberfläche ab [127].

Der Wärmeaustausch an der Oberfläche kann mit Gleichung 36 beschrieben werden.

$$\dot{q} = \alpha \cdot (\vartheta_U - \vartheta_O)$$

Gleichung 36

Die Wärmestromdichte \dot{q} [W/m²] wird dabei durch den Wärmeübergangskoeffizienten α [W/m²K] sowie die Differenz der Umgebungstemperatur ϑ_U [°C] und der Oberflächentemperatur ϑ_O [°C] berechnet.

Der Wasserdampfübergang lässt sich entsprechend dem Wärmeübergang nach Gleichung 37 beschreiben.

$$\dot{m} = \beta \cdot (p_U - p_O)$$

Gleichung 37

Die Wasserdampfstromdichte \dot{m} [kg/(m²·s)] wird dabei durch den Wasserdampfübergangskoeffizienten β [kg/(m²·s·Pa)] sowie die Differenz des Wasserdampfpartialdrucks der Umgebung p_U [Pa] und der Oberfläche p_O [Pa] berechnet. Das Auftreten eines Widerstandes beim Wasserdampfübergang ist wie beim Wärmeübergang durch die Auswirkung einer Grenzschicht an der Bauteiloberfläche zu begründen. Da beide Grenzschichten durch die Umweltbedingungen auf gleiche Weise beeinflusst werden, bestehen Ähnlichkeitsbeziehungen zwischen dem Wärme- und dem Wasserdampfübergang, so dass der Wasserdampfübergangskoeffizient β nach [128] mit Gleichung 38 berechnet werden kann.

$$\beta = 7 \cdot 10^{19} \cdot \alpha_K$$

Gleichung 38

α_K [W/(m²·K)] ist dabei der konvektive Wärmeübergangskoeffizient, der im Gegensatz zu α strahlungsbedingte Einflüsse nicht berücksichtigt [2].

2.11 Existierende Berechnungsmodelle

Die ersten Modelle zur Beschreibung des Chlorideintrags in Bauteile aus Stahlbeton basieren auf einem reinen Diffusionsprozess. Dabei wird das Gauß'sche Fehlerintegral („Errorfunction“) als Lösung des zweiten Fick'schen Gesetzes verwendet. Mit Hilfe der Errorfunction werden Chloridprofile zurück gerechnet, die durch die Analyse von Bauwerksproben bestimmt wurden. Daraus folgen scheinbare Diffusionskoeffizienten für den analysierten Bauwerksbeton, welche die Wechselwirkungen zwischen Bauwerk und dessen Umgebung berücksichtigen, d.h. die Beanspruchungsgeschichte sowie die entsprechende Reaktion des Bauwerks und fiktive (zeitlich gemittelte) Oberflächenkonzentrationen. Auf

Grundlage dieser empirisch bestimmten Werte wird wiederum eine Prognose für den zu erwartenden Chlorideintrag in der Zukunft möglich. Während die ersten Modelle den reinen Diffusionsprozess berücksichtigen [z.B. 113], wurden durch die Weiterentwicklung des Modells die realen Verhältnisse zunehmend besser abgebildet. Schwerpunkte sind die Berücksichtigung der Chloridbindung, der Orts-, Zeit- und Konzentrationsabhängigkeit der Diffusionskoeffizienten sowie der Exposition des Bauwerks, die die Oberflächenkonzentration bestimmt [z.B. 129, 130, 131, 132, 133]. Für Bauteile, die sich permanent unter Wasser befinden, werden mit diesen Modellen sehr gute Ergebnisse erzielt. In teilgesättigten Bauteilen, die unter realen Klimabedingungen zyklische Feucht- Trockenwechsel (Bsp.: Konvektionszone) durchlaufen, ist der Chlorideintrag maßgeblich durch den Kapillartransport und durch Auswascheffekte geprägt. Hier wird ebenfalls durch eine Erweiterung des Basismodells erreicht, dass auch für Bauteile in der Konvektionszone der Chlorideintrag aufgrund empirischer Korrekturfaktoren prognostiziert werden kann [22, 134, 135]. Lay [23] entwickelte eine analytische Lösung einer Differentialgleichung, in welcher die Mechanismen Kapillarleitung inklusive des Selbstabdichtungseffekts, die mechanische Dispersion und die Chloriddiffusion inklusive der Bindung Berücksichtigung finden und somit der Chlorideintrag im Spritzwasserbereich von Verkehrsbauwerken prognostiziert werden kann.

Auf Grundlage der Erkenntnisse dieser Arbeiten wurden Modelle zur probabilistischen Dauerhaftigkeitsbemessung entwickelt. Mit Hilfe dieser Modelle kann zum einen die Restlebensdauer eines Bauwerks abgeschätzt werden, andererseits können sie auch als planerisches Werkzeug zur Optimierung erforderlicher Betoneigenschaften bei einer geforderten Nutzungsdauer dienen oder als Grundstein eines Systems zum Lebensdauerzyklusmanagement verwendet werden. [23, 136].

Lunk [44] entwickelte einen Ansatz, mit welchem das kapillare Eindringen von Salzlösungen sowie die Verteilung der Chloride in Beton auf Grundlage des Zylinderkapillarporenmodells beschrieben werden. Die Abweichung des Lösungseintrags von der Wurzel-Zeit-Abhängigkeit wird durch eine zeitabhängige theoretische Abnahme des effektiven Porenradius berücksichtigt. Anhand umfangreicher Untersuchungen konnte er den Chromatographieeffekt, der beim Eintrag von Wasser und Salz beobachtbar ist, in Abhängigkeit von Betonzusammensetzung, Vorlagerungsbedingungen und Lösungskonzentration quantifizieren. Über einen „Retardierungsfaktor“ berücksichtigt er den verzögerten Chlorideintrag.

Im Bereich der Bauphysik gibt es bereits eine Vielzahl von praxistauglichen Computerprogrammen, mit welchen der Feuchtehaushalt von Baustoffen mit starrem Porengefüge mit Ausnahme der Permeation infolge eines Gesamtdruckgradienten berechnet werden kann [z.B. 4, 5, 6, 7, 8]. Das Berechnungsmodell des bereits 1994 von Künzel

entwickelten Modells WUFI findet in der Baupraxis eine breite Anwendung und ist durch zahlreiche Labor- und Freilandversuche validiert worden [2]. Die implementierten Transportgleichungen stellen eine Weiterführung der Ansätze von Kießl [1] dar. Der Modellansatz für den Kapillartransport beruht dabei auf den Grundlagen von Krischer [63].

Das Programm DELPHIN (früher DIM) [8], welches 1997 von Grunewald entwickelt wurde, beinhaltet in seiner Weiterentwicklung im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP1122 neben dem reinen Feuchtetransport auch den daran gekoppelten Transport von Salzen in Baustoffen. Für zementgebundene Baustoffe bedeutsame Mechanismen wie die Selbstabdichtung oder die Chloridbindung sind darin jedoch nicht enthalten.

Ein numerisches Modell für den Wärme-, Feuchte- und Salzhaushalt in zementgebundenen Materialien, mit welchem auf Grundlage gekoppelter Transportgleichungen, die die einzelnen Mechanismen, vor allem die Selbstabdichtung, für sich physikalisch korrekt beschreiben und zeitgleich praxisnahe Transportkenngrößen beinhalten, existiert nicht.

2.12 Zusammenfassung

Die Mechanismen des Feuchte- und Salztransports wurden seit Ende des 19. Jahrhunderts an vielen Standorten intensiv untersucht und entsprechende Modellansätze auf empirischer oder physikalisch-mathematischer Basis aufgestellt und weiterentwickelt. Der kapillare und dampfförmige Feuchtetransport für Baustoffe, bei denen keine Wechselwirkungen mit der Matrix stattfinden, kann mit sehr guter Genauigkeit berechnet werden (vgl. Gleichung 8, Gleichung 18). Entsprechende Zahlenwerte für materialabhängige Transportkenngrößen sind in umfangreichem Maße bekannt. Die umfassenden Kenntnisse im Bezug auf die gegenseitige Beeinflussung von Feuchte- und Wärmetransport haben ebenfalls Eingang in die Modelle gefunden (vgl. Gleichung 32, Gleichung 33, Gleichung 35).

Die Modelle für den Chlorideintrag in Beton bauen in erster Linie auf dem Gauß'schen Fehlerintegral als Lösung des zweiten Fick'schen Gesetzes auf. Mit der Fick'schen Diffusion lässt sich allerdings das Eindringen von Chloriden nur unter gewissen Randbedingungen vorhersagen.

Im Zuge der Weiterentwicklung der Modelle, die neben der Diffusion, Dispersion und Konvektion, weitere Einflüsse aus Alterung, Bindung usw. berücksichtigen, wurden viele Erkenntnisse im Bezug auf die Zusammenhänge zwischen Feuchte- und Salzhaushalt gewonnen. Um einen Berechnungsalgorithmus für den gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Salztransport auf numerischer Ebene für Beton bereitstellen zu können, müssen vor allem die genauen Mechanismen der Selbstabdichtung geklärt und modellmäßig erfasst werden.

Außerdem gilt es zu klären, welchen Einfluss Salze auf die Feuchtespeicher- und Transporteigenschaften sowie auf die Selbstabdichtung haben. Erst auf dieser Grundlage können bestehende Lücken zur Beschreibung des gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Salztransports geschlossen werden. Mit den im Folgenden beschriebenen Untersuchungen sollen diese bestehenden Lücken gefüllt werden. Aufbauend darauf wird ein numerisches Modell vorgeschlagen, welches den gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Salztransport unter Berücksichtigung der Selbstabdichtung beinhaltet.

3 BEOBACHTUNG DES FEUCHTE- UND SALZTRANSPORTS

3.1 Überblick

Das Eindringverhalten einer Flüssigkeit in ein Material hängt einerseits von der Gefügestruktur ab, andererseits wird es maßgeblich von den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Flüssigkeit beeinflusst. Abbildung 21 gibt einen Überblick über die in der Arbeit untersuchten Einflussgrößen, die das Eindringverhalten von Flüssigkeiten in zementgebundene Baustoffe beeinflussen.

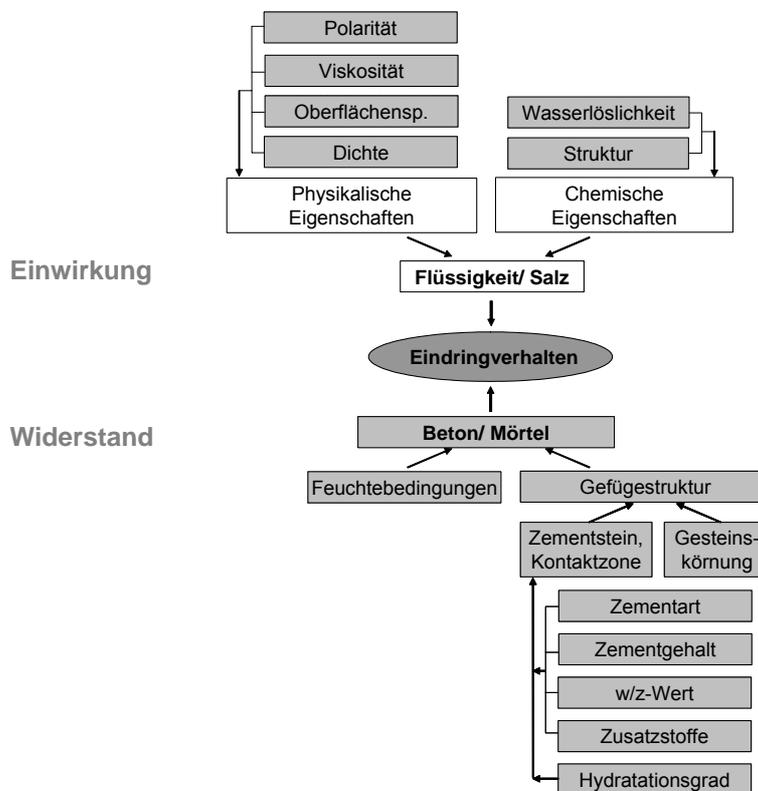


Abbildung 21: Überblick über die in der Arbeit untersuchten Parameter, die auf Einwirkungs- und Widerstandsseite das Eindringverhalten von Flüssigkeiten und Salzen in zementgebundene mineralische Baustoffe beeinflussen, in Anlehnung an [137]

Als Grundlage für die Entwicklung eines Modells für den gekoppelten Feuchte- und Salztransport wurden zunächst Versuche ausschließlich an Probekörpern einer Mörtelrezeptur durchgeführt. Gegenstand dieser ersten Untersuchungsserie waren sämtliche Mechanismen, die nach Literaturlauswertung als maßgebende Mechanismen offensichtlich wurden. Mit dem Ziel, die Ursache des Selbstabdichtungsmechanismus zu klären, wurde der Kapillartransport in besonderem Umfang untersucht. Alle Versuche wurden so ausgelegt, dass jeder einzelne Mechanismus getrennt beobachtet werden konnte. Je nach Relevanz für den beobachteten Mechanismus wurden die Parameter auf der Einwirkungsseite variiert.

Da die Gefügestruktur sich in Abhängigkeit der Ausgleichsfeuchte ändert, ist diese ebenfalls ein Parameter, der im Hinblick auf die Modellierung der Transportmechanismen, vor allem im Hinblick auf die Selbstabdichtung, getrennt betrachtet wurde.

Auf Grundlage der Versuche an einer Mörtelrezeptur wurde ein Transportmodell aufgestellt. Zur Validierung des Modells wurde ein Versuchsablauf durchgeführt, bei welchem sämtliche auftretenden Mechanismen zusammenwirken.

Kennzeichnend für das entwickelte Transportmodell ist, dass die Transportkenngrößen stets für ein System bestehend aus Wasser, Salzart und Material gelten, die anhand von Versuchen bestimmt werden können.

In einer zweiten Untersuchungsserie wurde der Einfluss des Gefüges, d.h. der Widerstandsseite auf den Selbstabdichtungseffekt untersucht. Aus den Zusammenhängen zwischen Rezeptur, Gefüge und Selbstabdichtung wurde ebenfalls auf die Ursache der Selbstabdichtung geschlossen. Die variierenden Parameter waren dabei Zementwerk, Mahlfeinheit, Zementgehalt, Flugaschegehalt, Zementart, Wasserzementwert sowie Oberfläche und Größe der Gesteinskörnung. Der Einfluss der Hydratation war nicht Gegenstand der Untersuchungen. Alle für den Feuchtetransport maßgebenden Transportkenngrößen wurden für die Betone und Mörtel der zweiten Untersuchungsserie bereitgestellt.

3.2 Untersuchte Materialien

Zur Interpretation der auftretenden Transport- und Wechselwirkungsmechanismen wurden Versuche an einem Mörtel mit einem Wasserzementwert von 0,6 durchgeführt. Tabelle 1 zeigt die Zusammensetzung des verwendeten Mörtels. Um über eine ausreichende Probekörperanzahl für das komplette Versuchsprogramm zu verfügen, wurden dabei neben der Mischung (A) vom Januar 2002 zusätzlich 2 weitere Mischungen (B) im Juli 2004 hergestellt.

Tabelle 1: Zusammensetzung des verwendeten Mörtels ($w/z = 0,6$)
 Herstellungsdatum: Januar 2002 (A) bzw. Juli 2004 (B)

Ausgangsstoffe	Masse in kg/m^3
1	2
Zement CEM I 42,5 R	515
Sand 0/4	1.359
Wasser	310

Die jeweiligen Probekörper zur Untersuchung der einzelnen Mechanismen wurden im Alter von 3 Monaten aus einem unter Wasser gelagerten Balken ($700 \cdot 15 \cdot 15 \text{ mm}^3$) herausgesägt. Die aus den Randbereichen geschnittenen Probekörper fanden in den Versuchen keine Verwendung, um den Einfluss der Schal- bzw. Einfüllseite auszuschließen. Das Wasserlager diente gleichzeitig als Lagerungsraum für sämtliche in der MPA Bau Abteilung Baustoffe hergestellten Betonprobekörper, so dass davon ausgegangen werden konnte, dass eine bedeutsame Auslaugung der Probekörper nicht stattfand, da das Wasserbad eine ausreichende Konzentration an Alkalien bzw. Calciumhydroxid enthält.

Nach einer dreimonatigen Wasserlagerung trockneten die Probekörper zunächst ca. einen Monat bei 50°C und wurden anschließend bis zur Gewichtskonstanz im Umgebungsklima $23^\circ\text{C} / 50\% \text{ r.F.}$ gelagert, so dass das Betonalter zu Prüfbeginn mindestens 8 Monate betrug. $50\% \text{ r.F.}$ wurde als „trockenste“ Klimabedingung gewählt, da geringere Luftfeuchten in der Regel für die Praxis keine Relevanz haben. Der Großteil der Kapillaren ist dabei leer, da durch Kondensation theoretisch nur Poren mit einem Durchmesser von rd. 3 nm gefüllt sind. In sämtlichen Poren ist ein adsorbierter Wasserfilm von $0,45 \text{ nm}$ vorhanden (vgl. Gleichung 1).

Abbildung 22 zeigt den Einfluss der Entnahmestelle aus den jeweiligen Balken an Proben mit dem Herstellungsdatum (B) auf die kapillare Wasseraufnahme. Prismen, die aus dem unteren Bereich eines Balkens herausgearbeitet wurden, zeigen eine geringere Wasseraufnahme als solche, die aus dem oberen Bereich des Balkens herausgearbeitet wurden, was auf die herstellungsbedingt unterschiedlichen Porositäten in Abhängigkeit der Probekörperhöhe zurückzuführen ist. Bei den im Folgenden dargestellten Versuchen wurde aus diesem Grund darauf geachtet, dass Ergebnisse von Proben mit dem Herstellungsdatum (B), die miteinander verglichen werden, zum einen das gleiche Herstellungsdatum haben und zum anderen aus der gleichen Lage stammen. Bei den Proben mit dem Herstellungsdatum (A) war die Zuordnung der entnommenen Prismen zu der Ursprungslage nicht möglich, so dass hier bei vergleichenden Untersuchungen jeweils der Mittelwert aus 5 verschiedenen Proben bestimmt wurde.

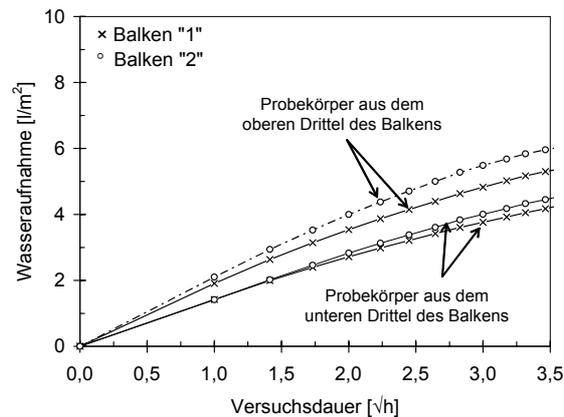


Abbildung 22: Einfluss der Ursprungslage des entnommenen Prismas in den Balken. Im Vergleich: Wasseraufnahme von 4 Würfeln (rd. $45 \times 45 \times 45 \text{ mm}^3$) aus der gleichen Betonage, herausgearbeitet aus zwei verschiedenen Balken. Ein Würfel stammt jeweils aus dem oberen Drittel des Balkens, ein Würfel aus dem unteren Drittel

Vergleichend wurden vereinzelte Versuche an Sander Sandstein durchgeführt. Es handelt sich dabei um einen fein- bis mittelsandigen Schilfsandstein der mineralologisch gesehen größtenteils Quarz (54 %) und Gesteinsbruchstücke (32 %) enthält. Die Korngrößen liegen zwischen 0,1 und 0,4 mm. Dieser Stein wurde ausgewählt, da hier gemäß Literatur eine Vielzahl an feuchtetechnischen Parametern bereits ermittelt wurde und es zudem ein Material ist, welches im Gegensatz zu zementgebundenen Materialien einerseits keinen Selbstabdichtungseffekt gegenüber eindringender Feuchte zeigt und andererseits keine Chloride bindet. Die Sandsteine wurden auf die erforderlichen Maße zurechtgesägt und vor Versuchsbeginn bei einer Temperatur von 105 °C getrocknet.

Der Einfluss verschiedener Rezepturen auf das Porengefüge und die Transportkenngrößen wurde an verschiedenen Beton- und Mörtelrezepturen überprüft. Abbildung 23 gibt einen Überblick über die untersuchten Betonrezepturen und stellt gleichzeitig dar, welcher Einflussparameter mit welchen Mischungen untersucht wurde. Die Betone mit der Kurzbezeichnung /1/ bis /25/ wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens zur Quantifizierung des Chloridmigrationskoeffizienten hergestellt [138], Ergebnisse zu Migrationsversuchen bzw. Wenner-Messungen können dem Forschungsbericht entnommen werden.

Die Betone wurden bis zu einem Alter von ca. zwei bis drei Jahren unter Wasser gelagert, um eine nahezu vollständige Hydratation zu erreichen. Anschließend wurden die Probekörper für die Versuche aus den Würfeln und Zylindern herausgesägt und nach einer einmonatigen Lagerung im Trockenschrank bei 50 °C bis zur Gewichtskonstanz im Klima 23 °C / 50 %r.F. gelagert. Die Herstellung und Lagerung für die Versuche an den in Abbildung 23 aufgeführten Mörteln erfolgte analog der Probekörper zur Beurteilung der Mechanismen.

		Zementart	w/z	z [kg/m ³]	f [kg/m ³]	GK [kg/m ³]	Oberfläche GK [m ² /m ³ _{Beton}]	Kurzbe- zeichnung		
w/b-Wert konstant 0,45	Bindemittelgehalt konstant 360 kg/m ³	Einfluss Zementart/ Mahlfähigkeit	CEM I 32,5 R							
			Einfluss Zementwerk	Werk A	0,45	360	-	1932	3400	/24/
				Werk C	0,45	360	-	1932	3400	/23/
				CEM I 42,5 R						
		Einfluss Zementwerk	Werk A	0,45	360		1932	3400	/22/	
			Werk B	0,45	360		1932	3400	/21/	
				CEM I 52,5 R						
			Werk D	0,45	360		1932	3400	/20/	
				CEM I 32,5 R + SFA						
		Einfluss Flugasche	Werk A	0,45	342	60	1874	3297	/19/	
				CEM I 42,5 R + SFA						
		Einfluss Flugasche	Werk A	0,45	342	60	1874	3297	/18/	
		Einfluss Zementart/ Bestandteile		CEM II/A-LL 42,5 R						
				Werk A	0,45	360		1932	3400	/17/
	CEM II/B-S 32,5 R									
	Werk B		0,45	360		1932	3400	/16/		
	CEM II/B-S 42,5 N									
	Werk A		0,45	360		1932	3400	/3/		
	CEM II/B-T 32,5 R									
	Werk C		0,45	360		1932	3400	/15/		
	CEM III/A 32,5 N - LH									
	Werk A		0,45	360		1932	3400	/1/		
	CEM III/B 32,5 N - LH/HS									
	Werk A	0,45	360		1932	3400	/25/			
Z variabel		CEM I 32,5 R								
	Einfluss Zementgehalt	Werk B	0,45	300		2059	3623	/4/		
		Werk B	0,45	330		1995	3512	/5/		
		Werk B	0,45	360		1932	3400	/6/		
		Werk B	0,45	390		1869	3289	/7/		
		Werk B	0,45	420		1805	3177	/8/		
		Werk B	0,45	450		1742	3066	/9/		
w/z-Wert konstant 0,5	Z konstant 360 kg/m ³	Einfluss Zementart	CEM II/A-LL 42,5 R	Werk A	0,50	360		1883	3313	/13/
			CEM II/B-S 32,5 R	Werk B	0,50	360		1883	3313	/12/
			CEM II/B-T 32,5 R	Werk C	0,50	360		1883	3313	/11/
			CEM III/A 32,5 N - LH	Werk A	0,50	360		1883	3313	/10/
			CEM III/B 32,5 N - LH/HS	Werk A	0,50	360		1883	3313	/2/
w/z-variabel, V _{Zement} konstant	Einfluss w/z-Wert	CEM I 42,5 R	Werk E	0,60	320		1883	3747	/34/	
			Werk E	0,50	359		1883	3747	/35/	
			Werk E	0,40	409		1883	3747	/36/	
Mörtel										
		CEM I 42,5 R	Werk E	0,60	516		1359	5432	/27/	
			Werk E	0,50	578		1359	5432	/28/	
Einfluss Oberfläche und Gehalt an Gesteinskörnung			Werk E	0,40	658		1359	5432	/29/	
			Werk E	0,50	778		913	3747	/31/	
			Werk E	0,60	580		1197	5051	/32/	
			Werk E	0,50	650		1199	5051	/33/	

Abbildung 23: Zusammensetzung der Betone und Mörtel zur Untersuchung des Einflusses betontechnologischer Parameter auf das Gefüge und auf die Transportkenngrößen

3.3 Untersuchungen und zugehörige Untersuchungsmethoden

3.3.1 Gefügestruktur

3.3.1.1 Allgemeines

Die experimentelle Grundlage zur rechnerischen Bestimmung der hygrischen Kenngrößen bildet die Analyse der Porenstruktur. An allen verwendeten Materialien wurden daher die für die Porenstruktur maßgebenden Kenngrößen wie die Porosität (freie Wassersättigung w_f), die Porengrößenverteilung und die spezifische Oberfläche bestimmt.

3.3.1.2 Porosität

Die Porosität w_f wurde mit Hilfe der freien Wassersättigung an den Proben zur Ermittlung der Sorptionsisothermen (Kapitel 3.3.2) bestimmt. Für den Mörtel nach Tabelle 1 wurde eine kapillaraktive Porosität von 194 l/m^3 (A) bzw. 188 l/m^3 (B) bestimmt, w_f für den Sander Sandstein betrug 159 l/m^3 . Die Porositäten für die Rezepturen nach Abbildung 23 sind in Tabelle A2, Spalte 3 im Anhang aufgeführt.

3.3.1.3 Porengrößenverteilung

Die Poreneingangsgrößenverteilung im Bereich zwischen 4 nm und $170 \mu\text{m}$ wurde für sämtliche Rezepturen nach Abbildung 23 mittels Quecksilberdruckporosimetrie (Gerät AutoPore III der Firma Micromeritics) bestimmt. Zur Sicherstellung der vollständigen Trocknung wurden die Proben (Bruchstücke mit Abmessungen von rd.: $25 \cdot 25 \cdot 3 \text{ mm}^3$) im Anschluss an die Standardvorlagerung eine Woche in Isopropanol gelagert und weitere 3-4 Tage bei $50 \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet, bis die gesamte Flüssigkeit verdampft war. Bei der Bestimmung der Porengrößenverteilung waren die Betone mindestens drei Jahre alt, die Mörtel mindestens ein Jahr. Es wurde darauf geachtet, dass möglichst kein Grobkorn in den Probestücken enthalten war und die Probestücke frei von geschalteten Flächen waren.

Die Proben wurden in ein Penetrometer mit einem Volumen von $18,9 \text{ ml}$ gelegt und das Quecksilber mit einem definierten Druck in das Porengefüge eingepresst. Hierbei wurde der Druck langsam bis auf 4000 bar gesteigert und zu jedem Druckintervall die eingedrungene Quecksilbermenge ermittelt. Über den Zusammenhang zwischen Druck und gefüllter Porengröße nach Gleichung 2 ermittelt das Gerät die zugehörigen Porendurchmesser. Für die Oberflächenspannung σ des Quecksilbers wurde ein Wert von $0,485 \text{ N/m}$ und für den Benetzungswinkel θ zwischen Quecksilber und Zementstein bzw. Beton ein Wert von 130° angenommen. Abbildung 24 stellt sowohl die Summenkurve des mit Quecksilber gefüllten Porenraums in Abhängigkeit des Porenradius wie auch die Porengrößenverteilung für den

Mörtel nach Tabelle 1 (A) und den Sander Sandstein im Vergleich dar. Die entsprechenden Diagramme für die Rezepturen nach Abbildung 23 sind im Anhang enthalten.

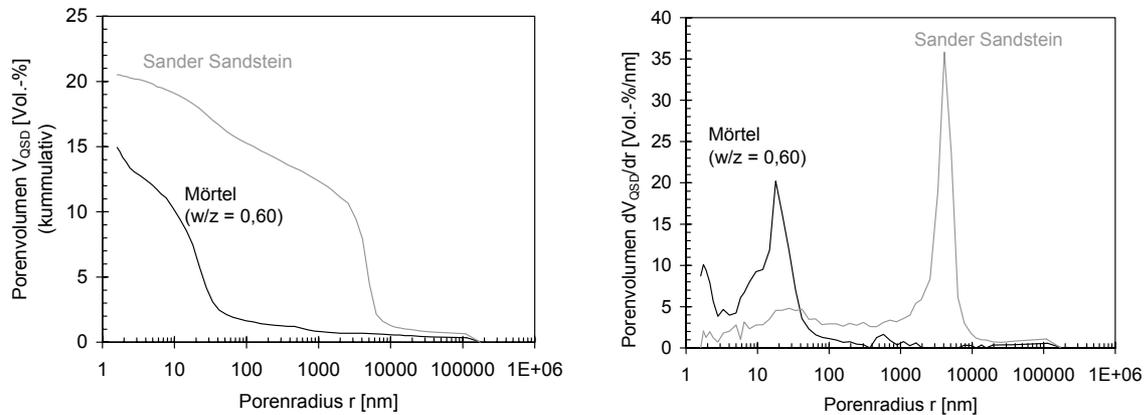


Abbildung 24: Ergebnisse der Quecksilberdruckporosimetrie am Mörtel ($w/z = 0,60$) aus Tabelle 1 (A) und am Sander Sandstein, links: Summenkurve des mit Quecksilber gefüllten Porenvolumens V_{QSD} , rechts: Porengrößenverteilung (dV/dr)

3.3.1.4 Innere Oberfläche

Die spezifische oder innere Oberfläche O_i stellt in besonderem Maße ein Bewertungskriterium für das Ausmaß der zu erwartenden Wechselwirkungen zwischen Wasser und der Feststoffmatrix zementgebundener Baustoffe dar. Je größer die spezifische Oberfläche eines Materials ist, umso stärkere Wechselwirkungsmechanismen sind zu erwarten. Während grobporöse Baustoffe eine relativ geringe spezifische Oberfläche haben, kann diese bei zementgebundenen Baustoffen aufgrund der Häufigkeit der Porengrößen im Gelporenbereich um Größenordnungen darüber liegen.

Für grobporige Baustoffe mit einem geringen Porenanteil an Poren mit einem Radius kleiner als 4 nm kann die spezifische Oberfläche näherungsweise aus der mit Quecksilberdruck gemessenen Summenporenvolumenkurve berechnet werden $O_{i,QSD}$ [3]. Für feinporöse zementgebundene Baustoffe, die einen sehr großen Anteil an Porengrößen im Nanometerbereich haben, eignet sich die Berechnung der inneren Oberfläche nach der Theorie von Brunauer, Emmett und Teller (BET) $O_{i,BET}$ mit Hilfe von Daten aus der Sorptionsisotherme. Die innere Oberfläche wird dabei durch die Zusammenhänge in Gleichung 39 beschrieben:

$$O_{i,BET} = n \cdot L \cdot O_W = \frac{V_m}{M} \cdot L \cdot O_W$$

Gleichung 39

Die Zahl n [mol/g] entspricht der Anzahl der adsorbierten Wassermoleküle, die zur monomolekularen Bedeckung notwendig sind, L ist die Loschmidtsche Zahl ($L = 6,06 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) und M die Molmasse des Wassers ($M = 18 \text{ g/mol}$). O_W ist die Oberfläche, die ein einzelnes Wassermolekül bedeckt ($O_W = 11,4 \times 10^{-20} \text{ m}^2$), V_m ist eine Konstante und entspricht dem Volumen einer monomolekularen Bedeckung der Oberfläche.

Im Bereich geringer Luftfeuchten unter 50 % r.F. lässt sich die innere Oberfläche anhand der von Badmann [139] für Zementstein hergeleiteten Beziehung zwischen der statistischen Dicke d [m] der adsorbierten Wassermolekülschicht an den Porenwänden und der relativen Luftfeuchte φ nach Gleichung 1 bestimmen. Die adsorptiv gebundene Wassermenge $w(\varphi)$ lässt sich damit wie folgt beschreiben:

$$w(\varphi) = \frac{d(\varphi)}{d_1} \cdot \frac{O_i \cdot M}{O_W \cdot L}$$

Gleichung 40

Mit $d(\varphi)$ nach Gleichung 1 und der Dicke einer Wassermolekülschicht d_1 , die dem Durchmesser des Wassermoleküls von 0,3 nm entspricht, ergibt der erste Quotient in Gleichung 40 die Anzahl der adsorbierten Molekülschichten in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte. Der zweite Quotient entspricht gemäß der BET-Theorie (vgl. Gleichung 39) dem Volumen der monomolekularen Bedeckung aller Porenwände. Bei bekanntem Ausgleichsfeuchtegehalt aus Sorptionsmessungen, die an allen untersuchten Materialien im Rahmen der Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion durchgeführt werden, wird mit Gleichung 40 die innere Oberfläche O_i [m²/g] berechnet. Für den Mörtel nach Tabelle 1 (B) wurde eine innere Oberfläche O_i von rd. 48 m²/g bestimmt, O_i für den Sander Sandstein betrug rd. 18 m²/g. Die berechneten inneren Oberflächen für die Rezepturen nach Abbildung 23 sind in Tabelle A1, Spalte 9 im Anhang aufgeführt.

3.3.2 Bestimmung der Sorptionsisothermen

3.3.2.1 Versuchsbeschreibung

Die Feuchtespeicherfunktion wurde anhand von drei Versuchsserien im Exsikkatorverfahren in Anlehnung an DIN EN ISO 12571:2000 ermittelt. Die relativen Luftfeuchten im Exsikkator wurden über gesättigte Salzlösungen nach DIN 50008-1:1981 bzw. nach [101] eingestellt. In der ersten Versuchsserie wurden am Mörtel (A) aus Tabelle 1 die Desorptionsisotherme und der Einfluss von Salzen auf die Feuchtespeicherung untersucht. In der zweiten Versuchsreihe wurde die Hysterese zwischen Desorption und Adsorption an einem Mörtel aus einer zweiten Mischung nach Tabelle 1 (B) untersucht. Auch hier wurden

salzbelastete Probekörper getestet. Der Einfluss der Betonrezeptur auf die Desorption salzfreier Proben wurde in Versuchsreihe 3 untersucht.

Die Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion erfolgte an Proben mit Abmessungen von rd. $25 \cdot 25 \cdot 3 \text{ mm}^3$. Die Masse der Proben wurde gravimetrisch mit einer Genauigkeit von 10^{-4} g ermittelt.

Nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte im Klima $23 \text{ °C} / 50 \text{ \% r.F.}$ nach der Standardlagerung wurden die Probekörper der Versuchsserien 1 und 2 entweder mit Wasser oder mit Natriumchloridlösung verschiedener Konzentrationen gesättigt. Die Sättigung mit der Salzlösung diente dazu, vor Untersuchungsbeginn unterschiedliche Gehalte an Salz in den Probekörper einzubringen.

Die Salzlösungen für die Versuchsreihe 1 hatten einen Natriumchloridgehalt von 3,3 M.-%, 8,7 M.-% und 26,4 M.-%. Jeweils 5 Probekörper der Versuchsreihe 1 wurden mit Wasser bzw. einer Salzlösung beaufschlagt. Im Anschluss an die Vorlagerung wurden die Probekörper schrittweise in den Klimastufen 93 % r.F., 85 % r.F., 75 % r.F., 65 % r.F., 50 % r.F., 33 % r.F. und 3 % r.F. bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C getrocknet. Je Trocknungsstufe wurde mindestens ein Zeitraum von 4 Monaten eingehalten, bevor die nächste Trocknungsstufe eingestellt wurde, um den Feuchteausgleich im entsprechenden Klima sicherzustellen.

Jeweils 18 Probekörper der Versuchsreihe 2 wurden vor Versuchsbeginn mit Natriumchloridlösungen von 0,1 M.-%, 0,5 M.-%, 1 M.-%, 3 M.-% bzw. 4,5 M.-% gesättigt. Um den Versuchsablauf zu beschleunigen, wurden in dieser Versuchsreihe die Trocknungsschritte bei der Desorption nicht schrittweise durchgeführt, sondern es wurden jeweils 3 Probekörper je Salzbeauschlagungsintensität direkt für einen Zeitraum von mindestens 6 Monaten in einer der vorgesehenen Luftfeuchten gelagert. Folgende Klimastufen wurden bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C eingestellt: 93 % r.F., 85 % r.F., 75 % r.F., 65 % r.F., 50 % r.F. und 33 % r.F.. Nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte wurden alle Probekörper im Klima $23 \text{ °C} / 3 \text{ \% r.F.}$ gelagert (Dauer > drei Monate). Im Anschluss an die Desorption erfolgte die Adsorption. Die Probekörper wurden ausgehend von der Lagerung im Klima $23 \text{ °C} / 3 \text{ \% r.F.}$ in den jeweils schon bei der Desorptionsmessung vorgesehenen Luftfeuchten gelagert. Die Probekörper wurden hier wiederum für einen Zeitraum von mindestens sechs Monaten gelagert. Anschließend erfolgte eine erneute Desorptionsmessung, wobei die Probekörper für einen Zeitraum von drei Monaten im Klima $23 \text{ °C} / 3 \text{ \% r.F.}$ gelagert wurden. Anschließend wurden alle Proben dieser Versuchsreihe bei 50 °C vollständig getrocknet.

Die Probekörper zur Untersuchung des Einflusses der Betonrezeptur (vgl. Abbildung 23) auf die Feuchtespeicherfunktion (Versuchsreihe 3) wurden direkt nach der Wasserlagerung im definierten Klima gelagert. Der Einfluss von Salzen wurde hier nicht zusätzlich untersucht. Folgende Trocknungsschritte wurden zur Ermittlung der Desorptionsisothermen eingestellt: 93 % r.F., 75 % r.F., 50 % r.F. und 22 % r.F. Die Temperatur betrug 23 °C. Um den Versuchsablauf zu beschleunigen, wurde jeweils ein Probekörper jeder Rezeptur in einer Trocknungsstufe gelagert. Nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte im jeweiligen Klima (mindestens sechs Monate) wurden alle Probekörper bei 3 % r.F. gelagert. Im Anschluss wurden die Proben erneut gesättigt. Nach vollständiger Wassersättigung wurden alle Probekörper bei 105 °C getrocknet.

3.3.2.2 Ergebnisse und Interpretation

Abbildung 25 zeigt neben der Desorptionsisotherme für Wasser (Ermittlung des Verlaufs vgl. Kapitel 3.3.2.3) die Wassergehalte der salzbelasteten Mörtelproben aus den Versuchsreihen 1 und 2 im Gleichgewicht mit der relativen Luftfeuchte der Lagerungsatmosphäre. Die entsprechende Konzentration an freien Chloriden in der Porenlösung der salzbelasteten Mörtelproben ist im Diagramm in $\text{g Cl}_{\text{frei}}/100 \text{ g Wasser}$ angegeben. Zur Ermittlung der Konzentration an freien Chloriden in der Porenlösung wurde zunächst die Natriumchloridkonzentration aus der eingetragenen Natriumchloridlösungsmenge und dem anschließenden Wasserverlust während der Trocknung berechnet. Mit Hilfe der Ergebnisse zur Chloridbindung (vgl. Kapitel 3.3.6) wurde daraufhin die Konzentration an freien Chloriden in der Porenlösung abgeschätzt.

Abbildung 26, links zeigt ergänzend zu den in Abbildung 25 dargestellten Versuchsergebnissen schematisch, welchen Einfluss die Salzionen im Porensystem auf die Feuchtespeicherfunktion haben. Die dargestellten Feuchtespeicherfunktionen stellen dabei jeweils für eine konstante Ionenkonzentration der Porenlösung über den gesamten Luftfeuchtebereich den Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Luftfeuchte dar. Gegenüber dem salzfreien Material (Feuchtespeicherfunktion Wasser) ist neben einer Verschiebung der Feuchtespeicherfunktion zu niedrigerem Wassergehalten bei einer bestimmten Lagerungsfeuchte eine Verschiebung in Richtung geringerer Luftfeuchten, d.h. zu niedrigeren Dampfdrücken charakteristisch.

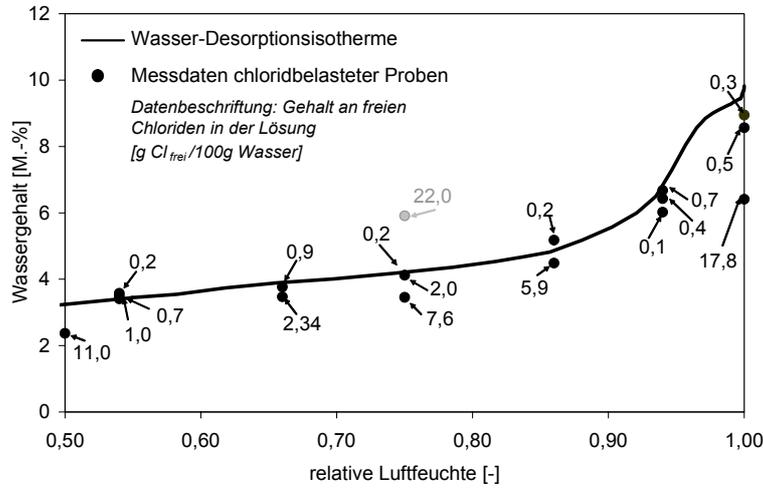


Abbildung 25: Desorptionsisotherme (Wasser) des Mörtels ($w/z = 0,60$) nach Tabelle 1 (A), Messpunkte schwarz: gemessene Wassergehalte chloridbelasteter Proben, Messpunkt grau: gemessener Wassergehalt einer chloridbelasteter Probe, bei welcher die Sättigungskonzentration für Natriumchlorid ($35,9 \text{ g NaCl}/ 100\text{g Wasser}$) überschritten ist (NaCl -Kristalle liegen im Porenraum vor)

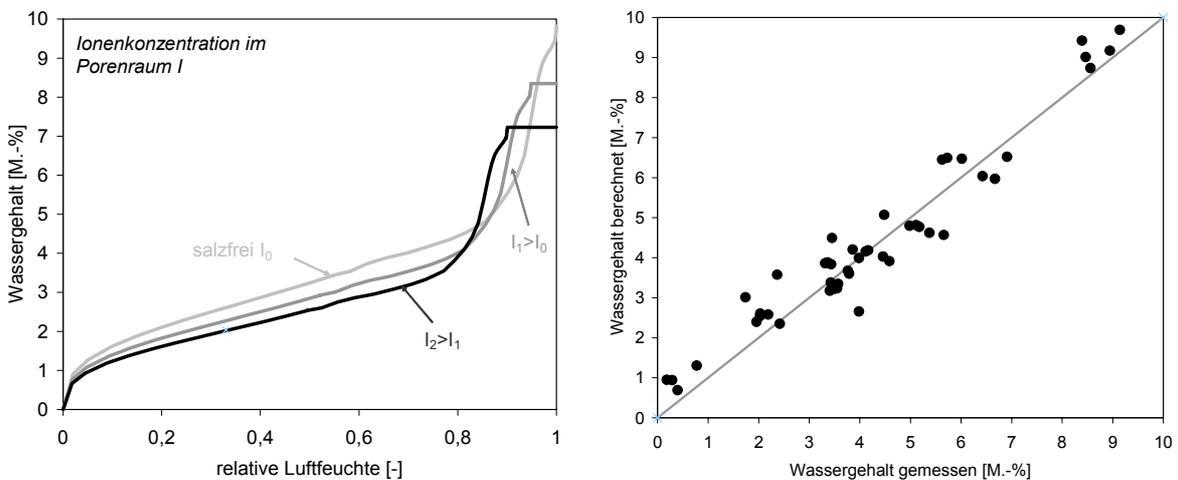


Abbildung 26: links: schematische Darstellung zum Einfluss im Wasser gelöster Ionen auf die Feuchtespeicherfunktion, rechts: Gegenüberstellung der gemessenen Wassergehalte aus den Versuchen der Versuchsreihe 1 und 2 und den aus der nach Raoult berechneten salzgehaltsabhängigen Dampfdruckerniedrigung berechneten Wassergehalten aus der Feuchtespeicherfunktion für Wasser

Die Reduzierung der Wassergehalte bei gleichbleibender Luftfeuchte resultiert aus dem geringeren dem Wasser zur Verfügung stehenden Porenvolumen infolge der zusätzlichen Ionen (z.B. Na^+ , Cl^-) in den salzbelasteten Proben. Die Verschiebung der Feuchtespeicherfunktion in Richtung niedriger Luftfeuchten resultiert aus der Absenkung des Partialdampfdrucks infolge der im Porenraum enthaltenen Salze (vgl. Kapitel 2.6). Das Ausmaß der Dampfdruckerniedrigung hängt von der molaren Konzentration der gelösten

Ionen ab. Entsprechend des Stoffmengenanteils n_{H_2O} des Wassers in der Salzlösung kann der Dampfdruck der Salzlösung nach dem Raoult'schen Gesetz für verdünnte Lösungen abgeschätzt werden [67].

$$p_{\text{Lösung}} = n_{H_2O} \cdot p_{H_2O}$$

Gleichung 41

Für einen salzbelasteten Probekörper bedeutet dies, dass dieser schon bei geringeren Luftfeuchten als ein salzfreier Probekörper seine maximale Wassersättigung erreicht hat. Während der Trocknung eines salzbelasteten Materials, d.h. mit abnehmender relativer Luftfeuchte im Lagerungsraum konzentriert sich die Porenlösung auf. Dies hat eine Absenkung des Partialdampfdrucks im Porenraum bei gleichbleibender maximal aufnehmbarer Wassermenge zur Folge. Infolge der steigenden Dampfdruckerniedrigung mit zunehmendem Anteil an Ionen im Wasser wird das Wasser im Porenraum auch bei geringeren Luftfeuchten gehalten. Werden zusätzlich Salze von außen in das Material eingetragen, wirkt sich dies ebenso auf die Erniedrigung des Dampfdrucks, aber auch auf die maximal aufnehmbare Wassermenge aus.

Für die Anwendung eines Modells zur Berechnung des Feuchtehaushalts unter Berücksichtigung des Einflusses von Salzen ist es aufgrund der geschilderten Zusammenhänge von Bedeutung, für jede beliebige Ionenkonzentration der Porenlösung aus der Sorptionsisotherme für Wasser den entsprechenden Zusammenhang zwischen relativer Feuchte und Wassergehalt berechnen zu können. Abbildung 26, rechts zeigt die Gegenüberstellung der gemessenen Wassergehalte aus den Versuchen der Versuchsreihe 1 und 2 und den aus der nach Raoult berechneten salzgehaltsabhängigen Dampfdruckerniedrigung berechneten Wassergehalten aus der Feuchtespeicherfunktion für Wasser. Die Korrelation mit den experimentellen Ergebnissen zeigt, dass Isothermen für beliebige konstante Porenlösungskonzentrationen unter Berücksichtigung der Partialdampfdruckerniedrigung durch gelöstes Salz aus der Wassersorptionsisotherme des Materials berechnet werden können.

Ist die Porenlösung übersättigt, liegen im Porensystem wasserlösliche Salze in kristalliner Form vor. Oberhalb einer Luftfeuchte, die dem Deliqueszenzpunkt des Salzes, d.h. der relativen Luftfeuchte über einer gesättigten Lösung mit diesem Salz entspricht (Bsp. $\varphi_{NaCl} = 75\% \text{ r.F.}$), halten die Salze aufgrund der starken Ion-Dipol-Kräfte zwischen Salzionen und Wasserdipolen so viel Feuchte im Porensystem, wie für die Bildung einer gesättigten Salzlösung notwendig ist. Eine Kristallbildung wird somit verhindert. Die Wasserabgabe, die mit einer Kristallbildung einher geht, erfolgt erst ab einer Luftfeuchte, die unterhalb des Deliqueszenzpunkts des Salzes liegt (vgl. Kapitel 2.6).

Abbildung 25 zeigt exemplarisch den Wassergehalt einer Probe mit einem Gehalt an freien Chloriden von $22,0 \text{ g Cl}_{\text{frei}}^- / 100 \text{ g Wasser}$ bei einer relativen Luftfeuchte von $75 \% \text{ r.F.}$ (grau dargestellt). Unter der Annahme, dass in der Porenlösung des untersuchten Mörtels eine ausreichende Anzahl an Na^+ -Ionen enthalten ist, ist mit einer Übersättigung der Porenlösung, d.h. mit einer Bildung von Natriumchloridkristallen bei einer Konzentration an freien Chloriden von $21,8 \text{ g Cl}_{\text{frei}}^- / 100 \text{ g Wasser}$ zu rechnen. Mit Erreichen der Luftfeuchte von $75 \% \text{ r.F.}$, die dem Deliqueszenzpunkts des Natriumchlorids entspricht, wird hier zusätzlich zu dem Wasser, welches aufgrund der Dampfdruckerniedrigung im Probekörper gehalten wird, Wasser durch die starken Ion-Dipolkräfte gehalten (vgl. Kapitel 2.6), um so eine Kristallbildung zu verhindern. Im Modell wird daher bei Übersättigung der Porenlösung und Überschreiten des Deliqueszenzpunkts des Salzes eine vollständige Sättigung des Porenraums angenommen.

Die gleichen Zusammenhänge konnten auch für die Versuchsreihen mit Sandstein und Natriumsulfat bestätigt werden.

Die Hysterese zwischen Desorption und Adsorption ist, wie Abbildung 27 zeigt, bei den meisten Baustoffen so wenig ausgeprägt, dass es ausreichend ist, zur Charakterisierung der Feuchtespeicherung im Modell nur die Desorptionsisotherme heranzuziehen.

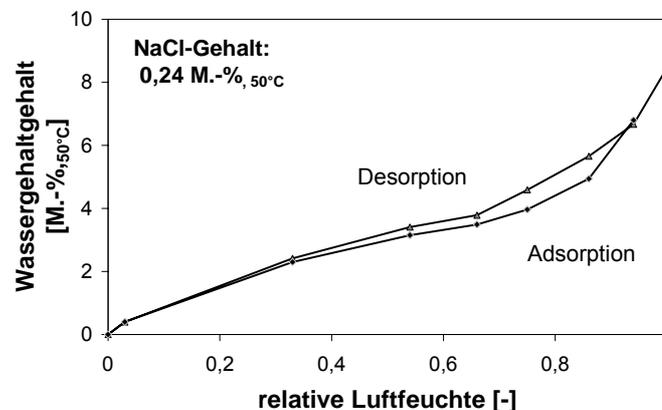


Abbildung 27: Ergebnisse eines Sorptionsversuchs am Mörtel ($w/z = 0,60$) nach Tabelle 1 (B) und einem Salzgehalt von $0,24 \text{ M.-%}$

Die Ergebnisse zum Einfluss der Betonrezeptur auf die Desorption salzfreier Proben aus Versuchsreihe 3 sind in Tabelle A2 im Anhang zusammengefasst.

3.3.2.3 Beschreibung der Feuchtespeicherfunktion

Die versuchstechnische Bestimmung der Sorptionsisothermen ist mit einem extrem hohen Zeitaufwand verbunden. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, den Zusammenhang zwischen

Ausgleichsfeuchte und Umgebungsklima rechnerisch aus schnell zu bestimmenden Kenngrößen herzuleiten.

Anhand der Versuchsergebnisse der Versuchsreihen 1 und 3 wurde überprüft, inwieweit sich die Feuchtespeicherfunktion (Desorptionsisotherme) durch die Bestimmung der inneren Oberfläche des Gefüges und der Porengrößenverteilung aus der Quecksilberdruckporosimetrie bestimmen lässt.

Dazu wurde im Bereich geringer Luftfeuchten unter 50 % r.F. der Materialfeuchtegehalt anhand der von Badmann für Zementstein hergeleiteten Beziehung zwischen der Dicke $d(\varphi)$ der adsorbierten Wassermolekülschicht an den Porenwänden und der relativen Luftfeuchte bestimmt (Gleichung 1). Mit bekannter spezifischer Oberfläche O_i des Baustoffs, die aus der monomolekularen Belegung der Porenwandungen bei einem gemessenen Wassergehalt bei 22 % r.F. bestimmt wurde (vgl. Kapitel 3.3.1.4), und der von einem Wassermolekül beanspruchten Belegungsfläche O_w wurde die in der Sorbatschicht enthaltene Menge an Wasser $w_{ad}(\varphi)$ in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte mit Gleichung 40 berechnet.

Der Zusammenhang zwischen dem Porenradius r und der relativen Luftfeuchte φ , bei der die Dampfdruckerniedrigung in Poren bestimmter Größe eine Kapillarkondensation in den Poren bewirkt, ist durch die Kelvin-Thomson-Gleichung (vgl. Gleichung 2) gegeben. Für einen gegebenen Porenradius r kann somit oberhalb von 50 % r.F. die Luftfeuchte berechnet werden, bei deren Überschreiten die Poren durch Kapillarkondensation gefüllt werden. Aus der Summenporenverteilung mittels Quecksilberdruckporosimetrie kann damit für jede Luftfeuchte das durch Kapillarkondensation gefüllte Porenvolumen errechnet werden. Die massebezogene Kondensatmenge $w_{kk}(\varphi)$ ergibt sich schließlich aus der Multiplikation des Porenvolumens mit der Dichte des Wassers ρ .

Abbildung 28 zeigt den Vergleich einer berechneten Sorptionsisotherme mit versuchs-technisch bestimmten Daten (Versuchsreihe 1, vgl. Kapitel 3.3.2.1).

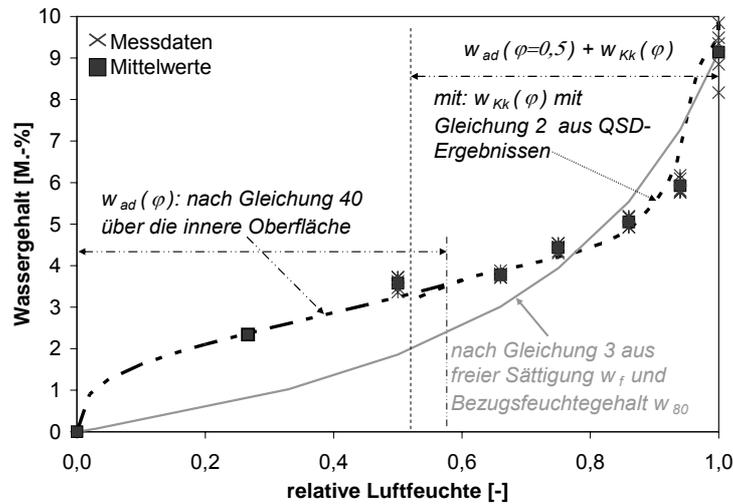


Abbildung 28: Vergleich der Messwerte und der Näherung der Desorptionsisotherme des Mörtels nach Tabelle 1 (A) ($w/z = 0,60$)

Bis zu einer Luftfeuchte von 50 % r.F. entspricht die Materialfeuchte der Menge an Wasser, die an den Porenwänden adsorbiert wird $w_{ad}(\varphi)$. Im Bereich von höheren Luftfeuchten kondensiert zusätzlich Wasser in den größeren Poren mit $r > 1,6$ nm. Die Materialfeuchte errechnet sich hier aus der Summe der Sorbatmenge infolge mono- bzw. multimolekularer Belegung $w_{ad}(\varphi)$ und der in den feinen Kapillaren kondensierten Feuchte $w_{kk}(\varphi)$. Der Vergleich der über die innere Oberfläche und die Porengrößenverteilung berechneten Feuchtespeicherfunktion mit den in Versuchsreihe 1 gemessenen Wassergehalten zeigt, dass sich die Sorptionsisotherme gut annähern lässt. Die Feuchtespeicherfunktion lässt sich demnach in verhältnismäßig kurzer Zeit aufstellen, indem der Probekörper getrocknet wird (z.B. 3 % r.F.) und anschließend die Ausgleichsfeuchte bei z.B. 25 % r.F. bestimmt wird. Zusätzlich wird die Porengrößenverteilung aus der Quecksilberdruckporosimetrie benötigt. Entsprechende Ergebnisse für die Betonrezepturen nach Abbildung 23 befinden sich in Tabelle A2 im Anhang.

Gleichzeitig zeigt Abbildung 28 die nach Künzel über die freie Sättigung und den Bezugsfeuchtegehalt nach Gleichung 3 genäherte Feuchtespeicherfunktion, welche zwar im Bereich geringer relativer Luftfeuchten starke Abweichungen vom gemessenen Verlauf der Feuchtespeicherfunktion zeigt, im Bereich höherer relativer Luftfeuchten jedoch eine gute Näherung liefert. Der zugehörige Approximationsfaktor b für den Mörtel nach Tabelle 1 (A) beträgt 1,3. Weitere Approximationsfaktoren für die Rezepturen nach Abbildung 23 befinden sich in Tabelle A2, Spalte 17 im Anhang.

3.3.3 Beobachtung des Kapillartransports

3.3.3.1 Allgemeines

Zur Beobachtung des kapillaren Eindringverhaltens von Wasser, Salzlösungen und organischen Flüssigkeiten in zementgebundene Baustoffe wurden Prismen mit einer Querschnittsfläche von $45 \cdot 45 \text{ mm}^2$ und einer Länge von 100-250 mm verwendet. Vergleichend wurde das Eindringverhalten an Prismen aus Sander Sandstein untersucht.

Im Anschluss an die Standardvorlagerung wurden die Mantelflächen der Prismen mit einer 5-lagigen Epoxidharzbeschichtung versehen, um ein seitliches Ein- bzw. Ausdringen der Versuchsflüssigkeit zu vermeiden und eindimensionale Transportbedingungen zu gewährleisten. Vor Versuchsbeginn wurden die Stirnflächen der Probekörper mit einer Drahtbürste aufgeraut und das Ausgangsgewicht der Prismen erfasst.

Abbildung 29 zeigt die Wirkung der Epoxydharzbeschichtung am Beispiel zweier Probekörper mit Abmessungen von jeweils rd. $45 \cdot 45 \cdot 45 \text{ mm}^3$. Die Probekörper wurden zunächst wassergesättigt. Im Anschluss daran wurde ein Probekörper mit einer 5-lagigen Epoxydharzbeschichtung an allen 6 Würfeloberflächen beschichtet, der andere Probekörper blieb unbeschichtet. Während der Lagerung im Klima $23 \text{ °C} / 50 \text{ \% r.F.}$ wurde schließlich die abgegebene Wassermenge gravimetrisch bestimmt. Während der unbeschichtete Probekörper in einem Betrachtungszeitraum von einem Monat rd. 83 % der aufgenommenen Wassermenge abgegeben hat, reduzierte sich der Wassergehalt im beschichteten Probekörper um lediglich 2 %. Für die durchgeführten Versuche zur Beobachtung des Kapillartransports, die sich maximal innerhalb dieses Zeitraums abspielen, ist die Beschichtung demnach ausreichend dicht.

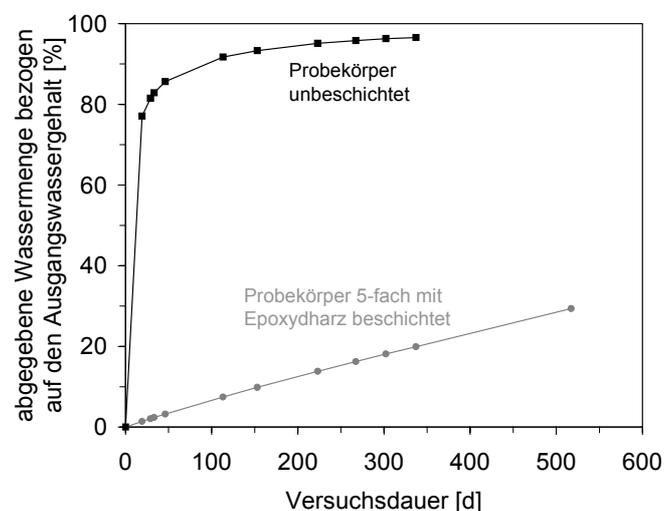


Abbildung 29: Austrocknung zweier Probekörper aus Mörtel ($w/z = 0,60$) nach Tabelle 1 (B) im Klima $23 \text{ °C} / 50 \text{ \% r.F.}$

Das kapillare Eindringverhalten der unterschiedlichen Flüssigkeiten wurde bei vollständiger Benetzung untersucht. Dazu wurden die Probekörper mit einer der Stirnseiten auf Abstandhaltern in ein Gefäß mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gestellt. Durch die Geometrie der Abstandhalter wurde eine möglichst große Benetzungsfläche der Saugseite gewährleistet. Die Proben standen etwa einen halben Zentimeter tief in den Flüssigkeiten. Während des Saugvorgangs war die der Saugseite gegenüberliegende Stirnseite den Lagerungsbedingungen (Klima 23 °C / 50 % r.F.) ausgesetzt, eine Abdichtung erfolgte nicht.

Um zu überprüfen, ob eine fehlende Abdichtung der der Saugseite gegenüberliegenden Stirnseite eine Auswirkung auf die integrale Wasseraufnahme hat, wurde das Wassereindringverhalten bei 1 bar Druck in Probekörper aus Mörtel unterschiedlicher Höhe untersucht. Abbildung 30 zeigt, dass unabhängig von der Höhe der Mörtelprismen die Eindringfront des Wassers bei einer zunehmenden Abweichung vom Wurzel-Zeit-Gesetz mit nahezu identischer Geschwindigkeit in den einzelnen Probekörpern voranschreitet, bis das Ende des Probekörpers erreicht ist. Bis zu diesem Zeitpunkt verläuft die Aufnahme der Menge an anstehendem Wasser ebenfalls identisch, was darauf schließen lässt, dass ein Austrocknen über die der Saugseite gegenüberliegende Stirnseite keinen zu berücksichtigenden Einfluss auf die Aufnahme und die Eindringtiefe in die Probekörper haben kann.

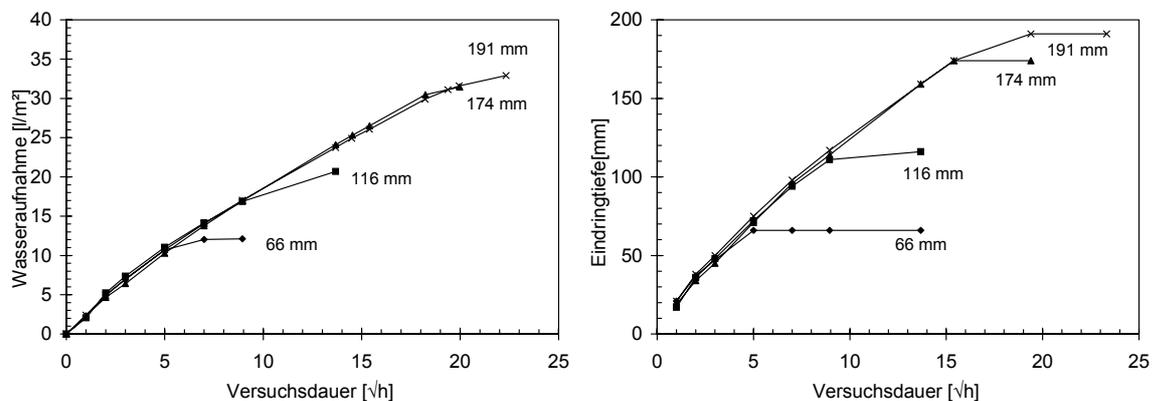


Abbildung 30: Eindringen von drückendem Wasser bei 1 bar in einen Mörtel ($w/z = 0,60$) nach Tabelle 1 in Abhängigkeit von der Probekörperhöhe, links: Wasseraufnahme, rechts: Eindringtiefe

An einigen Probekörpern wurde nach dem Saugvorgang das Weiterleiten der Flüssigkeit nach Unterbrechung der Flüssigkeitszufuhr oder das Austrocknen untersucht. Dazu wurden nach Beendigung der vollständigen Benetzung entweder die Stirnseiten der Prismen mit Folie abgedichtet (Weiterleiten) oder die Stirnflächen konnten im Klima 23 °C / 50 % r.F. über die Stirnseiten trocknen.

Nach definierten Zeitintervallen wurde die integrale Flüssigkeitsmenge gravimetrisch bestimmt. Am Großteil der Probekörper wurden zusätzlich Eindringprofile mittels kernmagnetischer Resonanz (NMR) gemessen. Zur Überprüfung der Messmethode des NMR wurden an ausgewählten Proben ergänzend Eindringprofile mittels γ -Durchstrahlung gemessen. Aus den Eindringprofilen wurden Transportkoeffizienten D_W bestimmt.

3.3.3.2 Gravimetrische Bestimmung des integralen Lösungsgehalts

Die gravimetrische Bestimmung des integralen Lösungsgehalts erfolgte zu definierten Zeitpunkten mit einer Waage der Genauigkeit von 10^{-3} g. Aus den Ergebnissen der Wägung wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 15148:2003 der Wasseraufnahmekoeffizient w (w -Wert) bestimmt (vgl. Gleichung 16). Für den Mörtel (A) nach Tabelle 1 wurde ein w -Wert nach einer Saugzeit von 22 Stunden von rd. $1,47 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$ bestimmt. Der Variationskoeffizient unter Berücksichtigung von Saugversuchen an 5 Probekörpern betrug dabei 5 %. Der w -Wert für den Sander Sandstein betrug rd. $1,17 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$, wobei ein Variationskoeffizient von 11 % an 4 Einzelwerten ermittelt wurde. Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse der Wasseraufnahme bei Benetzung einer Stirnseite des Prismas mit Wasser und den in gleicher Einheit dargestellten Wassergehalt nach Unterbrechung der Wasserzufuhr.

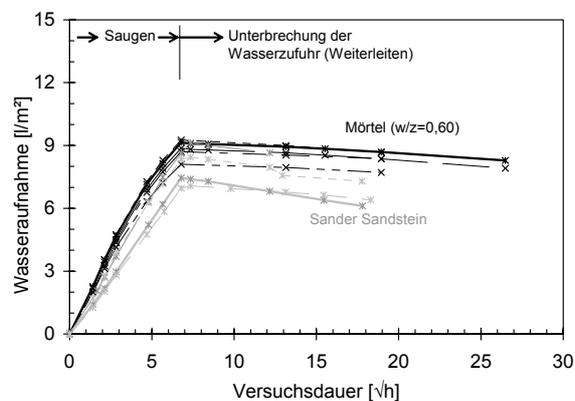


Abbildung 31: Aufgenommene Menge an Wasser bezogen auf die Saugfläche in Abhängigkeit der Wurzel der Versuchszeit; Mörtel (A) nach Tabelle 1 (schwarz), Sander Sandstein (grau)

Die berechneten Wasseraufnahmekoeffizienten für die Rezepturen nach Abbildung 23 sind in Tabelle A4, Spalte 8-13 im Anhang aufgeführt. Die entsprechenden Lösungsaufnahmekoeffizienten (L -Werte, volumenbezogen) für Salzlösungen sind im Anhang Tabelle A5 aufgeführt.

3.3.3.3 Bestimmung der Feuchteindringprofile mit Kernmagnetischer Resonanz

Messverfahren auf Basis kernmagnetischer Resonanz bieten die Möglichkeit, zerstörungsfrei Feuchteverteilungen in Baustoffen zu bestimmen. Das Verfahren beruht auf dem Drehimpuls der positiv geladenen Protonen (H^1) und dem daraus resultierenden magnetischen Moment. In einem konstanten äußeren Magnetfeld verhalten sich Wasserstoffkerne wie kreiselnde magnetische Dipole. Dabei sind zwei mögliche Energieniveaus möglich. Durch die Einstrahlung eines elektromagnetischen Impulses bestimmter Frequenz, senkrecht zum konstanten Feld, werden Übergänge zwischen den beiden Energieniveaus induziert. Nach Beendigung des Hochfrequenzimpulses kehren die angeregten Kerne mit einem Zeitverhalten, das mit der Relaxationszeit T_1 beschrieben wird, in die Ausgangslage zurück. Diese Relaxationszeit ist mit einer Energieabgabe an die Umgebung verbunden. T_1 ist vor allem von der physikalischen Bindung des Wasserstoffkerns abhängig, also im Falle des Wassers davon, ob es als Feststoff (Eis) oder in flüssiger Form vorhanden ist. Unter Abgabe der aufgenommenen Energie stellt sich der ursprüngliche Zustand ein. Die gemessene Spannung in Volt, die durch die abgegebene Energie in einer Spule induziert und messtechnisch erfasst wird, ist proportional der Anzahl der im Messvolumen vorhandenen Protonen. Da in mineralischen Baustoffen Wasserstoffkerne nur in dem darin vorhandenen Wasser enthalten sind, ist das Messsignal proportional zum Wassergehalt in der Probe und dient als Maß für den Feuchtegehalt. Dieses Messverfahren kann somit für die meisten mineralischen Baustoffe als ein direktes Feuchtemessverfahren angesehen werden.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten NMR-Messungen wurde das NMR-Gerät des Fraunhofer Institut für Bauphysik in Holzkirchen verwendet. Das Gerät wird von der Firma Bruker hergestellt und arbeitet mit einer Magnetfeldstärke von 0,47 T. Ein über einen Schrittmotor gesteuerter Schlitten schiebt den zu untersuchenden Probekörper in Schritten von je 12 mm in die Messspule. Je Schritt werden 15 Messpunkte erstellt, so dass in Abständen von 0,8 mm Messwerte erzeugt werden. Die Steuerung des Schrittmotors sowie die Messwerterfassung erfolgt durch einen PC.

Um eine möglichst hohe Ortsauflösung zu erreichen, wird bei der verwendeten NMR-Anlage dem permanenten Magnetfeld bei der Messung ein Feldgradient überlagert. Da die Resonanzfrequenz proportional zu dem Magnetfeld ist, ist somit jedem Ort eine eigene Frequenz zugeordnet. Bei der Messung wird der Anregungsimpuls breitbandig eingestrahlt und anschließend das Gesamtsignal erfasst. Durch Fourrierrücktransformation wird dieses dann in die Frequenzbereiche aufgeteilt und somit dem Ort zugeordnet.

Die verwendete Spule dient sowohl zur Einstrahlung der Anregungsimpulsfolge als auch zum Empfang des Nutzsignals. Durch das Umschalten von Senden auf Empfangen besitzt die

Messspule eine gewisse Totzeit. Innerhalb dieser Totzeit kann durch das Zurückkehren der angeregten Kerne in den Ausgangszustand keine Spannung in der Spule induziert werden, d.h. es wird kein Messsignal erfasst. In den sehr kleinen Poren des Zementsteins ist das Wasser aufgrund der in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Oberflächeneffekte stark gebunden. Dies führt zu einer sehr kleinen Relaxationszeit T_1 der Wasserstoffkerne in den kleinen Poren des Zementsteins. Nach Anregung der Wasserstoffkerne relaxieren diese bereits innerhalb der Totzeit der Messspule, so dass sie nicht oder nur zum Teil erfasst werden.

Nach Wägung der Probekörper im Anschluss an die Standardlagerung fand zunächst die Trockenmessung mittels NMR statt. Zu definierten Saug-, Weiterleitungs- und Trocknungszeiten wurden weitere NMR-Messung durchgeführt. Vor und nach jeder NMR-Messung, die für einen 200 mm langen Probekörper rd. 10 Minuten in Anspruch nimmt, wurde der integrale Lösungsgehalt mittels Wägung ermittelt. Zwischen dem ermittelten Lösungsgehalt vor und nach der NMR-Messung wurde keine messbare Differenz ermittelt, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Probekörper während des Versuchs keinen wesentlichen Feuchteverlust haben. Abbildung 32 zeigt beispielhaft eine Trockenmessung und eine Feuchtmessung nach einer Saugdauer t . Um ein Feuchteprofil aus den Messsignalen zu erhalten, wird zunächst die Trockenmessung von der Feuchtmessung zum Zeitpunkt t abgezogen. Aus dem Verhältnis des integralen Messsignals (hellgrauer Bereich), welches durch die aufgenommene Wassermenge erzeugt wurde, und dem gravimetrisch ermittelten Wassergehalt der gesamten Probe ergibt sich ein Faktor F , mit dem das Messsignal an jeder Messstelle multipliziert wird, um die Feuchteverteilung zu erhalten.

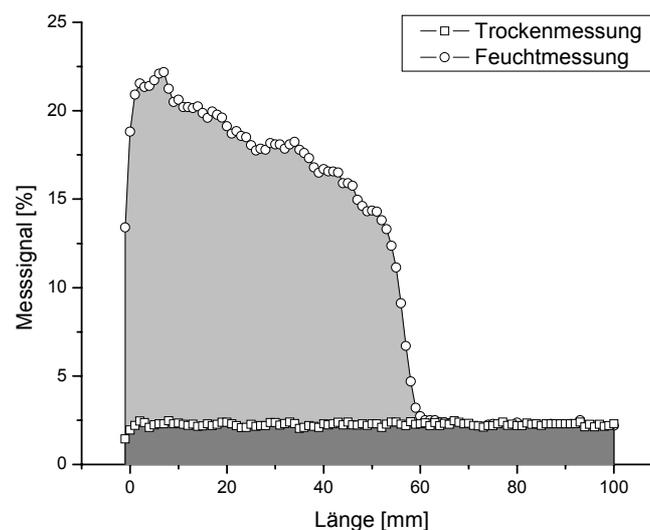


Abbildung 32: Ermittlung des Feuchteprofils aus den Messsignalen. Die Trockenmessung (dunkelgrauer Bereich) wird von der Feuchtmessung (hellgrauer Bereich) abgezogen

Bei den Messungen des grobporigen Sander Sandsteines bleibt der Faktor F bei jeder Messung gleich, d.h. auch nach längeren Saugzeiten. Das bedeutet, dass das Messsignal direkt proportional zum Wassergehalt der Probe ist. Bei Messungen an zementgebundenen Materialien steigt der Faktor F bei dieser Vorgehensweise mit fortschreitender Versuchsdauer an. Mit zunehmender Versuchsdauer wird hier Wasser in kleinere Poren umverteilt und durch die NMR-Messung aufgrund der Totzeit dieser Messspule nicht mehr vollständig erfasst.

Anhand von Vorversuchen an dem Mörtel (A) aus Tabelle 1 wurde daher untersucht, ab welcher Porengröße das darin enthaltene Wasser durch das gewählte NMR-Messgerät noch erfasst werden kann. Dazu wurden Probekörper mit Abmessungen von $45 \cdot 45 \cdot 15 \text{ mm}^3$ im Anschluss an die Standardvorlagerung bei Luftfeuchten von 93, 80, 75, 65, 50, 34 % r.F. vorgelagert. Weitere Probekörper wurden kapillar gesättigt. Bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte wurden der Wassergehalt bezogen auf die Ausgleichsfeuchte im Klima $23^\circ\text{C} / 50\% \text{ r.F.}$ gravimetrisch ermittelt und gleichzeitig eine Messung mittels NMR durchgeführt. Abbildung 33 zeigt das ermittelte Messsignal aus der NMR-Messung in Abhängigkeit des Wassergehalts w .

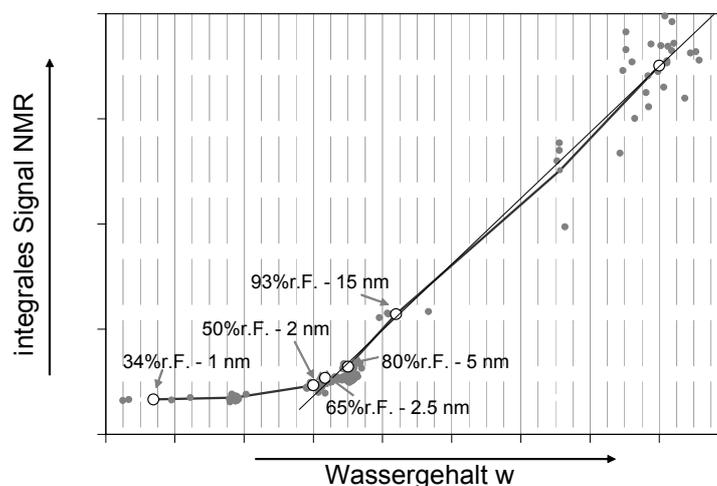


Abbildung 33: integrales NMR-Messsignal in Abhängigkeit des Wassergehalts w infolge Vorlagerung in den Ausgleichsfeuchten 34, 50, 65, 75, 80, 93 % r.F. bzw. nach Wasserlagerung, (Beschriftung: Lagerungsfeuchte in % r.F.- gefüllter Porenradius in nm)

Die Mittelwerte der NMR-Messsignale nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte in Abhängigkeit des zugehörigen mittleren Wassergehalts der Probekörper sind in Abbildung 33 durch weiße Kreise markiert. Die zugehörigen Porenradien der Poren, die bei der entsprechenden Lagerungsfeuchte nach Gleichung 2 mit Wasser gefüllt sind, sind in der Abbildung dargestellt. Erst ab einer Lagerungsfeuchte von rd. 80 % r.F. nimmt das gemessene Signal proportional mit dem Wassergehalt zu. Dies bedeutet, dass in Poren mit einem

Porenradius < 5 nm die Wechselwirkungen zwischen den Wassermolekülen und den Porenwänden so stark sind, dass die Relaxationszeit, innerhalb welcher die Kerne in Ihre Ausgangslage zurückkehren innerhalb der Totzeit der Messspule liegt. Aus diesem Grund werden die Wassermoleküle durch das NMR-Gerät nicht vollständig erfasst. Mit abnehmendem Porenradius nimmt dieser Effekt infolge der stärkeren Wechselwirkungen zwischen Feststoff und Wasser zu (vgl. Kapitel 2.2.2).

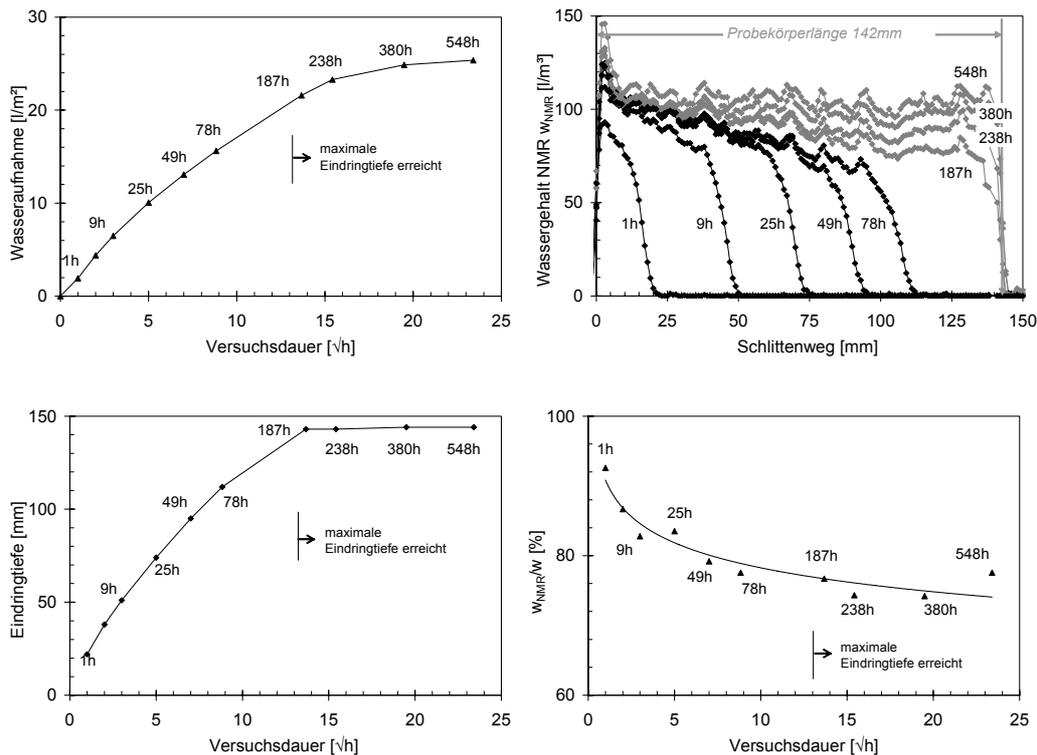


Abbildung 34: oben, links: integrale Wasseraufnahme über eine Stirnseite des untersuchten Prismas (Mörtel nach Tabelle 1 (B), Wasserdruck 0,5 bar) in Abhängigkeit der Wurzel der Zeit, oben rechts: mittels NMR ermittelte Wassereindringprofile w_{NMR} (grau dargestellt: Eindringprofile nach Erreichen der maximalen Eindringtiefe), unten links: Eindringtiefe in Abhängigkeit der Wurzel der Zeit, unten rechts: integraler Wassergehalt NMR w_{NMR} berechnet aus den Eindringprofilen aus den NMR-Messungen bezogen auf den gravimetrisch ermittelten integralen Wassergehalt w

Abbildung 34 zeigt beispielhaft die Auswertung eines Versuchs, bei welchem die Stirnseite eines Prismas der Höhe 142 mm über einen Zeitraum von rd. 550 Stunden mit einem Wasserdruck von 0,5 bar beaufschlagt wurde. Das Prisma (Rezeptur vgl. Tabelle 1 (B)) wurde standardmäßig vorgelagert. Die Ergebnisse der gravimetrischen Wassergehaltsbestimmung sind im Bild oben links dargestellt. Innerhalb der ersten Stunden verläuft die Wasseraufnahme annähernd linear mit der Wurzel der Zeit. Später weicht das Wasseraufnahmeverhalten zunehmend vom Wurzel-Zeit-Gesetz ab. Im Bild oben rechts sind die mittels kernmagnetischer Resonanz ermittelten Eindringprofile des Wassers in den Probekörper dargestellt. Nach einer Versuchsdauer von 187 Stunden hat das Wasser bereits das Ende des

Probekörpers erreicht. Mit zunehmender Versuchsdauer wird jedoch weiter Wasser aufgenommen und der Wassergehalt steigt über die gesamte Probekörperlänge an bis ein gleichmäßiger Wassergehalt erreicht wird. Hier wird der Effekt der unterschiedlichen Porengrößen im Porensystem deutlich. Zunächst erfolgt die Wasseraufnahme vornehmlich durch die großen Kapillaren, die aufgrund des geringen Strömungswiderstands schnell das Wasser aufsaugen und weitertransportieren bis der Probekörper durchdrungen ist, vgl. Abbildung 34 rechts oben, ca. 187 h. Mit fortschreitender Zeit füllen sich zunehmend kleinere Poren, die aufgrund des geringeren Durchmessers einen erhöhten Strömungswiderstand aufweisen und somit das Kapillarwasser langsamer aufnehmen und weiterleiten. Aus den Fronten der Feuchteprofile werden entsprechende Eindringtiefen abgelesen, Abbildung 34 unten links. Nicht nur die Wasseraufnahme, sondern auch das Eindringen der Wasserfront erfolgt mit der Zeit zunehmend langsamer als nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz zu erwarten wäre. Die aus diesen Bildern ersichtlichen Zusammenhänge entsprechen den in Kapitel 2.4.4 aufgeführten Erkenntnissen.

Abbildung 34 unten rechts stellt in Abhängigkeit der Wurzel der Zeit den Anteil an Wasser dar, der mittels NMR-Messung erfasst wird. w_{NMR}/w ist das Verhältnis zwischen dem Wassergehalt aus NMR w_{NMR} und dem gravimetrisch ermittelten Wassergehalt w . Der Wassergehalt aus NMR w_{NMR} ergibt sich dabei aus der Integration der gemessenen Eindringprofile. Mit zunehmender Versuchsdauer sinkt offensichtlich der durch das NMR-Gerät erfasste Anteil an Wasser. Auf Grundlage der zuvor beschriebenen Vorversuche lässt sich daraus schließen, dass mit fortschreitender Zeit ein zunehmender Anteil an Wasser in Poren mit einem Radius von kleiner als 5 nm umverteilt wird. Die Darstellung der Änderung von w_{NMR}/w dient als Hinweis auf die Wassermenge, die aus den Kapillarporen in die Gelporen umgelagert wird.

Die Ergebnisse weiterer Untersuchungen am Mörtel ($w/z = 0,60$) nach Tabelle 1 und an Proben nach Abbildung 23 sowie am Sander Sandstein werden in nachstehenden Kapiteln beschrieben und interpretiert (vgl. Kapitel 4). Die gemessenen Eindringprofile mit den zugehörigen Verläufen der Wasseraufnahme und des Anteils mittels NMR erfassten Wassers entsprechend Abbildung 34 für die Rezepturen nach Abbildung 23 sind im Anhang enthalten.

3.3.3.4 Bestimmung von Feuchteindringprofilen mit γ - Durchstrahlung

Die γ -Durchstrahlung ist eine Methode zur zerstörungsfreien Messung von Feuchteverteilungen in Feststoffen [140, 141, 142]. Das Messprinzip beruht darauf, dass elektromagnetische Strahlung einer konstanten Energie aus einer radioaktiven Quelle beim Durchgang durch ein Material abgeschwächt wird. Die Quelle strahlt Photonen aus, die durch

eine Schlitzblende fokussiert werden. Die Photonen durchdringen den Prüfkörper und werden in Abhängigkeit der Elektronendichte abgeschwächt. Die abgeschwächte Strahlung wird wiederum durch eine Schlitzblende geleitet und trifft auf den Detektor. Dieser registriert die ankommenden Photonen und gibt sie als Zählrate aus. Die Zählrate der γ -Durchstrahlung wird um so geringer, je Dichter das Material ist. Demnach ist die Abschwächung der Strahlung von der Dichteänderung im Prüfkörper abhängig, die auch durch eintretendes Wasser verursacht wird. Durch Messung der Reduzierung der Zählrate der Strahlung, die infolge Photonenabsorption und Comptonstreuung durch das Material abgeschwächt wurde, kann der Wassergehalt abgeleitet werden [143, 144].

Zur Bestimmung der Feuchteprofile mit γ -Durchstrahlung wurde die γ -Anlage des Fraunhofer Instituts für Bauphysik in Holzkirchen verwendet. Die Gammastrahlenanlage enthält neun übereinander angeordneten Americium-241-Linienquellen (Halbwertszeit 458 Jahre). Die Quellen besitzen eine Gesamtstrahlungsaktivität von 15 GBq. Die abgestrahlte Energie beträgt etwa 60 keV. Die Photonen, die den Probekörper durchdringen, werden von einem thalliumdotierten Natrium-Jodid-Dünnkristall-Detektor registriert.

Der Prüfkörper wird auf einem Probeschlitten zwischen die Quelle und den Detektor gefahren. Der Schlitten wird durch einen Schrittmotor angetrieben. Als Schrittweite wurde 1 mm gewählt, als Messzeit 5 s. Eine Verlängerung der Messzeit führte nicht zu einer wesentlichen Verbesserung der Genauigkeit des Messergebnisses. Die Spaltbreite der Schlitzblende zur Fokussierung der Strahlung betrug bei allen Messungen 1 mm. Die Steuerung des Schrittmotors und die Messwerverfassung erfolgt über einen PC.

Der Wassergehalt w [kg/kg] wird bestimmt, indem die Anzahl der durch einen Prüfkörper der Dicke d [m] durchgelassenen Photonen N_{tr} [cps] einer bestimmten Energie im trockenen Probekörperzustand mit der im feuchten Zustand N [cps] nach bestimmten Saugzeiten nach Gleichung 42 ausgewertet wird.

$$w = \frac{\ln\left(\frac{N_{tr}}{N}\right)}{d \cdot \rho_0 \cdot \beta}$$

Gleichung 42

Die Massenabschwächungskoeffizienten β [m²/kg] können abhängig von der Strahlungsenergie des γ -Strahlers und der chemischen Zusammensetzung der Materialien aus den Daten des National Institute Of Standards and Technology (NIST) [145] entnommen werden. Die Rohdichte des Probekörpers im trockenen Zustand ρ_{tr} [kg/m³] wird mit der Trockenmessung bestimmt.

3.3.3.5 Interpretation der gemessenen Eindringprofile

Abbildung 35 zeigt jeweils im Vergleich die mittels Kernspinresonanz und Gammadurchstrahlung gemessenen Eindringprofile des Wassers in ein Mörtelprisma (links, Rezeptur (A), Tabelle 1) bzw. in ein Prisma aus Sander Sandstein (rechts) während eines Saugversuchs. Die Prismen saugten jeweils für einen Zeitraum von 46 Stunden über eine Stirnseite Wasser auf (Abbildung 35, oben). Im Anschluss daran wurde die Wasserzufuhr unterbrochen und das Weiterleiten des Wassers im Probeninneren untersucht (Abbildung 35, unten). Der Wasserverlust in den Proben war dabei vernachlässigbar gering (vgl. Abbildung 31). Der Faktor F zur Berechnung des Wassergehalts aus dem gemessenen NMR-Signal wurde dabei jeweils durch Auswertung des ersten Saugprofils bestimmt.

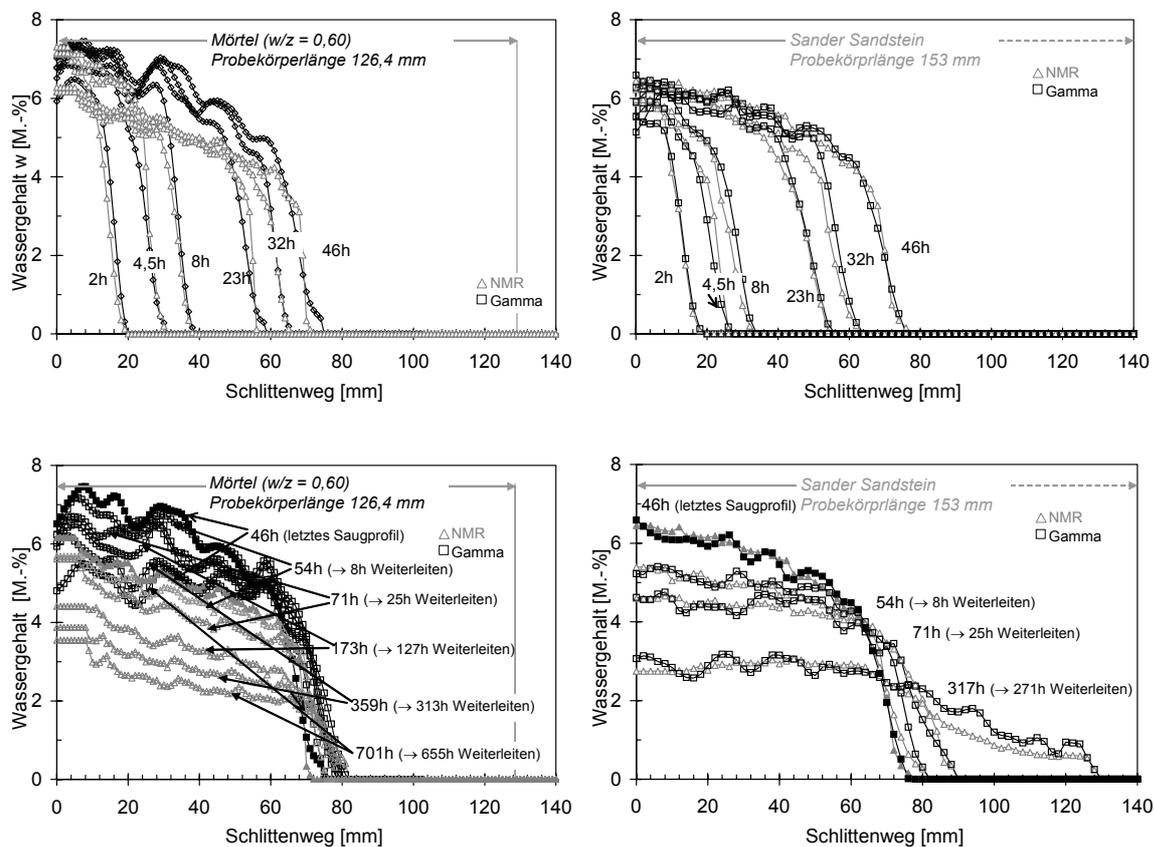


Abbildung 35: Vergleich der mittels Kernspinresonanz (NMR) und Gammadurchstrahlung gemessenen Wassergehaltsprofile im Mörtel (links) und im Sander Sandstein (rechts); oben: Saugversuch, unten: Weiterverteilungsversuch

Unabhängig von der Art des verwendeten Messverfahrens werden im Sander Sandstein vergleichbare Wassergehaltsprofile mit den beiden Messmethoden ermittelt (Abbildung 35, rechts). Im Mörtel hingegen nimmt der mit Kernspinresonanz gemessene Wassergehalt im Vergleich zum Wassergehalt aus der Gammadurchstrahlungsmessung stetig ab (vgl. Abbildung 35, links). Besonders deutlich wird dies beim Vergleich der mittels NMR und

Gammadurchstrahlung ermittelten Wassergehalte während des Weiterleitens zum jeweils gleichen Zeitpunkt (Abbildung 35, unten links). Nach einer Versuchsdauer von 701 h werden durch das NMR-Gerät nur noch rd. 50 % des Wassergehalts erfasst.

Die Fläche unter den Eindringprofilen aus der Gammadurchstrahlungsmessung, welche dem Gesamtwassergehalt des Probekörpers entspricht, stimmt mit der über Wägung ermittelten integralen Wasseraufnahme überein.

Abbildung 36, links stellt dar, wie viel Prozent des aufgenommenen Wassers (gravimetrisch ermittelt) durch die NMR- bzw. durch die Gammamessung erfasst wurden. Während mit fortschreitender Versuchsdauer durch die NMR-Messung ein zunehmender Anteil an Wasser infolge Umverteilung in den Gelporenraum nicht erfasst wird, kann durch die Gammadurchstrahlung der tatsächliche Wassergehalt in der Probe auch für die Mörtelprismen abgebildet werden. Der Sander Sandstein weist ein wesentlich gröberes Porengefüge auf (vgl. Abbildung 24), so dass hier der Einfluss der wenigen Poren sehr kleinen Durchmessers keine Auswirkungen auf die Vergleichbarkeit der beiden Messverfahren hat.

Die maximalen Eindringtiefen, die aus den gemessenen Eindringprofilen beider Verfahren herausgelesen werden, sind zu jedem Versuchszeitpunkt vergleichbar, da beim Eindringen des Wassers zunächst die großen Poren saugen. Das dort enthaltene Wasser wird durch beide Messverfahren erfasst.

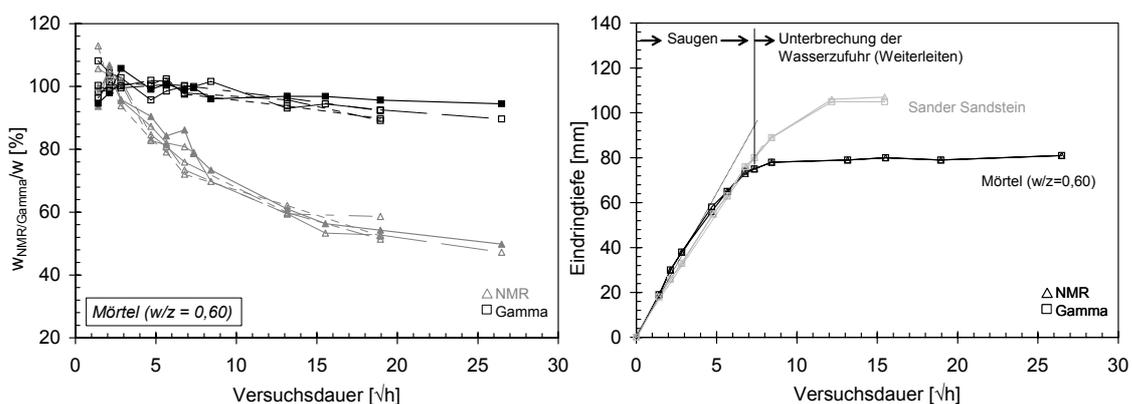


Abbildung 36: links: Anteil an gemessenem Wasser mittels Kernspinresonanz (grau) bzw. mittels Gammadurchstrahlung an tatsächlich in der Mörtelprobe enthaltenem Wasser, rechts: maximale Wassereindringtiefen in Abhängigkeit der Wurzel der Versuchszeit herausgelesen aus den gemessenen Eindringprofilen. Die gestrichelten Linien stellen jeweils den Verlauf der Eindringtiefe dar, der bei einem Eindringverhalten nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz zu erwarten wäre

Die Entwicklung der Wassergehaltsprofile (Abbildung 35, oben) und die Gewichtszunahme beim Saugen (Abbildung 31) zeigen, dass das übliche Wurzel-Zeit-Gesetz für kapillares Saugen im Sander Sandstein gültig ist, im untersuchten Mörtel jedoch nicht. Aus den

abgebildeten Eindringprofilen aus den Messungen mittels Kernspinresonanz wird deutlich, dass ab einer Saugzeit von 8 h trotz anhaltender Benetzung der Stirnseite des Probekörpers der Wassergehalt an der Saugseite abnimmt. Bis zu diesem Zeitpunkt folgt das Eindringverhalten etwa linear zur Wurzel der Zeit (vgl. Abbildung 36, rechts). Mit fortschreitender Versuchsdauer, die bedingt, dass ein größerer Anteil an Wasser in den Gelporenraum umverteilt wird, weicht das Eindringverhalten zunehmend vom Wurzel-Zeit-Gesetz ab. Dies kann als Hinweis darauf gedeutet werden, dass der Selbstabdichtungseffekt in engem Zusammenhang mit der Umlagerung des eindringenden Wassers in den Gelporenraum steht.

Nach Unterbrechung der Wasserzufuhr beginnt der Prozess des Weiterleitens, bei welchem die kleinen Poren aufgrund der höheren Saugspannung die größeren entleeren (vgl. Kapitel 2.4.4). Dies hat zur Folge, dass der hohe Wassergehalt auf der Saugseite abnimmt und das Wasser tiefer in den Probekörper eindringt. Das Beispiel des Sander Sandsteins verdeutlicht diesen Mechanismus (vgl. Abbildung 35, unten rechts). Bei Abdichtung der Probekörper bleibt der Gesamtwassergehalt, d.h. die Flächen unter den Wassergehaltsprofilen konstant. Die Geschwindigkeit des Weiterleitens ist aufgrund des zunehmenden viskosen Widerstands mit abnehmender Porengröße deutlich langsamer als die Geschwindigkeit des kapillaren Saugens bei Benetzung.

Die Eindringprofile des untersuchten Mörtelprismas zeigen, dass das Wasser nach Unterbrechung der Wasserzufuhr nur geringfügig tiefer in den Probekörper hinein transportiert wird. Nach einem Zeitraum von etwa 130 h bleibt die Eindringfront bei einer Eindringtiefe von ca. 80 mm praktisch stehen. Porengrößenbereiche, die den Prozess des Weiterleitens maßgeblich bestimmen, scheinen im Mörtel nach Tabelle 1 nur in geringer Anzahl vorhanden zu sein. Entsprechende Beobachtungen konnten für die weiteren Betonrezepturen nach Abbildung 23 gemacht werden, vgl. Anhang.

3.3.3.6 Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten

Aus den gemessenen Wassereindringprofilen wurden die für das Material geltenden wassergehaltsabhängigen Kapillartransportkoeffizienten $D_W(w)$ berechnet. Wie in Kapitel 2.4.4 beschrieben, setzt die Anwendbarkeit der Beschreibung des Transports mit Hilfe eines Diffusionsansatzes, der die wassergehaltsabhängigen Transportkoeffizienten beinhaltet, ein Eindringverhalten proportional der Wurzel der Zeit voraus. Diese Voraussetzung ist für den Sander Sandstein gegeben, für den zuvor dargestellten Mörtel und sämtliche Betonrezepturen nach Abbildung 23 jedoch nur für einen sehr kurzen Zeitraum der kapillaren Wasseraufnahme. Die Kapillartransportkoeffizienten für die zementgebundenen Materialien wurden

aus diesem Grund aus den Eindringprofilen bestimmt, die in einem Zeitraum gemessen wurden, in dem ein Eindringen nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz erfolgte (vgl. Abbildung 37, unten). Die Kenngrößen, die für den Selbstabdichtungseffekt maßgeblich sind, werden separat ermittelt (vgl. Kapitel 4.7).

Aus dem Zusammenhang zwischen Flüssigtransportstromdichte und Wassergehaltsgradient nach Gleichung 18 können die Transportkoeffizienten ermittelt werden. Der Wassergehaltsgradient lässt sich dabei für jeden Messzeitpunkt und jede Messstelle aus den gemessenen Profilen berechnen. Die Flüssigtransportstromdichte \dot{m} wird nach Gleichung 43 aus zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten t_1 und t_2 gemessenen Eindringprofilen bestimmt.

$$\dot{m}\left(x, t = \frac{t_1 + t_2}{2}\right) = \frac{1}{2(t_2 - t_1)} \int_{a=x}^{\text{Saugfront}} (w_{a,t_2} - w_{a,t_1}) da$$

Gleichung 43

Abbildung 37, oben zeigt für die zuvor dargestellten Mörtelprismen und Prismen aus Sander Sandstein die ermittelten Transportkoeffizienten D_{WS} für den Saugvorgang. Entsprechend der Materialstreuung, die sich in der Wasseraufnahme, vgl. Abbildung 37, unten, bemerkbar macht, streuen die aus den Wassereindringprofilen ermittelten Transportkoeffizienten in erheblichem Maß. Vor allem am Beispiel des Sander Sandstein wird dies deutlich. Schon in der üblichen Darstellung der Koeffizienten im logarithmischen Maßstab, vgl. Abbildung 37, oben, die die Streuungen im höheren Wertebereich in der Darstellung gering erscheinen lässt, zeigt sich eine große Streubreite der Werte. Bei einem Sättigungsgrad von $w/w_f = 0,2$ ergibt sich bei einem mittleren Transportkoeffizienten von $D_{WS} = 9,7 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ eine Variationskoeffizient von rd. 9,5 %. Der entsprechende Variationskoeffizient bei $w/w_f = 0,67$ liegt hingegen bei 65 % (Mittelwert: $D_{WS} = 1,7 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$). Für den untersuchten Mörtel ergeben sich bei den Sättigungsgraden w/w_{f50} von 0,2 bzw. 0,67 Variationskoeffizienten von 14 % bzw. 43 % bei entsprechenden Mittelwerten der Transportkoeffizienten von $5,6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ bzw. $3,5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

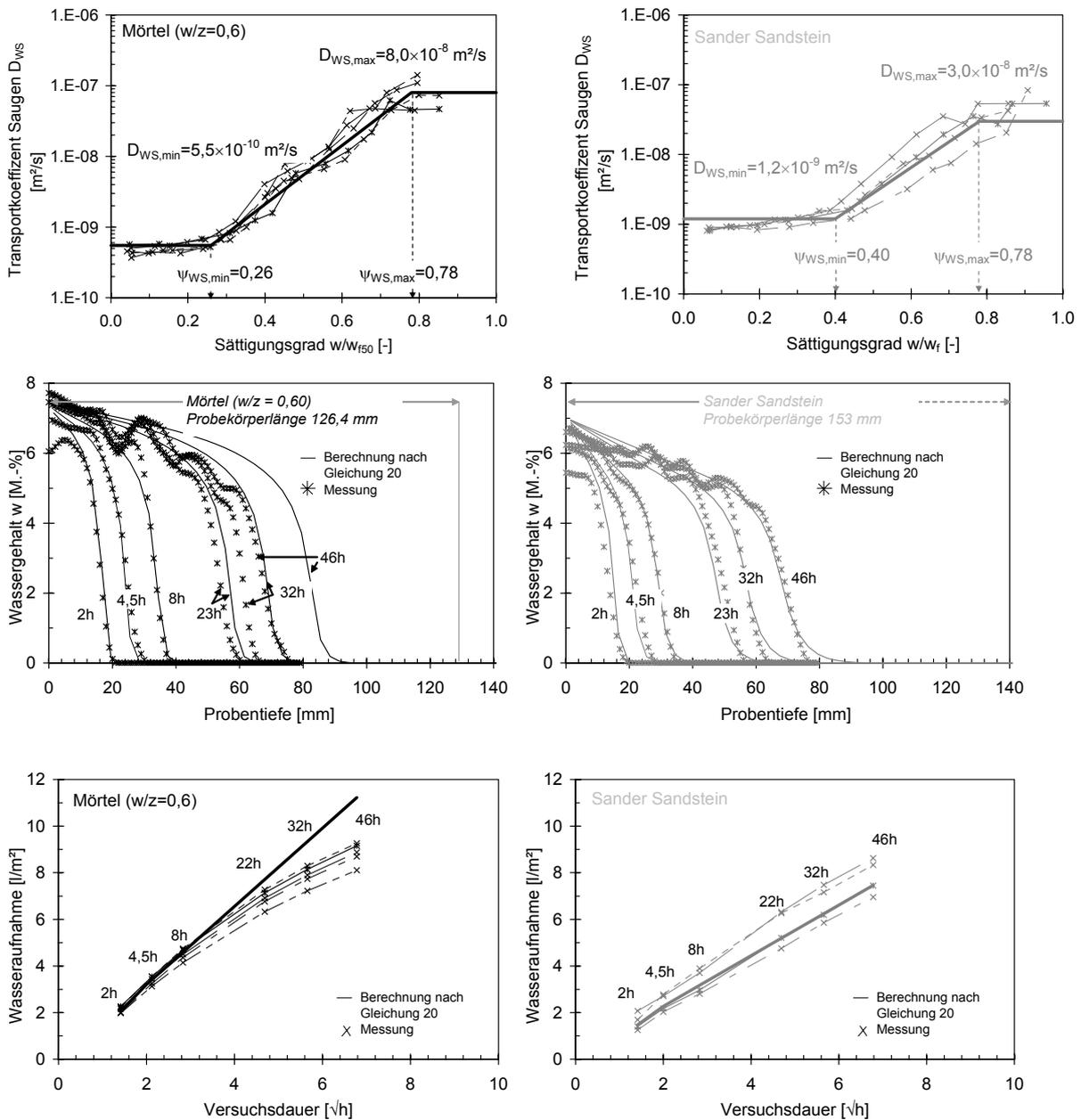


Abbildung 37: links: Mörtel $w/z=0,6$, vgl. Tabelle 1 (A), rechts: Sander Sandstein; oben: Transportkoeffizienten, ermittelt aus Wassereindringprofilen nach Gleichung 43 für 5 Mörtelprismen bzw. 4 Sandsteinprismen, fett gedruckt: den folgenden Berechnungen zugrunde liegende Transportkoeffizienten; Mitte und unten: nach Gleichung 18 berechnetes Eindringverhalten im Vergleich zu den Messergebnissen

Entsprechend Gleichung 18 wurde das Eindringverhalten mit Transportkoeffizienten berechnet, deren wassergehaltsabhängige Größe entsprechend Abbildung 37, oben durch $D_{WS,min}$ und $D_{WS,max}$ bei einem Sättigungsgrad $\Psi_{WS,min}$ bzw. $\Psi_{WS,max}$ charakterisiert wird (fett gedruckte Linie). In den mittig dargestellten Diagrammen werden jeweils die daraus resultierenden berechneten Eindringprofile den gemessenen Eindringprofilen gegenübergestellt. Im Zeitraum der Gültigkeit des Wurzel-Zeit-Gesetzes (2 h-, 4,5 h- und 8 h- Profile),

lässt sich das Eindringverhalten mit Hilfe der gewählten Transportkenngrößen sehr gut berechnen. Für längere Saugzeiten, ergeben sich für das Eindringverhalten des Sander Sandsteins weiterhin gut übereinstimmende Profile. Das Eindringen des Wassers in den Mörtel wird jedoch mit fortschreitender Zeit durch die Berechnung nach Gleichung 18 nicht korrekt berechnet. Mit fortschreitender Zeit eilt die berechnete der gemessenen Eindringfront voraus, was auf Mechanismen, die den Selbstabdichtungseffekt auslösen, zurückzuführen ist. Abbildung 37, unten verdeutlicht, inwieweit die Streuung der Materialeigenschaften an sich bezüglich des Ergebnisses der Rechnung mit den gewählten Transportkenngrößen einzuordnen sind. Für die Berechnung des Sander Sandsteins ergibt sich im dargestellten Beispiel nach einem Berechnungszeitraum von 46 Stunden eine durch die Berechnung unter- bzw. überschätzte aufgenommene Wassermenge von betragsmäßig rd. 16 % bzw. 7 %.

Die Transportkoeffizienten D_{WW} für den Transport nach Unterbrechung der Wasserzufuhr lassen sich für den Mörtel aus den gemessenen Profilen durch $D_{WW,min} = 8,0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ und $D_{WW,max} = 2,0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ bei einem Sättigungsgrad $\Psi_{WW,min} = 0,24$ bzw. $\Psi_{WW,max} = 0,56$ beschreiben. Die entsprechenden charakteristischen Werte zur Beschreibung der wassergehaltsabhängigen Transportkenngrößen für den Sander Sandstein ergeben sich zu: $D_{WW,min} = 7,0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $D_{WW,max} = 3,0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $\Psi_{WW,min} = 0,35$ und $\Psi_{WW,max} = 0,47$.

Die entsprechenden Werte für die Rezepturen nach Abbildung 23 sind in Tabelle A3, Spalte 3-6 im Anhang enthalten.

3.3.3.7 Einfluss von Salzen auf den Kapillartransport

Nach [1] basiert die Temperaturabhängigkeit des Flüssigtransportkoeffizienten D_W für Wasser im Wesentlichen auf der Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung und der Viskosität des Wassers. In Wasser gelöste Salze erhöhen sowohl die Oberflächenspannung wie auch die Viskosität des Wassers, wobei die Erhöhung der Viskosität wesentlich ausgeprägter ist als die Erhöhung der Oberflächenspannung (vgl. Abbildung 20). Demzufolge ist für die Flüssigtransportkoeffizienten von salzhaltigem Wasser ebenfalls eine Konzentrationsabhängigkeit zu erwarten.

Der Einfluss der Oberflächenspannung und der Viskosität auf die Eindringgeschwindigkeit und somit auf die Transportkoeffizienten D_W wurde zunächst anhand von Saugversuchen mit Hexan, Methanol, Ethanol, Isopropanol, und Ethylenglycol untersucht. Anstelle von Salzlösungen wurden diese Flüssigkeiten gewählt, da die physikalischen Eigenschaften der verwendeten Flüssigkeiten deutlich stärker voneinander abweichen als dies beim Vergleich von Wasser mit Salzlösungen unterschiedlicher Konzentration der Fall ist und so die

Relevanz der einzelnen Eigenschaften deutlicher hervortritt. Sowohl die Oberflächenspannung als auch die Viskosität der Flüssigkeiten können Tabelle 2, Spalte 2 und 3 entnommen werden.

Für die Versuche wurden Mörtelprismen (Rezeptur Tabelle 1 (B)) mit einer Grundfläche von rd. $45 \times 45 \text{ mm}^2$ und einer Länge von $124 \text{ mm} (\pm 1 \text{ mm})$ verwendet. Die Vorbehandlung der Prismen entsprach der Standardvorlagerung inkl. Beschichtung der Mantelflächen. Bei Versuchsbeginn hatten die Proben ein Alter von rd. einem Jahr.

Abbildung 38 links zeigt das über die Saugfläche aufgenommene Flüssigkeitsvolumen f in Abhängigkeit von der Wurzel der Zeit. Die Eindringgeschwindigkeiten der untersuchten Flüssigkeiten unterscheiden sich deutlich. Der Einfluss, den Oberflächenspannung und Viskosität auf das Eindringverhalten der Flüssigkeiten haben, macht Abbildung 38, rechts deutlich. Hierbei wurde der Einfluss von Oberflächenspannung und Viskosität entsprechend des im Bild dargestellten Zusammenhangs auf die Eigenschaften der Referenzflüssigkeit Hexan bezogen. Das auf die Eigenschaften von Hexan bezogene Flüssigkeitsvolumen f^*_{FK} der einzelnen Flüssigkeiten erfolgt nach Berücksichtigung dieses Zusammenhangs entsprechend dem Verlauf der Referenzflüssigkeit Hexan.

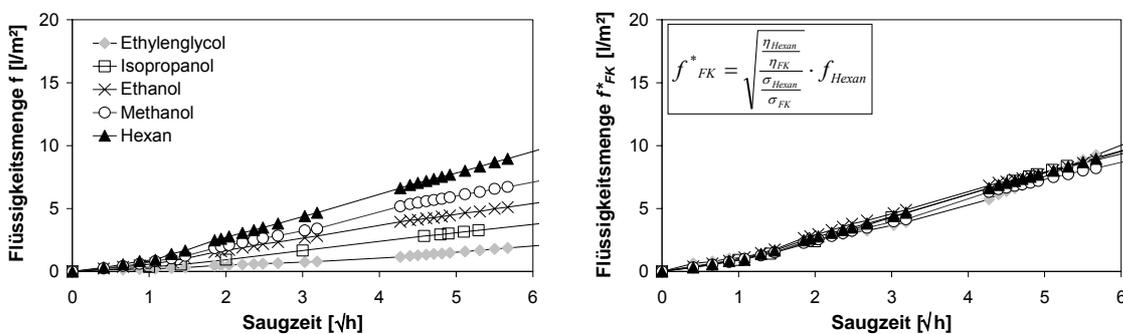


Abbildung 38: links: Während eines Saugversuchs aufgenommene Flüssigkeitsmenge in Abhängigkeit der Wurzel der Saugzeit, rechts: aufgenommene Flüssigkeitsmenge f^*_{FK} bezogen auf die physikalischen Eigenschaften von Hexan

Für die Transportkoeffizienten D_W ergibt sich hieraus in Analogie zu dem von Garrecht [3] hergeleiteten Zusammenhang zwischen Gleichung 27 und Gleichung 28 folgender Einfluss der physikalischen Eigenschaften auf den Transportkoeffizienten, bei welchem der Benetzungswinkel der Flüssigkeit eine untergeordnete Rolle spielt:

$$D_{W, Lsg.}(c_{M, -\%}) = \frac{\sigma_{Lsg.}(c_{M, -\%})}{\sigma_{H_2O}} \cdot \frac{\eta_{H_2O}}{\eta_{Lsg.}(c_{M, -\%})} \cdot D_{W, H_2O}$$

Um zu überprüfen, ob Gleichung 44 auf die Kapillarleitung von Salzlösungen übertragbar ist, wurden jeweils fünf Saugversuche mit 3,3 M.-%, 8,7 M.-% und 26,4 M.-% NaCl-Lösung an Prismen mit einer Querschnittsfläche von rd. $48 \times 48 \text{ mm}^2$ und eine Länge von 127 mm ($\pm 4 \text{ mm}$) durchgeführt. Die Rezeptur ist Tabelle 1 (A) zu entnehmen, die Vorbehandlung der Prismen entsprach der Standardvorlagerung inkl. Beschichtung der Mantelflächen. Bei Versuchsbeginn hatten die Proben ein Alter von rd. 8 Monaten.

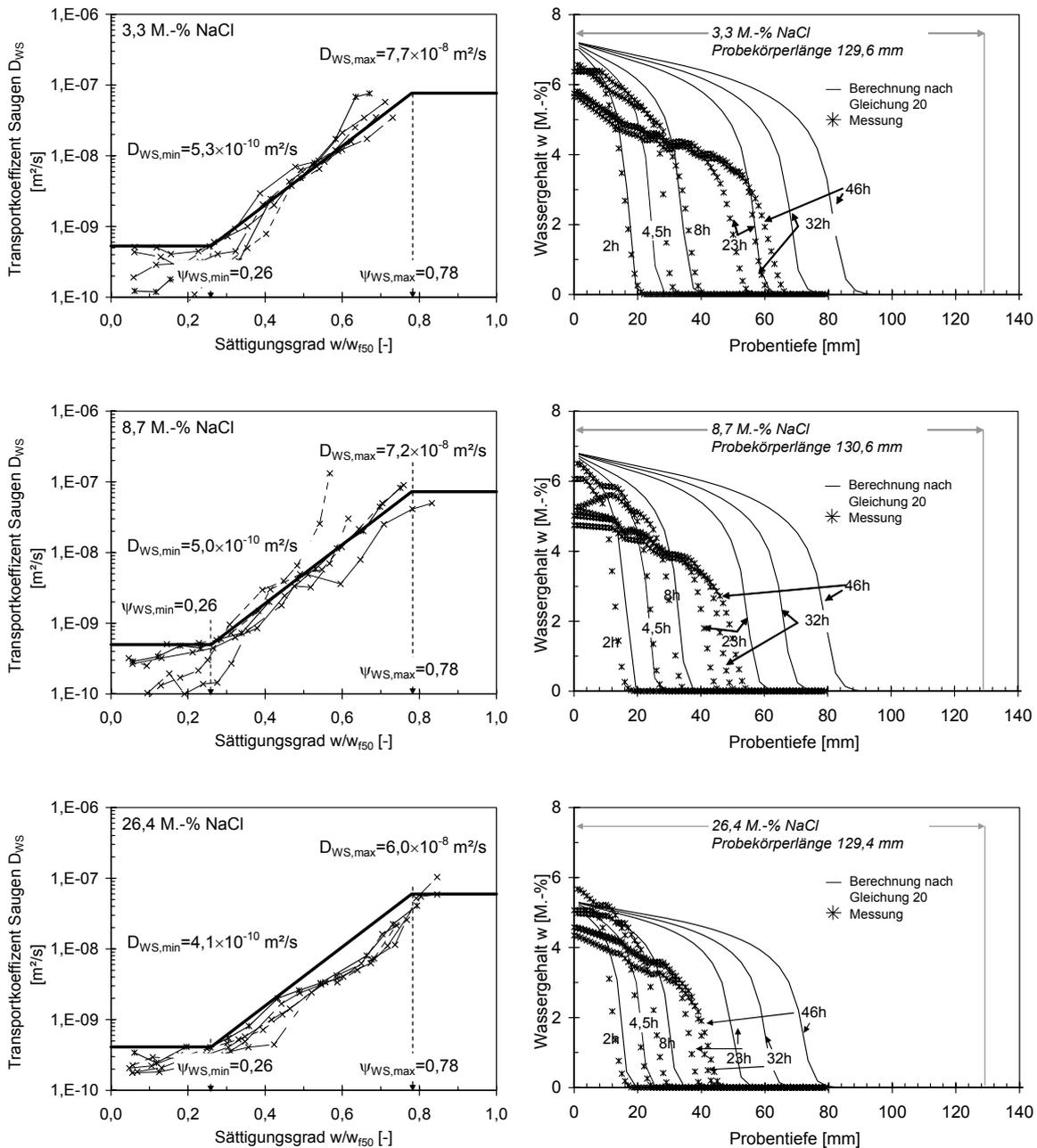


Abbildung 39: links: Transportkoeffizienten, ermittelt aus Wassereindringprofilen nach Gleichung 43 für 5 Mörtelprismen, fett gedruckt: nach Gleichung 44 genäherte und den im Bild rechts dargestellten Berechnungen zugrunde liegende Transportkoeffizienten; rechts: nach Gleichung 18 berechnetes Eindringverhalten im Vergleich

zu den Messergebnissen. oben: 3,3 M.-% NaCl-Lösung, Mitte: 8,7 M.-% NaCl-Lösung, unten: 26,4 M.-% NaCl-Lösung

Die bei einer bestimmten Lösungskonzentration maßgebenden Transportkoeffizienten wurden einerseits nach Gleichung 44 anhand der Transportkoeffizienten für Wasser (vgl. Kapitel 3.3.3.6) genähert, andererseits anhand der gemessenen NMR-Profile entsprechend 3.3.3.6 berechnet. Abbildung 39, links zeigt die entsprechenden Transportkoeffizienten (fett: genähert, dünn: aus gemessenen Profilen berechnet). Abbildung 39, rechts zeigt die nach Gleichung 18 berechneten Eindringprofile für jeweils einen Probekörper im Vergleich zu den mittels NMR gemessenen Wassereindringprofilen. Die den berechneten Profilen zugrunde liegenden Transportkoeffizienten wurden in Abhängigkeit der NaCl-Konzentration nach Gleichung 44 aus den Transportkoeffizienten für Wasser genähert.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Eindringverhalten solange die Kapillarleitung durch den Selbstabdichtungseffekt noch nicht beeinträchtigt ist (kurze Saugzeiten), unter Berücksichtigung von Transportkoeffizienten nach Gleichung 44 mit Gleichung 18 in guter Näherung beschrieben werden kann.

3.3.4 Ermittlung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ wurde anhand von zwei Versuchsserien in Anlehnung an DIN EN ISO 12572:2001 ermittelt. Zur Ermittlung des Diffusionsstroms wurde die Masseänderung bis zum Erreichen eines konstanten Massestroms im Abstand von zwei Wochen gravimetrisch mit einer Genauigkeit von 10^{-2} g ermittelt.

Die Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ der Versuchsreihe 1 (Rezepturen nach Abbildung 23) erfolgte an Zylindern mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Dicke von 45 mm (Betone) bzw. 25 mm (Mörtel). Nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte im Klima 23 °C / 50 % r.F. im Anschluss an die Standardlagerung wurde der Diffusionsstrom jeweils an einer Probe nach Prüfbedingung A (dry-cup: 23°C; 0-50% r.F.) im Trockenbereich und an einer Probe nach Prüfbedingung C (wet-cup: 23°C; 50-93 % r.F.) im Feuchtbereich bestimmt. Die Probekörper der Versuchsreihe 1 hatten vor Versuchsbeginn ein Alter von mindestens einem Jahr.

Liegen im Porenraum eines Baustoffs Salze in kristalliner Form vor, wird der Diffusionsprozess behindert. Die Abnahme des Diffusionskoeffizienten bzw. die dementsprechende Zunahme der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ in Abhängigkeit vom Kristallvolumen der Salze wurde in Versuchsreihe 2 an Zylindern aus Mörtel (Zusammensetzung Tabelle 1 (B)) und aus Sander Sandstein untersucht. Die Zylinder mit

einem Durchmesser von 100 mm und einer Dicke von rd. 25 mm (Mörtel) bzw. rd. 10 mm (Sander Sandstein) saugten unterschiedliche Salzlösungen und wurden im Anschluss daran bei 105 °C (Sander Sandstein) bzw. 40 °C (Beton) bis zur Massekonstanz getrocknet, so dass die Salze im Porenraum in kristalliner Form vorlagen. Im Sander Sandstein wurden so Natriumchloridgehalte zwischen 0 und 1,6 M.-% sowie Natriumsulfatgehalte zwischen 0 und 1,4 M.-% bezogen auf den trockenen Stein erreicht. Der Mörtel wies Chloridgehalte zwischen 0 und 1,8 M.-% bezogen auf die Gesamtmasse des Mörtels auf (Natriumchloridgehalt zwischen 0 und 2,9 M.-%). Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ wurde nach DIN EN ISO 12572:2001, Prüfbedingung A (dry-cup: 23°C; 0-50% r.F.) im Trockenbereich bestimmt. Nach Gleichung 45 wurde aus der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ ein Diffusionskoeffizient D_{WD} ermittelt:

$$D_{WD} = \frac{\delta_a}{\mu}$$

Gleichung 45

Der Diffusionsleitkoeffizient von Wasserdampf in Luft δ_a [kg/(m·s·Pa)] wird nach Gleichung 6 berechnet, so dass der Diffusionskoeffizient D_{WD} [kg/(m·s·Pa)] dem Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient δ nach DIN EN ISO 12572:2001 entspricht. Durch die Wahl der Prüfbedingung A wurde sichergestellt, dass das Salz im Versuchszeitraum vollständig in kristalliner Form vorliegt.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe 1, d.h. sämtliche Wasserdampfdiffusionskoeffizienten μ für die Betone und Mörtel nach Abbildung 23 befinden sich in Tabelle A1, Spalte 11 und 12 im Anhang.

Abbildung 40, links stellt dar, inwieweit sich die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ in Abhängigkeit des Salzgehalts bezogen auf das Gewicht des durchströmten Materials erhöht. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl des Mörtels (A) nach Tabelle 1 erhöht sich ausgehend von einem Wert des salzfreien Materials von rd. 170 (Variationskoeffizient aus 4 Einzelwerten: 6 %) auf einen μ -Wert von rd. 1050 (Variationskoeffizient aus 3 Einzelwerten: 5 %) bei einem Gesamtchloridgehalt von 1,8 M.-%, der in der Darstellung einem Natriumchloridgehalt von 2,9 M.-% entspricht. Der μ -Wert des salzfreien Sander Sandsteins beträgt rd. 50 und erhöht sich mit zunehmendem Salzgehalt: 1,5 M.-% NaCl, $\mu = 130$; 1,0 M.-% Na₂SO₄, $\mu = 65$).

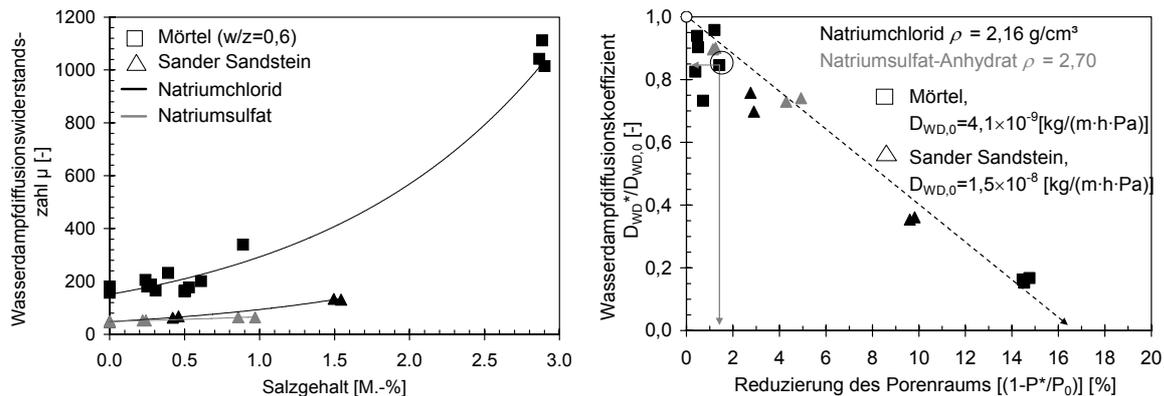


Abbildung 40: links: μ -Werte, ermittelt nach DIN EN ISO 12572:2001 (dry-cup) in Abhängigkeit der aufgenommenen Salzmenge (Salzgehalt [M.-%] bezogen auf das Gesamtgewicht des durchströmten Materials) für den Mörtel w/z = 0,6, vgl. Tabelle 1 (A) und einen Sander Sandstein, rechts: Wasserdampfdiffusionskoeffizienten des salzbelasteten Materials D_{WD}^* im Verhältnis zum Wasserdampfdiffusionskoeffizienten $D_{WD,0}$ des salzfreien Materials in Abhängigkeit der Reduzierung des Transportraums infolge auskristallisierter Salze, wobei für den Mörtel nach Tabelle 1 (A) $P_0 = 0,19$ gilt und für den Sander Sandstein $P_0 = 0,16$

Über die Dichte des kristallinen Natriumchlorids bzw. Natriumsulfat-Anhydrats ($\rho_{\text{NaCl}} = 2,164 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{Na}_2\text{SO}_4} = 2,697 \text{ g/cm}^3$) wurde das Volumen der Salzkristalle und die Reduzierung des Porenraums berechnet. Für den Mörtel wurde dazu zunächst aus dem gemessenen Gesamtchloridgehalt der Proben anhand der Ergebnisse zur Chloridbindung (vgl. Kapitel 3.3.6) der Gehalt an freien Chloriden vor der Trocknung der Probekörper berechnet. Unter der Annahme, dass in der Porenlösung Natriumionen in ausreichender Zahl zur Bildung von Natriumchloridkristallen bei Trocknung zur Verfügung stehen, wurde mit dem Gehalt an freien Chloriden und den zugehörigen Natriumionen der Gehalt und das Volumen der Natriumchloridkristalle nach Trocknung, d.h. vor Beginn der Diffusionsversuchs berechnet. Abbildung 40, rechts zeigt für alle durchgeführten Versuche das Verhältnis des Diffusionskoeffizienten des salzbelasteten Materials bezogen auf den Diffusionskoeffizienten des salzfreien Materials (Mörtel nach Tabelle 1 (A): $4,1 \times 10^{-9} \text{ kg/(m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa)}$, Sander Sandstein: $1,5 \times 10^{-8} \text{ kg/(m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa)}$). So bewirkt bei dem untersuchten Mörtel eine Reduzierung des Porenraums um 1,4 % eine Reduzierung des Wasserdampfdiffusionstransports um rd. 16 % infolge eines Gehalts an freien Chloriden vor Trocknung des Probekörpers von 0,16 M.-% (vgl. Abbildung 40, rechts: markierter Datenpunkt). Hohe Salzgehalte bewirken eine überproportionale Zunahme des Wasserdampfdiffusionswiderstands gegenüber diffundierenden Wassermolekülen. Für die untersuchten Porengefüge ist bei einer Porenraumreduzierung von rd. 16,5 % infolge auskristallisierter Salze von einer kompletten Abdichtung des Gefüges auszugehen. Dies bedeutet, dass bei einer Reduzierung des Porengefüges um rd. 16,5 % die Konnektivität der Poren bereits derart unterbrochen ist, dass kein weiterer durchgängiger Transport mehr stattfinden kann.

3.3.5 Diffusion gelöster Salze

Zur Ermittlung des Diffusionskoeffizienten gelöster Ionen durch das Gefüge des Mörtels aus Tabelle 1 (A) wurde im Anschluss an die Standardvorlagerung ein stationärer Diffusionsversuch in einer Diffusionsapparatur nach Page [146] durchgeführt. Die Probe mit einem Durchmesser von 30 mm und einer Dicke von rd. 4,4 mm wurde dabei zwischen zwei Zellen eingebaut. Durch die notwendige Abdichtung blieb eine durchströmbare Fläche mit einem Durchmesser von rd. 28 mm zur Diffusion erhalten. Die Lösung in Zelle 1 enthielt zu Versuchsbeginn 0,05 mol KOH und 1 mol NaCl, Zelle 2 enthielt 0,15 mol KOH.

Nach dem Start des Diffusionsversuchs wurden Lösungsproben während eines Zeitraumes von rd. 580 Stunden aus den beiden Zellen entnommen und analysiert. Aus der Änderung der jeweiligen Ionenkonzentration in der Zelle 2 und der Konzentrationsdifferenz zwischen beiden Zellen, sowie Fläche und Dicke der durchströmten Probe wurde der effektive Diffusionskoeffizient D_{eff} [m²/s] berechnet. D_{eff} ist ein effektiver Wert, der von der Porosität und Tortuosität des Mörtels und der Ionenaktivität abhängt, Einflüsse aus Kapillarleitung und Bindung sind nicht enthalten.

Mit Hilfe des Versuchs wurde lediglich der Diffusionskoeffizient für Natrium bestimmt. Aus dem von Brodersen [109] anhand von Versuchen an Zementsteinscheiben aus Portlandzement mit einem Wasserzementwert von 0,60 ermittelten Verhältniswert $D_{eff, Na} / D_{eff, Cl}$ von 0,51 (vgl. Kapitel 2.8.2) wurde somit der Diffusionskoeffizient für das Chlorid abgeschätzt. Der gemessene Wert für Natrium beträgt $D_{eff, Na} = 1,21 \times 10^{-12}$ m²/s, so dass auf dieser Grundlage mit $D_{eff, Na} / D_{eff, Cl} = 0,51$ für den effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten (Mörtel nach Tabelle 1A)) ein Wert von $D_{eff, Cl} = 2,37 \times 10^{-12}$ m²/s berechnet wurde.

Die Diffusionskoeffizienten für die Betone /1/ bis /25/ nach Abbildung 23 wurden mittels Migrationsversuchen im Alter von 28, 56, 91, 182 und 365 Tagen von Lay [138] bestimmt. Die entsprechenden Ergebnisse im Prüfalter von einem Jahr sind in Tabelle A1, Spalte 13 im Anhang zusammengefasst. Für die Mischungsrezepturen /28/-/33/ sind entsprechende Werte im Rahmen dieser Arbeit ermittelt worden und ebenfalls in Tabelle A1, Spalte 13 im Anhang aufgeführt. Die Prüfung erfolgte analog dem Vorgehen in [138]. Der Versuchsaufbau sowie die detaillierte Vorgehensweise zur Bestimmung des Diffusionskoeffizienten D_{RCM} werden in [138] ausführlich beschrieben.

3.3.6 Beobachtung der Chloridbindung

Zur Bestimmung des zeitlichen Verlaufs der Chloridbindung und der Abhängigkeit von der Chloridkonzentration der Porenlösung wurde in Versuchen die Veränderung des

Verhältnisses von freiem zu gebundenem Chlorid bestimmt. Dazu wurden Mörtelscheiben (Zusammensetzung Tabelle 1 (A)) mit Abmessungen von ca. $5 \times 150 \times 100 \text{ mm}^3$ im Anschluss an die Standardvorlagerung zunächst bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet. Da die Carbonatisierung des Mörtels einen Einfluss auf das Bindevmögen des Mörtels hat, wurde diese durch CO_2 -freie Trocknung verhindert. Anschließend wurden die Proben für eine Dauer von 2 Stunden in Natriumchloridlösungen unterschiedlicher Konzentration (3 und 8,7 M.-%) gelegt. Abbildung 39, rechts zeigt, dass die Eindringtiefe der Lösungen bis zu diesem Zeitpunkt bereits einen Wert von $> 12 \text{ mm}$ erreicht. Die geringe Dicke (5 mm) der Proben gewährleistete somit eine gleichmäßige Verteilung der Natriumchloridlösung in der gesamten Probe. Danach wurden die Proben so gelagert, dass der Feuchte- und Chloridgehalt konstant blieben und ein CO_2 -Zutritt ausgeschlossen war. Das in der Probe vorhandene Chlorid konnte langsam im Zementstein gebunden werden. Zu definierten Zeiten wurden an jeweils drei Proben der Gesamtchloridgehalt s_{ges} [kg/m^3] und der Anteil freier Chloride s_f bestimmt. Der Gesamtchloridgehalt s_{ges} wurde nach Trocknung mittels Salpetersäureaufschluss ermittelt. Zur Bestimmung des freien Chloridgehalts s_f wurde Porenwasser ausgepresst und chemisch analysiert. Die Verfahrensbeschreibung zum Auspressen der Porenlösung ist in [147] beschrieben. Aus der Differenz des Gesamtgehalts s_{ges} und des Gehalts an freiem Chlorid s_f wurde der zeitliche Anstieg des gebundenen Chlorids s_g bestimmt.

Die Koeffizienten zur Beschreibung der Bindungskinetik nach Gleichung 31 wurden aus den gemessenen Daten (s_{ges} , s_f) bestimmt. Abbildung 41, links zeigt die Versuchsergebnisse für Konzentrationen der Ausgangslösungen von 3 bzw. 8,7 g NaCl/ 100 g Wasser, wobei die dargestellten Messpunkte jeweils den zu den einzelnen Zeitpunkten gemessenen Anteil an gebundenem und freiem Chlorid anzeigen. Der Gesamtchloridgehalt bei einer Konzentration der Beaufschlagungslösung von 3 M.-% NaCl betrug $s_{ges}=4,0 \text{ kg/m}^3$, bei der 8,7 M.-%-Lösung betrug der Gesamtchloridgehalt $11,4 \text{ kg/m}^3$. Die Versuchsergebnisse lassen sich anhand von Gleichung 31 mit den entsprechenden Koeffizienten ($s_{g,max}=5,3 \text{ kg/m}^3$, $t_k=2 \text{ d}$, $k_s=3$) beschreiben. Abbildung 41, rechts zeigt die Bindungsisotherme, berechnet nach kurzer Chloridbelastungsdauer (2,1 Tage) und nach „langer“ Belastungsdauer (35 Tage), die den entsprechenden Messwerten gegenübergestellt sind. In Abhängigkeit vom Chloridangebot ist das Bindungsverhalten nach gleichem Belastungsalter unterschiedlich ausgeprägt.

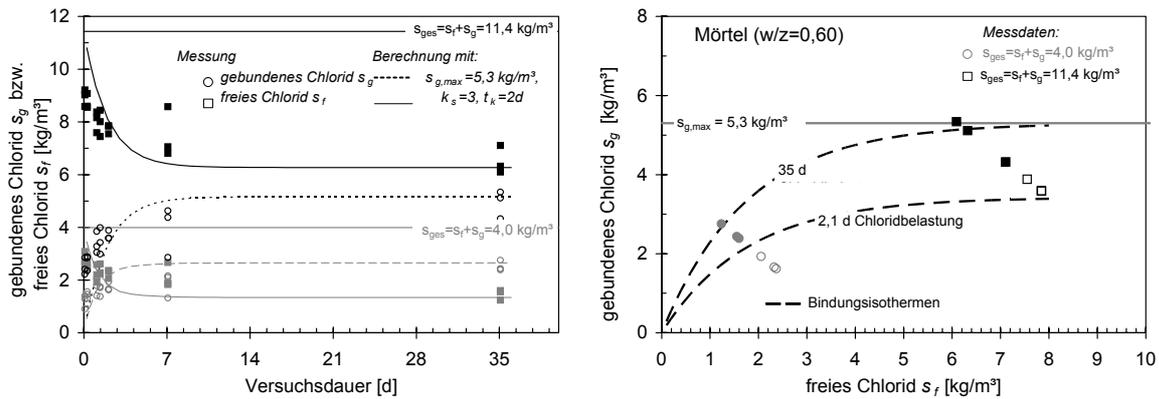


Abbildung 41: links: zeitabhängiges Bindungsverhalten von Chloridionen für den Mörtel mit einem w/z-Wert von 0,60 nach Tabelle 1 (A) bei einem Gesamtchloridgehalt von 4 kg/m^3 (Konzentration der Ausgangslösung 3,3 M.-% NaCl) bzw. $11,4 \text{ kg/m}^3$ (Konzentration der Ausgangslösung 8,7 M.-% NaCl), rechts: Bindevermögen nach $t = 2,1$ bzw. 35 Tagen in Abhängigkeit des Angebots an freiem Chlorid

4 URSACHEN DER SELBSTABDICHTUNG

4.1 Versuchsmatrix

Voraussetzung für die Entwicklung eines Modells zur Beschreibung des Transports von Wasser und Salzen durch das Porengefüge ist die Kenntnis der maßgebenden Ursachen der Selbstabdichtung, deren Einflussgrößen sowie die Auswirkungen unterschiedlichster Randbedingungen auf die Reduzierung des Flüssigkeitstransports. Die Selbstabdichtung zementgebundener Materialien gegenüber eindringenden Flüssigkeiten wird maßgeblich durch die in Abbildung 42 aufgeführten Mechanismen erklärt (vgl. Kapitel 2.2.2).

Auf Grundlage der Versuchsmatrix in Abbildung 42 wurde im Rahmen dieser Arbeit der maßgebende Mechanismus herausgestellt und die Wirkung unterschiedlicher Randbedingungen, wie Ausgangsfeuchte, Druckeinfluss und Materialeinfluss auf das Ausmaß der Selbstabdichtung untersucht.

In einer ersten Versuchsreihe wurde das Eindringen verschiedener organischer Flüssigkeiten untersucht. Die Flüssigkeiten wurden dabei so ausgewählt, dass jeweils eine physikalische Größe bei verschiedenen Flüssigkeiten in der gleichen Größenordnung und somit vergleichbar war, während weitere physikalische Größen dieser Flüssigkeiten deutliche Unterschiede haben sollten. Auf diesem Weg sollten für die Selbstabdichtung relevante physikalische Größen herauskristallisiert werden. Die Kenntnisse der maßgebenden physikalischen Größen der Flüssigkeitseigenschaften geben einen ersten Anhaltspunkt über den maßgebenden Selbstabdichtungseffekt.

	Einfluss Flüssigkeit				Einfluss Druck	Einfluss Vorlagerung	Einfluss Material
Einflussgröße	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächenspannung • Viskosität • Dipolmoment • Molekülgröße • Ca(OH)_2-Löslichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Ca(OH)_2-Konzentration 	<ul style="list-style-type: none"> • Bestandteile im Grundwasser 	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächenspannung • Viskosität • Ionenstärke 	<ul style="list-style-type: none"> • Druckhöhe (0, 0,5 und 1 bar) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausgleichsfeuchte (50, 65, 75 und 80%r.F.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Vorgeschichte durch 1. Befuchtungszyklus (Reversibilität) • innere Oberfläche (Rezepturen aus Abbildung 23)
Medium	<ul style="list-style-type: none"> • Dest. Wasser • Hexan • Methanol • Ethanol • Isopropanol • Ethylenglycol 	<ul style="list-style-type: none"> • Dest. Wasser • Ethylenglycol • $\pm \text{Ca(OH)}_2$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Dest. Wasser • Leitungswasser 	<ul style="list-style-type: none"> • Dest. Wasser • NaCl-Lösungen (3,3, 8,7 und 26,4 M.-%) 	<ul style="list-style-type: none"> • Dest. Wasser 	<ul style="list-style-type: none"> • Dest. Wasser • Hexan 	<ul style="list-style-type: none"> • Dest. Wasser • Hexan
Rückschluss auf Abdichtungsmechanismus							
Lösen von Ca(OH)_2	•	•					•
Ablagern von Ca(OH)_2		•					•
Umverteilen/Quellen	•		•	•	•	•	•

→ Welcher Abdichtungsmechanismus ist maßgebend ?

Abbildung 42: Versuchsmatrix zur Klärung des maßgebenden Selbstabdichtungsmechanismus und zur Beobachtung der Einflüsse von Flüssigkeitseigenschaften, Vorlagerungsbedingungen, Druck und Materialeigenschaften auf die Selbstabdichtung und den Kapillartransport

Während die Flüssigkeiten Hexan, Ethanol und Isopropanol keine Lösemittel für Calciumhydroxid aus der Matrix sind, wurden für Methanol, Wasser und Ethylenglycol lösliche Mengen an Calciumhydroxid gemessen. Die Relevanz dieser Eigenschaft der Flüssigkeiten für die Selbstabdichtung wurde anhand einer weiteren Versuchsreihe untersucht, indem die Aufnahme mit Calciumhydroxid gesättigtem destilliertem Wasser bzw. Ethylenglycol der Aufnahme der entsprechenden Flüssigkeiten ohne Calciumhydroxid gegenübergestellt wurde. Ein Einfluss von Lösungs- und Ablagerungsvorgängen von Calciumhydroxid auf den Selbstabdichtungseffekt müsste anhand vom Eindringverhalten der Flüssigkeiten sichtbar werden.

Um zu überprüfen, inwieweit im Grundwasser enthaltene Bestandteile den Selbstabdichtungseffekt zusätzlich beeinflussen, wurde das Eindringverhalten von destilliertem Wasser mit Leitungswasser verglichen. Leitungswasser enthält, wie Grundwasser, im Vergleich zu destilliertem Wasser unter anderem härtebildende Carbonationen, die mit den in der Porenlösung enthaltenen Calciumionen reagieren und im Porengefüge als Calciumcarbonat ausfallen. Diese Reaktion findet mit Eindringen des Wassers direkt an der Oberfläche statt und müsste demnach unmittelbar einen Selbstabdichtungseffekt hervorrufen. Zudem enthält Leitungswasser eine Vielzahl weiterer Ionen, wie z.B. Calcium, Sulfate, Magnesium, Chlorid, Natrium Kalium, etc. (vgl. Wasseranalyse des Münchner Leitungswassers [148]), die zum einen das Lösungsgleichgewicht der Porenlösung beeinflussen können. Zum anderen auch Einfluss auf die

Wechselwirkungskräfte zwischen dem eindringenden Wasser und dem Porengefüge haben können.

Der Einfluss der Ionenstärke auf das Ausmaß der Selbstabdichtung wurde anhand von Saugversuchen mittels Natriumchloridlösungen untersucht, indem die Lösungskonzentration variiert wurde.

Mit zunehmender Druckhöhe können kleinere Poren mit Wasser gefüllt werden (vgl. Abbildung 14). Anhand von Versuchen mit anstehendem drückenden Wasser sollte untersucht werden, ob eine Umlagerung des Wassers in den Gelporenraum Ursache für den Selbstabdichtungseffekt sein kann. Mit zunehmender Druckhöhe müsste demnach der Selbstabdichtungseffekt verstärkt werden.

Mit zunehmendem Ausgleichsfeuchtegehalt ist ein größerer Anteil an kleinen Gelporen mit Wasser gefüllt. Sofern eine Umlagerung von Wasser in den Gelporenraum und ein damit verbundenes Quellen Ursache für die Selbstabdichtung ist, muss ein deutlicher Einfluss der Ausgangsfeuchte auf das Wassereindringen und die Selbstabdichtung in Versuchen erkennbar sein. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurden Prismen bei unterschiedlichen Luftfeuchten vorkonditioniert, bevor Saugversuche mit Wasser und Hexan durchgeführt wurden.

Um Rückschlüsse über den Einfluss einer „Vorbelastung“ durch eingedrungenes Wasser auf die Selbstabdichtung zu gewinnen, wurde ein Saugversuch an einem Probekörper wiederholt, nachdem dieser nach einer Trocknungszeit von fast zwei Jahren sein Ausgangsgewicht nahezu erreicht hatte. Ausschließlich der Mechanismus, der in Abbildung 42 mit „Umverteilen/Quellen“ des Zementgels bezeichnet wird, setzt eine Reversibilität des Selbstabdichtungsmechanismus voraus.

Mit zunehmendem Größtkorn wird der Transport nach [149] unabhängiger vom Wasserzementwert und verläuft zunehmend entlang der porösen Korngrenzen. Die Oberfläche der Gesteinskörnung spielt ebenfalls eine große Rolle. Der Grund liegt zum einen in dem einseitigen Wachstum der Hydratationsprodukte gegen das Gesteinskorn, was eine weniger dichte Vernetzung der Hydratationsprodukte zur Folge hat als im Inneren des Zementsteins. Zum anderen bewirkt der so genannte Wall-effect einen höheren w/z-Wert in der Kontaktzone. In einer letzten Versuchsreihe sollte daher der Einfluss der Betonzusammensetzung und somit der Gefügestruktur auf das Ausmaß der Selbstabdichtung untersucht werden. Dazu wurden an sämtlichen in Abbildung 23 aufgeführten Betonen und Mörteln Saugversuche durchgeführt.

4.2 Einfluss durch die Eigenschaften der eindringenden Flüssigkeiten

4.2.1 Eindringen organischer Flüssigkeiten

Das Eindringen der Flüssigkeiten destilliertes Wasser, Hexan, Methanol, Ethanol, Isopropanol und Ethylenglycol wurde an Prismen mit einer Querschnittsfläche von rd. $45 \times 45 \text{ mm}^2$ und einer Länge von 124 mm ($\pm 1 \text{ mm}$) bestimmt. Die Rezeptur entsprach Tabelle 1 (B), die Vorbehandlung der Prismen entsprach der Standardvorlagerung inkl. Beschichtung der Mantelflächen. Bei Versuchsbeginn hatten die Proben ein Alter von rd. einem Jahr. Die Gefäße, in denen sich die Flüssigkeiten Hexan, Methanol und Ethanol befanden, wurden während des Versuchs mit Folie abgedeckt, um ein Verdunsten der Flüssigkeiten zu verhindern. In festgelegten Zeitabständen wurde die Flüssigkeitsaufnahme gravimetrisch ermittelt. Tabelle 2 gibt die Flüssigkeitseigenschaften wieder, die zur Interpretation des Eindringverhaltens zu beachten sind.

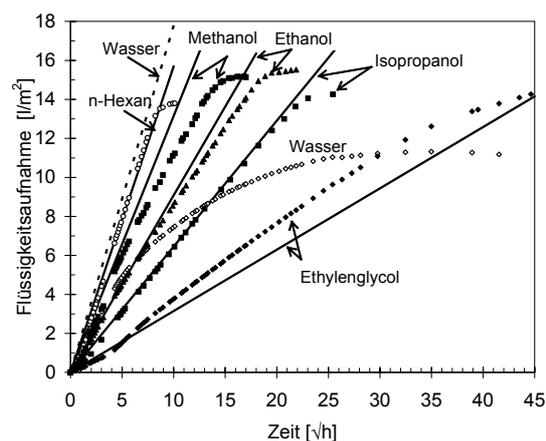


Abbildung 43: Symbole: integrale Aufnahme der Flüssigkeiten Wasser, Hexan, Methanol, Ethanol, Isopropanol und Ethylenglycol in einen Mörtel ($w/z = 0,60$; Tabelle 1 (B)), Geraden: entsprechend der linearen Aufnahme von Hexan aus dem Einfluss der Oberflächenspannung und Viskosität nach $\sqrt{(\sigma/\eta)}$ zu erwartenden Aufnahmeverhalten

Abbildung 43 zeigt die Flüssigkeitsaufnahme der organischen Flüssigkeiten bis zu einer Gesamtversuchsdauer von rd. 80 Tagen. Die im Bild deutlich werdende plötzliche Reduzierung der Flüssigkeitsaufnahme für Hexan, Methanol, Ethanol, Isopropanol ist auf das Erreichen des der Saugseite gegenüberliegenden Probekörperendes zurückzuführen. Die freie Sättigung, die in Abbildung 43 bei einer Probenlänge von 123 mm einer Flüssigkeitsaufnahme über die Saugfläche von rd. 18 l/m^2 entsprechen würde, wurde von keiner der Flüssigkeiten während der Versuchsdauer erreicht.

Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften der Flüssigkeiten, die das Eindringverhalten in poröse Materialien beeinflussen

Flüssigkeit	Oberflächen- spannung σ	dyn. Visko- sität η	$\sqrt{(\sigma/\eta)}$	molare Masse M	Dichte ρ	Mole- kül- volumen M/ρ	Mole- kül- größe \bar{a}_m *)	Dipol- moment μ_D	Dipol- konzent- ration c_D **)	Löslich- keit von Ca(OH) ₂
	[mN/m]	[mPa·s]	$[\sqrt{\text{m}/\text{s}}]$	[g/mol]	[g/cm ³]	[cm ³ /mol]	[nm]	[Debye]	[Debye/nm ³]	[g/l]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Wasser	72,8	1,00	8,5	18,0	0,998	18	0,31	1,85	61,8	1,2
n-Hexan	18,4	0,33	7,5	86,2	0,66	131	0,60	0,00	0	0,0
Methanol	22,6	0,57	6,3	32,0	0,79	41	0,41	1,71	25,4	0,2
Ethanol	22,8	1,20	4,2	46,1	0,79	58	0,46	1,70	17,5	0,0
Iso- propanol	21,7	2,27	3,1	60,1	0,79	76	0,50	1,69	13,4	0,0
Ethylen- glycol	47,7	21,00	1,5	62,1	1,11	56	0,45	2,28	24,5	3,0
*) Annahme: mittlere Molekülgröße $\bar{a}_m = \left(\frac{M}{\rho \cdot N_A} \right)^{\frac{1}{3}}$ [nm], N_A : Avogadro Konstante **) Berechnung der Dipolkonzentration: $c_D = \mu_D \cdot \frac{\rho \cdot N_A}{M}$ [debye/nm ³]										

Im Gegensatz zum Eindringen von Wasser, wo ein deutlich vom Wurzel-Zeit-Gesetz abweichendes Eindringverhalten zu beobachten ist, tritt Hexan in dasselbe Material mit einer Wurzel-Zeit-Abhängigkeit ein. Dies lässt darauf schließen, dass das Eindringen von Hexan maßgeblich durch Kapillarkräfte bestimmt wird.

Als Referenzversuch für den Vergleich des Eindringverhaltens der verschiedenen Flüssigkeiten diene Hexan. Dazu wurde die Proportionalitätskonstante c aus Gleichung 15, die den Einfluss der Porosität, Porengrößenverteilung und Tortuosität des Materials berücksichtigt, aus den Messdaten des Hexanversuchs berechnet. Die daraus resultierende Gerade ist in Abbildung 43 für Hexan dargestellt. Über das Verhältnis $\sqrt{(\sigma/\eta)}$ (vgl. Tabelle 2, Spalte 4) wurden aus der Geraden für Hexan die entsprechenden Geraden für die anderen Flüssigkeiten berechnet. Es ist festzustellen, dass das Eindringverhalten der organischen Flüssigkeiten grundsätzlich mit dem Verhältnis $\sqrt{(\sigma/\eta)}$ korreliert, d.h. unabhängig von der Selbstabdichtung wird das Eindringverhalten von der Oberflächenspannung und der

Viskosität bestimmt. Die aus diesem Zusammenhang theoretisch sehr schnelle Aufnahme von Wasser ist nur bei sehr kurzen Saugzeiten gegeben und nimmt extrem ab.

Sämtliche untersuchten polaren Flüssigkeiten zeigen mit Ausnahme von Isopropanol ein mehr oder weniger stark ausgeprägtes vom Wurzel-Zeit-Gesetz abweichendes Eindringverhalten.

Als Maß für die Polarität wird das Dipolmoment herangezogen (vgl. Tabelle 2, Spalte 9). Methanol, Ethanol und Isopropanol haben vergleichbare Dipolmomente in der Größenordnung von 1,7 Debye. Dennoch weicht das Eindringverhalten von Methanol deutlich vom Eindringverhalten nach \sqrt{t} ab, während dies für Isopropanol nicht der Fall ist. Die in Kapitel 2.4.6.4 beschriebenen Untersuchungsergebnisse von [97] zeigten, dass beim Kontakt mit Methanol makroskopisch ein Quellen gemessen werden konnte, während dies beim Kontakt mit Isopropanol kaum der Fall war. Bei einem Vergleich des Volumens der Moleküle (vgl. Tabelle 2, Spalte 7) bzw. der Molekülgrößen von Methanol ($\bar{a}_m = 0,41$ nm), Ethanol ($\bar{a}_m = 0,46$ nm) und Isopropanol ($\bar{a}_m = 0,50$ nm) liegt so zunächst die Vermutung nahe, dass das Ausmaß der Selbstabdichtung, durch ein Quellen des Gelporenraums verursacht wird und von der Molekülgröße abhängt, wobei mit zunehmender Molekülgröße weniger Flüssigkeit in den Gelporenraum gelangen und dort Quellen und somit die Selbstabdichtung verursachen kann. Ein Vergleich zwischen den eindringenden Flüssigkeiten Ethylenglycol und Ethanol, deren Molekülgröße in der gleichen Größenordnung ($\bar{a}_m = 0,45$ bzw. $0,46$ nm) liegt, zeigt jedoch, dass dies alleine nicht die ausschlaggebende physikalische Eigenschaft für die Wirkung der Selbstabdichtung sein kann. Während Ethanol nur leicht abweichend vom Wurzel-Zeit-Gesetz eindringt, ist die Abweichung bei Ethylenglycol, welches ein höheres Dipolmoment μ_D (vgl. Tabelle 2, Spalte 9) aufweist, wesentlich größer. Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass sowohl Molekülgröße bzw. das Volumen der Moleküle wie aber auch das Dipolmoment der eindringenden Flüssigkeit das Ausmaß der Selbstabdichtung zu beeinflussen scheinen. In Abhängigkeit der Menge und Art der eingedrungenen Flüssigkeit sind die Wechselwirkungen im Gelporenraum unterschiedlich stark ausgeprägt. Die dafür bedeutsamen Materialeigenschaften wurden in einer „neuen“ Materialkenngröße, der Dipolkonzentration c_D [Debye/nm³], zusammengefasst, vgl. Tabelle 2, Spalte 10. Sie soll als Maß dafür dienen welche Stärke der Wechselwirkungskräfte die Flüssigkeit mit der Gelporenoberfläche ausübt. Die Dipolkonzentrationen korrelieren mit dem beobachteten Eindringverhalten der untersuchten Flüssigkeiten. Während Wasser mit der größten Dipolkonzentration die größten Abweichungen vom Wurzel-Zeit-Gesetz zeigt, nimmt die Abweichung mit abnehmender Dipolkonzentration ab.

Um zu überprüfen, ob Lösungsvorgänge nach einem Herauslösen von Calciumhydroxid aus der Matrix als maßgebende Ursache für den Selbstabdichtungseffekt in Frage kommen, wurde die Löslichkeit von Calciumhydroxid in Wasser, Methanol, Ethanol und Ethylenglycol

versuchstechnisch bestimmt, vgl. Tabelle 2, Spalte 11. Da ein Selbstabdichtungseffekt bei Ethanol beobachtet wird, obwohl dieses kein Calciumhydroxid lösen kann, ist davon auszugehen, dass auch bei Wasser, Methanol und Ethylenglycol Lösungsvorgänge nicht maßgebende Ursache der Selbstabdichtung sind.

4.2.2 Eindringen von Calciumhydroxidlösungen

In den Versuchen, die im vorangegangenen Kapitel dargestellt sind, ist zu beobachten, dass Ethylenglycol schneller in den Probekörper eintritt, als dies nach Gleichung 15 aufgrund der Flüssigkeitseigenschaften berechnet wurde. Ein Grund dafür könnte sein, dass das Ethylenglycol, welches eine vergleichsweise große Menge an $\text{Ca}(\text{OH})_2$ lösen kann (vgl. Tabelle 2, Spalte 11) während des Eindringens $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aus der Matrix löst und so die Eindringgeschwindigkeit durch eine Erhöhung der Porosität erhöht wird. Abbildung 44, links zeigt die Ergebnisse eines darauf aufbauenden Versuchs. Die Versuchsbedingungen und Probekörper entsprachen dabei den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Voraussetzungen. Hier wurde die Aufnahme $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -gesättigten Ethylenglycols der Aufnahme reinen Ethylenglycols gegenübergestellt. Gleichzeitig zeigt die Abbildung das nach Gleichung 15 aufgrund der Viskosität und Oberflächenspannung zu erwartende Eindringverhalten nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz. Es wird deutlich, dass die $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -gesättigte Lösung zunächst mit der erwarteten Eindringgeschwindigkeit eindringt bis der Selbstabdichtungseffekt zum Tragen kommt. Eine Lösung des Calciumhydroxids aus der Matrix scheint demnach zu bewirken, dass sich der viskose Widerstand aufgrund einer Erhöhung der Porosität erniedrigt und somit die Flüssigkeit schneller aufgenommen wird. Unabhängig davon findet in beiden Fällen ein Selbstabdichtungseffekt statt.

Im Falle eines maßgebenden Einflusses von Lösungs- und Ablagerungsprozessen von Calciumhydroxid auf die Selbstabdichtung müsste eine deutliche Abweichung in der Aufnahme von destilliertem Wasser im Vergleich zu mit Calciumhydroxid gesättigtem destillierten Wasser feststellbar sein. Bei der reinen Wasseraufnahme müsste die Lösung kleinster Mengen Calciumhydroxids aus der Matrix einen großen Effekt auf die Zugänglichkeit und die Konnektivität des Porensystems haben, so dass die Aufnahmegeschwindigkeit im Vergleich zu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -gesättigtem Wasser erhöht sein müsste. Im Gegensatz dazu würden sich kleine Mengen von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ablagern, wenn gesättigte Calciumhydroxidlösung aufgenommen wird, weil die Alkalien in der Porenlösung das Lösungsgleichgewicht stören. Dies hätte eine Reduktion der Konnektivität und der Zugänglichkeit der Poren zur Folge, die Einfluss auf das Eindringverhalten im Vergleich zu reinem Wasser haben müsste. Abbildung 44, rechts zeigt die Ergebnisse eines Saugversuchs an einem Mörtel nach Tabelle 1 (B), bei welchem destilliertes Wasser mit bzw. ohne $\text{Ca}(\text{OH})_2$

gesättigt aufgenommen wurde. Hier konnte kein Unterschied in der Aufnahmegeschwindigkeit festgestellt werden. Dass Lösungs- oder auch Ablagerungsvorgänge von Calciumhydroxid für die Selbstabdichtung maßgebend sind, scheint demnach unwahrscheinlich.

Schon allein nach einer Betrachtung der Löslichkeiten der im Zementstein enthaltenen Ionen scheint sich dieser Effekt als Ursache für die Selbstabdichtung vernachlässigbar: Da die Löslichkeit der Natrium und Kalium-Ionen vergleichsweise hoch ist (Löslichkeit Natrium > Kalium > Calcium), lösen sich bei Wasserzutritt zunächst diese Ionen aus der Matrix. Mit zunehmendem Gehalt an Natrium und Kalium in der Porenlösung sinkt wiederum die Löslichkeit von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ im Zementstein (vgl. Kapitel 2.4.6.2, Berechnungen mit PHREEQC). Dies bedeutet, dass sehr wenig Calciumhydroxid in der Porenlösung gelöst wird und somit das Eindringverhalten von Wasser und gesättigter Calciumhydroxidlösung vergleichbar ist.

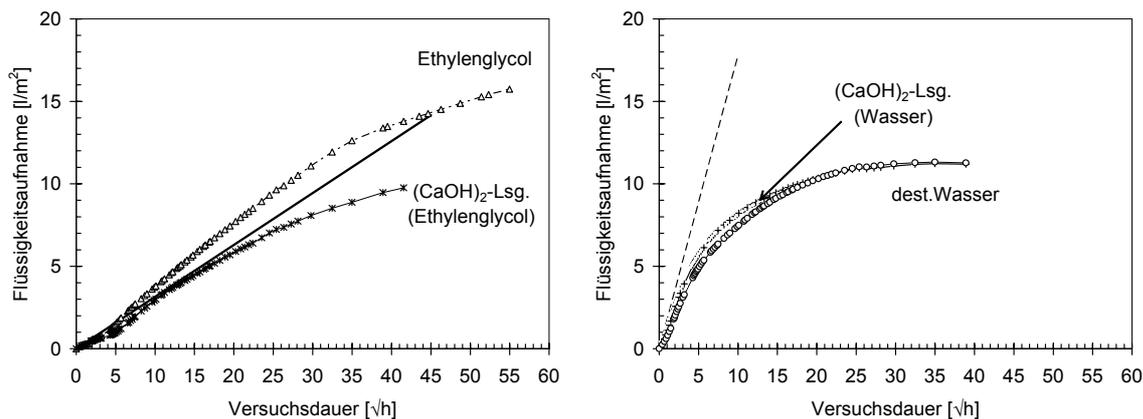


Abbildung 44: Einfluss der Sättigung von Ethylenglycol (links) und destilliertem Wasser (rechts) mit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ auf die Flüssigkeitsaufnahme eines Mörtels ($w/z = 0,60$, vgl. Tabelle 1 (B))

Auch der Einfluss der bremsenden Wirkung eines Diffusionsstroms [68] bzw. eines osmotischen Drucks [11] durch Lösung von Calciumhydroxid aus der Matrix als maßgebende Ursache für den Selbstabdichtungseffekt kann anhand dieser Betrachtungen ausgeschlossen bzw. vernachlässigt werden. Zusätzlich zeigen die in Abbildung 44 dargestellten Versuche, dass dieser Einfluss keine Relevanz haben kann. Da die Löslichkeit von Calciumhydroxid in Ethylenglycol etwa 2,5 mal so groß ist, wie in Wasser, müsste bei der Ethylenglycolaufnahme nach diesen Erklärungsansätzen die selbstabdichtende Wirkung deutlich stärker sein, als bei reinem Wasser. Dies ist anhand der Versuchsergebnisse nicht feststellbar.

4.2.3 Einfluss im Grundwasser enthaltener Ionen

Zur Überprüfung inwieweit im Grundwasser enthaltene Bestandteile wie z.B. Carbonationen, Calcium, Sulfate, Magnesium, Chlorid, Natrium, Kalium, etc. (vgl. Wasseranalyse des Münchner Leitungswassers [150]) den Selbstabdichtungsmechanismus beeinflussen, wurde anhand einer weiteren Versuchsreihe das Eindringverhalten von Münchner Leitungswasser (pH 7,6) mit dem Eindringverhalten von destilliertem Wasser verglichen. Auch hier entsprechen die Versuchsbedingungen und Probekörper den in den beiden vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Voraussetzungen. Abbildung 45 zeigt die entsprechenden Ergebnisse.

Die im Münchner Leitungswasser enthaltenen Bestandteile (Ionen) scheinen demnach einen Einfluss auf die Selbstabdichtung zu haben.

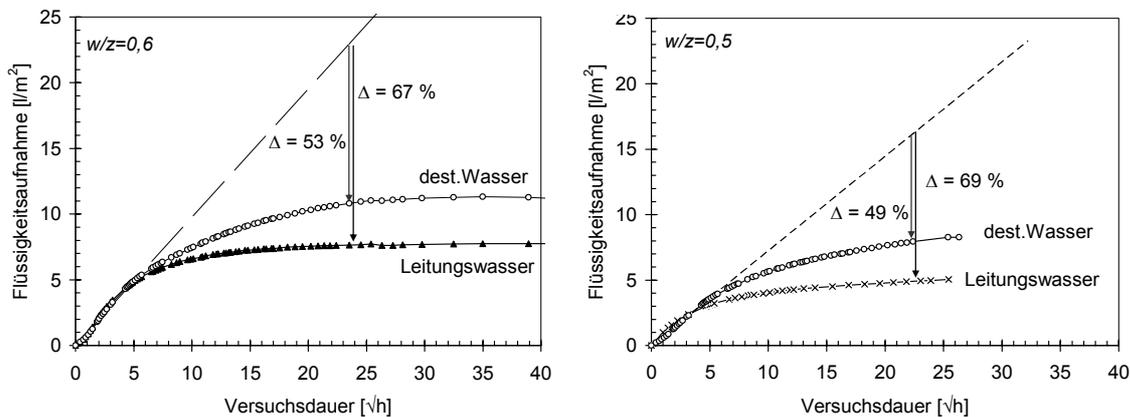


Abbildung 45: Einfluss der im Münchner Leitungswasser enthaltenen Bestandteile (Ionen) auf das Eindringverhalten von Wasser in einen Mörtel (links: $w/z = 0,60$, Tabelle 1 (B); rechts: $w/z = 0,50$, Mörtel /28/ nach Abbildung 23)

Mit Hilfe des hydrogeochemischen Modells PHREEQC [96] wurde zunächst abgeschätzt, welche Mengen an Calciumcarbonat (Calcit) bzw. Calciumhydroxid (Portlandit) infolge des eindringenden Wassers ausfallen. Der rechnerischen Abschätzung lagen folgende vereinfachte Annahmen zu Grunde: (a) das Porensystem ist sofort mit der eindringenden Flüssigkeit gesättigt, (b) die Alkalien im Mörtel lösen sich in der eindringenden Flüssigkeit, (c) bei der Berechnung des Lösungsgleichgewicht wird angenommen, dass eine große Menge Portlandit in der Matrix vorhanden ist. Den Berechnungen zu Folge geht beim Eindringen des destillierten Wassers eine Menge von rd. $0,19 \text{ mmol/kg}_{\text{Wasser}}$ Calciumhydroxid in Lösung. Dies entspricht einer minimalen Erweiterung des Porenraums um rd. $0,6 \times 10^{-3} \%$. Mit zunehmender Zeit würde die Alkalikonzentration vor allem im Randbereich an der im Wasser stehenden Oberfläche abnehmen, da die Alkalien hier aus der Porenlösung in das anstehende Wasser diffundieren. In diesem Bereich wäre mit einer maximalen Erweiterung des

Porenraums von 0,05 % infolge gelösten Calciumhydroxids zu rechnen. Beim Eindringen des Leitungswassers, dessen Zusammensetzung der Analyse der Stadtwerke München entnommen wurde, fallen nach den Berechnungen in etwa 0,13 mmol/ kg_{Wasser} an Portlandit aus, sowie rd. 1,6 mmol/ kg_{Wasser} an Calcit, so dass der Porenraum um rd. $5,9 \times 10^{-3}$ % reduziert wird. Dass eine Reduzierung des Porenraums in dieser Größenordnung den Selbstabdichtungseffekt beeinflusst, scheint unwahrscheinlich. Zudem müsste der Selbstabdichtungseffekt schon nach kurzen Saugzeiten sichtbar werden, da die Calcitbildung direkt an der saugenden Oberfläche stattfindet.

Der beobachtete zusätzliche Selbstabdichtungseffekt beim Eindringen von Leitungswasser wird demnach auf die Wirkung der im Leitungswasser enthaltenen Ionen zurückgeführt, die in Abhängigkeit der Ionenstärke die Oberflächenkräfte und somit das Ausmaß des Quellens beeinflussen. Ein Vergleich mit der aufgenommenen Wassermenge nach rd. 500 h Saugzeit, die sich theoretisch ohne Wirkung des Selbstabdichtungseffekts einstellen würde, zeigt, dass allein durch das Eindringen des destillierten Wassers in die Gelporen und den damit verbundenen Quellvorgang die aufgenommene Wassermenge bei dem untersuchten Mörtel mit $w/z = 0,60$ (Abbildung 45, links) um 53 % reduziert wird, hinzu kommt noch der Einfluss der Selbstabdichtung infolge der Wirkung der im Leitungswasser enthaltenen Ionen, der die aufgenommene Wassermenge um weitere 14 % reduziert. Der Selbstabdichtungseffekt für den Mörtel mit $w/z = 0,50$ (Abbildung 45, rechts) bewirkt allein infolge des Eindringens des destillierten Wassers in die Gelporen und des damit verbundenen Quellvorgangs eine Abweichung vom theoretischen Wurzel-Zeit-Eindringen von rd. 49 %, die zusätzlichen Ionen verstärken diese Abweichung um weitere 20 % nach einer betrachteten Saugzeit von rd. 500 h.

4.2.4 Einfluss gelöster Salze auf die Selbstabdichtung

Anhand von Versuchen mit Natriumchloridlösungen wurde der zusätzliche Einfluss von Ionen auf die Selbstabdichtung infolge Quellen untersucht werden. Die Prismen zur Untersuchung des Einflusses von Salzen auf den Selbstabdichtungsmechanismus hatten eine Querschnittsfläche von rd. 48×48 mm² und eine Länge von 127 mm (± 4 mm). Die Rezeptur ist Tabelle 1 (A) zu entnehmen, die Vorbehandlung der Prismen entsprach der Standardvorlagerung inkl. Beschichtung der Mantelflächen. Bei Versuchsbeginn hatten die Proben ein Alter von rd. 8 Monaten.

Abbildung 46 zeigt am Beispiel von zwei repräsentativen Versuchen die mittels NMR-Messung ermittelten Eindringprofile von Wasser (links) und dem in 26,4 M.-%

Natriumchloridlösung enthaltenen Wassers (rechts). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Eindringgeschwindigkeit der Natriumchloridlösung deutlich unterhalb der von Wasser liegt.

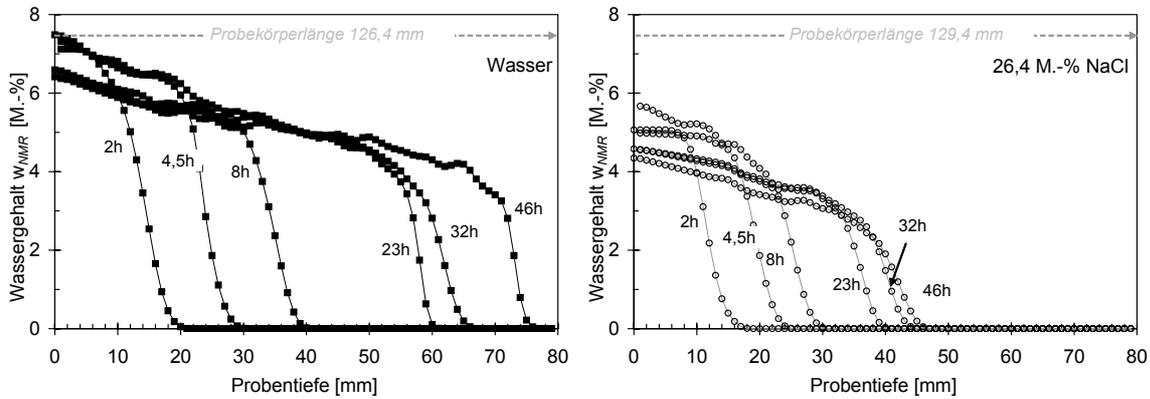


Abbildung 46: Mittels NMR ermittelte Eindringprofile von Wasser (links) und 26,4 M.-% Natriumchloridlösung (rechts) in einen Mörtel ($w/z = 0,60$, Tabelle 1 (A))

Abbildung 47 zeigt den Einfluss der Salzkonzentration auf das Eindringverhalten in Abhängigkeit von der Wurzel der Zeit. Sowohl die integrale Lösungsaufnahme, wie auch die Eindringtiefe zeigen einen in vergleichbarer Weise vom Wurzel-Zeit-Gesetz abweichenden Verlauf, wobei beide Größen mit zunehmender Lösungskonzentration langsamer zunehmen. Um das Ausmaß des Selbstabdichtungseffektes beurteilen zu können und somit den Selbstabdichtungseffekt quantifizieren zu können, wurde das nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz zu erwartende Eindringverhalten aufgrund der nach 4,5 Stunden aufgenommenen Lösungsmenge berechnet (vgl. gestrichelte Geraden für Wasser und 26,4 M.-% NaCl-Lösung, Abbildung 47, links). Die Reduzierung der Steigung der entsprechenden Geraden für Wasser und 26,4 M.-% NaCl-Lösung entspricht der Änderung des Verhältnisses $\sqrt{(\sigma/\eta)}$ mit zunehmender Salzkonzentration, welches in Tabelle 3 aufgeführt ist. Die Lösungsaufnahme ändert sich demnach entsprechend Gleichung 15 und wird somit von der Oberflächenspannung und der Viskosität der Salzlösung dominiert (vgl. Kapitel 3.3.3.7).

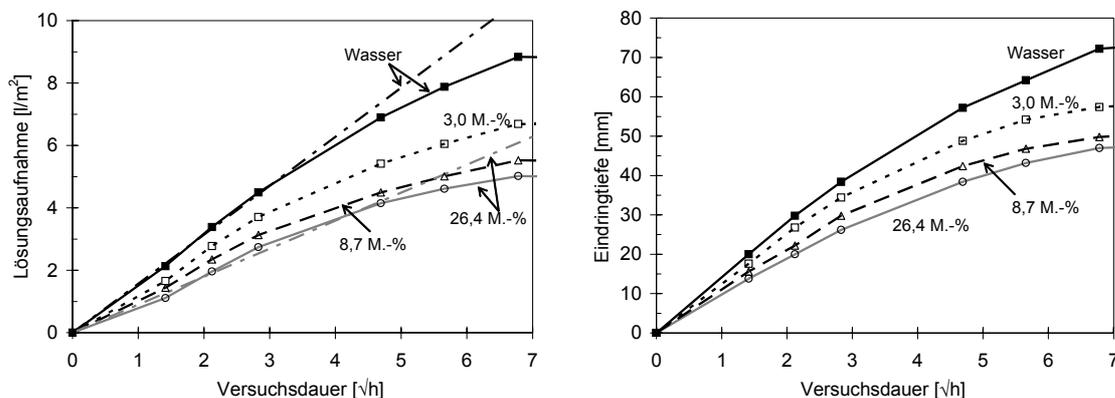


Abbildung 47: Einfluss der Natriumchloridkonzentration in eindringendem destilliertem Wasser auf das Eindringverhalten in einen Mörtel ($w/z = 0,60$, Tabelle 1 (A)), links:

integrale Lösungsaufnahme über die Saugfläche; rechts: Eindringtiefe herausgelesen aus den mittels NMR ermittelten Eindringprofilen. Die dargestellten Messpunkte stellen jeweils den Mittelwert aus 5 Einzelversuchen an verschiedenen Probekörpern dar

Tabelle 3: Physikalische Eigenschaften der Natriumchloridlösungen unterschiedlicher Konzentration [101]

Flüssigkeit	Oberflächen- spannung σ [mN/m]	dyn. Viskosität η [mPa·s]	$\sqrt{(\sigma/\eta)}$ [$\sqrt{\text{m}}/\sqrt{\text{s}}$]	Dichte ρ [g/cm ³]	Löslichkeit von Ca(OH) ₂ [g/l]
1	2	3	4	6	11
Wasser	72,8	1,00	8,5	0,998	1,2
3,3 M.-% NaCl	73,8	1,064	8,33	1,02	1,7
8,7 M.-% NaCl	75,5	1,222	7,86	1,06	1,9
26,4 M.-% NaCl	82,8	2,831	5,41	1,20	2,0

Um zu klären, inwieweit sich die Salzkonzentration, d.h. die Ionenstärke der Lösung, auf das Ausmaß der Selbstabdichtung auswirkt, wurden die Ergebnisse der NMR-Messung herangezogen. Wie in Kapitel 3.3.3 lässt sich aus den Vorversuchen schließen, dass mit fortschreitender Zeit ein zunehmender Anteil an Wasser in Poren mit einem Durchmesser in der Größenordnung von 10 nm umverteilt wird und hier nicht mehr erfasst wird. Ursache für diesen Effekt ist die Tatsache, dass das Wasser durch die starken Wechselwirkungen mit den Gelporenwänden messtechnisch nicht erfasst werden kann. Die Darstellung der Änderung von w_{NMR}/w in Abbildung 48 (links) dient als Hinweis auf die Wassermenge, die aus den Kapillarporen in die Gelporen umgelagert wird.

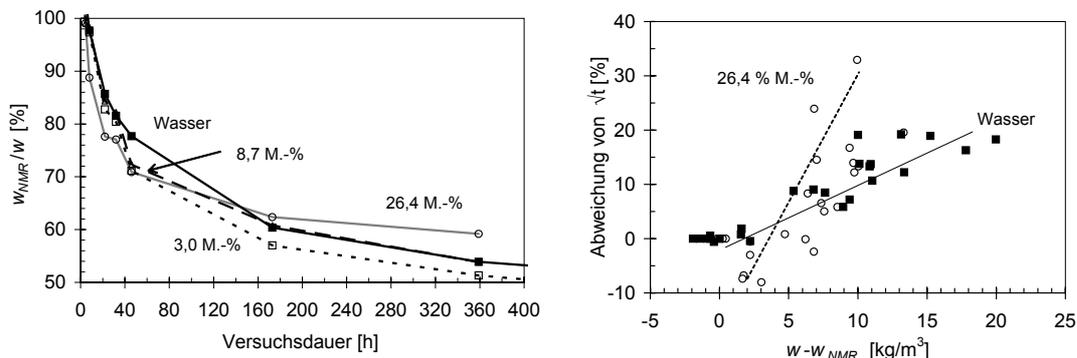


Abbildung 48: links: integraler Wassergehalt NMR w_{NMR} berechnet aus den Eindringprofilen aus den NMR-Messungen bezogen auf den gravimetrisch ermittelten integralen Wassergehalt w ; rechts: Zusammenhang zwischen der Abweichung vom Eindringverhalten nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz und der mittels NMR nicht mehr erfassten Wassermenge aufgrund starker Wechselwirkungen mit dem Porenraum (Mörtel ($w/z = 0,60$, Tabelle 1 (A))); Die dargestellten Messpunkte stellen jeweils den Mittelwert aus 5 Einzelversuchen an verschiedenen Probekörpern dar

Die Umverteilung des Wassers aus der eindringenden Salzlösung ist der des Wassers ähnlich. Die Gesamtwassermenge ist jedoch aufgrund der in der Lösung enthaltenen Salzionen und der damit verbundenen geringeren Eindringgeschwindigkeit bei gleicher Versuchsdauer mit zunehmender Konzentration geringer.

Abbildung 48, rechts zeigt den Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der Selbstabdichtung, ausgedrückt durch die Abweichung der tatsächlich aufgenommenen Wassermenge von der nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz zu erwartenden Wassermenge (vgl. Abbildung 48, links) und der Menge an Wasser, welche infolge der Wechselwirkungen mit der Porenwand nicht mehr messtechnisch durch das NMR-Gerät erfasst wird. Es wird deutlich, dass die Abweichung vom Eindringverhalten nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz mit zunehmender Menge an umverteiltem Wasser stets größer wird. Zudem wird dieser Effekt mit der Anwesenheit von Salzen verstärkt, was darauf schließen lässt, dass die Wechselwirkungen, die beim Eintritt von Wasser in den Gelporenraum stattfinden mit zunehmender Ionenstärke verstärkt werden. Auch nach [151] beeinflussen gelöste Ionen die Wechselwirkungskräfte zwischen Gelporenwasser und Porengefüge.

Die hier dargestellten Ergebnisse deuten darauf hin, dass die maßgebende Ursache für den Selbstabdichtungseffekt darin begründet ist, dass Wasser in die Gelporen umverteilt wird und dies mit den damit verbundenen Quellvorgängen zur Reduzierung der Transportgeschwindigkeit führt. Da sämtliche untersuchten Prismen bei einer relativen Luftfeuchte von 50 % r.F. vorgelagert waren, wird die Wasseraufnahme in erster Linie zu einer Erhöhung des Spaltdrucks und einem damit verbundenen internen Quellen führen, da die Gelporen bis in eine Größe von rd. 2 nm bereits mit Wasser gefüllt sind. Messungen von [58] zu Spaltänderungen an Quarzscheiben haben ebenso gezeigt, dass gelöstes Natriumchlorid den Spaltdruck erhöht (vgl. Kapitel 2.3).

4.3 Eindringverhalten unter Druck

Zur Beobachtung des Einflusses von Wasserdruck auf die Eindringtiefe, die Wasseraufnahme und die Selbstabdichtung wurden Prismen mit einer Querschnittsfläche von $45 \cdot 45 \text{ mm}^2$ und einer Höhe von 224 mm ($\pm 4 \text{ mm}$) aus dem Mörtel nach Tabelle 1 (B) nach der Standardvorlagerung und Beschichtung der Mantelflächen in eine Druckapparatur eingebaut, mit der sie einseitig mit einem Wasserdruck von 0,0 bar, 0,5 bar und 1,0 bar beaufschlagt wurden (vgl. Abbildung 49). In den Räumen, in denen die Versuche durchgeführt wurden, betrug die Temperatur durchschnittlich $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und die relative Luftfeuchte durchschnittlich 40 % r.F., so dass an der gegenüberliegenden Stirnseite des Prismas von diesem Umgebungsklima ausgegangen werden kann. Mittels NMR wurde hier neben der Wasser-

aufnahme auch der Verlauf der Eindringtiefe mit der Zeit untersucht. In diesem Fall wurde der Faktor F zur Berechnung des Wassergehalts aus den Messergebnissen des NMRs an einem Probekörper nach einer kapillaren Wasseraufnahme ohne Druck von einer Stunde bestimmt. Dieser Probekörper war bei einer relativen Feuchte von 50 % r.F. vorgelagert. Zu Versuchsbeginn hatten die Proben ein Alter von rd. 15 Monaten.

Abbildung 49 zeigt die Entwicklung der Wasseraufnahme, der Eindringtiefe und das Verhältnis w_{NMR}/w im Wurzel-Zeit Maßstab sowie die mittels NMR gemessenen Eindringprofile bei Wasserdrücken von 0 bzw. 1 bar zu ausgewählten Zeitpunkten. Außerdem ist im Bild unten die Abweichung der Wasseraufnahme bzw. der Eindringtiefe vom Wurzel-Zeit-Gesetz der durch das NMR-Gerät nicht erfassten Wassermenge gegenübergestellt.

Wie erwartet steigt die aufgenommene Wassermenge und dementsprechend die Eindringtiefe mit dem Wasserdruck. Aber auch das drückende Wasser dringt deutlich langsamer ein, als nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz zu erwarten wäre. Dem Verhältnis w_{NMR}/w zufolge, in Abbildung 49 Mitte, links für die Drücke 0 bar und 1 bar dargestellt, wird mit zunehmendem Druck ein mit der Zeit zunehmend höherer Anteil des Wassers aus Kapillarporen in kleine Gelporen umverteilt. Auch das Eindringen von drückendem Wasser scheint demnach durch den Selbstabdichtungseffekt verzögert zu werden. Abbildung 49, unten, links zeigt, dass die Abweichung der Wasseraufnahme wie auch gleichermaßen die Abweichung der Eindringtiefe vom Wurzel-Zeit Gesetz mit der Menge des umgeleiteten Wassers zunimmt. Dies gilt sowohl bei 0 bar wie auch bei 1 bar. Der Selbstabdichtungseffekt wird demnach maßgebend durch die Menge an Wasser bestimmt, die in den Gelporenraum umgelagert wurde. Offensichtlich tritt infolge des Drucks ein größerer Anteil des eingedrungenen Wassers in kürzerer Zeit mit den Gelporen in Wechselwirkungen, so dass der Selbstabdichtungseffekt schneller wirkt.

Durch einen zusätzlichen äußeren Druck werden Poren, die zunächst durch kapillares Saugen nicht gefüllt werden bzw. dadurch alleine nicht zugänglich sind, mit Wasser gefüllt. Dies bewirkt eine Erhöhung des Sättigungsgrades durch Füllung einer zusätzlichen Anzahl an kleinen Poren, die durch Quellen auch zur Selbstabdichtung beitragen.

Die Versuche mittels H^1 -Kernspinresonanz zeigen, dass durch den Einfluss hydrostatischen Drucks einerseits das Eindringen des Wassers beschleunigt wird, andererseits erreicht jedoch durch den Druck das Wasser schneller den Gelporenraum, was zu einem schnelleren Einsetzen der Selbstabdichtung führt. Mit zunehmender Drückhöhe wird demnach die selbstabdichtende Wirkung beschleunigt und ist hier ausgeprägter. Unabhängig von der Druckhöhe ist das Maß der Selbstabdichtung davon abhängig, wie viel Wasser in den Gelporenraum umverteilt wurde.

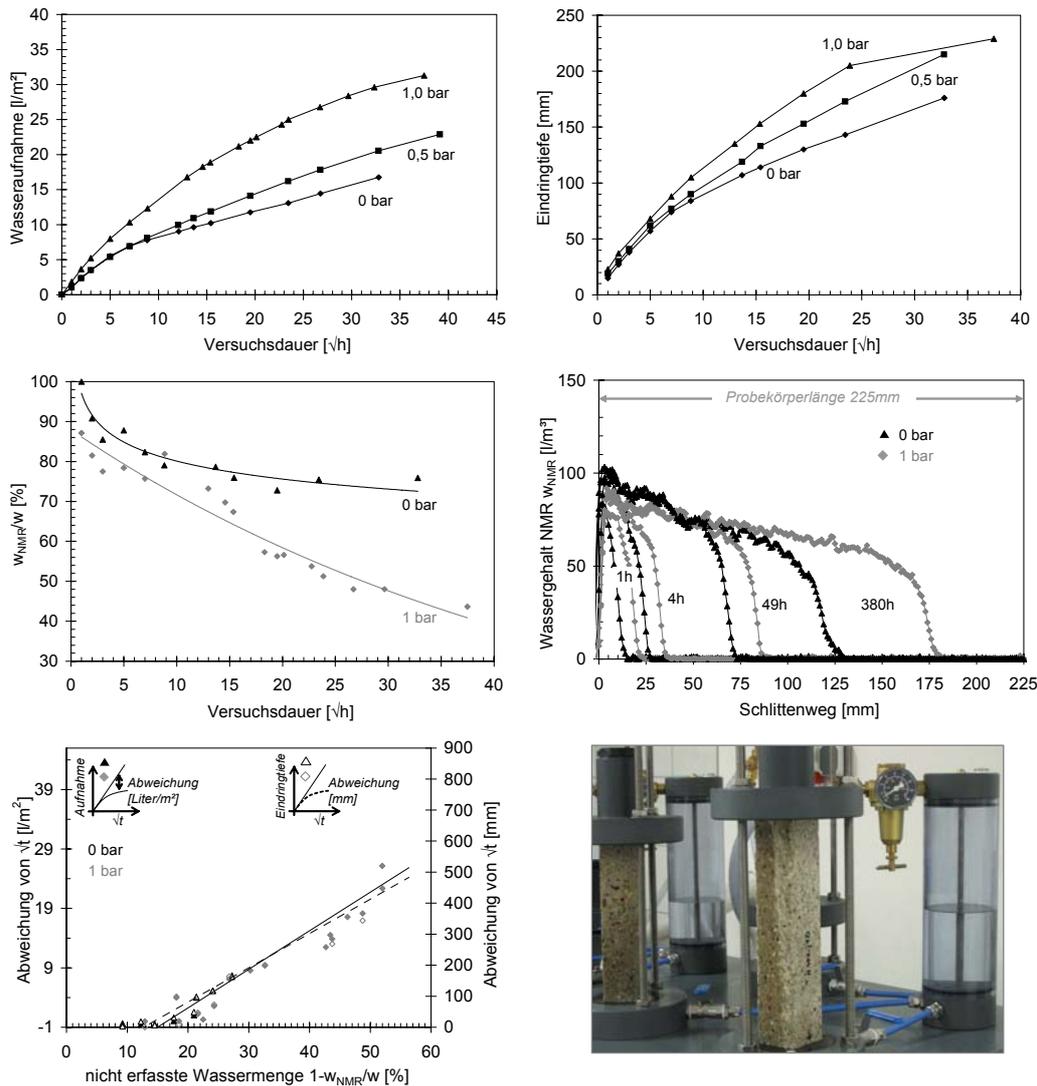


Abbildung 49: Einfluss von Wasserdruck, oben, links: gravimetrische Wasseraufnahme, oben rechts: NMR-Eindringtiefe, Mitte, links: Wasseranteil w_{NMR}/w , Mitte rechts: Eindringprofile des Wassergehalts w_{NMR} für die Prismen, die mit 0 und 1 bar Wasserdruck beaufschlagt wurden, unten, links: Abweichung der Wasseraufnahme bzw. der Eindringtiefe vom Wurzel-Zeit-Gesetz im Zusammenhang mit dem durch das NMR-Gerät nicht erfassten Wassermenge, unten, rechts: Fotografie der Druckapparatur, die Dimension der Beaufschlagungs- und Trocknungsfläche ist definiert durch die Aussparung einer Gummidichtung an den Stirnseiten der Mörtelprismen mit $40 \times 40 \text{ mm}^2$

4.4 Einfluss der Vorlagerung

4.4.1 Einfluss des Feuchtegehalts

Das Eindringverhalten von destilliertem Wasser und Hexan in Prismen mit unterschiedlichem Ausgangsfeuchtegehalt wurde mittels NMR-Messungen untersucht. Die Prismen (Rezeptur, vgl. Tabelle 1 (B)) mit Abmessungen von rd. $45 \times 45 \times 225 (\pm 3) \text{ mm}^3$ lagerten zunächst entsprechend der Standardvorlagerung. Anschließend wurden sie bis zum Erreichen der

Ausgleichsfeuchte bei relativen Luftfeuchten von nominell 50 % r.F., 65 % r.F., 75 % r.F. und 80 % r.F. und einer Temperatur von 23 °C gelagert. Bezogen auf eine Ausgleichsfeuchte von 50 % r.F. hatten die Probekörper nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte Wassergehalte entsprechend Tabelle 4.

Tabelle 4: Wassergehalte der Mörtelprismen nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte im entsprechenden Umgebungsklima bei einer Temperatur von 23 °C, bezogen auf eine Ausgleichsfeuchte bei 50 % r.F.

Lagerungsfeuchte	65 % r.F.	75 % r.F.	80 % r.F.	Wasserlagerung
Wassergehalt w_{j50} [l/m^3]	20	36	59	146

Die Mantelflächen der Prismen wurden erst nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte mit Epoxidharz beschichtet und die Stirnseiten mit einer Stahlbürste aufgeraut. Bis zum Versuchsstart in einem Alter von 21 Monaten wurden die Prismen in den jeweiligen Ausgleichsbedingungen gelagert.

Der Proportionalitätsfaktor F zur Bestimmung der Wassergehaltsverteilungen aus den gemessenen NMR-Signalen wurde aus dem Verhältnis des integralen Signals und des durch Wägung ermittelten Wassergehalts nach einer Saugzeit von einer Stunde an dem Prisma bestimmt, welches eine Ausgleichsfeuchte von 80 % r.F. erreicht hatte (vgl. Kapitel 3.3.3.3). Dieser Faktor wurde für die gesamte Versuchsreihe konstant gewählt.

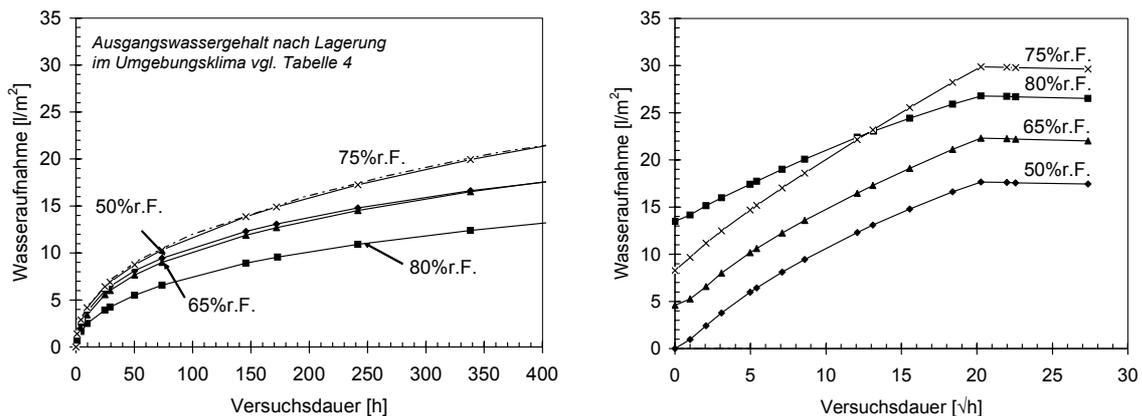


Abbildung 50: links: integrale Wasseraufnahme über die Saugfläche nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte in Luftfeuchten zwischen 50 % r.F. und 80 % r.F. (zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit des Ergebnisses wurde der „75 % r.F.-Versuch“ zweimal durchgeführt, rechts: integrale Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Wurzel der Zeit, wobei durch den Startwert die bereits enthaltene Wassermenge bezogen auf den „50 % r.F. Probekörper“ berücksichtigt wird; Mörtel ($w/z = 0,60$, Tabelle 1 (B))

Abbildung 50 zeigt zunächst die integrale Wasseraufnahme der Prismen über die Saugfläche. In Abhängigkeit des Porenfüllgrads vor Saugbeginn, der mit zunehmender Ausgleichsfeuchte zunimmt, steht dem eindringenden Wasser ein unterschiedliches Volumen an freien Poren zur Verfügung, die gefüllt werden können. Damit lässt sich die geringere Wasseraufnahme der „80 % r.F. Probekörper“ im Gegenansatz zu der vergleichbaren Wasseraufnahme der „50 % r.F. und 65 % r.F. Probekörper“ erklären, nicht jedoch die deutlich schnellere Wasseraufnahme des „75 % r.F. Probekörpers“.

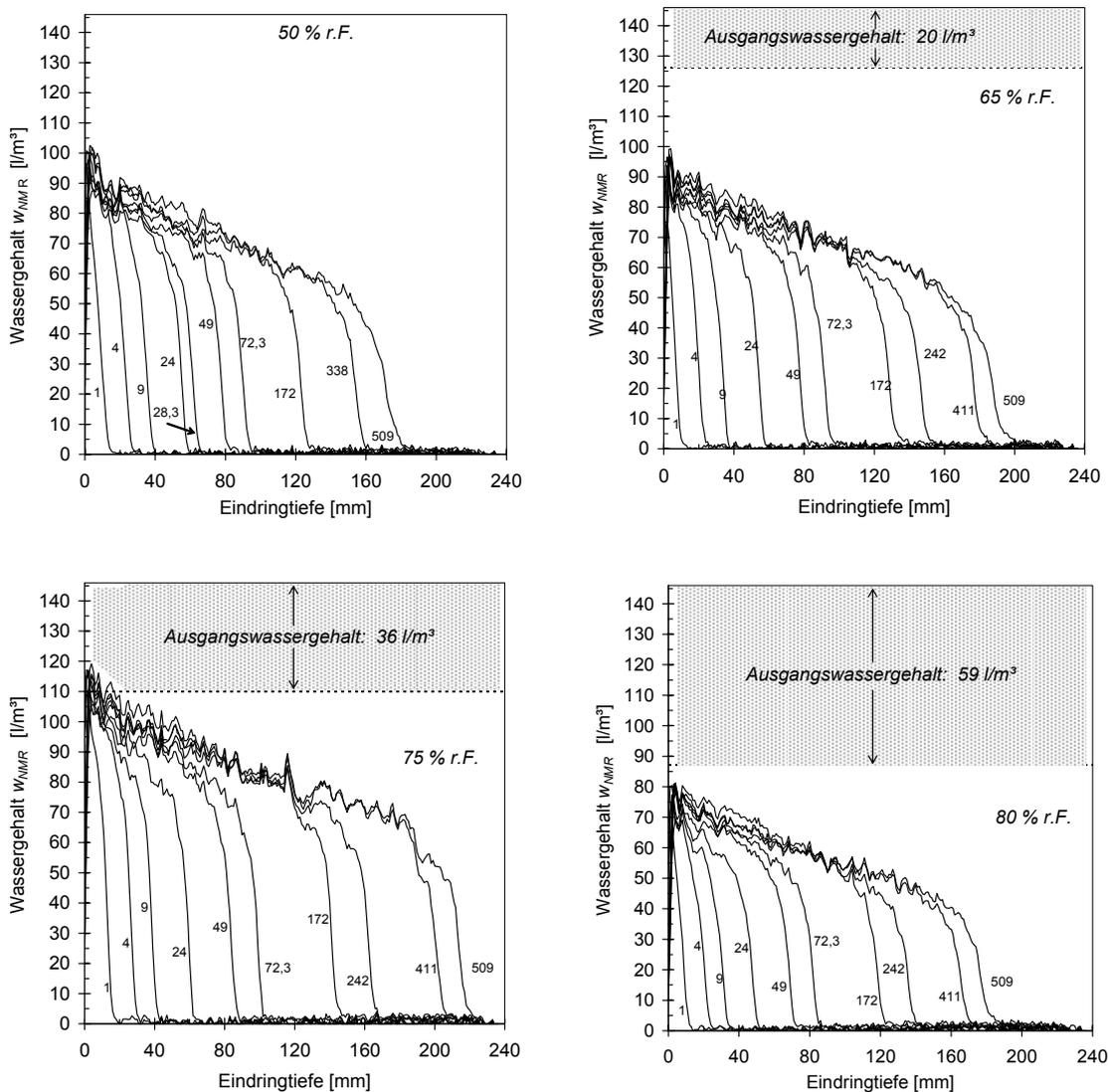


Abbildung 51: Wassereindringprofile während eines Saugversuchs nach Vorlagerung in 50, 65, 75 bzw. 80 % r.F. Luftfeuchte mittels NMR ermittelt. Die Saugzeiten sind in den Diagrammen in Stunden angegeben

Abbildung 51 zeigt die Eindringprofile des Wassers, die mittels NMR ermittelt wurden. Der freie Porenraum, der oberhalb einer relativen Luftfeuchte von 50 % r.F. füllbar ist, beträgt für die untersuchten Prismen 146 l/m³ (vgl. Tabelle 4). Dieser Bereich ist durch den Maximalwert

der y-Achse in Abbildung 51 gekennzeichnet. Die in den Bildern enthaltenen grauen Bereiche markieren das Porenvolumen, welches bereits infolge der Vorlagerung in den Luftfeuchten 65, 75 und 80 % r.F. im Vergleich zur 50 % r.F. Lagerung gefüllt ist. Die Bereiche unterhalb der grauen Bereiche entsprechen somit dem Porenraum, der durch das eindringende Wasser gefüllt werden kann. Durch die dargestellten Eindringprofile wird lediglich das Wasser dargestellt, welches sich in Poren mit Radien größer rd. 5 nm befindet (vgl. Kapitel 3.3.3). Abbildung 52 zeigt den Anteil an Wasser, der durch das NMR Gerät während der Versuchsdauer erfasst wird.

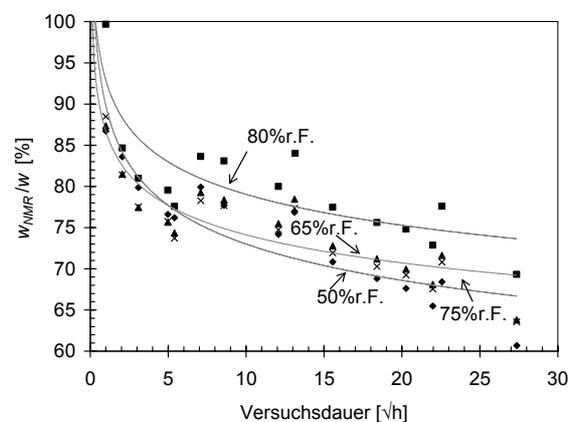


Abbildung 52: integraler Wassergehalt NMR w_{NMR} berechnet aus den Eindringprofilen aus den NMR-Messungen bezogen auf den gravimetrisch ermittelten integralen Wassergehalt w für die untersuchten Prismen, die eine Ausgleichsfeuchte zwischen 50 und 80 % r.F. aufwiesen

Mit fortschreitender Versuchsdauer nimmt der Anteil an Wasser, welches von den saugkräftigen Kapillarporen während der Saugdauer aufgenommen wird und in den Gelporenraum umverteilt wird ($1 - w_{NMR}/w$), zu. Damit verbunden ist eine zunehmende Abweichung vom Eindringverhalten nach Wurzel-Zeit (vgl. Abbildung 50 und Abbildung 53, links).

Wie auch die Versuche mittels Druckwasser gezeigt haben, wird auch in Abbildung 53, rechts deutlich, dass die Abweichung der Wasseraufnahme vom Wurzel-Zeit Gesetz mit der Menge des umgeleiteten Wassers zunimmt. Auch diese Ergebnisse legen demnach nahe, dass die Umverteilung des Wassers aus den Kapillarporen in die Gelporen den Selbstabdichtungseffekt auslöst.

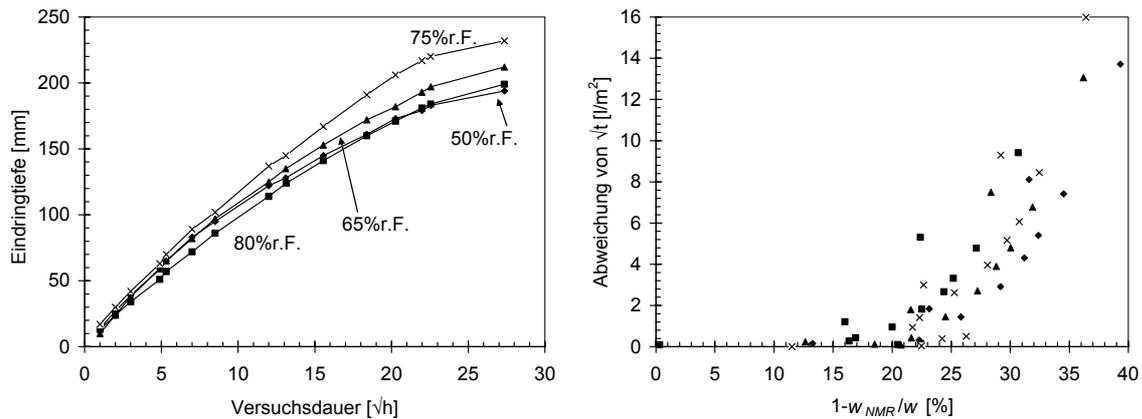


Abbildung 53: links: Eindringtiefe herausgelesen aus den mittels NMR ermittelten Eindringprofilen, rechts: Abweichung der Wasseraufnahme bzw. der Eindringtiefe vom Wurzel-Zeit-Gesetz im Zusammenhang mit dem durch das NMR-Gerät nicht erfassten Menge an Wasser

Zur weiteren Interpretation des Eindringverhaltens ist das Zusammenspiel folgender Mechanismen zu betrachten. Mit zunehmender relativer Luftfeuchte:

- A) wird die Wasseraufnahme reduziert, da weniger Porenraum für die Aufnahme des Wassers zur Verfügung steht,
- B) befindet sich bereits eine größere Menge an Wasser in den Gelporen, wodurch weniger Gelporenraum für die Umverteilung des Wassers zur Verfügung steht,
- C) ist der Sättigungsgrad des Mörtels höher, was zu größeren Transportkoeffizienten D_W nach Gleichung 18 führt. Bei vergleichbaren Wassergehaltsgradienten dw/dx führt dies zu einer schnelleren Transportgeschwindigkeit.

Abbildung 50 und Abbildung 53 zeigen, dass die Wasseraufnahme und die Eindringtiefe mit Erhöhung der Ausgleichsfeuchte von 50 % r.F. auf 75 % r.F. zu steigen scheinen. Dieses Verhalten kann durch die Erhöhung der Transportgeschwindigkeit infolge eines höheren Sättigungsgrades erklärt werden (vgl. Mechanismus C)). Aus Abbildung 51 lässt sich ablesen, dass in beiden Fällen für das kapillare Saugen ausreichend Porenraum zur Verfügung steht, was bedeutet, dass Mechanismus A) nicht zum Tragen kommt. Die größte Wasseraufnahme und die tiefste Eindringtiefe wurde nach Vorlagerung bei 75 % r.F. erreicht, wobei hier im Bereich der Saugseite des Probekörpers Wassersättigung erreicht wurde.

Bei einer Ausgleichsfeuchte über 75 % r.F. nehmen die Wasseraufnahme und die Eindringtiefe wiederum ab, was auf die Reduzierung des zur Verfügung stehenden Transportraums zurückzuführen ist, vgl. Mechanismus A). Gleiche Beobachtungen konnten in [77] für Luftfeuchten zwischen 60 und 90 % r.F. gemacht werden. Gleichzeitig steht für die

Umverteilung des Wassers weniger Platz im Gelporenraum zur Verfügung, was die verhältnismäßig geringe Menge an umverteiltem Wasser des „80 % r.F. Probekörpers“ in Abbildung 52 erklärt, vgl. Mechanismus B).

Bei weiterer Erhöhung der Ausgleichsfeuchte ist zunehmend mehr Wasser in den kleinen Gelporen, was zum einen die Sauggeschwindigkeit und zum anderen die Menge an umverteilbarem Wasser weiter reduziert. Es ist zu erwarten, dass das Eindringverhalten sich hier entsprechend des Wurzel-Zeit-Gesetzes verhält, was schon die Verläufe aus Abbildung 53 andeuten.

Anhand weiterer Prismen wurde das Eindringverhalten von n-Hexan nach Vorlagerung in 50 bzw. 80 % r.F. untersucht. Entsprechend den Beobachtungen in Kapitel 4.2.1 zeigt Hexan ein Eindringverhalten entsprechend des Wurzel-Zeit-Gesetzes solange, bis die Flüssigkeit das Ende des Probekörpers erreicht hat (vgl. Abbildung 54 und Abbildung 55). Grundsätzlich dringt Hexan aufgrund des bei Wasser auftretenden Selbstabdichtungseffekts schneller in das Material ein als Wasser. Entsprechend der physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeiten (vgl. Kapitel 4.2.1) müsste Wasser rd. 12 % schneller in das Porensystem eindringen.

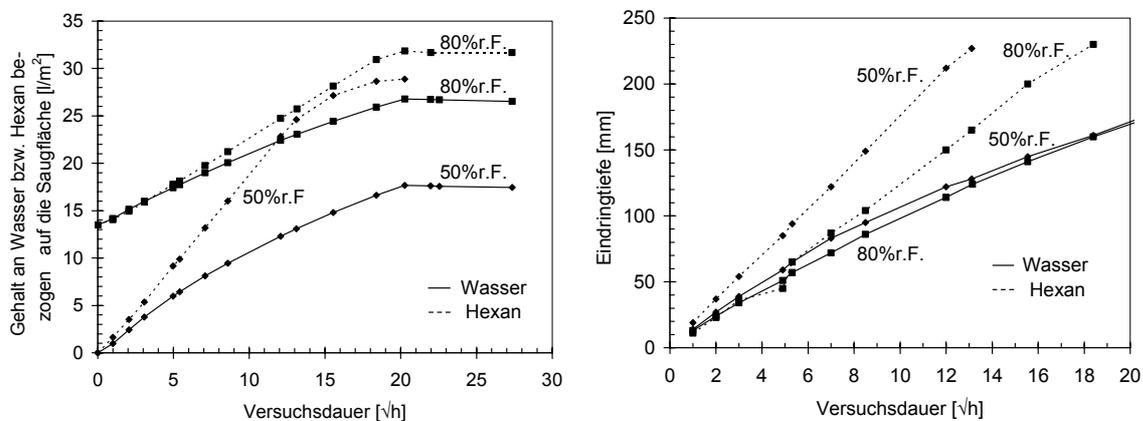


Abbildung 54: links: integrale Aufnahme von Hexan im Vergleich zu Wasser in Abhängigkeit der Wurzel der Zeit, wobei durch den Startwert die bereits enthaltene Wassermenge bezogen auf den „50 % r.F. Probekörper“ berücksichtigt wird; rechts: Eindringtiefen von Hexan im Vergleich zu Wasser herausgelesen aus den mittels NMR ermittelten Eindringprofilen; Mörtel ($w/z = 0,60$, Tabelle 1 (B))

Abbildung 55 zeigt die mittels NMR gemessenen Eindringprofile von n-Hexan. Genauso wie bei Wasser führt das Eindringen von n-Hexan nach Vorlagerung in 80 % r.F. zu einer Sättigung des vor Saugbeginn ungefüllten Porenraums im Bereich der Saugfläche. Im Gegensatz zu Wasser trifft dies auch bei einer Vorkonditionierung bei 50 % r.F. zu (vgl. Abbildung 51 und Abbildung 55). Die Aufnahmegeschwindigkeit von Hexan ist wie bei Wasser vom Ausgangsfeuchtegehalt abhängig, d.h. mit zunehmendem Porenfüllgrad vor Versuchsbeginn

steht für die Aufnahme weniger Porenraum zur Verfügung, der gefüllt werden kann, vgl. Mechanismus A).

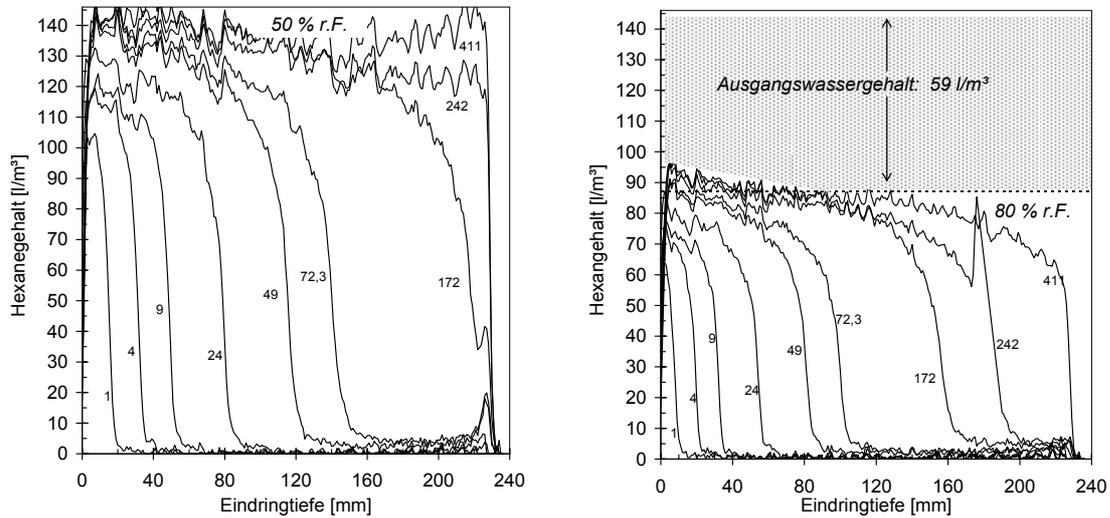


Abbildung 55: Eindringprofile von n-Hexan während eines Saugversuchs nach Vorlagerung in 50 bzw. 80 % r.F. Luftfeuchte mittels NMR ermittelt. Die Saugzeiten sind in den Diagrammen in Stunden angegeben

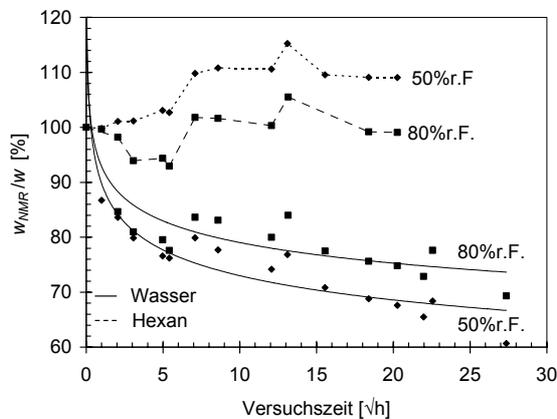


Abbildung 56: integraler Wasser- bzw. Hexangehalt NMR w_{NMR} berechnet aus den Eindringprofilen aus den NMR-Messungen bezogen auf den gravimetrisch ermittelten integralen Wasser- bzw. Hexangehalt w für die untersuchten Prismen, die eine Ausgleichsfeuchte zwischen 50 bzw. 80 % r.F. aufwiesen

Abbildung 56 zeigt für die gemessenen Eindringprofile mittels NMR die Menge an Wasser, die durch das NMR-Gerät erfasst wird. Es wird deutlich, dass im Gegensatz zu Wasser das eindringende Hexan offensichtlich nicht durch die Wechselwirkungskräfte in den kleinen Poren beeinflusst wird, so dass das gesamte eingedrungene Hexan durch das Messgerät erfasst werden kann. Beim Eindringen von Hexan treten folglich keine merklichen Wechselwirkungen mit dem Gelporenraum auf, die zu einem Quellen führen und somit den Selbstabdichtungseffekt auslösen. Dies korreliert wiederum mit Untersuchungen von [13], in

denen gezeigt wurde, dass n-Hexan keine Quellen der Zementmatrix verursacht (vgl. Kapitel 2.4.6.4).

4.4.2 Überprüfung der Reversibilität der Selbstabdichtung

Zur Überprüfung der Reversibilität der Selbstabdichtung wurde ein Prisma mit den Abmessungen von $37 \times 37 \times 106$ mm zunächst entsprechend der Standardvorlagerung gelagert. Die Rezeptur entsprach Tabelle 1 (A), die Vorbehandlung der Prismen entsprach der Standardvorlagerung inkl. Beschichtung der Mantelflächen. Der Versuchsbeginn dieser Versuche fand in einem Betonalter von rd. 3 Jahren statt. Abbildung 57, links oben gibt einen Überblick über den Ablauf des Gesamtversuchs. In Zyklus I saugte das Prisma ausgehend von der Ausgleichfeuchte bei $23\text{ °C} / 50\% \text{ r.F.}$ Wasser über eine Stirnseite auf. Abbildung 57, oben, rechts zeigt die mit Kernspinresonanz gemessenen Eindringprofile nach 9, 32 und 48 Stunden. Im Anschluss daran wurden beide Stirnseiten des Prismas abgedeckt und das Weiterleiten beobachtet. Anschließend wurde die Abdichtung an den Stirnseiten entfernt und das Prisma trocknete über diese für einen Zeitraum von weiteren 535 Tagen.

Wie aus Abbildung 57, links ersichtlich, war das Ausgangsgewicht des Prismas am Ende des ersten Zyklus noch nicht erreicht. Dennoch wurde unter diesen Ausgangsbedingungen der zweite Zyklus gestartet. Der zeitliche Ablauf des Zyklus II verlief analog zu Zyklus I, wobei die Trocknung hier über einen Zeitraum von 139 Tagen beobachtet wurde.

Abbildung 57, links unten zeigt die Wasseraufnahme während beider Zyklen in Abhängigkeit der Zeit im Wurzelmaßstab. Während beider Zyklen ist ein Abweichen vom Wurzel-Zeit-Gesetz zu beobachten (Abbildung 57, unten links). Die Wasseraufnahme zu Beginn des Zyklus I ist zunächst gegenüber der Wasseraufnahme während des Zyklus II, die von einem leicht höheren Feuchtegehalt ausgeht, höher. Gleichzeitig ist hier zu Beginn im Vergleich zu Zyklus II eine stärkere Abweichung vom Wurzel-Zeit-Gesetz zu beobachten. Schon nach kurzer Saugzeit gleicht sich jedoch die Eindringgeschwindigkeit an, was sowohl an der Steigung der integralen Wasseraufnahme nach rd. 9 Stunden (Abbildung 57, links unten: Zeitpunkt $3 [\sqrt{h}]$) wie auch an den Eindringprofilen (rechts oben) zu erkennen ist. Grund für das kurzfristig schnellere Eindringverhalten während des Zyklus I kann die geringere Füllung der Gelporen zu Beginn der Wasseraufnahme sein, die hier erst mit der Wasseraufnahme gefüllt werden, während diese bei Zyklus II teilweise bereits gefüllt sind. Dies bewirkt, dass zum einen aufgrund des größeren füllbaren Gelporenvolumens der Selbstabdichtungseffekt ein wenig stärker ausgeprägt ist, zum anderen wird dadurch das anfänglich schnellere Aufnahmeverhalten begründet.

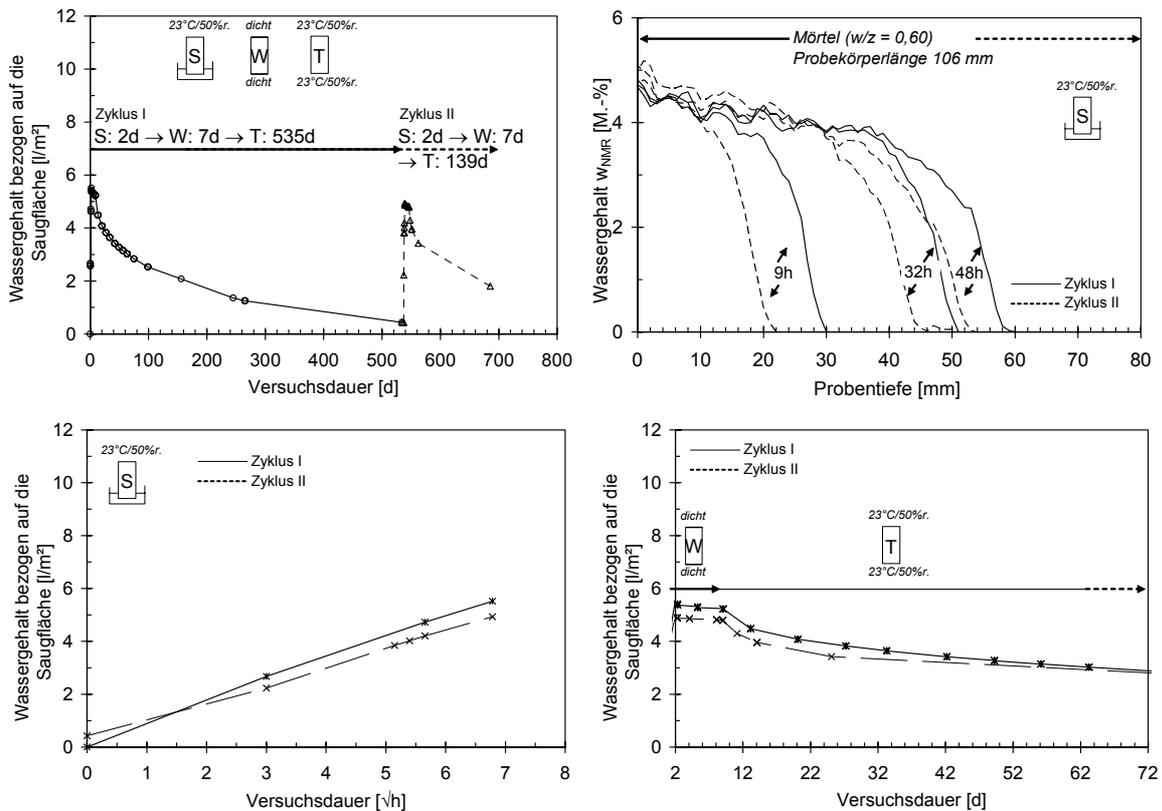


Abbildung 57: Versuchsergebnisse zur Reversibilität, links oben: Ablauf des gesamten Versuchs, rechts oben: Wassereindringprofile aus Kernspinresonanz während des Saugversuchs, links unten: Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Wurzel der Zeit, rechts unten: integraler Wassergehalt bezogen auf die Saugfläche in Abhängigkeit der Versuchsdauer während des Weiterleitens und des Trocknens über beide Stirnseiten; S: Saugen, W: Weiterleiten; T: Trocknen

Die Trocknung des Prismas verläuft entsprechend des höheren Gradienten zunächst für den Probekörper mit höherem Sättigungsgrad schneller, bis sich die Trocknungsgeschwindigkeiten erwartungsgemäß zunehmend angleichen.

Mit diesem Versuch lässt sich eindeutig zeigen, dass der Mechanismus der Selbstabdichtung ein reversibler Prozess ist. Wären Ablagerungen oder Porenverstopfungen die Hauptursache der Selbstabdichtung, wäre ein deutlich langsames Eindringen des Wassers während des Zyklus II zu beobachten.

4.5 Einfluss der Gefügestruktur

Abbildung 58 gibt einen Überblick über die Rezepturen mit den Kurzbezeichnungen /27/-/36/ gemäß Abbildung 23. Die Mischungen unterscheiden sich in ihrem w/z -Wert, dem Gehalt und der Größe an Gesteinskörnung und dem Zementsteinvolumen. Die Untersuchungen an Probekörpern aus diesen Mischungen werden im Folgenden näher erläutert. Ausgehend von

einer praxisüblichen Betonzusammensetzung mit einem w/z -Wert von 0,6 und einem Zementgehalt von 320 kg/m^3 (Referenzbeton B) wurde hier zunächst der Wasserzementwert bei gleichbleibendem Zementleimvolumen erniedrigt. Hierdurch sollte der Einfluss des veränderten Porenraums auf die Selbstabdichtung untersucht werden.

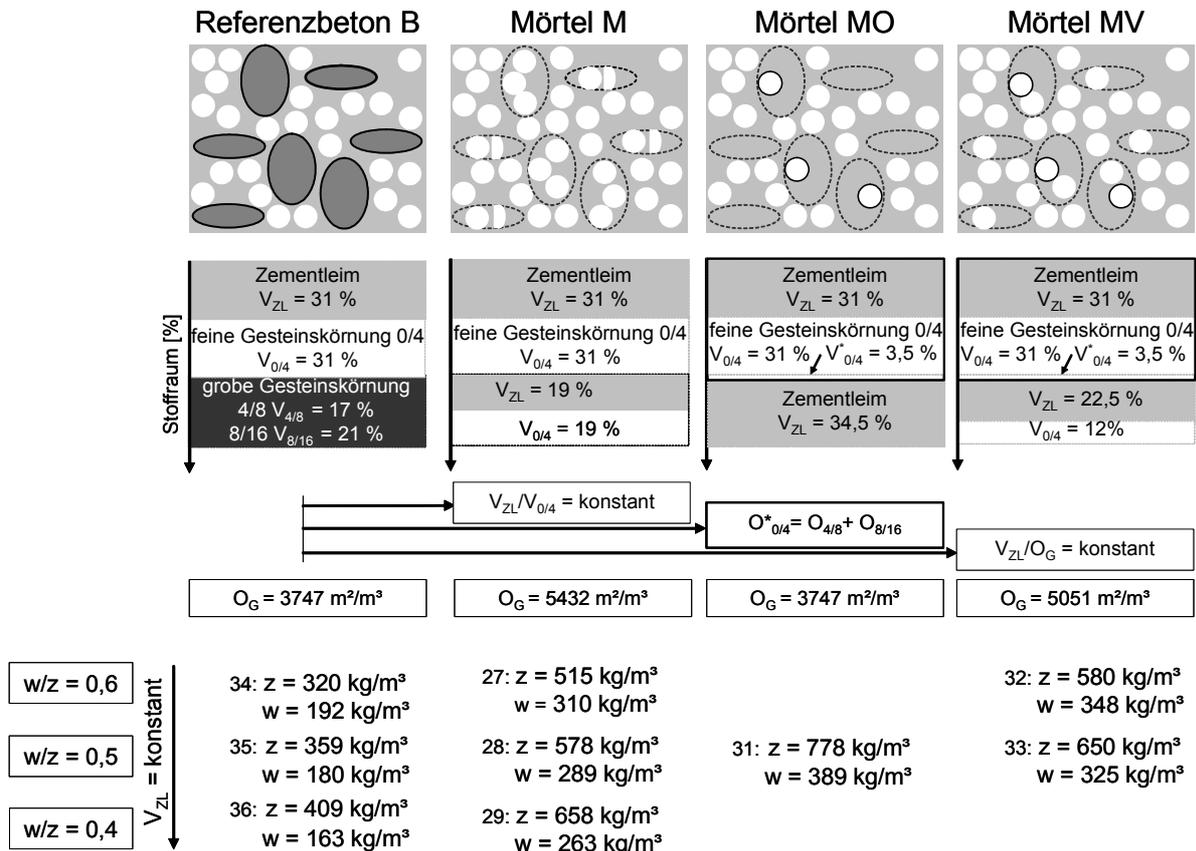


Abbildung 58: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem gewählten Referenzbeton und des Mörtels, an welchem die Transportmechanismen untersucht wurden: Referenzbeton B; Mörtel M mit gleichem Verhältnis zwischen Volumen Zementleim (V_{ZL}) und Gesteinskörnung 0/4 ($V_{0/4}$); Mörtel MO mit gleicher Oberfläche der Gesteinskörnung (O_G) und Mörtel MV mit gleichem Verhältnis zwischen V_{ZL} und O_G

Der Einfluss der Größe und der Oberfläche der Gesteinskörnung wurde mit weiteren Mischungsvarianten untersucht. In den Mischungen „M“ wurden aus der Betonzusammensetzung des Referenzbetons die Gesteinskörnung 4/8 und 8/16 „herausgenommen“ und mit Zementleim und Gesteinskörnung 0/4 ersetzt, so dass das Verhältnis zwischen Volumen Zementleim und Gesteinskörnung 0/4 des Mörtels dem des Referenzbetons entsprach. Im Vergleich zur Referenzmischung erhöhte sich damit das Volumen des Zementleims um 19 %, die Oberfläche der Gesteinskörnung erhöhte sich ebenfalls deutlich (vgl. Abbildung 58, Mischung „M“).

Bei einer weiteren Mischungsreihe „MO“ sollte die Oberfläche der Gesteinskörnung der des Referenzbetons entsprechen. Zu diesem Zweck wurde aus der Betonzusammensetzung des Referenzbetons die Gesteinskörnung 4/8 wie 8/16 „herausgenommen“ und eine Menge an Sand (Volumen $V_{0/4}^*$) hinzugefügt, deren Oberfläche der Oberfläche der entnommenen Gesteinskörnung 4/8 und 8/16 entsprach (Abschätzung der Oberfläche der Gesteinskörnung unter Annahme kugelförmiger Gesteinskörner). Der verbleibende Stoffraum wurde mit Zementleim aufgefüllt. Da die feine Gesteinskörnung 0/4 eine wesentlich größere spezifische Oberfläche hat, als die grobe Gesteinskörnung 4/8 und 8/16, hatte der Mörtel MO bei gleich bleibender Oberfläche der Gesteinskörnung im Vergleich zum Referenzbeton einen sehr hohen Anteil an Zementleim bezogen auf die Oberfläche der Gesteinskörnung, so dass diese Mischung für einen w/z-Wert von 0,6 nicht herstellbar war und demnach nur mit einem w/z-Wert von 0,5 ausgeführt wurde. Daher wurde zusätzlich ein weiterer Mörtel „MV“ hergestellt, bei welchem das Verhältnis Volumen Zementleim zu Oberfläche Gesteinskörnung konstant gehalten wurde. Die Vorbehandlung der Prismen entsprach der Standardvorlagerung inkl. Beschichtung der Mantelflächen. Bei Versuchsbeginn hatten die Proben ein Alter von rd. 13 Monaten.

Abbildung 59 zeigt den Einfluss des Wasserzementwertes auf das Eindringverhalten in die Referenzbetone „B“. Das Zementsteinvolumen der hier gezeigten Mischungen war konstant. Sowohl Eindringprofile wie auch die integrale Wasseraufnahme zeigen einen Verlauf, der in gleichem Maße vom Wurzel-Zeit-Gesetz abweicht. Die Eindringtiefen stellen dabei jeweils die maximalen Eindringtiefen in den Probekörper dar und wurden aus den Eindringprofilen der NMR-Messungen abgelesen. Abbildung 60 zeigt die Ergebnisse eines Saugversuchs an weiteren Probekörpern, bei welchen die Wasseraufnahme in kürzeren Zeitintervallen und über einen längeren Zeitraum ermittelt wurde. Im Bild links ist neben der gemessenen integralen Wasseraufnahme über die Saugfläche die Wasseraufnahme dargestellt, die bei einem Eindringverhalten nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz zu erwarten wäre. Im Bild rechts ist die Abweichung der tatsächlichen Wasseraufnahme von diesem Erwartungswert in Prozent dargestellt. Mit abnehmendem Wasserzementwert wird bei gleichem Zementleimvolumen eine stärkere Selbstabdichtung beobachtet.

Die Variation des w/z-Wertes führte zum einen zu einer Verringerung der Gesamtporosität w_f , zum anderen zu einer Erhöhung der inneren Oberfläche O_i mit abnehmendem w/z-Wert (vgl. Abbildung 59, unten rechts). Dies resultiert zum einen in einer Verringerung der über die Stirnseite aufnehmbaren Wassermenge und zum anderen in einer Zunahme der Selbstabdichtung, was auf die Erhöhung der inneren Oberfläche bei niedrigen w/z-Werten zurückgeführt wird. Diese Beobachtungen konnten ebenso bei den Mörteln „M“ und „MV“ gemacht werden.

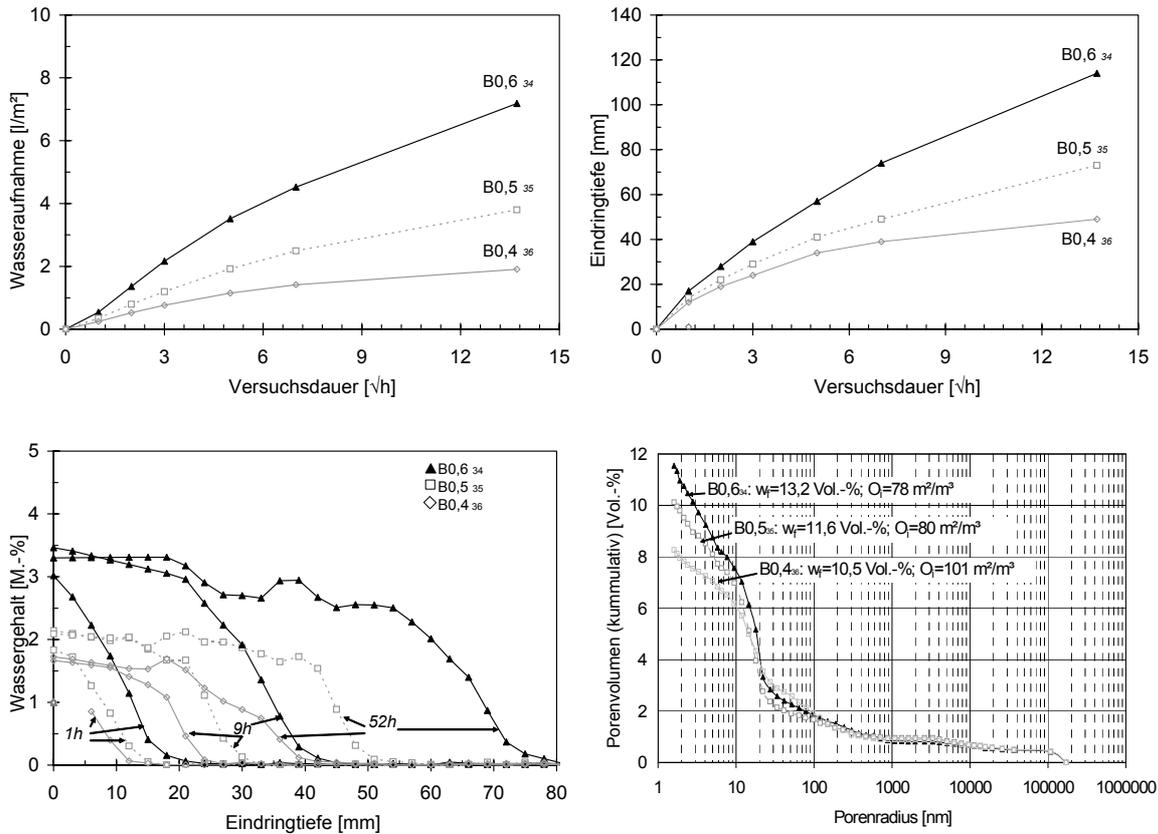


Abbildung 59: Einfluss des w/z -Wertes auf das Eindringverhalten von Wasser, oben links: gravimetrische Wasseraufnahme, oben rechts: NMR-Eindringtiefe, unten links: Eindringprofile des Wassergehalts w_{NMR} , unten, rechts: Summenporenverteilung inkl. der Gesamtporosität w_f und der inneren Oberfläche O_i

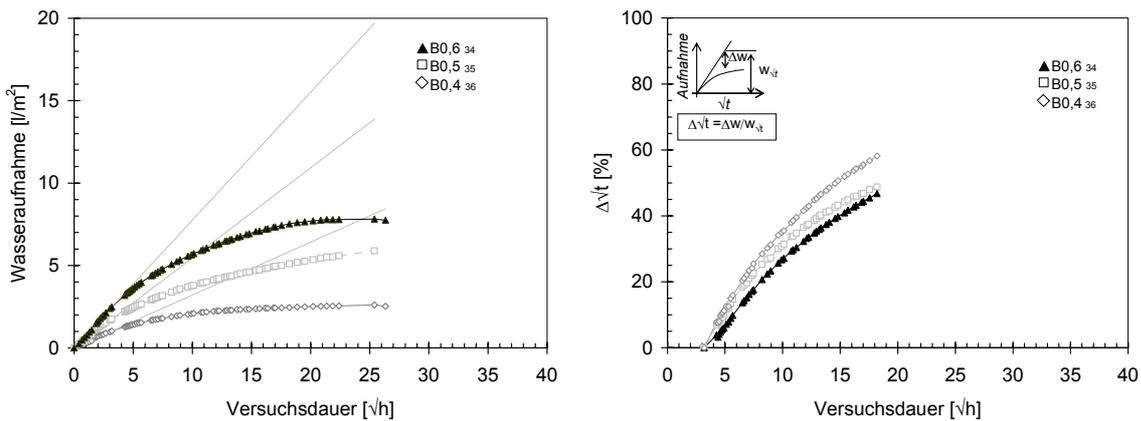


Abbildung 60: Einfluss des w/z -Wertes auf das Eindringverhalten von Wasser, links: gravimetrische Wasseraufnahme inkl. nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz zu erwartende Wasseraufnahme, rechts: Abweichung des tatsächlichen vom nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz zu erwartenden Eindringverhalten in Prozent

Abbildung 61 zeigt die Ergebnisse von Saugversuchen an der Reihe „ $w/z = 0,50$ “. Die jeweiligen Rezepturen unterscheiden sich dabei jeweils im Anteil an Zementleimvolumen, der

Oberfläche der Gesteinskörnung und der Größe der Gesteinskörnung, vgl. Abbildung 58. Die aufgenommene Wassermenge nimmt mit zunehmendem Zementleinvolumen erwartungsgemäß aufgrund der höheren Porosität stärker zu (Abbildung 61, oben links), während dies bei der Eindringtiefe deutlich weniger stark ausgeprägt ist.

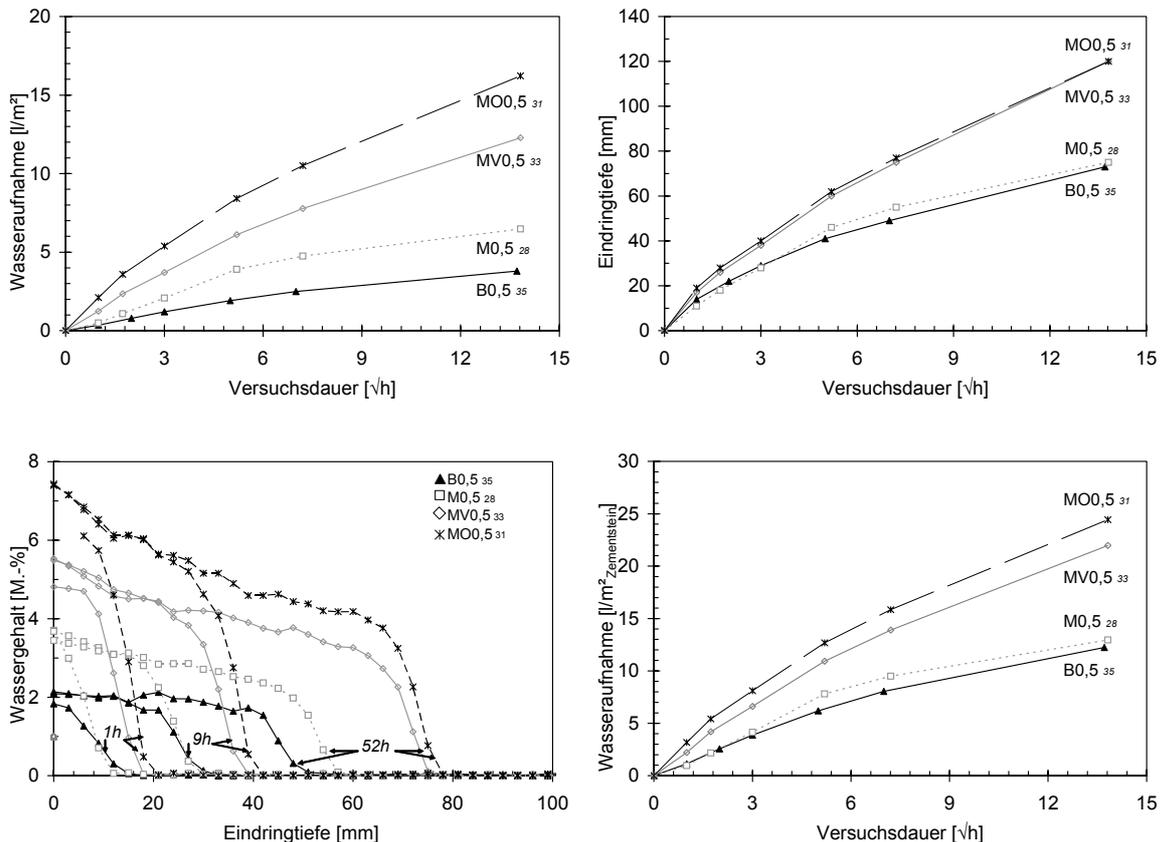


Abbildung 61: Einfluss der Oberfläche der Gesteinskörnung auf das Eindringverhalten von Wasser, oben, links: gravimetrische Wasseraufnahme, oben rechts: NMR-Eindringtiefe, unten links: Eindringprofile des Wassergehalts w_{NMR} , unten, rechts: Wasseraufnahme bezogen auf den Zementstein

Abbildung 61, unten, rechts zeigt die aufgenommene Wassermenge bezogen auf den Zementsteinanteil der Saugfläche. Vergleicht man diesen Verlauf mit dem Verlauf der maximalen Eindringtiefe in Abbildung 61, oben, rechts, wird deutlich, dass die Abweichung vom Wurzel-Zeit-Gesetz für die Wasseraufnahme mit der Abweichung der Eindringtiefe übereinstimmt. Die Unterschiede im Vergleich der aufgenommenen Wassermenge resultieren demnach aus dem unterschiedlichen Anteil an Zementleinvolumen, welches eine erhöhte Wasseraufnahme infolge höherer Porosität (vgl. Profile Abbildung 61) ermöglicht. Ein eindeutiger Einfluss der Oberfläche der Gesteinskörnung oder der Größe der Gesteinskörnung auf das Eindringverhalten konnte anhand dieser Daten nicht festgestellt werden. Bei einem w/z-Wert von 0,50 ist der Einfluss des veränderten Porengefüges an den Korngrenzen auf die Transportgeschwindigkeit im Vergleich zum restlichen Transportvolumen offensichtlich nicht

maßgebend. Deutlich wird jedoch, dass die Eindringgeschwindigkeit von der Tortuosität abhängig sein muss. Je mehr Transportwege durch Gesteinskörnung unterbrochen bzw. umgelenkt werden (vgl. Abbildung 61, rechts), umso geringer wird die Eindringgeschwindigkeit.

Abbildung 62 zeigt Ergebnisse der Saugversuche der Betonmischungen „w/z = 0,6“ und „w/z = 0,40“ im Vergleich zu den entsprechenden Versuchen der „M“-Mischungen. Das Verhältnis zwischen Zementsteinvolumen und Volumen der Gesteinskörnung wurde hier jeweils konstant gehalten, was eine Erhöhung der Oberfläche der Gesteinskörnung der Mischungen „M“ bedeutete, da hier das Volumen der Gesteinskörnung durch „kleinere“ Zuschläge eingestellt wurde. Während bei den „w/z = 0,6“-Mischungen, entsprechend den zuvor gezeigten „w/z = 0,5“-Mischungen die Wasseraufnahme bezogen auf das Zementsteinvolumen unabhängig von der Oberfläche der Gesteinskörnung verlief, konnte bei einem geringeren w/z-Wert von 0,4 ein Einfluss der Oberfläche der Gesteinskörnung festgestellt werden. Durch die erhöhte Oberfläche der Gesteinskörnung wird die Porosität in der Kontaktzone erhöht. Während dies bei höheren w/z-Werten einen sehr geringen Einfluss auf die Transportgeschwindigkeit hat, ist dieser Einfluss bei einem w/z-Wert von 0,4 zu erkennen. Abbildung 62, rechts zeigt die Abweichung vom Eindringverhalten nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz. Während der Beton mit einem w/z-Wert von 0,4 die größte Abweichung vom Eindringverhalten nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz aufweist, liegt die Abweichung bei den anderen Mischungen in ähnlicher Größenordnung. Ein Vergleich der inneren Oberflächen des Porenvolumens zeigt, dass die größte Abweichung vom Wurzel-Zeit-Gesetz mit einer großen inneren Oberfläche des Zementsteins von $326 \text{ m}^2/\text{m}^3_{\text{Zementstein}}$ einhergeht, während die anderen Mischungen eine mittlere innere Oberfläche von $225 \text{ m}^2/\text{m}^3_{\text{Zementstein}}$ aufweisen.

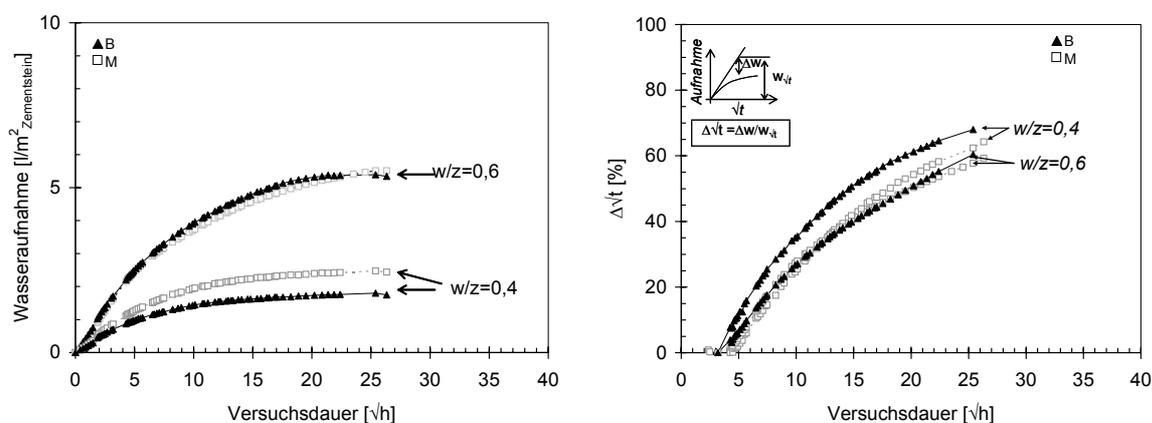


Abbildung 62: Einfluss der Oberfläche der Gesteinskörnung auf das Eindringverhalten von Wasser, links: gravimetrische Wasseraufnahme bezogen auf den Zementstein, rechts: Abweichung vom Wurzel-Zeit-Gesetz

Um den Einfluss der inneren Oberfläche des Zementsteins auf das Ausmaß der Selbstabdichtung zu untersuchen, wurde die Abweichung vom Wurzel-Zeit-Gesetz nach einer definierten Saugzeit von 188 Stunden an allen untersuchten Betonrezepturen nach Abbildung 23 bestimmt und der nach Gleichung 40 ermittelten inneren Oberfläche des Zementsteins gegenübergestellt. Abbildung 63 zeigt das entsprechende Ergebnis.

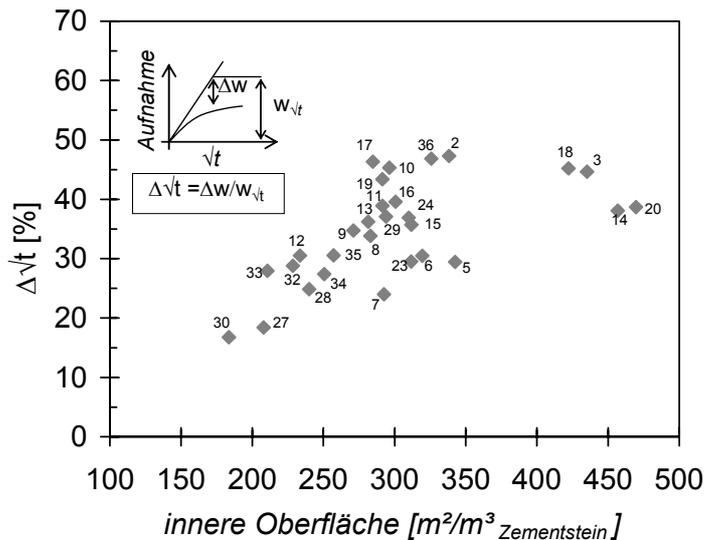


Abbildung 63: Abweichung vom Wurzel-Zeit-Gesetz nach einer Saugdauer von 188 Stunden in Abhängigkeit der inneren Oberfläche des Zementstein für sämtliche Mischungen nach Abbildung 23 (Zahl im Diagramm über Abbildung 23 der Betonzusammensetzung zuzuordnen)

Es wird deutlich, dass das Ausmaß der Selbstabdichtung von der Größe der inneren Oberfläche des Zementsteins bestimmt wird. Mit zunehmender innerer Oberfläche des Zementsteins nimmt die Abweichung vom nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz erwarteten Eindringverhalten tendenziell zu. Da die innere Oberfläche des Zementsteins in erster Linie durch den höheren Anteil an Gelporen bestimmt wird, deuten auch diese Ergebnisse darauf hin, dass die Selbstabdichtung maßgeblich durch die Wechselwirkungen zwischen Gelporenraum und eindringendem Wasser bestimmt wird.

Bei gleich bleibender Porosität führt eine Verschiebung der Porengrößenverteilung zu kleineren Poren, d.h. eine Verfeinerung des Gefüges zu einer Zunahme der inneren Oberfläche. Je größer die innere Oberfläche bezogen auf das Zementsteinvolumen ist, umso größer ist der Anteil der quellfähigen Gelporen. Dies führt zur einer stärkeren Abweichung vom Wurzel-Zeit-Gesetz.

4.6 Zusammenfassung

Organische Flüssigkeiten

Die durchgeführten Versuche mit verschiedenen organischen Flüssigkeiten haben gezeigt, dass das Ausmaß der Selbstabdichtung gegenüber dem Eindringen der Flüssigkeiten, die aus der Wechselwirkung zwischen Flüssigkeit und dem Gefüge resultiert in Abhängigkeit der physikalische Größen Molekülgröße und Dipolmoment unterschiedlich beeinflusst wird. Mit abnehmender Molekülgröße, die ein Eindringen in Poren mit kleinem Durchmesser begünstigt und zunehmendem Dipolmoment nehmen die Stärke der Wechselwirkung zwischen der Gelporenflüssigkeit und der Gelporenoberfläche zu. Die Ursache der Lösung von Calciumhydroxid aus der Matrix als Ursache für die Selbstabdichtung ist unwahrscheinlich, da dieser Effekt auch bei Flüssigkeiten auftritt, die kein Calciumhydroxid lösen können.

Calciumhydroxidlösungen

Auch die Ablagerung von Calciumhydroxid im Porengefüge konnte als Ursache für den Selbstabdichtungseffekt ausgeschlossen werden, da im Vergleich zur Aufnahme destillierten Wassers bei Aufnahme gesättigter Calciumhydroxidlösung kein zusätzlicher Selbstabdichtungseffekt beobachtet werden konnte. Die bremsende Wirkung eines Diffusionsstroms bzw. eines osmotischen Drucks durch Lösung von Calciumhydroxid scheidet als maßgebende Ursache aus, da dieser Effekt bei Ethylenglycol im Vergleich zu Wasser stärker hätte ausgeprägt sein müssen, was nicht der Fall war. Was aber durchaus anhand der Versuche gezeigt werden konnte: Schon die Lösung einer kleinen Menge an Calciumhydroxid aus der Zementsteinmatrix kann die Eindringgeschwindigkeit merklich erhöhen, was auf eine damit verbundene Erhöhung der Porosität und Konnektivität zurückzuführen ist.

Ionenkonzentration

Saugversuche mit destilliertem Wasser im Vergleich zu Leitungswasser und Natriumchloridlösungen haben gezeigt, dass der Selbstabdichtungseffekt mit zunehmender Menge an Wasser, welches in den Gelporenraum umverteilt wird, zunimmt. Hierbei wird der Selbstabdichtungseffekt bei gleicher Menge an in den Gelporenraum umverteiltem Wasser mit zunehmender Ionenkonzentration verstärkt. In Versuchen von [151] konnte festgestellt werden, dass der Spaltdruck mit zunehmender Natriumchloridkonzentration zunimmt. Dies lässt darauf schließen, dass das durch das umverteilte Wasser ausgelöste Quellen infolge eines Spaltdrucks Ursache für den Selbstabdichtungseffekt ist.

Druckwasser

Versuche an Mörtelprismen, die mit drückendem Wasser beaufschlagt wurden, zeigen, dass das Maß der Selbstabdichtung unabhängig von der Druckhöhe davon abhängig ist, wie viel Wasser in den Gelporenraum der Zementsteinmatrix umgelagert bzw. vorhanden ist. Mit zunehmender Druckhöhe wird demnach die selbstabdichtende Wirkung, d.h. die Abweichung vom Eindringverhalten proportional zur Wurzel der Zeit, ausgeprägter, da mehr Wasser den Gelporenraum erreicht.

Ausgleichsfeuchte

Neben den Versuchen mit Druckwasser, legen auch die Versuche, in denen die Probekörper in verschiedenen relativen Luftfeuchten vorkonditioniert waren nahe, dass die Umverteilung des Wassers aus den Kapillarporen in die Gelporen den Selbstabdichtungseffekt auslösen. Es zeigte sich, dass die Aufnahmegeschwindigkeit einerseits und der Selbstabdichtungseffekt andererseits durch den Ausgangsfeuchtegehalt beeinflusst werden. Dies wird durch folgende Mechanismen beeinflusst: A) Reduzierung des zur Verfügung stehenden Transportraums durch bereits gefüllte Poren, B) Die Umverteilung des Wassers in den Gelporenraum wird mit zunehmendem Ausgleichsfeuchtegehalt reduziert und C) Erhöhung der Transportgeschwindigkeit mit zunehmendem Porensättigungsgrad.

Vorbelastung

Dass der Selbstabdichtungseffekt ein reversibler Prozess ist, konnte anhand eines wiederholten Saugversuchs im Anschluss an eine Austrocknung gezeigt werden. Auch dies zeigt, dass das Umverteilen des Wassers in den Gelporenraum verbunden mit einem Quellen der maßgebende Selbstabdichtungsmechanismus ist, da Ablagerungsvorgänge und physikalische Verstopfung eine Reversibilität ausschließen würden.

Einfluss Gefüge

Die systematischen Untersuchungen an Mischungsvarianten ausgehend von einem Referenzbeton mit einem w/z-Wert von 0,60 haben gezeigt, dass eine Verringerung des w/z-Wertes bei gleichbleibendem Zementsteinvolumen neben der geringeren Eindringgeschwindigkeit infolge reduzierter Gesamt- bzw. Kapillarporosität einen stärkeren Selbstabdichtungseffekt aufweisen, welcher auf die Erhöhung der inneren Oberfläche des Zementsteins zurückzuführen ist. Die Variation des Gehalts an Gesteinskörnung machte deutlich, dass die Eindringgeschwindigkeit deutlich von der Tortuosität abhängt. Je mehr Transportwege durch die Gesteinskörnung unterbrochen werden, umso geringer wird die Eindringgeschwindigkeit. Weiter wurde festgestellt, dass eine erhöhte Porosität der Kontakt-

zonen infolge größerer Oberfläche der Gesteinskörnung bei höheren w/z -Werten einen sehr geringen Einfluss auf die Transportgeschwindigkeit hat, während dieser Einfluss bei einem w/z -Wert von 0,40 deutlich zu erkennen war. Somit nimmt die Porosität im Zementstein mit einer Zunahme an Gesteinsoberfläche zu, da der Anteil der porösen Kontaktzonen im Zementstein ansteigt. Die Form, die Größe und die Vernetzung der Poren sind für den Transport von entscheidender Bedeutung.

Eindringversuche an Betonmischungen unterschiedlichster Zusammensetzung zeigen, dass der Selbstabdichtungseffekt mit zunehmender innerer Oberfläche des Zementsteins zunimmt. Da die innere Oberfläche maßgeblich vom Anteil an Gelporen im Zementstein bestimmt wird, zeigt auch dieser Sachverhalt, dass der Selbstabdichtungseffekt durch die Wechselwirkung zwischen Wasser und Gelporenraum verursacht wird.

4.7 Schlussfolgerung und mathematische Beschreibung der Selbstabdichtung

Der Selbstabdichtungseffekt wird auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen damit erklärt, dass Wasser, welches von den großen Kapillaren aufgesaugt wird, in die kleinen Poren, d.h. den Gelporenraum umverteilt und hierdurch die Eindringgeschwindigkeit reduziert wird. Es konnte gezeigt werden, dass das Maß der Selbstabdichtung, d.h. die Abweichung von dem nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz zu erwartenden Eindringverhalten, von der Menge an Wasser abhängig ist, die in den Gelporenraum umverteilt wurde. Die Reduzierung der Eindringgeschwindigkeit resultiert zum einen daraus, dass das Wasser in den kleinen Poren infolge von Oberflächenkräften so stark gebunden ist, dass es kapillar nicht weitertransportiert werden kann (vgl. Bingham Medium), zusätzlich bewirkt der sich in diesen Porenbereichen aufbauende Spaltdruck ein Quellen, wodurch der Transportraum und vor allem die Konnektivität der Poren untereinander reduziert wird. Anhand von Abbildung 64 werden die Zusammenhänge, die den Mechanismus der Selbstabdichtung umgeben, erklärt. Entscheidende Bedeutung hat dabei die Feuchtespeicherfunktion bzw. die innere Oberfläche und die Porengrößenverteilung.

Abbildung 64, links zeigt schematisch eine Feuchtespeicherfunktion, deren Verlauf dem Mörtel nach Tabelle 1 B) entspricht. Anstelle der relativen Luftfeuchte der Umgebung zeigt die x-Achse den Porenradius in nm, der nach Gleichung 2 im direkten Zusammenhang mit der relativen Luftfeuchte steht ($\varphi > 50\% r.F.$). Bei einer Ausgleichfeuchte nach Lagerung in 50 % r.F. zum Zeitpunkt t_1 sind sämtliche Poren mit einem Radius $\leq 1,6$ nm mit Wasser gefüllt. Außerdem sind die Porenwandungen aller Poren mit einem Film adsorbierten Wassers belegt. Das Wasser beim Ausgangswassergehalt $w_{in} = w(50\% r.F.)$, welches sich im betrachteten Volumenelement befindet, steht nach den in Kapitel 2.2.2 beschriebenen

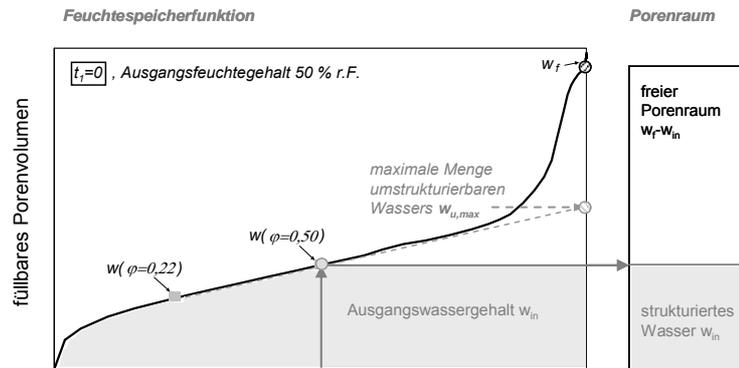
Zusammenhängen im Einfluss der Oberflächenkräfte und wird demnach kapillar nicht transportiert werden können. Es wird mit „strukturiertes Wasser w_{in} “ bezeichnet. Der Rest des Porenraums im betrachteten Volumenelement ist leer und kann durch Wasseraufnahme während des Saugversuchs bis zum Erreichen der freien Sättigung w_f gefüllt werden.

Die Menge an umstrukturierbarem Wasser in den Gelporenraum, welches kapillar nicht weiter transportiert wird und Quelleffekte auslöst, ist mit der Feuchtespeicherfunktion in Abbildung 64 durch eine gestrichelte dargestellt. Diese wird genauso wie der Sorptionsfeuchtegehalt bei niedrigen Luftfeuchten in erster Linie von der Anzahl der Porengrößen im Nanometerbereich bestimmt. Mit zunehmender Anzahl an Gelporen nimmt die innere Oberfläche zu. Dadurch steigt einerseits der Sorptionsfeuchtegehalt bei niedrigen Luftfeuchten, zudem wirken in diesen Porenbereichen jene Wechselwirkungskräfte, die einen Kapillartransport des darin enthaltenen Wassers unterbinden und einen Spaltdruck ausüben (vgl. Kapitel 4.5). Die Ergebnisse aus [97], in denen die Abhängigkeit der Zementsteindehnung von der relativen Luftfeuchte an Zementstein-Hohlzylindern gemessen wurde (vgl. Abbildung 18, Kapitel 2.4.6.4) zeigen, dass sowohl für einen w/z -Wert von 0,40 als auch 0,55 eine annähernd lineare Dehnungszunahme mit steigender Luftfeuchte von 22 % r.F. bis zu 96 % r.F. stattfindet. Da diese Dehnungszunahme auf die Spaltdruckentwicklung zurückzuführen ist, die wiederum von der Menge des in den Gelporenraum umverteilten, d.h. umstrukturierten Wassers w_u bestimmt wird, kann davon ausgegangen werden, dass genauso wie die Dehnungszunahme im Bereich zwischen 25 % r.F. und 96 % r.F. auch die Menge an umstrukturierbarem Wasser w_u mit zunehmender relativer Luftfeuchte linear zunimmt. Aus diesem Grund wird die Menge an insgesamt „umstrukturierbarem Wasser $w_{u,max}$ “ bei 100 % r.F. (vgl. Abbildung 64) näherungsweise aus den Wassergehalten bei 22 % r.F. und 50 % r.F. linear interpoliert.

Abbildung 64 b) stellt den Zeitpunkt t_2 dar, zu welchem die aufgrund des großen Porendurchmessers schnell saugenden Kapillaren das Volumenelement mit dem aufgenommenen Wasser w füllen und das Wurzel-Zeit-Gesetz noch gilt. Das Wasser, welches sich in den Kapillaren befindet ist frei beweglich und wird mit „kapillaraktives Wasser w_{kap} “ bezeichnet. Der gesamte Porenraum ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht gefüllt, da die kleineren Poren sich aufgrund des erhöhten viskosen Widerstands noch nicht gefüllt haben.

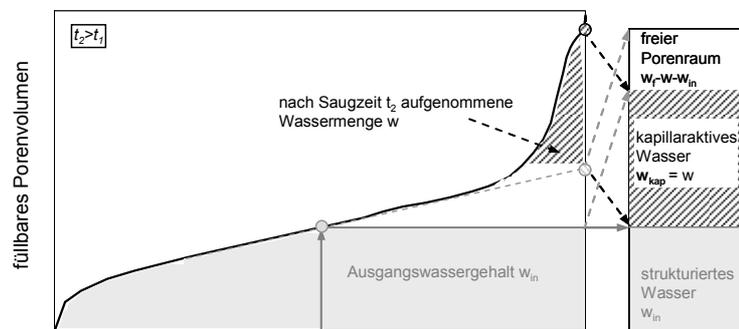
a) Ausgangssituation:

Nach Vorlagerung in 50 % r.F. sind Poren mit $r < 1,6$ nm mit Wasser gefüllt. Dieses Wasser ist strukturiert, d.h. es kann kapillar nicht transportiert werden.



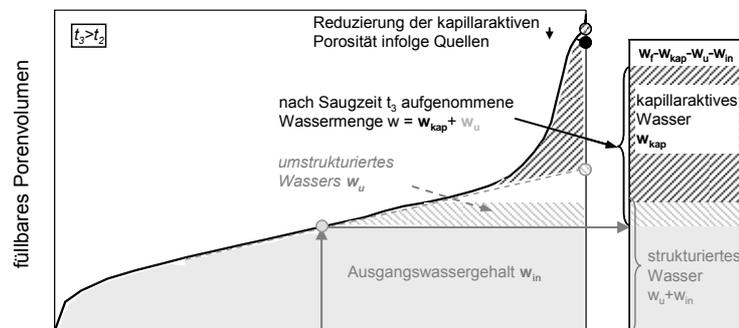
b) kurze Saugzeiten:

Bei Wasserzufuhr werden zunächst die schnell saugenden, d.h. die großen Kapillarporen mit Wasser gefüllt. Das Wasser hat die Eigenschaften freien Wassers und wird als kapillaraktiv bezeichnet. Die kleinen Poren werden aufgrund des hohen viskosen Widerstands zunächst nicht gefüllt.



c) zunehmende Saugzeit:

Das Wasser wird aus den Kapillarporen in die Gelporen umverteilt. Hier steht es unter dem Einfluss der Oberflächenkräfte, die einerseits bewirken, dass das Wasser in strukturierter Form vorliegt, d.h. kapillar nicht weiter transportiert wird, andererseits wird durch den Spaltdruck der kapillaraktive Transportraum reduziert. Durch die anhaltende Wasserzufuhr von außen bleiben die Kapillarporen mit Wasser gefüllt.



d) lange Saugzeiten:

Der Porenraum ist vollständig mit Wasser gefüllt, wobei sich der kapillaraktive Porenraum durch das Quellen infolge der Ausbildung des Spaltdrucks reduziert hat.

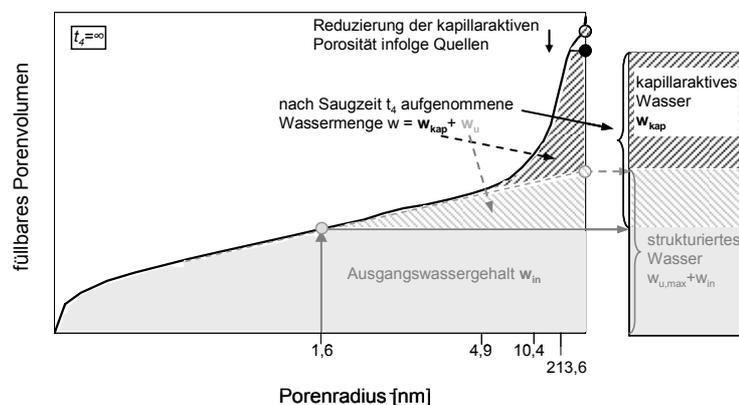


Abbildung 64: Schematische Darstellung der Feuchtespeicherfunktion und eines Volumenelements einer Probe, die während eines Saugversuchs ausgehend von einer Ausgleichsfeuchte bei 50 % r.F zum Zeitpunkt $t_1=0$ (a) mit Wasser gefüllt wird. Der

Zeitpunkt t_2 (b) entspricht einem kurzen Zeitraum nach t_1 , in welchem das Wasser von Kapillarporen aufgenommen wird (Wurzel-Zeit-Gesetz gilt noch). Zum Zeitpunkt t_3 (c) ist Wasser teilweise von den großen Poren in die kleinen Poren umverteilt worden, ist dort durch die Oberflächenkräfte quasi gebunden (umstrukturiertes Wasser w_u) und löst ein Quellen infolge Spaltdruck aus. Zum Zeitpunkt t_4 (d) ist das betrachtete Volumenelement vollständig mit Wasser gefüllt, die Umlagerung des Wassers aus dem Kapillarporenraum in den Gelporenraum ist abgeschlossen

Zum Zeitpunkt t_3 (Abbildung 64, c)) ist ein Teil des zuvor kapillaraktiven Wassers in den Gelporenraum umverteilt bzw. umstrukturiert worden („umstrukturiertes Wasser w_u “). Dieses Wasser steht dem Kapillartransport nicht weiter zur Verfügung. Der „kapillaraktive Porenbereich“ wird dabei durch das zusätzlich aufgenommene Wasser wieder gefüllt, der freie Porenraum im Volumenelement reduziert sich so lange, bis nach einer gewissen Saugzeit (vgl. Abbildung 64 d), hier: $t_4 = \infty$) die maximal umstrukturierbare Wassermenge $w_{u,max}$ erreicht ist und der Porenraum bis zur freien Wassersättigung w_f gefüllt ist.

Die Geschwindigkeit der Umstrukturierung hängt dabei von der Menge kapillaraktiven Wassers und der Menge an bereits gebundenem Wasser ab (vgl. Abbildung 65).

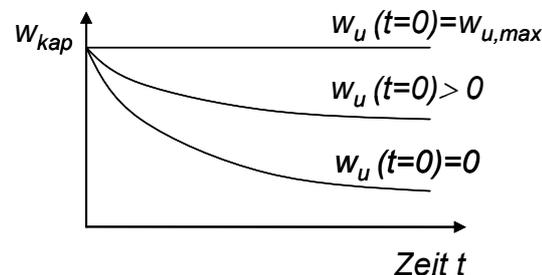


Abbildung 65: Schematische Darstellung der Geschwindigkeit der Umstrukturierung in Abhängigkeit von der Menge an bereits umstrukturiertem Wasser

Sämtliche in den Kapiteln 4.2 bis 4.5 beobachteten Zusammenhänge lassen sich anhand der erläuterten Modellvorstellung erklären. Mit zunehmender Ausgleichsfeuchte vor Saugbeginn hat der Gelporenraum weniger Kapazitäten, neue Wassermengen aufzunehmen. Infolgedessen wird das vom Wurzel-Zeit-Gesetz abweichende Eindringverhalten mit zunehmender Ausgleichsfeuchte weniger ausgeprägt (vgl. Kapitel 4.4.1).

Die Modellierung des Kapillartransports unter Berücksichtigung des Selbstabdichtungseffekts erfolgt auf Grundlage der dargestellten Erläuterungen. Die Kapillarleitung wird zunächst mit dem üblichen Diffusionsansatz nach Gleichung 18 beschrieben. Das treibende Potential für den Transport (Kapillarzug) wird auf Grundlage der in Kapitel 2.4.4 beschriebenen Zusammenhänge durch den Wassergehaltsgradienten beschrieben. Infolge der Oberflächenkräfte wird das strukturierte Wasser im Gelporenraum stark gebunden und steht einem

weiteren Transport nicht mehr zur Verfügung. Die Abnahme des Wassers (hier: w_{kap} Abbildung 64), welches nach dieser Wechselwirkung weiter am kapillaren Transport beteiligt ist, wird mit Gleichung 46 beschrieben. Die Zeitkonstante t_u [h] bestimmt die Geschwindigkeit, mit der das Wasser im Gelporenraum gebunden wird.

$$\frac{\partial w_{kap}}{\partial t} = -\frac{w_{kap}}{t_u} \cdot \frac{(w_{u,max} - w_u)}{w_{u,max}}$$

Gleichung 46

Der lokale Wassergehalt w_{kap} bestimmt die Geschwindigkeit, mit der die Abnahme stattfindet. Die Menge an umstrukturiertem Wasser w_u wird mit Gleichung 46 nach Gleichung 47 bestimmt.

$$\frac{\partial w_u}{\partial t} = -\frac{\partial w_{kap}}{\partial t}$$

Gleichung 47

Die Selbstabdichtung, oder die Verringerung der wasserführenden Porosität w_{kap}^* aufgrund der Verringerung der Kontinuität des kapillaraktiven Porenraums infolge von Quellen, wird durch einen Abdichtungskoeffizienten q [-] nach Gleichung 48 berücksichtigt.

$$w_{kap}^* = w_{kap} - q \cdot w_u$$

Gleichung 48

Entsprechend der Änderung des lokalen Sättigungsgrads w^*/w_f wird der Wert für den Flüssigtransportkoeffizienten D_W in Gleichung 18 reduziert. Die Änderung des Sättigungsgrades hängt dabei von der Menge des umstrukturierten Wassers in den Gelporen ab.

Die Zeitkonstante t_u und der Abdichtungskoeffizient q können, wie auch die Flüssigtransportkoeffizienten D_W aus gemessenen Eindringprofilen mittels NMR abgeschätzt werden. Zur Bestimmung von t_u werden die Weiterleitungsmessungen (vgl. Abbildung 66) herangezogen. Innerhalb eines Auswertebereichs, welcher in den betrachteten Zeiträumen weder von Randeffekten noch vom Weiterleiten des Wassers in den Probekörper wesentlich beeinflusst wird, lässt sich t_u nach Gleichung 49 bestimmen.

$$w_{kap}(x, t_2 - t_1) = w_{kap}(x, t_1) \cdot e^{-\left(\frac{w_{u,max} - w_u(x, t_1)}{w_{u,max}}\right) \cdot \frac{t_2 - t_1}{t_u}}$$

Gleichung 49

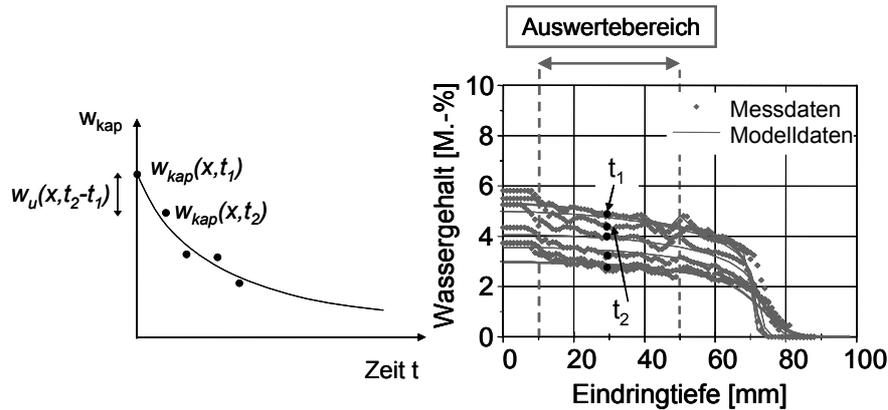


Abbildung 66: exemplarische Darstellung der Ergebnisse von Weiterleitungsmessungen nach einem Saugversuch. Aus diesen Daten kann die Zeitkonstante t_u abgeleitet werden

Der Abdichtungskoeffizient q ergibt sich schließlich aus der Anpassung gemessener Eindringprofile während eines Saugversuchs. Die Flüssigtransportkoeffizienten D_W werden aus den gemessenen Eindringprofilen wie in Kapitel 3.3.3.6 beschrieben, für kurze Zeiten, in denen das Wurzel-Zeit-Gesetz noch gültig ist, berechnet. Die entsprechenden Koeffizienten für die Rezepturen nach Abbildung 23 befinden sich in Tabelle A3 im Anhang.

Abbildung 67 zeigt beispielhaft für den Mörtel nach Tabelle 1 (A) die Abhängigkeit der Zeitkonstante t_u und des Abdichtungsfaktors q von der Konzentration gelöster Salze. Entsprechend der Änderung der physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit nimmt die Geschwindigkeit mit der das Wasser umstrukturiert wird mit Zunahme der Lösungskonzentration ab. Der Abdichtungskoeffizient steigt hingegen mit steigender Lösungskonzentration, was auf eine Zunahme des Spaltdrucks zurückzuführen ist (vgl. Kapitel 4.2.4).

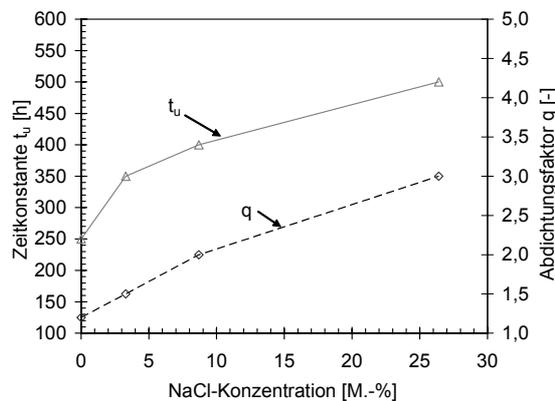


Abbildung 67: Abhängigkeit der Zeitkonstante t_u und des Abdichtungsfaktors q von der Konzentration gelöster Salze

In Abbildung 68 werden beispielhaft für das Eindringverhalten von Wasser und Salzlösungen (3,3, 8,7, 26,4 M.-%) in einen Mörtel nach Tabelle 1 A) die experimentell bestimmten Eindringtiefen während des Saugens mit den Ergebnissen der Modellrechnung verglichen.

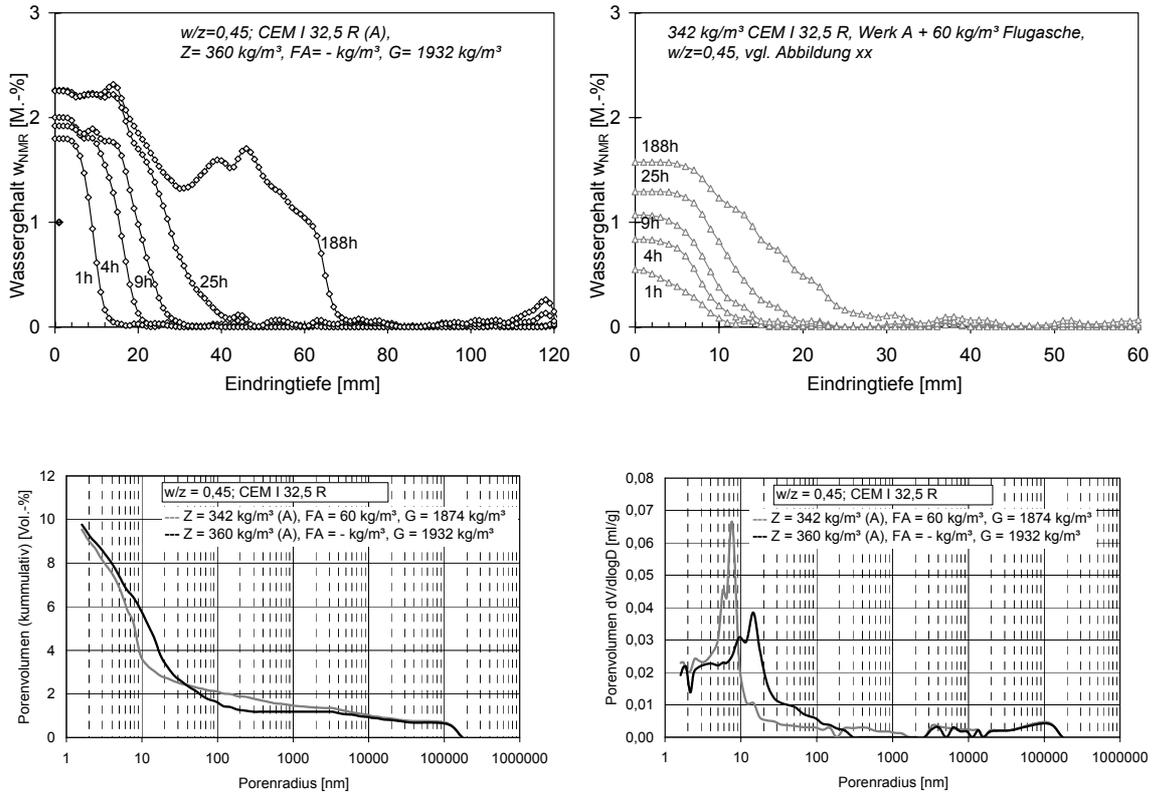


Abbildung 69: oben: mittels NMR ermittelte Wassereindringprofile, links: an einem Beton CEM I 32,5 R Werk A, $w/z=0,45$ (Mischung /24/ nach Abbildung 23), rechts: an einem Beton CEM I 32,5 R Werk A + SFA, $w/z_{\text{eff}}=0,45$ (Mischung /19/ nach Abbildung 23); unten links: kumulatives Porenvolumen, unten rechts: Porengrößenverteilung

Um diesen Effekt deutlicher herauszuarbeiten, wurde der Flüssigkeitsgehalt an der Oberfläche der in Kapitel 4.4.1 untersuchten Mörtelprismen aus den gemessenen NMR-Eindringprofilen abgelesen, vgl. Abbildung 51.

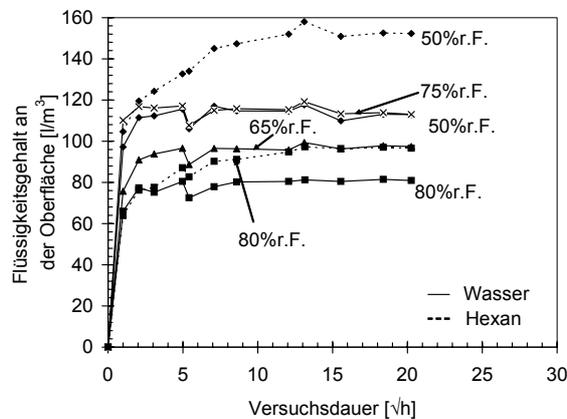


Abbildung 70: Änderung des Flüssigkeitsgehalts an der Oberfläche während der Wasser- bzw. Hexanaufnahme in Abhängigkeit der Ausgleichsfeuchte vor Saugbeginn, herausgelesen aus den NMR-Profilen; Mörtel ($w/z=0,60$, Tabelle 1 (B))

Bei der Aufnahme von Wasser nimmt der gemessene Wassergehalt an der Oberfläche während der ersten 5 Stunden zu und bleibt dann aufgrund der Umverteilung des Wassers in den Gelporenraum im Gegensatz zum Hexangehalt an der Oberfläche auf einem Niveau. Da bei Hexan keine ausgeprägten Wechselwirkungen mit dem Gelporenraum stattfinden, ist hier kein Umverteilen festzustellen. Der Hexangehalt an der Oberfläche strebt hier langsam eine obere Grenze des Wassergehalts an.

In Berechnungsprogrammen zur Berechnung des kapillaren Saugens wird in der Regel eine sofortige Wassersättigung an der Oberfläche vorausgesetzt (Bsp. WUFI). In Analogie zu den Übergangskoeffizienten für den Wärme- und den Feuchtetransport (vgl. Kapitel 2.10) wird hier ein neuer Übergangskoeffizient γ [m/s] für das kapillare Saugen definiert. Der Flüssigkeitsstrom über die Oberfläche \dot{m}_γ [kg/(m²·s)] wird damit nach Gleichung 50 beschrieben:

$$\dot{m}_\gamma = \gamma \cdot \Delta w$$

Gleichung 50

Δw [kg/m³] beschreibt dabei den leeren Porenraum, der für den Kapillartransport zur Verfügung steht. Für die Aufnahme von Wasser in den untersuchten Mörtel nach Tabelle 1 (B) wurden Oberflächenübergangskoeffizienten γ für das kapillare Saugen von $2,12 \times 10^{-5}$ m/s bestimmt. Ein Vorschlag für die entsprechenden Übergangskoeffizienten der in Abbildung 23 aufgeführten Betone und Mörtel befindet sich in Tabelle A4, Spalte 5 im Anhang.

6 MODELLIERUNG DES GEKOPPELTEN WÄRME-, FEUCHTE- UND SALZTRANSPORTS

6.1 Transportgleichungen

Der Wärmetransport wird mit folgender Differentialgleichung beschrieben (vgl. [2]):

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \cdot \frac{\partial p_D}{\partial x} \right)$$

Gleichung 51

$$\text{Speicherung} = \text{Wärmeleitung} + \text{Dampfenthalpiestrom}$$

Der Wärmeinhalt bzw. die Enthalpie H [J/m³] des feuchten Baustoffs setzt sich aus der Wärmekapazität des trockenen Baustoffs und des darin enthaltenen Wassers zusammen. Die Wärmespeicherung ergibt sich aus der Ableitung der Wärmespeicherfunktion $\frac{\partial H}{\partial \vartheta}$ [J/(m³·K)], die den Wärmeinhalt in Abhängigkeit der Temperatur ϑ [°C] beschreibt. Der Wärmetransport

basiert auf der feuchteabhängigen Wärmeleitung, die durch die Wärmeleitfähigkeit λ [(W/(m·K))] des feuchten Baustoffs in Abhängigkeit der Temperaturgradienten $\frac{\partial \vartheta}{\partial x}$ [°C/m] über die Ortslänge x [m] bestimmt wird und dem Dampfenthalpiestrom. Der Dampfenthalpiestrom transportiert Wärme, indem Wasser an einer Stelle mit der Verdunstungsenthalpie des Wassers h_V [J/kg] verdunstet, dabei dieser Stelle Wärme entzieht und anschließend an eine andere Stelle diffundiert, dort kondensiert und dadurch Wärme zuführt. Der Diffusionsprozess wird dabei durch den Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft δ [kg/(m·s·Pa)], die Dampfdiffusionswiderstandszahl des trockenen Baustoffs μ [-] und den Partialdampfdruckgradienten $\frac{\partial p_D}{\partial x}$ [Pa/m] über die Weglänge x [m] bestimmt. Der Wärmeaustausch an der Bauteilgrenze wird nach Gleichung 36 berücksichtigt.

Der Feuchtehaushalt wird mit Gleichung 52 formuliert:

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_w \frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta_a}{\mu} \cdot \frac{\partial p_D}{\partial x} \right) - \frac{\partial w_u}{\partial t}$$

Gleichung 52

$$\text{Speicherung} = \text{Flüssigtransport} + \text{Wasserdampfdiffusion} - \text{umstrukturiertes Wasser} \\ \text{(Gelporenwasser)}$$

Die Feuchtespeicherung wird durch die Ableitung der Feuchtespeicherfunktion $\frac{\partial w}{\partial \varphi}$ [kg/m³]

beschrieben. Der Einfluss im Porengefüge vorhandener Salze auf die Feuchtespeicherung wird in Abhängigkeit des vorhandenen Salzgehalts berechnet, vgl. Kapitel 3.3.2. Der Feuchtetransport erfolgt über den Flüssigtransport, der sowohl den Mechanismus der Oberflächendiffusion wie auch der Kapillarleitung beinhaltet und die Wasserdampfdiffusion, die den reinen Wasserdampftransport in der gasförmigen Phase beschreibt. Der Flüssigtransport wird durch den Transportkoeffizienten D_w [m²/s], der vom lokalen Wassergehalt w [kg/m³] abhängig ist, und durch den Gradienten der relativen Feuchte φ [-] über die Ortslänge x [m] als transportauslösendes Potential bestimmt. Der Salzeinfluss auf D_w wird durch Gleichung 44 berücksichtigt. Der Wasserdampftransport wird durch den Quotienten des Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft δ_a [kg/(msPa)] und der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ [-] des trockenen Baustoffs bestimmt und durch den Gradienten des Partialdampfdrucks p_D [Pa] über die Weglänge x [m] angetrieben. Die Partialdrücke werden entsprechend des lokalen Salzgehalts und der Konzentrationen der Porenlösung im Porenraum berechnet, vgl. Kapitel 3.3.2.2, Gleichung 41. Das Umverteilen des Wassers aus den Kapillarporen in den Gelporenraum des Zementsteins geht als “Feuchtesenke“ in die Gleichung 52 ein. Der Anteil des Wassers, welches nach Umverteilung weiter am kapillaren Transport beteiligt ist, wird mit Gleichung 46 beschrieben. Die Menge

an umstrukturiertem, d.h. im Gelporenraum gebundenem Wasser w_u wird mit Gleichung 47 bestimmt. Die Selbstabdichtung, oder die Verringerung der wasserführenden Porosität w^* aufgrund der Verringerung der Kontinuität des kapillaraktiven Porenraums wird nach Gleichung 48 berücksichtigt. Entsprechend der Änderung des lokalen Sättigungsgrads w^*/w_f wird der Wert für den Flüssigtransportkoeffizienten D_w in Gleichung 52 reduziert. Der Feuchteausaustausch an der Bauteilgrenze und der Übergang des flüssigen Wassers werden nach Gleichung 37 bzw. Gleichung 50 berücksichtigt.

Der Salztransport wird nach Gleichung 53 beschrieben:

$$\frac{\partial s_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_w \cdot c_{\text{Lösung}} \frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\text{eff}} \cdot \frac{\partial s_f}{\partial x} \right) - \frac{\partial s_g}{\partial t}$$

Gleichung 53

konvektiver Transport + Ionendiffusion - Ionenbindung

Der Transport der gelösten Salze s_f [kg/m³] im Porensystem erfolgt konvektiv, d.h. “huckepack“ mit dem kapillar transportierten Wasser und wird aus diesem über die lokale Salzkonzentration der Lösung $c_{\text{Lösung}}$ [kg/kg_{Wasser}] berechnet. Der Flüssigtransportkoeffizient D_w entspricht dem aus Gleichung 52 und wird durch die Selbstabdichtung wie auch durch die Änderung der physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit infolge der Konzentration gelöster Salzionen beeinflusst, vgl. Kapitel 3.3.3.7. Der Diffusionstransport der gelösten Salze infolge eines Unterschieds in der Salzkonzentration s_f [kg/kg_{Feststoff}] über die Weglänge x [m] wird durch den effektiven Diffusionskoeffizienten D_{eff} [m²/s] bestimmt. Die Bindung der Salze an den Zementstein des Gefüges wird durch eine “Bindungssenke“ berücksichtigt. Der Anteil an gebundenem Chlorid s_g [kg/m³], der durch die Zementsteinmatrix gebunden wird, wird nach Gleichung 31 berücksichtigt [76]. Neben dem maximalen Bindevermögen des Betons wird dabei auch die Reaktionskinetik der Bindung berücksichtigt.

6.2 Der Berechnungsalgorithmus

6.2.1 Allgemeines

Ausgehend von den Transportgleichungen für den Wärme-, Feuchte- und Salztransport in mineralischen Baustoffen werden die Modellansätze in einem Berechnungsalgorithmus zusammengeführt. Zur Berücksichtigung der klimatischen Randbedingungen werden die in [2] entwickelten Transportgleichungen zum Wärme- und Feuchteübergang an der Bauteiloberfläche integriert. Abbildung 71 zeigt das Ablaufschema des Berechnungsmodells.

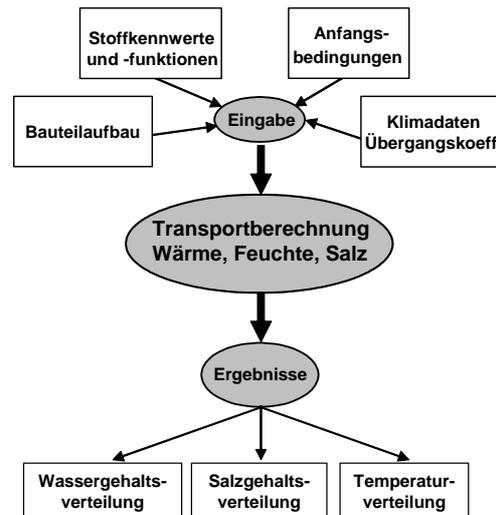


Abbildung 71: Ablaufschema des Berechnungsmodells

Nach Eingabe der klimatischen Randbedingungen, der Übergangsbedingungen, des Bauteilaufbaus, der Stoffkennwerte des Materials sowie der Anfangsbedingungen erfolgt die Berechnung des Wärme-, Feuchte- und Salztransports. Als Ergebnis erhält man den Verlauf des Wasser- und Salzgehalts sowie den Temperaturverlauf über den Berechnungszeitraum. Zudem können zu definierten Zeitpunkten Wassergehalts-, Salzgehalts- sowie Temperaturprofile angegeben werden.

6.2.2 Eingabeparameter

Neben der Dicke des zu berechnenden Bauteils werden die thermischen und hygrischen Stoffkennwerte und Stofffunktionen des betrachteten Baustoffs eingegeben, d.h. Rohdichte, Porosität, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, Feuchtespeicherfunktion, die Flüssigtransportkoeffizienten und der kapillaraktive Transportraum, welcher näherungsweise der freien Wassersättigung abzüglich der maximalen Menge umstrukturierbaren Wassers entspricht. Als Parameter für die Selbstabdichtung ist entweder die maximal umstrukturierbare Menge an Wasser direkt anzugeben, alternativ kann diese anhand der Feuchtespeicherfunktion aus dem Wassergehalt bei 22 und 50 % r.F. berechnet werden. Außerdem ist die Zeitkonstante, die die Umverteilungsgeschwindigkeit bestimmt, sowie der Selbstabdichtungskoeffizient anzugeben (vgl. Kapitel 4.7). Zur Berücksichtigung des Salzeinflusses und des Salztransports sind zum einen die Parameter einzugeben, die die Bindung der Salzionen charakterisieren (vgl. Kapitel 3.3.6) zum anderen ist der Diffusionskoeffizient der freien Chloriden D_{eff} (vgl. Kapitel 3.3.5) einzufügen. Die zu betrachtenden klimatischen Randbedingungen wie Lufttemperatur und -feuchte, Wasser- und Salzbelastung, welchen das Bauteil ausgesetzt ist, werden genauso wie die Übergangsbedingungen eingegeben. Zu den Übergangsbedingungen gehören der Wärme- sowie der

Feuchteübergangskoeffizient, die den Austausch von Wärme und Feuchte mit der Umgebung berücksichtigen. Des Weiteren muss der mit Kapitel 5 neu eingeführte Übergangskoeffizient für das kapillare Saugen γ eingefügt werden. Zusätzlich ist die Eingabe der Anfangsverteilungen von Temperatur, Feuchte und Salz über den Bauteilquerschnitt nötig. In Abbildung A 34 im Anhang sind die nötigen Eingabeparameter am Beispiel des Mörtels nach Tabelle 1 (A) zusammengefasst. Zusätzlich wird an dieser Stelle zusammengefasst, in welchem Kapitel dieser Arbeit die Bestimmung der entsprechenden Kennwerte beschrieben wird. Eine Vielzahl der nötigen Eingabeparameter für die Mischungen nach Abbildung 23 sind in den Tabellen im Anhang zusammengestellt.

6.2.3 Berechnung

Die Berechnung der Änderung der Temperatur-, Feuchte- und Salzgehaltsverteilungen in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen erfolgt eindimensional in Volumenelementen definierbarer Abmessungen und in vorgegebenen Zeitschritten. Ausgehend von dem vorgegebenen lokalen Gehalt an freiem Wasser w_{kap} , an gebundenem Wasser w_u , an gelöstem Salz s_f , an gebundenem Salz s_g und an kristallinem Salz $s_{kristall}$ in den einzelnen Volumenelementen werden die Transportkenngrößen berechnet. Die Transportgleichungen werden durch Iteration der Zeit mit dem Differenzverfahren gelöst. Vor jeder iterativen Lösung der Wärmetransportgleichung werden alle lokale Werte der feuchte- und temperaturabhängigen thermischen Speicher- und Transportkoeffizienten aktualisiert (Gesamtenthalpie, Wärmeleitfähigkeit, Latentwärme beim Phasenübergang). Vor der Lösung der Feuchtetransportgleichung werden die hygrischen Koeffizienten aktualisiert (temperatur- und salzkonzentrationsabhängiger Sättigungsdampfdruck). Nach jedem Zeitschritt erhält man den lokalen Gehalt an freiem Wasser w_{kap} , an gebundenem Wasser w_u , an gelöstem Salz s_f , an gebundenem Salz s_g und an kristallinem Salz $s_{kristall}$. Die Menge des auskristallisierten Salzes wird dabei anhand der temperaturabhängigen Löslichkeit der Salze bestimmt. In Abhängigkeit der im Porenraum auskristallisierten Salze und des in die Gelporen des Zementsteins umverteilten Wassers w_u wird die transportrelevante Porosität $P_{Transport}$ ausgehend von der Porosität des trockenen unbelasteten Baustoffs P_0 berechnet. Entsprechend dieser Reduzierung des Transportraums werden vor jedem Zeitschritt die Transportkoeffizienten aktualisiert, d.h. die Transportkoeffizienten D_W reduziert, der Wasserdampfdiffusionswiderstand μ erhöht. Am Ende des vorgegebenen Berechnungszeitraums erhält man die Temperatur-, Wassergehalts- und Salzgehaltsprofile über den Bauteilquerschnitt, sowie die zugehörigen Verläufe.

7 VALIDIERUNG DES MODELLS

Die Versuche, die in den Kapiteln 3-5 beschrieben wurden, zeigen, dass die einzelnen Mechanismen, wie zum Beispiel die Feuchtespeicherung, die Wasserdampfdiffusion oder der Kapillartransport inklusive der Selbstabdichtung durch die vorgestellten Transportgleichungen mit den entsprechenden Kenngrößen gut beschrieben werden können. Die Validierung des Modells nach Kapitel 6 erfolgt anhand eines Versuchs, bei welchem sämtliche auftretende Mechanismen zusammenwirken und voneinander beeinflusst werden. Probekörper wurden dabei zyklischen Feucht- und Trockenwechseln ausgesetzt, wobei der Feuchtzyklus das einseitige Aufsaugen einer 3,3 M.-% Natriumchloridlösung beinhaltete. Mit Hilfe von NMR- Messungen wurden Wassergehaltsprofile zu definierten Zeitpunkten gemessen, gleichzeitig wurden Salzgehaltsverteilungen über nasschemische Analyse bestimmt und mit Berechnungsergebnissen verglichen.

Der Validierungsversuch wurde an Probekörpern aus dem Mörtel nach Tabelle 1 A) durchgeführt, die Lagerung entsprach den Standardbedingungen. Zu Versuchsbeginn hatten die Prismen ein Alter von knapp 3 Jahren. Aufgrund der langen Lagerung im Klima 23 °C/ 50 % r.F. waren die Randbereiche der Prismen carbonatisiert (ca. 0,5 cm). Um einen Einfluss der carbonatisierten Randbereiche zu vermeiden, wurden diese vor Beschichtung der Mantelflächen der Prismen abgeschliffen, so dass der Versuch an Prismen mit Abmessungen von rd. 35 × 35 × 120 mm³ durchgeführt wurde.

Da die Bestimmung der Salzgehaltsverteilung über die nasschemische Analyse eine Zerstörung der Probekörper voraussetzt, wurde der Versuch mit 10 Prismen gleichzeitig gestartet. Nach jedem Saug- bzw. Trocknungsabschnitt wurde an jedem Prisma zunächst der integrale Lösungsgehalt gravimetrisch und die Wassergehaltsverteilung mittels NMR bestimmt. Jeweils einer der Probekörper wurde anschließend mit Hilfe einer Trockensäge in Abschnitte von rd. 10 mm geteilt, so dass nach jedem Saug- und Trocknungsabschnitt ein Salzgehaltsprofil über die nasschemische Analyse ermittelt werden konnte. Abbildung 72 zeigt den Verlauf des integralen Lösungsvolumens bezogen auf die Saugfläche über den gesamten Untersuchungszeitraum. Zyklus 1 und Zyklus 2 bestanden dabei jeweils aus einer 24-stündigen Saugperiode und einer darauffolgenden 2-wöchigen Trocknungsphase, in welcher die Prismen über beide Stirnseiten austrocknen konnten (Klima 23 °C/50 % r.F.). Im Zyklus 3 folgte der 24-stündigen Saugperiode eine Trocknungsdauer von 47 Wochen, im Zyklus 4 eine Trocknungsdauer von 3 Wochen. Zyklus 5 verlief analog zu Zyklus 1 und 2. Die Streuung des Eindringverhaltens in die einzelnen Prismen wird anhand von Abbildung 72 deutlich. Die gestrichelten Linien stellen dabei die Verbindungen zwischen den jeweiligen Messpunkten der einzelnen Probekörper dar. Das Ergebnis der Berechnung ist im Bild schwarz dargestellt. Die Eingabeparameter, die der Berechnung des Validierungsversuchs

zugrunde liegen, wurden anhand der zuvor beschriebenen Versuche bestimmt und sind in Abbildung A34 im Anhang zusammengefasst.

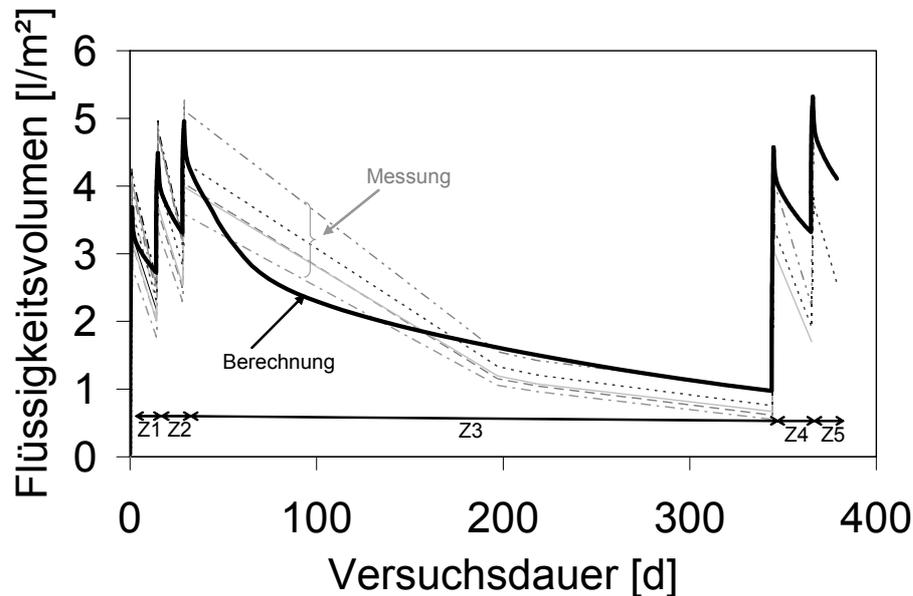
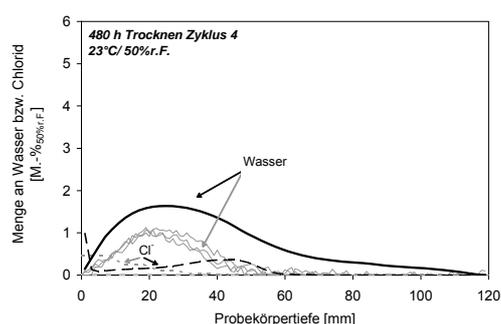
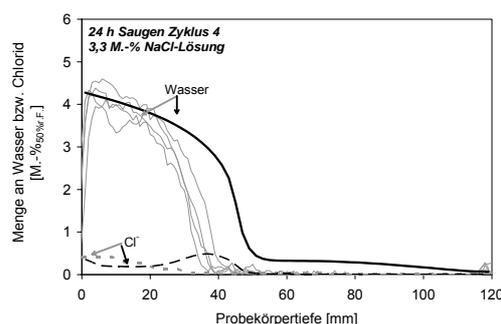
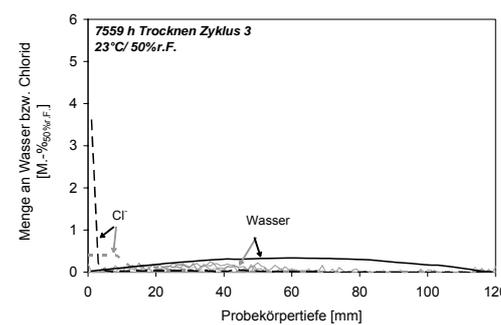
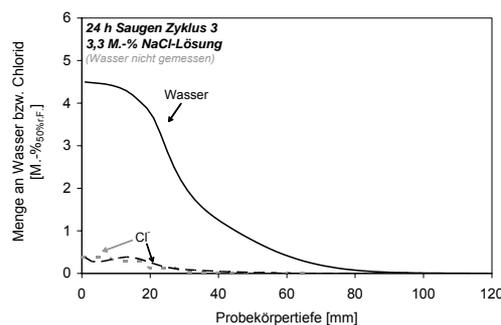
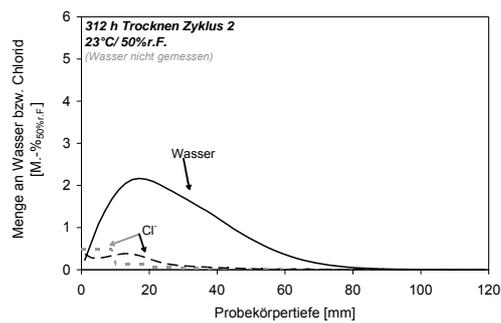
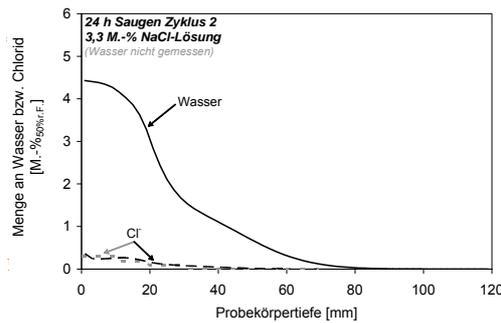
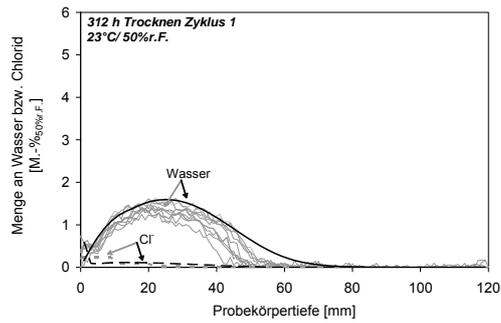
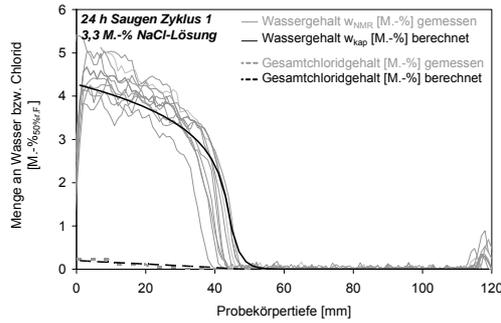


Abbildung 72: Während des Validierungsversuchs bezogen auf die Saugfläche enthaltenes Flüssigkeitsvolumen. Ablauf des Versuchs: 2 Zyklen: Z1 und Z2 mit je 24 h Saugen von 3,3 M.-% NaCl-Lösung, 2 Wochen trocknen bei 23 °C/ 50 % r.F.; 1 Zyklus: Z3 mit 24 h Saugen von 3,3 M.-% NaCl-Lösung, 47 Wochen trocknen bei 23 °C/ 50 % r.F.; 2 Zyklen: Z4 und Z5 mit 24 h Saugen von 3,3 M.-% NaCl-Lösung, 3 bzw. 2 Wochen trocknen bei 23 °C/ 50 % r.F.; Berechnung (schwarz), Messpunkte (Knickpunkte der grauen Linien)

Abbildung 73 stellt die Eindringprofile des kapillaraktiven Wassers (berechnet: w_{kap} , gemessen: w_{NMR}), sowie der Chloride (Gesamtchloridgehalt) bezogen auf das Ausgangsgewicht des Mörtels im Klima 23 °C/50 % r.F. während der 5 Zyklen dar. Im linken Bild sind jeweils die Ergebnisse nach der Saugperiode dargestellt, im rechten Bild der Zustand nach der Trocknungsphase. Neben der mittels NMR gemessenen Wassergehaltsverteilung der einzelnen Prismen, die noch nicht aufgrund der nasschemischen Analyse zerstört wurden (grau), sind die berechneten Eindringprofile in den Bildern dargestellt (schwarz).

Das Wasser dringt in den ersten 24 Stunden bis in eine Tiefe von rd. 45 mm ein, wobei die Eindringtiefen der einzelnen Prismen stark streuen (rd. 10 mm). Die Chloride dringen dabei nicht mit gleicher Eindringgeschwindigkeit ein. Es sind Chromatografieeffekte beobachtbar, die durch die Berücksichtigung der Bindung im Berechnungsmodell gut abgebildet werden können. Dies führt dazu, dass die Chloridkonzentration mit zunehmender Tiefe abnimmt (vgl. Abbildung 73, Z1 links). Während des darauf folgenden 2-wöchigen Trocknungsabschnitts

wird das Wasser unwesentlich weiter in den Probekörper kapillar weitertransportiert, während die oberflächennahen Bereiche austrocknen. Dies führt zu einer Aufkonzentration der Porenlösung (nicht dargestellt), resultierend einerseits aus der Abnahme des Wassergehalts an der Oberfläche, andererseits aus dem Rücktransport der Chloride mit dem austrocknenden Wasser in Richtung der Oberfläche.



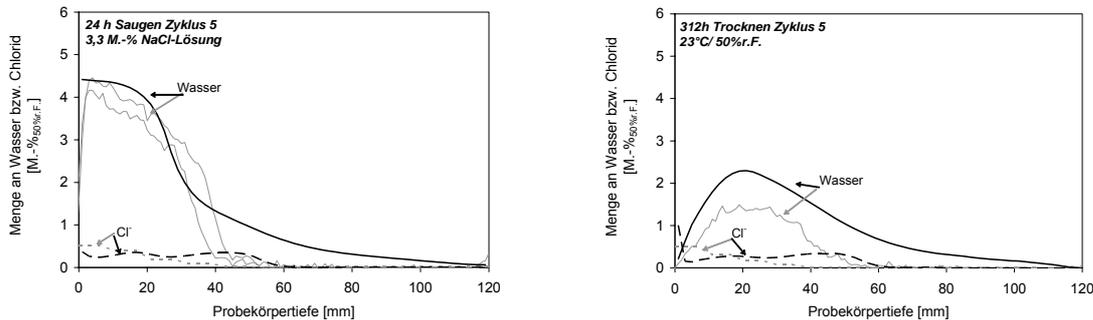


Abbildung 73: Eindringverhalten des Wassers (w_{NMR}) und der Chloride (nasschemische Analyse) in M.-% nach 24-stündigem Saugen (links) bzw. Trocknung (rechts) während der 5 Zyklen Z1-Z5. Gleichzeitig ist die Chloridkonzentration in mol Cl/kg Wasser dargestellt

Während des 2. Feuchtzyklus werden weitere Chloride in den Mörtel hineintransportiert, wobei die Eindringtiefe des Wassers und der Chloride sich unwesentlich bzw. nicht erhöht. Zusätzliche Chloride werden mit dem eindringenden Wasser eingetragen, die bewirken, dass die Chloridkonzentration ansteigt. Im darauf folgenden Trocknungsabschnitt findet, wie auch bei den weiteren Trocknungsphasen eine Umverteilung der Chloride statt. Eine Wiederholung der Zyklen macht deutlich, dass das Wasser auch nach mehrfacher Zyklenzahl nicht weiter in den Probekörper eindringt, wobei die Chloride mit zunehmender Zeit zum einen mit dem eindringenden Wasser tiefer in den Beton eindringen, andererseits aber auch eine Aufkonzentration der Chloride an der Oberfläche stattfindet. Nach dem sehr langen Trocknungsabschnitt im Zyklus 3 (Z3) ist zu beobachten, dass der gemessene Wassergehalt im Vergleich zum berechneten Wassergehalt geringer ist. Ursache hierfür ist die im Versuch geringe Austrocknung über die Mantelflächen (vgl. Abbildung 29, Austrocknen durch die Epoxidharzbeschichtung), die in den eindimensionalen Berechnungen nicht berücksichtigt werden kann, jedoch nach einer Trocknungsdauer im Zyklus 3 von einem Jahr einen Einfluss auf die Wassergehaltsverteilung und somit das weitere Eindringverhalten hat. Ein Vergleich der Berechnung und Messung zeigt dennoch, dass durch das vorgeschlagene Modell der gekoppelte Feuchte- und Salzanport gut beschrieben werden kann.

8 NICHT BERÜCKSICHTIGTE MECHANISMEN

Die dargestellten Validierungsversuche wie auch weitere rechnerische Untersuchungen, die mit Erfahrungswerten aus der Praxis verglichen wurden, zeigen, dass die dargestellten Modellansätze die Vorgänge die in der Praxis auftreten mit guter Übereinstimmung widerspiegeln.

In der Baupraxis treten jedoch weitere Mechanismen und Einflussfaktoren auf, die in diesem Modell bis dato nicht berücksichtigt wurden. So geht mit fortschreitender Hydratation, Schädigung der oberflächennahen Bereiche durch Frostbeanspruchung, Alkali-Kieselsäure-Reaktion, Säureangriff oder Carbonatisierung eine Veränderung der Porenstruktur einher. Diese resultiert in einer Veränderung der Transportkenngrößen, die im Modell nicht berücksichtigt wurde. Solange die Veränderung des Porenraums und damit der Transportkenngrößen langfristig und kontinuierlich abläuft, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass eine abschnittsweise Berechnung mit modifizierten Transportkenngrößen für die Bereiche mit veränderter Porenstruktur ausreichend genau ist. Dies sollte jedoch durch zukünftige Untersuchungen überprüft werden.

Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Werkstoffeigenschaften eines Betons nicht über den gesamten Querschnitt hinweg gleich sind. Die oberflächennahen Schichten unterscheiden sich maßgeblich in Zusammensetzung und Gefüge von den Eigenschaften des Kernbetons. Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit eines Bauteils ist vor allem die Randzone des Betons von entscheidender Bedeutung. An der Schalungsseite kommt es herstellungsbedingt zu einer mehr oder weniger stark ausgeprägten Anreicherung von Wasser und Feinstanteilen, die von der Art der verwendeten Schalung, der gravimetrisch bedingten Sedimentation und Entmischung des Frischbetons sowie der eingesetzten Verdichtungstechnik abhängt. Des Weiteren beeinflussen Dauer und Art der Nachbehandlung vor allem die Porenstruktur im Randbereich. Auch diese Tatsache muss in dem dargestellten Modell in der Art und Weise berücksichtigt werden, dass durch die Definition tiefenabhängiger Transportkenngrößen die unterschiedlichen Eigenschaften des Kern- und Randbetons berücksichtigt werden.

Des Weiteren wird der Transport durch Risse in diesem Modell nicht berücksichtigt. Da die Entstehung von Rissen in zementgebundenen Baustoffen unumgänglich ist und der Transport durch Risse um Größenordnungen schneller ist als durch das Porensystem des Betons, muss diese Tatsache bei der Beurteilung der Ergebnisse, die dieses Berechnungsprogramm liefert, berücksichtigt werden.

Ein weiterer Effekt, der mit diesem Modell nicht berücksichtigt wird, ist der Flüssigtransport, der bei Unter- und anschließender Überschreitung des Gefrierpunkts auftritt: die Mikroeislinsepumpe. Dieser Effekt bewirkt einen Transport von Wasser in der flüssigen Phase, der wesentlich leistungsstärker ist, als der Kapillartransport. Die grundlegenden Transportmechanismen hierzu sind bereits bekannt, eine einfache rechnerische Beschreibung fehlt jedoch bis dato.

Im Hinblick auf die Beständigkeit der Bindung der Chloride an die Zementsteinmatrix gilt es in weiteren Untersuchungen zu klären, inwieweit das Lösen der Bindung, welches hier nicht

berücksichtigt wurde, eine Rolle spielt. Die Einflussgrößen pH-Wert der Porenlösung aber auch der Temperatur sind dabei in Betracht zu ziehen. Auch der Einfluss der Temperatur auf die Ionendiffusion wird hier nicht berücksichtigt.

9 ZUSAMMENFASSUNG

Ein großer Prozentsatz im Bauwesen auftretender Bauschäden ist auf hohe Bauteilfeuchten zurückzuführen. Neben optischen Beeinträchtigungen, wie Verschmutzungen, Algenbildung und Ausblühungen, sind hohe Feuchtegehalte in Bauteilen oft Auslöser für Frostschäden, Korrosion oder andere das Bauteil beeinträchtigende Schäden. Ein Bauteil durchdringende Feuchte führt häufig zu Nutzungseinschränkungen, die durch hygienische Aspekte wie Schimmelpilzbildung oder die Raumluftqualität bedingt sind.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Modells zur Berechnung des gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Salztransports in zementgebundenen Baustoffen. Das Modell soll dabei sämtliche relevanten Transportmechanismen und Wechselwirkungen, die beim Eindringen von Wasser und Salzen, insbesondere von Chloriden, in zementgebundene Baustoffe auftreten, enthalten, so dass Schadensvorgänge und Risiken beurteilt werden können.

Die grundlegenden Mechanismen zum Wärme- und Feuchtetransport für grobporöse mineralische Baustoffe wurden bereits ausführlich untersucht und in der Literatur diskutiert. Berechnungsmodelle, welche die wesentlichen Mechanismen des stationären Wärme- und Feuchtetransports beinhalten, existieren bereits und werden seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt. Eines dieser Modelle ist das Berechnungsprogramm WUFI, welches von Künzel [2] bereits 1994 entwickelt und durch zahlreiche Labor- und Freilandversuche validiert wurde. Die dort implementierten Modellansätze für den Wärme- und Feuchtetransport dienen als Grundlage für diese Arbeit.

Die Transportgleichung für den Wärmetransport beinhaltet die Wärmeleitung, die durch die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit bestimmt wird und den Wärmetransport infolge Dampfdiffusion mit Phasenänderung (flüssig/gasförmig).

Die Transportgleichung für den Feuchtetransport enthält den Transport von Wasserdampf und flüssigem Wasser, die getrennt betrachtet werden. Die Dampfdiffusion wird als Transport infolge eines Dampfdruckgradienten mit einem feuchteunabhängigen Wasserdampfdiffusionsgradienten beschrieben. Der Flüssigtransport beinhaltet sowohl die Kapillarleitung wie auch die Oberflächendiffusion. Obwohl es sich beim Kapillartransport um eine Strömungserscheinung handelt, wird der Flüssigtransport unter der Annahme, dass das 1.

Fick'sche auch für die Kapillarleitung angewendet werden kann, mit einem Diffusionsansatz beschrieben. Hierbei ist der Wassergehalt das treibendes Potential, der mit den wassergehaltsabhängigen Transportkoeffizienten die lokale Flüssigtransportstromdichte bestimmt. Der Flüssigtransportkoeffizient hängt vom lokalen Sättigungsgrad des Porensystems ab. Er steigt mit zunehmendem Sättigungsgrad und nimmt bei freier Wassersättigung den Maximalwert an.

Die aus den Transportgleichungen für den Feuchtetransport resultierenden Potentiale Dampfdruck und Wassergehalt können einerseits aufgrund der Abhängigkeit des Dampfdrucks von der relativen Feuchte, andererseits durch die Feuchtespeicherfunktion, welche den Wassergehalt eines porösen Baustoffs in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte im Gleichgewichtszustand beschreibt, auf das Potential relative Feuchte reduziert werden.

Bei grobporösen Baustoffen wie Ziegel, Kalksandstein und Naturstein, für die die Modellansätze in WUFI gelten, folgt die durch kapillares Saugen hervorgerufene Wasseraufnahme dem Wurzel-Zeit-Gesetz. Im Gegensatz dazu weicht bei zementgebundenen Baustoffen wie Beton die Wasseraufnahme bereits nach kurzer Saugzeit von diesem Verhalten ab und es kommt zu einer zunehmend verminderten Aufnahmegeschwindigkeit. Die Dichtigkeit von Betonbauwerken gegenüber eindringendem Grundwasser wird beispielsweise entscheidend von diesem Effekt, der hier mit „Selbstabdichtung“ bezeichnet wird, bestimmt. Sämtliche existierenden Berechnungsmodelle, die das kapillare Eindringverhalten von Wasser in Beton beschreiben, sind aus diesem Grund für zementgebundene Baustoffe nicht anwendbar.

Nach kritischer Auswertung der Erklärungsansätze zum Selbstabdichtungseffekt, die in der Literatur dokumentiert sind, wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm zur Klärung der ursächlichen Mechanismen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass der Selbstabdichtungseffekt in erster Linie durch Oberflächenkräfte im Gelporenraum, der eine Vielzahl von Poren mit einem Durchmesser in der Größenordnung von 2 nm enthält, verursacht wird. Das Wasser, welches aus den schnell saugenden Kapillarporen in den Gelporenraum umverteilt wird, verändert infolge der dort wirkenden Oberflächenkräfte seine Struktur. Aufgrund der Wechselwirkungskräfte im Gelporenraum kann das Wasser nicht weiter kapillar transportiert werden. Die Abnahme des Wassers, welches nach dieser Wechselwirkung weiter am kapillaren Transport beteiligt ist, wird mit einer Gleichung beschrieben, in welcher eine materialabhängige Zeitkonstante die Geschwindigkeit bestimmt, mit der das Wasser im Gelporenraum gebunden wird. Die maximale Menge an Wasser, die im Gelporenraum gebunden werden kann, wird dabei von der inneren Oberfläche der Zementsteinmatrix bestimmt. Mit zunehmender innerer Oberfläche kann mehr Wasser im Gelporenraum gebunden werden und umso ausgeprägter ist der Selbstabdichtungseffekt. Mit der

Umverteilung des Wassers in den Gelporenraum baut sich oberhalb einer relativen Luftfeuchte von 50 % r.F. ein Spaltdruck auf, der ein Quellen des Gelporenraums verursacht. Dies führt zusätzlich zu einer Reduzierung der Transportgeschwindigkeit, die aus der Reduzierung des Transportraums, vor allem aber der Konnektivität der Poren resultiert.

Im Modell wird der Selbstabdichtungseffekt dadurch berücksichtigt, dass die wasser-gehaltsabhängigen Transportkoeffizienten entsprechend des lokal veränderten Sättigungs-grades reduziert werden. Die Reduzierung des lokalen Sättigungsgrades entspricht dabei der Menge an in den Gelporenraum umverteilten Wassers, verstärkt durch die Wirkung des Spaltdrucks, die durch einen Abdichtungskoeffizienten berücksichtigt wird.

Während die Wasseraufnahme an der Oberfläche eines grobporösen Materials dadurch gekennzeichnet ist, dass gleichzeitig mit der Wasserbeaufschlagung die freie Wassersättigung an der Oberfläche erreicht ist, wird bei zementgebundenen Baustoffen die freie Sättigung an der Oberfläche erst nach einer gewissen Zeit erreicht. Dieser Effekt ist auf die große Anzahl an kleinen Poren in zementgebundenen Baustoffen zurückzuführen, die aufgrund des hohen viskosen Widerstands sehr geringe Sauggeschwindigkeiten haben. Zur Beschreibung dieses Effekts wird mit dieser Arbeit in Analogie zum Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient an der Bauteiloberfläche ein Oberflächenübergangskoeffizient für das kapillare Saugen eingeführt, der diesen Effekt widerspiegelt.

Beim Vorhandensein von Salzen treten weitere Mechanismen auf, die im Rahmen dieser Arbeit zunächst untersucht und in das entwickelte Berechnungsmodell implementiert wurden. Salzionen werden konvektiv, d.h. „huckepack“ mit dem Wasser mittransportiert oder diffundieren in der Porenlösung.

Die Diffusion wird im Modell durch den bekannten Diffusionsansatz (1. Fick'sche Gesetz) mit der Konzentration der gelösten Ionen als treibendes Potential beschrieben. Der Diffusionskoeffizient entspricht dabei dem effektiven Diffusionskoeffizienten, der den materialabhängigen Einfluss der Tortuosität enthält.

Die im Wasser gelösten Salzionen beeinflussen die physikalischen Eigenschaften des Wassers, so dass die Eindringgeschwindigkeit verändert wird. Anhand von Versuchen konnte ein Zusammenhang zwischen Flüssigtransportkoeffizient des Wassers, Oberflächenspannung und Viskosität der Lösung hergeleitet werden. Die Zusammenhänge zwischen Lösungskonzentration und Änderung der Oberflächenspannung und Viskosität sind aus der Literatur bekannt, so dass im Modell für jede Salzkonzentration der Flüssigtransportkoeffizient für das Eindringen von Salzen und der konvektiv mitgeführten Ionen bestimmt werden kann.

Bei zementgebundenen Baustoffen scheint die Eindringgeschwindigkeit gelöster Chloride gegenüber Wasser geringer zu sein. Dies ist auf die Bindung der im Wasser gelösten freien Ionen an die Hydratationsprodukte zurückzuführen. Demzufolge wird nicht die Eindringgeschwindigkeit der Chloride an sich reduziert, sondern die Menge an transportierbaren Chloriden ändert sich mit der Zeit. Je höher das Angebot an freien Chloriden in der Porenlösung ist, umso mehr Chloride werden im Zementstein gebunden. Im Modell wird die Chloridbindung durch einen Ansatz nach [76] beschrieben, wobei hier neben der maximalen Bindekapazität auch die Zeitabhängigkeit der Bindung berücksichtigt wird.

Liegen die Salze im Porenraum in kristalliner Form vor, wird der dem Transport zur Verfügung stehende Porenraum entsprechend dem Volumen der auskristallisierten Salze verringert. Die Menge des auskristallisierten Salzes kann dabei anhand der temperaturabhängigen Löslichkeit der Salze näherungsweise bestimmt werden. In Abhängigkeit der im Porenraum auskristallisierten Salze wird die transportrelevante Porosität ausgehend von der Porosität des trockenen unbelasteten Baustoffs berechnet. Entsprechend dieser Reduzierung des Transportraums werden im Modell die Transportkoeffizienten angepasst, d.h. die Transportkoeffizienten werden reduziert, der Wasserdampfdiffusionswiderstand wird erhöht.

Auch die Feuchtespeicherfunktion ist entscheidend vom Salzgehalt des betrachteten Materials abhängig. Mit zunehmender Salzkonzentration der Porenlösung nimmt der Partialdampfdruck über der Porenlösung ab. Dies bewirkt, dass der Porenraum schon bei vergleichsweise geringeren relativen Luftfeuchten gefüllt wird. Anhand einer umfangreichen Versuchsserie konnte gezeigt werden, dass die Dampfdruckerniedrigung anhand der Salzkonzentration nach dem Raoult'schen Gesetz abgeschätzt werden kann, so dass für jede beliebige Salzkonzentration die Feuchtespeicherfunktion anhand der Feuchtespeicherfunktion für Wasser berechnet werden kann.

Nach der Zusammenführung der einzelnen Mechanismen in einem Berechnungsmodell konnten die physikalischen Ansätze mit Validierungsversuchen, bei denen sämtliche Mechanismen zusammenwirken, überprüft und bestätigt werden.

Für eine Vielzahl von Betonrezepturen konnten mit dieser Arbeit Transportkenngrößen bereitgestellt werden, mit denen die Auswirkungen verschiedener Einflussgrößen, wie Wasserzementwert, Zementgehalt, Mahlfeinheit des Zements, Zementart, etc. auf das Eindringverhalten von Wasser berechnet werden kann.

Im Hinblick auf die Anwendung in der Praxis bietet das Berechnungsprogramm die Möglichkeit auf Grundlage von wenigen zu bestimmenden Stoffkennwerten und Funktionen die sich in der Realität einstellenden Wärme-, Feuchte- und Chloridverteilungen zu berechnen. Damit stellt es eine kostengünstige Alternative oder Ergänzung zu aufwendigen

Messungen am Bauwerk dar und kann für einen Planer oder Gutachter als Hilfsmittel genutzt werden die Wirkungen von Feuchte- und Salzgehaltsveränderungen abzusehen, erforderliche Maßnahmen zu planen oder Alternativen zu bewerten.

Beispielsweise lässt sich das Eindringverhalten von außen anstehendem Wasser durch WU-Bauteile abschätzen. In Abhängigkeit der Zeit kann berechnet werden mit wie viel Wasserabgabe auf der Innenseite von Bauteilen, die als WU-Beton konzipiert sind, zu rechnen ist. Dies kann unter anderem dazu genutzt werden, die Wirtschaftlichkeit verschiedener Varianten zu überprüfen, wie beispielsweise die Fragestellung, um welche Dicke die Wandstärke reduziert werden kann, wenn der Wasserzementgehalt erniedrigt wird oder andere Optimierungen an der Betonrezeptur vorgenommen werden.

Auch für andere Anwendungsfälle kann das Langzeitverhalten auf Grundlage von diesen Berechnungen und innerhalb von relativ kurzen Zeiträumen bestimmaren Transportkenngrößen abgeschätzt werden. So kann beispielsweise die Entwicklung der Chloridverteilung in Bauteilen prognostiziert werden. Es kann rechnerisch untersucht werden, wie sich beispielsweise Beschichtungen oder andere Maßnahmen, die die Außenbedingungen des Bauteils beeinflussen auf die Chloridverteilung zukünftig auswirken. Daraus kann abgeleitet werden, nach welchem Zeitraum ein kritischer Chloridgehalt in der Bewehrungslage erreicht sein wird, der zu einem Korrosionsbeginn führen kann.

Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse solcher Berechnungen ist stets von der Genauigkeit der Eingangsgrößen abhängig. Da vor allem zementgebundene Baustoffe großen Materialschwankungen unterliegen (vgl. Kapitel 8), ist es erforderlich, die Zuverlässigkeit der Messergebnisse durch einen Vergleich mit gemessenen Stichproben am Bauwerk zu bestätigen. Anhand von rechnerischen Sensitivitätsanalysen kann überprüft werden, welche Eingangsgrößen und klimatischen Randbedingungen für den konkreten Anwendungsfall von Bedeutung sind und durch geeignete Maßnahmen beeinflusst werden können. Durch diese Maßnahmen kann ausgeschlossen werden, dass falsche Annahmen der Randbedingungen oder Eingangsgrößen sowie die Relevanz in diesem Berechnungsmodell nicht berücksichtigter Mechanismen zu Fehleinschätzungen- und interpretationen der Ergebnisse führen.

Die Ergebnisse können ebenso dazu verwendet werden, vom Wärme-, Feuchte- und Salzgehalt abhängige weitere Mechanismen und deren Auswirkungen abzuschätzen. So lässt sich durch die Berechnungen die zu erwartende Schwankungsbreite der Feuchte- und Temperaturverteilung berechnen. Dies kann wiederum beispielsweise in Finite-Elemente-Programme, wie SOFISTIK einfließen, mit welchen anhand der bekannten Temperatur- und Feuchtegehalte und einem Zusammenhang zwischen Feuchtegehalt und Schwinden Spannungen infolge der Temperatur- und Feuchteverteilungen berechnet werden können.

Damit kann wiederum das Risiko des Auftretens von Rissen infolge Zwang abgeschätzt und beurteilt werden.

10 LITERATUR

- [1] Kießl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen, Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung, Dissertation Universität Essen (Gesamthochschule), 1983
- [2] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Dissertation, Universität Stuttgart, 1994
- [3] Garrecht, H.: Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1992
- [4] Rode, C.: Combined Heat and Moisture Transfer in Building Components. Dissertation, Technical University of Denmark, 1990
- [5] Hagentoft, C.-E.: PC-program: 1D-HAM. Notes on heat transfer 5-93, Department of Building Physics, Lund University, Report TVBH-7147, 1993
- [6] Burch, D.M., Chi, J.: MOIST – A PC Program for Predicting Heat and Moisture Transfer in Building Envelopes – Release 3.0. National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 917, Gaithersburg, MD, 1997
- [7] Mendes, N., et al.: UMIDUS: A PC Program for the Prediction of Heat and Moisture Transfer in Porous Building Materials. Proceedings of Building Simulation 1999, Volume 1: pp. 277-283
- [8] Grunewald, J.: Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen. Dissertation TU Dresden, 1997
- [9] Beddoe, R., Springenschmid, R.: Feuchtetransport durch Bauteile aus Beton, Beton- und Stahlbetonbau 94 (1999), Heft 4, S. 158-166
- [10] Hall, C., Hoff, W.D., Taylor, S.C., Wilson, M.A., Yoon, Beom-Gi, Reinhardt, H.W., Sosoro, M., Meredith, P., Donald, A.M.: Water anomaly in capillary liquid absorption by cement-based materials, Journal of Materials Science Letters 14 (1995), pp. 1178-1181
- [11] Hearn, N., Morley, C.T.: Self-sealing property of concrete – Experimental evidence, Materials and Structures, Vol. 30, August-September 1997, pp. 404-411
- [12] Hearn, N.: Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference?, Materials and Structures, Vol. 31, October 1998, pp. 563-567
- [13] Krus, M., Hansen, K.K., Künzel, H.M.: Porosity and liquid absorption of cement paste, Materials and Structures, Vol. 30, August-September 1997, pp. 394-398
- [14] Sosoro, M.: Transport of organic fluids through concrete, Materials and Structures, Vol. 31, April 1998, pp. 162-169
- [15] Winter, K., Krus, M., Künzel, H.M.: Feuchtetransport in feinporigen Materialien. Intern. Zeitschrift für Bauinstandsetzen 3 (1997), H. 1, S. 1-14
- [16] Glass G.K., Buenfeld, N.R.: Chloride threshold levels for corrosion induced deterioration of steel in concrete, Chloride penetration into concrete, Proceedings of the international RILEM Workshop, Saint-Rémy-Les-Chevreuse, Bagneux, France, RILEM Publications, 1995, pp. 429-440
- [17] Schießl, P.: Durable concrete structures, Comité Euro-International du Béton (CEB), Bulletin d'information No. 182, 1989
- [18] Sandberg, P.: Chloride initiated reinforcement corrosion in marine concrete, Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, Report TVBM-1015, Doctoral Thesis, 1998
- [19] Breit, W.: Untersuchungen zum kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt für Stahl in Beton, Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH-Aachen, Nr. 8, Dissertation, 1997

- [20] Schießl, P.; Lay, S.: Corrosion in Concrete Structures (Ed.: H. Böhni), Chapter 4, "Influence of Concrete Composition", ISBN 1 85573 768 X, Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, 2005, pp. 91-134
- [21] Statistical Quantification, Onset of Corrosion, Brite/EuRam Project Report BE95-1347, European Community, Juli 1998
- [22] Gehlen, C.: Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsberechnungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion, Dissertation RWTH Aachen, 2000
- [23] Lay, S.: Abschätzung der Wahrscheinlichkeit tausalzinduzierter Bewehrungskorrosion – Baustein eines Systems zum Lebenszyklusmanagement von Stahlbetonbauwerken, Dissertation TU München, 2006, Heft 568 des DAfStb
- [24] IUPAC, Manual of Symbols and Terminology, App. 2, Part I, Coll. Surface Chem., Pure and Appl. Chem. 31, 578 (1972)
- [25] Setzer, M.J.: Interaction of Water with Hardened Cement Paste, S. Mindness (ed.), Advances in Cementitious Materials, Ceramic Transactions, Vol. 16, American Ceramic Society, 415 – 440 (1991)
- [26] ZKG international No.01/2001 (Teil 1) und No.02/2001 (Teil 2) im Bauverlag, „Neue Ansätze zur Zementhydratation“, hier: URL: <http://www.uni-weimar.de/~remlabor/ZKG.htm>
- [27] Stark, J., Wicht, B.: Zement und Kalk: der Baustoff als Werkstoff, F.-A.-Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, 2000
- [28] Gerdes, A.: Dauerhaftigkeit des Werkstoff Beton – ausgewählte Werkstoffeigenschaften, Wasser- und Geotechnologie, Nachrichten aus dem Institut für Technische Chemie, 1. Jahrgang, Heft 2, 45 – 68 (2002)
- [29] Gunkel, P.: Die Zusammensetzung der flüssigen Phase erstarrender und erhärtender Zemente. Beton-Informationen. 1983, 23, S. 3-8
- [30] Wittmann, F.H.: Grundlagen eines Modells zur Beschreibung Charakteristischer Eigenschaften des Betons, Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1977), Nr. 290, S. 45-95
- [31] Setzer, M.J.: Einfluss des Wassergehaltes auf die Eigenschaften des erhärteten Betons, Eigenschaften des Betons, Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1977), Nr. 280, S. 43-117
- [32] Badmann, R., Stockhausen, N., Setzer, M.J.: The statistical thickness and chemical potential of adsorbed water films, J. Colloid Interface Sci. 82 (1981), pp. 534-542
- [33] Stockhausen, N., Dorner, H., Zech, B., Setzer, M.J.: Untersuchung von Gefriervorgängen in Zementstein mit Hilfe der DTA, Cement and Concrete Research 9 (1979), S. 783-794
- [34] Krupp, H.: Particle Adhesion Theory and Experiment, Advances in Colloid and Interface Science 1 (1967), vol. 2, pp. 111-239
- [35] Beddoe, R.E., Setzer, M.J.: Phase transformations of water in hardened cement paste, a low-temperature DSC investigation, Cement and Concrete Research 20 (1990), pp.236-242
- [36] Seligman, P.: Nuclear Magnetic Resonance Studies of the Water in Hardened Cement Paste, Journal of the Portland Cement Association Research and Development Laboratories 1 (1968), vol. 10, pp. 52-65
- [37] Englert, G., Wittmann, F., Nussbaum, M.: Studium der Bindungsverhältnisse des Wassers im Zementstein, Zement-Kalk-Gips 24 (1971), S. 165-174
- [38] Englert, G., Wittmann, F.: Beitrag zum Studium der Wasserverteilung in hydratisiertem Tricalciumsilikat als Funktion des Feuchtigkeitsgehaltes, Materials Science and Engineering 7 (1971), S. 125-133

- [39] Setzer, M.J., Liebrecht, A.: The properties of pore solution in hardened cement paste, in Setzer, M.J. (ed.): Transport in concrete - Nano- to macrostructure. Aedificatio, Freiburg, 2007, pp. 207-215.
- [40] Setzer, M.J., Auberg, R.: Testing of Freeze Thaw and Deicing Salt Resistance, Second International Workshop on Concrete Block Paving, Oslo, 1994
- [41] Beddoe, R.E., Setzer, M.J.: A low-temperature DSC investigation of hardened cement paste subjected to chloride action, Cement and Concrete Research 18 (1988), pp. 249-256
- [42] Wittmann, F.H.: Porosität und Feuchtigkeitsgehalt, WTA-Schriftenreihe, Nr.3, 1992, S.1-22
- [43] Dullien F.A.L.: Porous Media-Fluid Transport and Pore Structure, Academic Press, New York, London, Toronto, Sydney, San Francisco, 1979
- [44] Metz, F., Knöfel, D.: Quecksilberdruckporosimetrie – Vergleichsmessungen an Natursteinproben zur Ermittlung der Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit. Ernst & Sohn, Berlin (1992), Jahresbericht Steinerfall – Steinkonservierung, Band 1, 1989, S. 259-287
- [45] Kast, W; Jokisch, F.: Überlegungen zum Verlauf von Sorptionsisothermen und zur Sorptionskinetik an porösen Feststoffen. Chemie-Ingenieur Technik 44 (1972), H. 8, S. 556-563
- [46] Künzel, H.: Feuchteinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit bei hygroskopischen und nicht hygroskopischen Stoffen, WKS 36 (1991), H. 29, S. 15-18
- [47] Bednar, Th.: Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden – Weiterentwicklung der Mess- und Rechenverfahren. Dissertation Technische Universität Wien, 2000
- [48] Häupl, P., Fechner, H., Neue, J.: Numerische Berechnung des hygrischen Verhaltens von Außenwänden, Tagungsband DFG-Forschungsschwerpunkt Bauphysik der Außenwände 1997, Internationaler Bauphysikkongress 25. September 1997 Berlin, IRB-Verlag Stuttgart 1997, S. 159-170
- [49] Husseini, F.: Feuchteverteilung in porösen Baustoffen aufgrund instationärer Wasserdampfdiffusion, Dissertation Universität Dortmund, 1982
- [50] Klopfer, H.: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen, Bauverlag GmbH Wiesbaden, 1974
- [51] Ricken, D.: Ein einfaches Berechnungsverfahren für die eindimensionale, instationäre Wasserdampfdiffusion in mehrschichtigen Bauteilen. Dissertation Universität Dortmund, 1989
- [52] Berliner, M.A.: Feuchtemessung, VEB Verlag Technik Berlin, 1980
- [53] Bazant, Z.P.: Constitutive equation for concrete creep and shrinkage based on thermodynamics of multiphase systems, Materials and Structures 3(1970), vol.1, pp. 3-36
- [54] Bazant, Z.P.: Drying of concrete as a nonlinear diffusion problem, Cement and Concrete Research 1 (1971), vol. 5, pp. 461-473
- [55] Bazant, Z.P., Najja, L.: Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete, Materials and Structures 5 (1972), vol. 3, pp. 3-20
- [56] Bazant, Z.P.: Thermodynamics of hindered adsorption and its implications for hardened cement paste and concrete, Cement and Concrete Research 2 (1972), vol. 1, pp. 1-16
- [57] Setzer, M.J.: Das Feststoff-Porenwassersystem des Zementgels (Solid-liquid gel-system SLGS Modell), Proceedings IBAUSIL 2006, FIB Bauhausuniversität Weimar (2006), S. 2-0683-2-0700
- [58] Beltzung, F., Wittmann, F.H.: Role of disjoining pressure in cement based materials, Cement and Concrete Research 35 (2005), vol. 12 , pp. 2364-2370

- [59] Holm, A.H.: Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes, Dissertation Universität Stuttgart, 2001
- [60] Barrow, G.M.: Physikalische Chemie, Bohmann-Verlag, Wien 1979
- [61] Crank, J.: The mathematics of diffusion, Oxford University Press, 1975
- [62] Gertis, K., Kiefl K., Werner, H., Wolfseher, U.: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen, Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton, Heft 258, 1976
- [63] Krischer, O., Kast, W.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, 3. Auflage, Springer Verlag Berlin (1978)
- [64] Cammerer, W.F.: Die kapillare Flüssigkeitsbewegung in porösen Körpern, Düsseldorf: VDI-Verlag – in VDI-Forschungshefte (1963), Nr. 500
- [65] Krus, M.: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken, Dissertation Universität Stuttgart, 1995
- [66] Fischer, H.-M. et al.: Lehrbuch der Bauphysik: Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima, 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage – Stuttgart: Teubner, 1997, ISBN 3-519-35014-9
- [67] Benedix, Roland: Chemie für Bauingenieure. 1999 B.G. Teubner Stuttgart – Leipzig, ISBN 3-519-00226-4
- [68] Sosoro, M.: Modell zur Vorhersage des Eindringverhaltens von organischen Flüssigkeiten in Beton, Beuth Verlag Berlin, Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton, Heft 446, 1995
- [69] Bakker, G.: Kapillarität und Oberflächenspannung, Handbuch der Experimentalphysik, Band 6, Leipzig, Akad. Verlagsgesellschaft 1926
- [70] Schubert, H.: Kapillarität in porösen Feststoffsystemen, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 1982
- [71] Schwarz, B.: Die Kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen, Der Gesundheitsingenieur 93 (1972), H. 7, S.206-211
- [72] Fehlhaber, Th.: Zum Eindringverhalten von Flüssigkeiten und Gasen in ungerissenen Beton, Beuth Verlag Berlin, Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton, Heft 445 (1994), S. 3- 85
- [73] Stöcker, H.: Taschenbuch der Physik, 3. Auflage (1998), Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main 1998, ISBN 3-8171-1556-3
- [74] Lutz, P. et al.: Lehrbuch der Bauphysik: Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima– Stuttgart, Teubner, 1985, ISBN 3-519-05014-5
- [75] Künzel, H., Schwarz, B.: Die Feuchtigkeitsaufnahme von Baustoffen bei Beregnung. Berichte aus der Bauforschung (1968) H.51, S. 99-113, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin
- [76] Volkwein, A.: Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in den Beton, Dissertation Technische Universität München , 1991
- [77] Lunk P.: Kapillares Eindringen von Wasser und Salzlösungen in Beton. Building Materials Reports No. 8, Aedificatio Verlag, 1997
- [78] Wiegrink, K.H.: Modellierung des Austrocknungsverhaltens von Calciumsulfat-Fließestrichen und der resultierenden Spannungen und Verformungen, Dissertation TU München, 2002
- [79] Gagarin, V.G., Mogutov, V.A.: Unsteady Movement of Fluid in Building Material, Proceedings of the ICHMT Symposium “Heat and Mass Transfer in Building Materials and Structures”, Hemisphere Publishing Corporation, New York (1990), pp. 42-62
- [80] Philip, J.R., de Vries, D.A.: Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradients, Transactions Amer. Geophysical Union 38 (1957), vol. 2, pp. 222-232

- [81] Cammerer, W.F.: Untersuchungsergebnisse über die kapillare Leitfähigkeit von Baustoffen. Wärme und Stoffübertr. 9 (1976), H. 2, S. 159-166
- [82] Krus, M; Holm; Schmidt: Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten mineralischer Baustoffe aus dem W-Wert. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzung 3, (1997), S. 219-234
- [83] Meng, B.: Charakterisierung der Porenstruktur im Hinblick auf die Interpretation von Feuchtetransportvorgängen, Dissertation RWTH Aachen, 1993
- [84] Göttig, R.: Untersuchung von Feuchtetransportvorgängen (kapillares Saugen und weiterverteilen nach Unterbrechung der Flüssigkeitszufuhr) in porösen Baustoffen mit Hilfe der Kernmagnetischen Resonanz, Diplomarbeit Fachhochschule München, 1991
- [85] Kießl, K.; Krus, M.; Künzel, H. M.: Weiterentwickelte Meß- und Rechenansätze zur Feuchtebeurteilung von Bauteilen. Bauphysik 15 (1993), H. 2, S. 61-67
- [86] Krus, M., Künzel, H.M.: Das Wasseraufnahmeverhalten von Betonbaustoffen, IBP Mitteilung 273, 22 (1995) Fraunhofer-Institut für Bauphysik
- [87] Sosoro, M.: Modell zur Vorhersage des Eindringverhaltens von organischen Flüssigkeiten in Beton, Beuth Verlag Berlin, Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton Heft 446 (1995), S. 87-108
- [88] Powers, T.C., Copeland, L:E., Hayes, J.C. and Mann, H.M.: Permeability of Portland Cement pastes, Journal of American Concrete Institute 51 (1954), pp. 285-298
- [89] Ruttgers, A., Vidal, E.N., Wing, S.P.: An investigation of the permeability of mass concrete with particular reference to Boulder dam, Journal of American Concrete Institute 6 (1935), pp. 389-416
- [90] Norton, P., Pleta, D.: Permeability of gravel concrete, Journal of American Concrete Institute 27 (1931), pp. 1093-1132
- [91] Banchia, N., Mindess, S.: Water permeability of cement paste, Cement and Concrete Research 19 (1989), pp. 727-736
- [92] McMillan, F.R. and Lyse, L.: Some permeability study of concrete, Journal of American Concrete Institute Proc., 1930, S. 101-142
- [93] Bier, T.A., Ludizdja, D., Young, J.F., Berger, R.L.: The effect of pore structure and cracking on the permeability of concrete, Pore Structures and Permeability of Cementitious Materials, MRS Symp, Boston, 1988
- [94] Bonzel, J.: Einfluss des Zements, des w/z-Werts, des Alters und der Lagerung auf die Wasserundurchlässigkeit des Betons, Beton 16 (1966), H. 9 und 10
- [95] Edvardsen, C.K.: Wasserundurchlässigkeit und Selbstheilung von Trennrissen in Beton, Beuth Verlag Berlin, Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton Heft 455, 1996
- [96] Parkhurst, D.L., Apello, C.A.J.: User's guide to PHREEQC - a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations, U.S. water-resources investigations report 99-4259
- [97] Springenschmid, R., Beddoe, R.E.: Quellspannungen im Zementstein, Forschungsbericht N.: Sp 174/28, Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), 2000
- [98] Sosoro, M., Reinhardt, H.W: Eindringverhalten von Flüssigkeiten in Beton in Abhängigkeit von der Feuchte der Probekörper und der Temperatur, Beuth Verlag Berlin, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 445 (1994), S. 87-108
- [99] Holm, A., Krus, M., Künzel, H.M.: Grenzen der Feuchtetransportberechnung bei Betonaußenbauteilen, 5. Internationales Kolloquium – Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen. Aedificato Publishers, Freiburg 1999, S. 405-414
- [100] Holm, A., Krus, M., Künzel, H.M.: Beton aus feuchtetechnischer Sicht: Kennwerte und rechnerische Bewertungsansätze für Klimawirkungen in Betonaußenbauteilen, DFG-Tagung Kassel, März 1998
- [101] Lide, D.L.: Handbook of Chemistry and Physics, 78th Edition, 1997-1998, CRC Press LLC, New York

- [102] Larsen, P.K.: Desalination of painted brick vaults, Department of Structural Engineering and Materials Technical University of Denmark, Series R, No 52, 1999
- [103] Nielsen C.B.: Salts in Porous Building Materials, Technical Report 243/91, Building Materials Laboratory, The Technical University of Denmark, 1991
- [104] Künzel, H.: Trocknungsblockade durch Mauerversalzung. Bautenschutz und Bausanierung, Jhrg. 14, H. 4 (1991), S. 63-66
- [105] Schießl, P.: Diffusionsmodell zur rechnerischen Erfassung der Chloridionendiffusion in Beton, Institut für Betonstahl und Stahlbetonbau e.V., 1983
- [106] Transportvorgänge verschiedener Ionen im Beton, Einfluss der Struktur und Zusammensetzung des Zementsteins, Beton Informationen 3-83, kein Verfasser angegeben
- [107] Goto, S., Roy, D.M.: Diffusion of ions through hardened cement pastes, Cement and Concrete Research 11 (1981), vol. 4-5, pp. 751-757
- [108] Kondo, R., Satake, M., Ushiyama, H.: Diffusion of various Ions in Hardened Portland Cement, The 28th General Meeting, The Cement Association of Japan, Tokyo, 1974, pp. 41-43
- [109] Brodersen, H.: Zur Abhängigkeit der Transportvorgänge verschiedener Ionen im Beton von Struktur und Zusammensetzung des Zementsteins, Dissertation Technische Hochschule Aachen, 1982
- [110] Richartz, W.: Die Bindung von Chlorid bei der Zementerhärtung. Zement-Kalk-Gips 22 (1969), H. 10, S. 447-456
- [111] Gunkel, P., Geiseler, J.: Chloridhaltige Hydratphasen in Zementstein. Beton-Informationen 2-90, Beton-Verlag, Düsseldorf (1990)
- [112] Tritthart, J.: Chloridinduzierte Betonstahlkorrosion, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten. Straßenforschung Heft 346, Wien (1988)
- [113] Tuutti, K.: Corrosion of Steel in Concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Report FO8.82 (1982)
- [114] Frey, R.: Neuere reaktionskinetische Erkenntnisse zum Mechanismus der Chloriddiffusion im Zementstein von Betonen, Habilitation Universität Stuttgart, 1990
- [115] Wiens, U.: Zur Wirkung von Steinkohlenflugasche auf die chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton, Dissertation RWTH Aachen, 2002
- [116] Smolczyk, H.G.: Zur Bindung des Chlorids im Zementstein, Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut des Vereins der Österreichischen Zementfabrikanten, Heft 36, Intern. Kolloquium, Wien 43-53 (1983)
- [117] Justnes, H.: A review of chloride binding in cementitious systems, SINTEF Civil and environmental engineering, cement and concrete, N7034, Trondheim, Norway
- [118] Wowra, O., Setzer, M.J.: Einfluss der elektrochemischen Doppelschicht auf die Sorption und den Transport von Chlorionen im Zementstein, Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 6 (2000), Nr. 4, S. 415-428
- [119] Tritthart, J.: Chloride binding in cement, Cement and Concrete Research 19 (1989), pp. 586-594
- [120] Steffens, A.: Modellierung von Carbonatisierung und Chloridbindung zur numerischen Analyse der Korrosionsgefährdung der Betonbewehrung, Dissertation Braunschweig, 2000
- [121] Suryavanshi, A.K., Scantlebury, J.D., Lyon, S.B.: Mechanism of Friedel's Salt formation in cements rich in C_3A , Cement and Concrete Research 26 (1996), vol. 5, pp. 717-727
- [122] Tang, L. and Nilsson, L.-O.: Chloride Binding Capacity and Binding Isotherms of OPC Pastes and Mortars, Cement and Concrete Research 23 (1993), pp.247-253
- [123] Glass, G.K., Stevensen, G.M., Buenfeld, N.R. (1998), Chloride-binding isotherms from the diffusion cell test, Cement and Concrete Research 28 (1998), vol. 7, pp. 939-945

- [124] Lukas, W.: Zur Frage der Chloridbindung und -korrosion von Stahl in Beton. Beitrag zum Kolloquium „Chloridkorrosion“, Wien 22./23. Feb. 1983, Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut des VÖZ, Heft 36
- [125] Tang, L. and Nilsson, L.-O.: Effect of Curing Conditions on Chloride Diffusivity in Silica Fume High Strength Concrete, Proceedings International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi 1992, Vol. V, pp.100-106
- [126] Künzel, H.: Bestimmt der volumen- oder der massebezogene Feuchtegehalt die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen? Bauphysik 8 (1986), H. 2, S. 33-39
- [127] Erhorn, H., Szerman, M.: Überprüfung der Wärme- und Feuchteübergangskoeffizienten in Außenwandoberflächen von Wohnbauten. Gesundheitsingenieur 113 (1992), H. 4, S. 177-186
- [128] Illig, W.: Die Größe der Wasserdampfübergangszahl bei Diffusionsvorgängen in Wänden von Wohnungen, Stallungen und Kühlräumen, Gesundheitsingenieur 73 (1952), H. 7/8, p. 124-127
- [129] Maage, M., Poulsen, E., Vennesland, O., Carlsen, J.E.: Service life model for concrete structures exposed to marine environment - initiation period, LIGHTCON report Nr. 2.4, STF70 A94082 SINTEF, Trondheim, Norwegen, 1995
- [130] Frederiksen, J.M., Mejlbro, L., Poulsen, E.: The Hetek model of chloride ingress into concrete made simpler by approximations, Testing and modelling the chloride ingress into concrete, Proceedings Workshop Paris (2000), Ed. C. Andrade, J. Kropp, pp. 317-336
- [131] Tang L.: Chloride transport in concrete, Measurement and prediction, Doctoral Thesis Chalmers University of Technology, Göteborg, Publication P-96: 6, 1996
- [132] Bamforth P.B.: Spreadsheet model for reinforcement corrosion in structures exposed to chlorides, Concrete under severe conditions 2, Proceedings CONSEC '98, Tromsø, Ed. O.E. Gjörff, K. Sakai, N. Banthia, E & FN Spon London und New York 1998, pp. 64-75
- [133] Weyers R.E.: Service life model for concrete structures in chloride laden environments, ACI Materials Journal 95 (1998), vol. 4, pp. 445-453
- [134] Mejlbro, L., Poulsen, E.: On a model of chloride ingress into concrete exposed to deicing salt containing chloride, Testing and modelling the chloride ingress into concrete, Proceedings Workshop Paris 2000; Ed. C. Andrade, J. Kropp, S. 337-354.
- [135] Ungricht, Heidi: Wasserhaushalt und Chlorideintrag in Beton – Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung, Dissertation ETH Zürich, 2004
- [136] DuraCrete: Probabilistic Methods for Durability Design, European Union – Brite EuRam III, document BE95-1347/R0, 1999
- [137] Paschmann, H., Grube, H., Thielen, G.: Prüfverfahren und Untersuchungen zum Eindringen von Flüssigkeiten und Gasen in Beton sowie zum chemischen Widerstand von Beton, Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton, Heft 450, 1995
- [138] Schießl, P., Lay, S.: Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonkonstruktionen, Forschungsbericht, AiF 12525 N, DBV 225, München, 2003
- [139] Badmann, R.: Das physikalisch gebundene Wasser des Zementsteins in der Nähe des Gefrierpunktes, Dissertation Universität München, 1981
- [140] Descamps, F.: Continuum and discrete modelling of isothermal water and air transfer in porous media, Dissertation Katholieke Universiteit Leuven, 1997
- [141] Kober, A., Mehlhorn, L.: Radiometr. Feuchtemessung in Bauteilen mit hoher räumlicher Auflösung, Teil 1: Grundlagen und Beschreibung der Meßvorrichtung. Bauphysik 13 (1991), H. 2, S. 43-49
- [142] Kober, A. und Mehlhorn, L.: Radiometrische Feuchtemessung in Bauteilen mit hoher räumlicher Auflösung, Teil 2: Erprobung der Meßvorrichtung und Ergebnisse. Bauphysik 16 (1994), H. 3, S. 81-85

- [143] Holm, A.: Bestimmung des Feuchteaustausches zwischen Putz und Mauerwerk, Diplomarbeit Technische Universität München, 1996
- [144] Holm, A., Krus, M., Wardzichowski, P.: Bestimmung der Wasser- und Salzgehaltsverteilung durch Kombination von NMR- und γ -Durchstrahlungsmessungen – Erste Ergebnisse, Tagungsband: Moderne Verfahren und Geräte zur Materialfeuchtemessung, 9. Feuchtetag 1997, Weimar, S. 203-217
- [145] Hubbel, J.H., Seltzer, S.M.: Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z=1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest, Internet: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>
- [146] Page, C.L., Short, N.R. and Tarras, A.El.: Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes, *Cement and Concrete Research* 11(1981), vol. 3, pp. 395-406
- [147] Longuet, P., Burglen, L., Zelwer, A.: The Liquid Phase of Hydrated Cement, (franz.), *Revue Mater. Const.* 676 (1973), pp. 35-41
- [148] Stadtwerke München: Münchner Trinkwasser-Analysewerte, Stand Januar 2007
- [149] Stark, J., Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton, Schriften der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar 100, Fakultät Bauingenieurwesen, F.A. Finger – Institut für Baustoffkunde, November 1995
- [150] Stadtwerke München: Münchner Trinkwasser-Analysewerte, Stand Januar 2007
- [151] Churaev, N.V., Setzer, M.J., Wowra, O., Reick, M.: Electrolytes in narrow pores, *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege* 6 (2000), pp. 87-102

ANHANG
- Abbildungen
- Tabellen

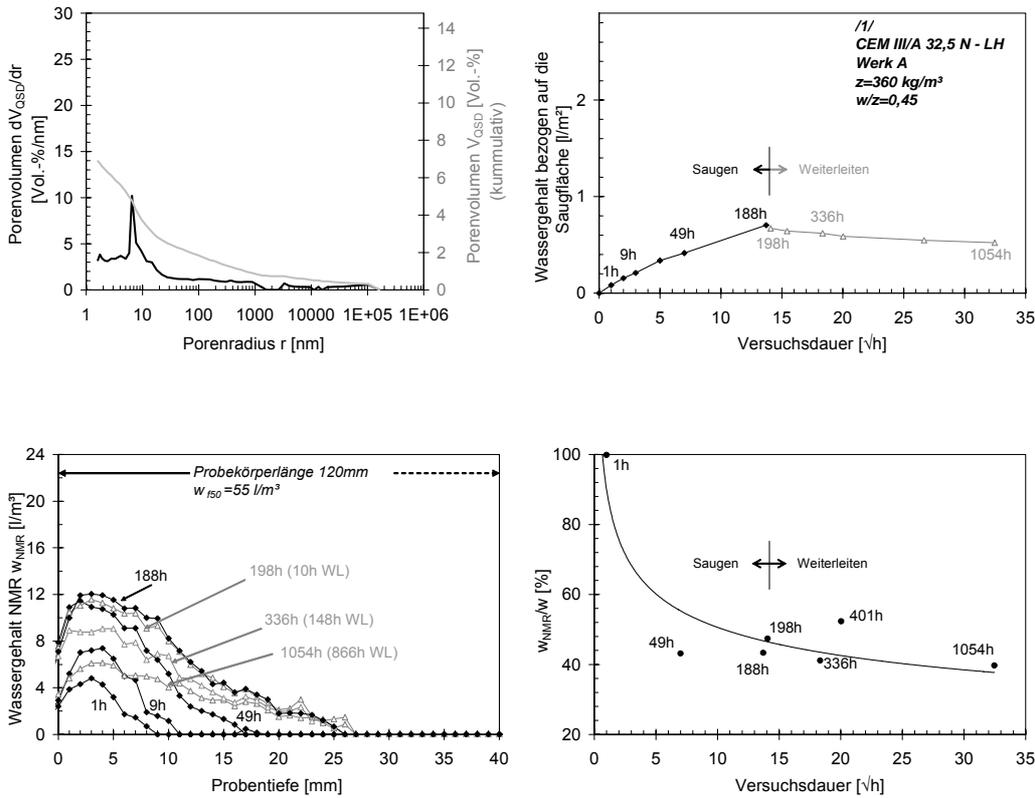


Abbildung A 1: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung CEM III/A 32,5 N - LH, Werk A, Zementgehalt 360 kg/m^3 , Wasserzementwert 0,45 (Kurzbezeichnung /1/)

Erläuterung zu Abbildung A 1 - Abbildung A 33:

Abbildung oben links: Ergebnisse aus der Quecksilberdruckporosimetrie.

Abbildung oben rechts: Integraler Wassergehalt bezogen auf die Saugfläche nach Vorlagerung im Klima $23 \text{ °C}/ 50 \text{ % r.F.}$ während der Benetzung einer Stirnseite des Prismas mit Wasser (Saugen) und nach Beendigung der Benetzung (Weiterleiten). Die Beschriftung der Datenpunkte entspricht der Versuchsdauer. Der Maximalwert der y-Achse entspricht der maximal über die Saugfläche aufnehmbaren Wassermenge zur Vollständigen Füllung des kapillaraktiven Transportraums w_{kap} (Betone) bzw. der maximal kapillar aufnehmbaren Wassermenge w_{f50} (Mörtel).

Abbildung unten links: Mittels NMR ermittelte Wassereindringprofile w_{NMR} (schwarz dargestellt: Eindringprofile während des Saugens, grau dargestellt: Eindringprofile während des Weiterleitens -WL-). Der Maximalwert der y-Achse entspricht dem maximal kapillaraktiven Transportraum w_{kap} (Beton) bzw. der maximal kapillar aufnehmbaren Wassermenge w_{f50} (Mörtel).

Abbildung unten rechts: integraler Wassergehalt NMR w_{NMR} berechnet aus den Eindringprofilen aus den NMR-Messungen bezogen auf den gravimetrisch ermittelten integralen Wassergehalt w .

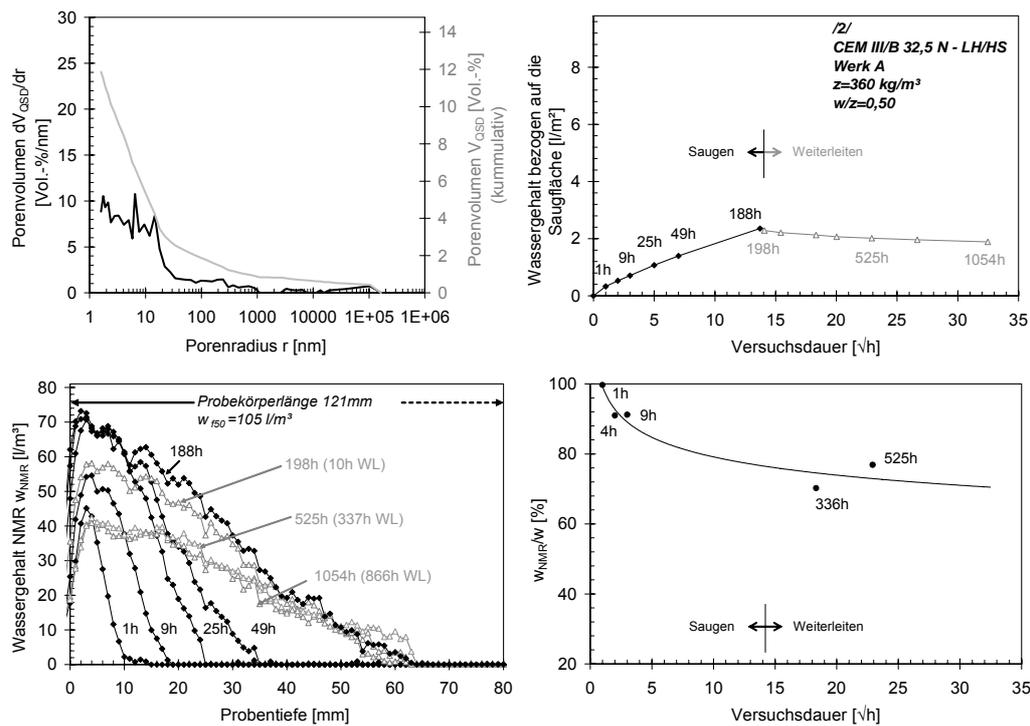


Abbildung A 2: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM II/B 32,5 N – LH/HS, Werk A, Zementgehalt 360 kg/m³, Wasserzementwert 0,50* (Kurzbezeichnung /2/)

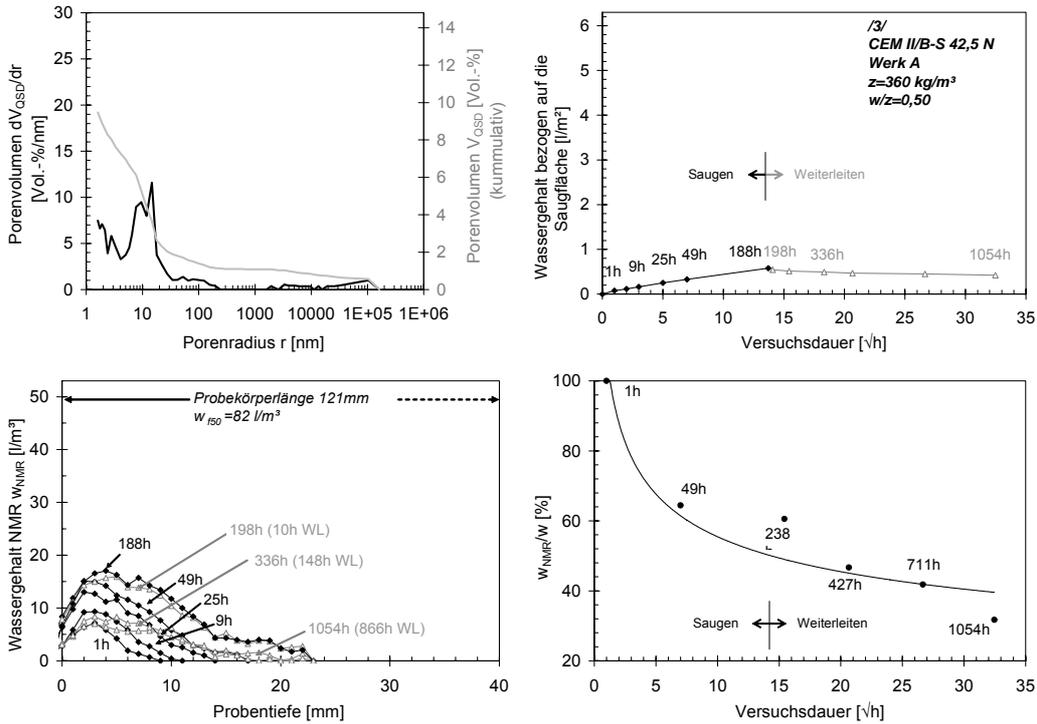


Abbildung A 3: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM II/B-S 42,5 N, Werk A, Zementgehalt 360 kg/m³, Wasserzementwert 0,45* (Kurzbezeichnung /3/)

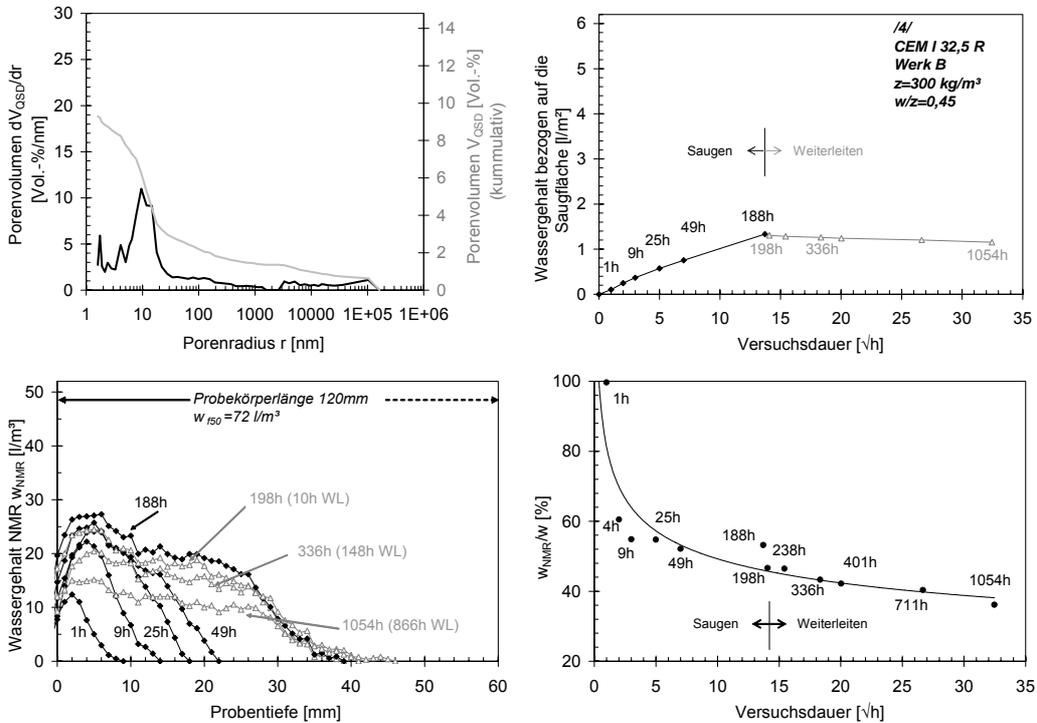


Abbildung A 4: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM I 32,5 R, Werk B, Zementgehalt 300 kg/m³, Wasserzementwert 0,45* (Kurzbezeichnung /4/)

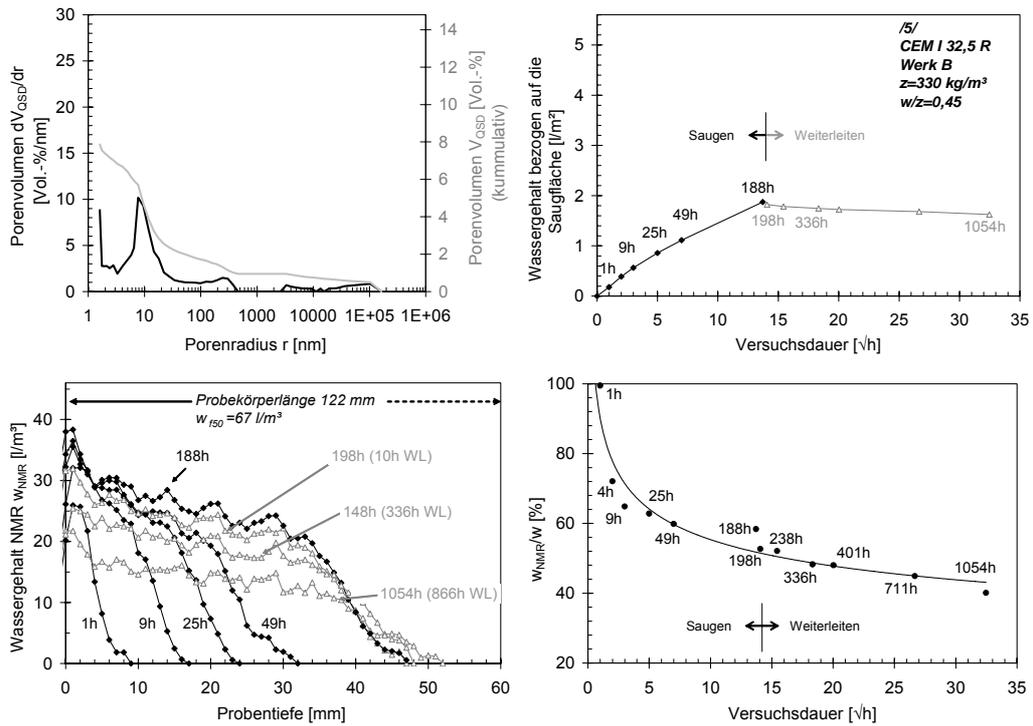


Abbildung A 5: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM I 32,5 R, Werk B, Zementgehalt 330 kg/m³, Wasserzementwert 0,45* (Kurzbezeichnung /5/)

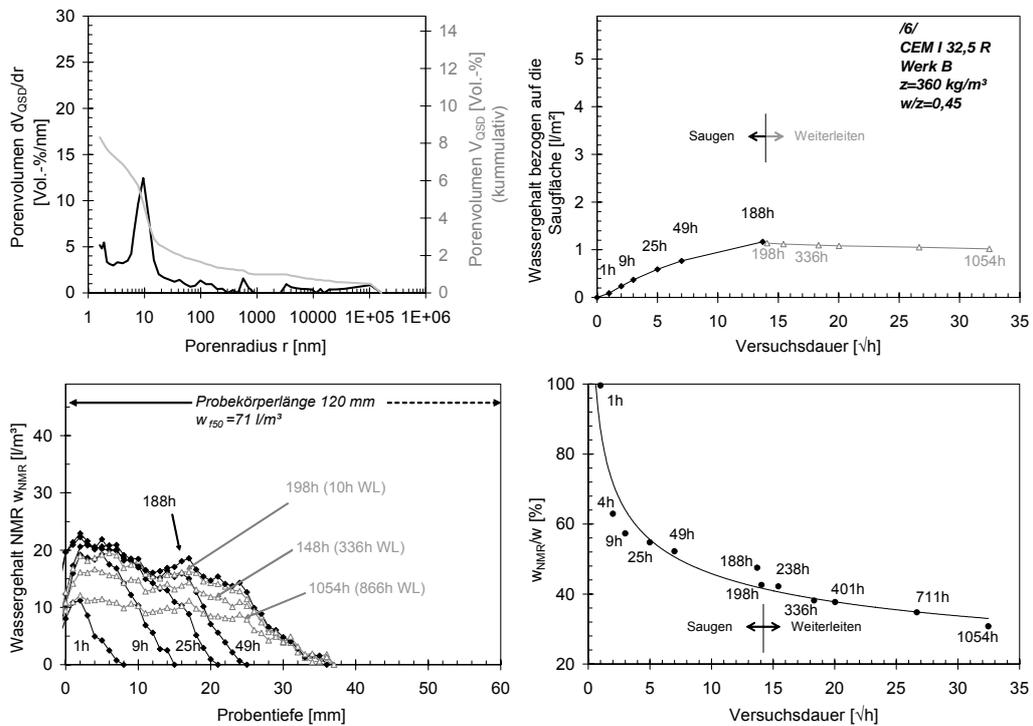


Abbildung A 6: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM I 32,5 R, Werk B, Zementgehalt 360 kg/m³, Wasserzementwert 0,45* (Kurzbezeichnung /6/)

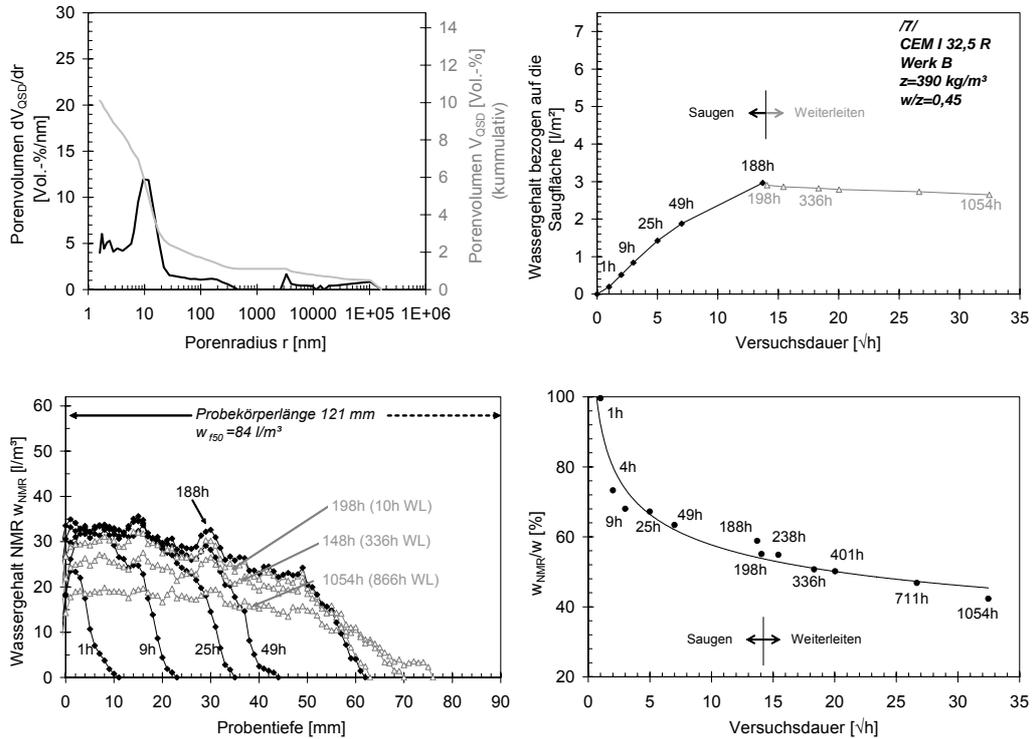


Abbildung A 7: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM I 32,5 R, Werk B, Zementgehalt 390 kg/m³, Wasserzementwert 0,45* (Kurzbezeichnung /7/)

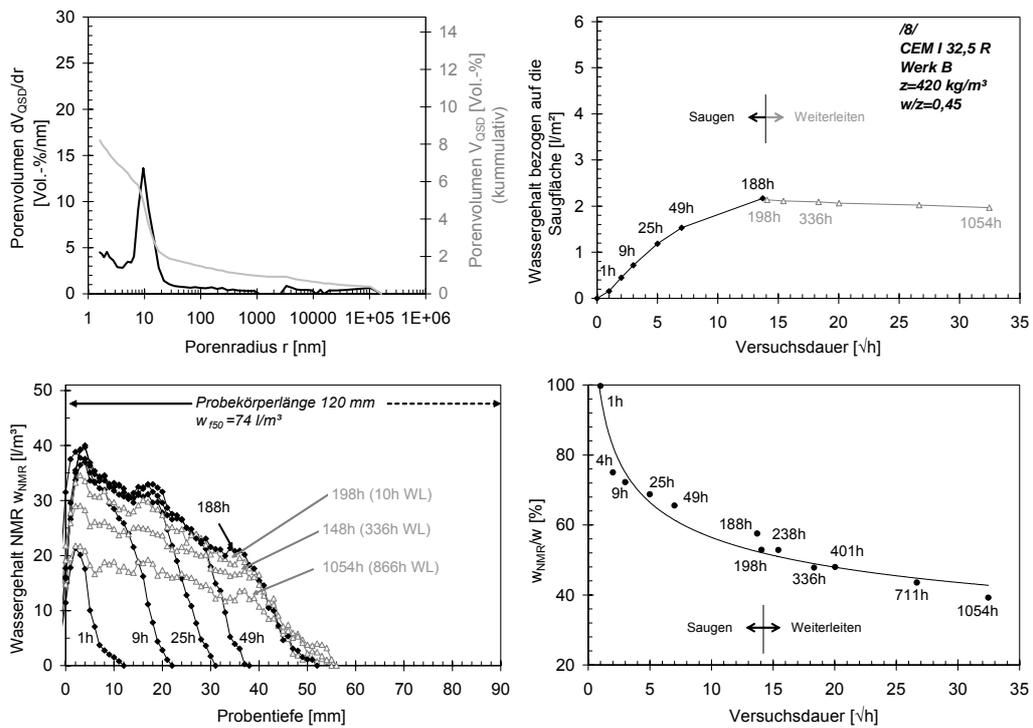


Abbildung A 8: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM I 32,5 R, Werk B, Zementgehalt 420 kg/m³, Wasserzementwert 0,45* (Kurzbezeichnung /8/)

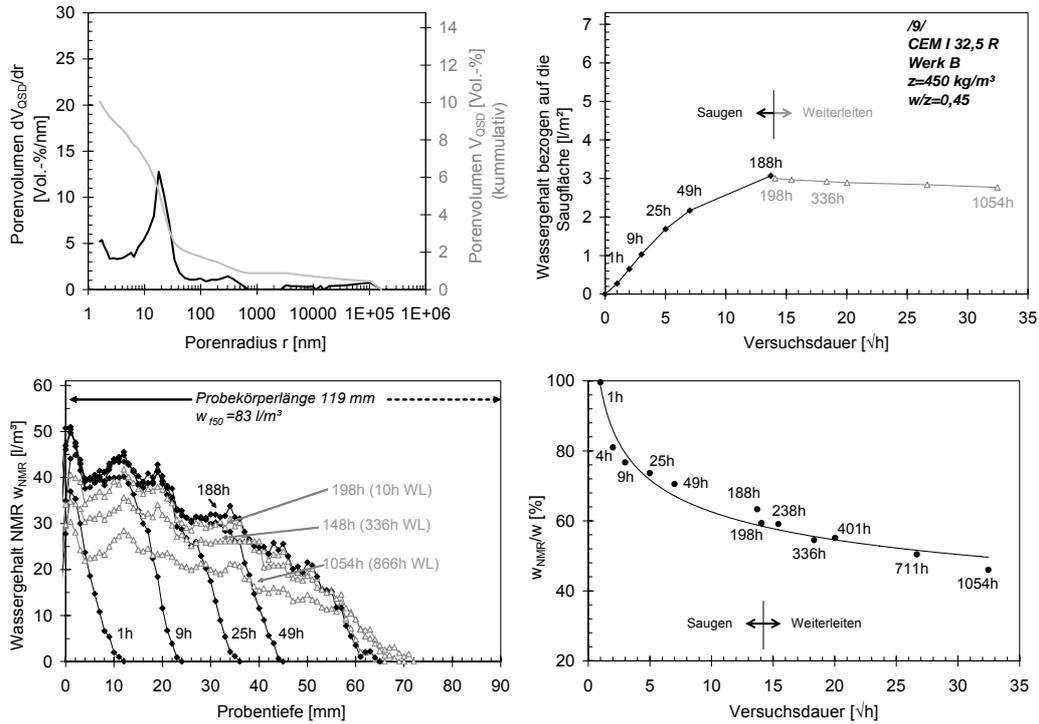


Abbildung A 9: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM I 32,5 R, Werk B, Zementgehalt 450 kg/m³, Wasserzementwert 0,45* (Kurzbezeichnung /9/)

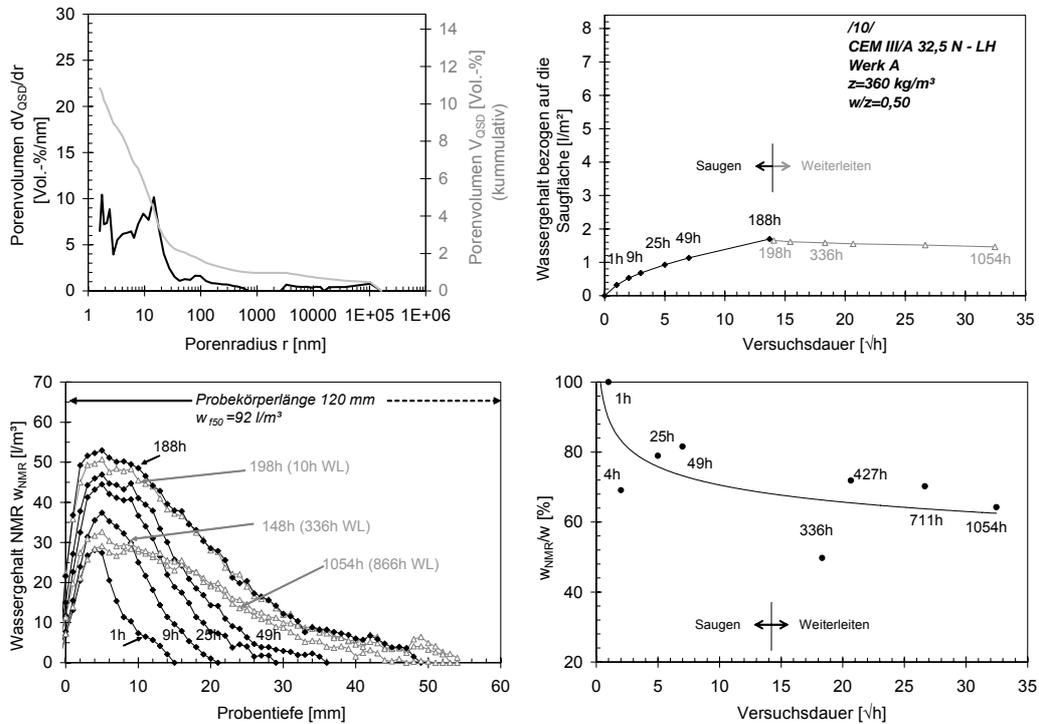


Abbildung A 10: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM III/A 32,5 N - LH, Werk A, Zementgehalt 360 kg/m³, Wasserzementwert 0,50* (Kurzbezeichnung /10/)

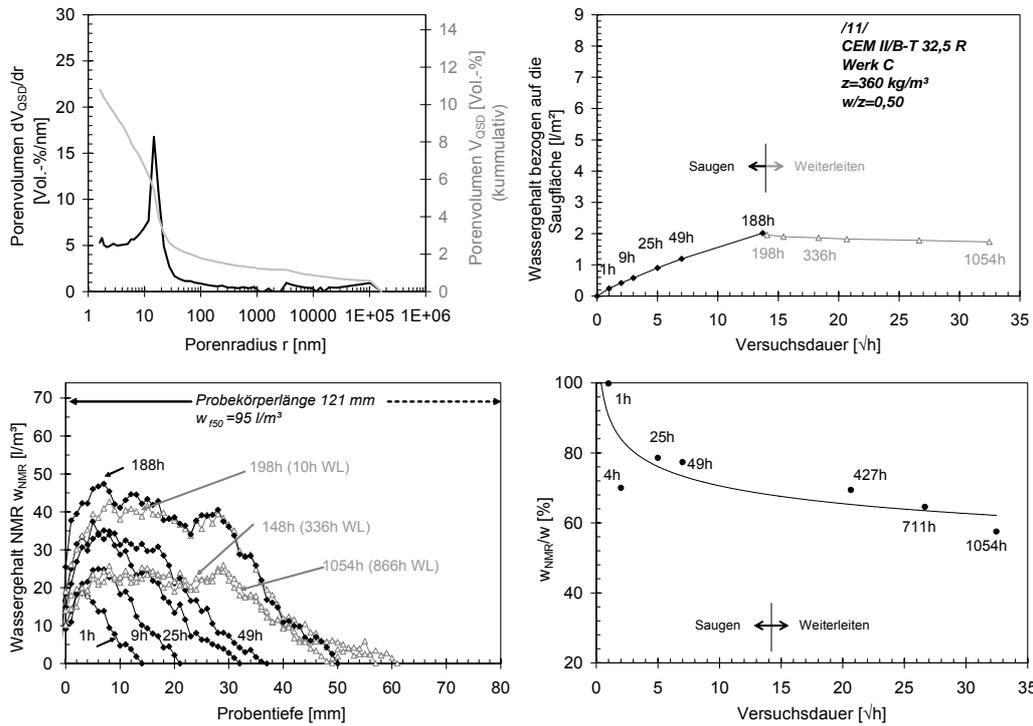


Abbildung A 11: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM II/B-T 32,5 R, Werk C, Zementgehalt 360 kg/m³, Wasserzementwert 0,50* (Kurzbezeichnung /11/)

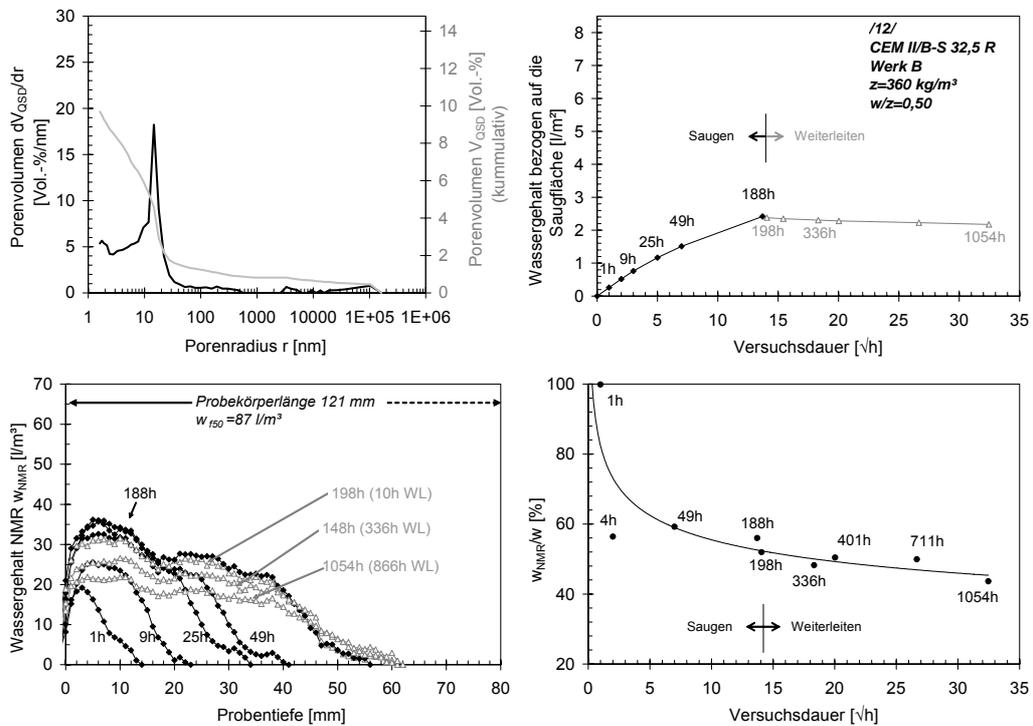


Abbildung A 12: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM II/B-S 32,5 R, Werk B, Zementgehalt 360 kg/m³, Wasserzementwert 0,50* (Kurzbezeichnung /12/)

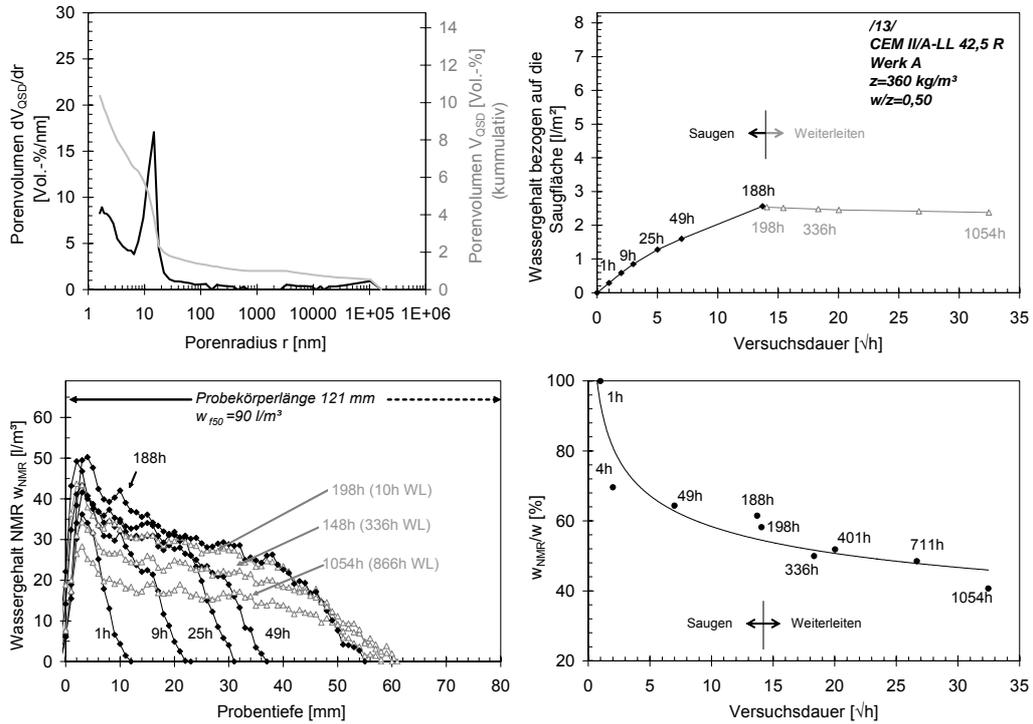


Abbildung A 13: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM II/A-LL 42,5 R, Werk A, Zementgehalt 360 kg/m³, Wasserzementwert 0,50* (Kurzbezeichnung /13/)

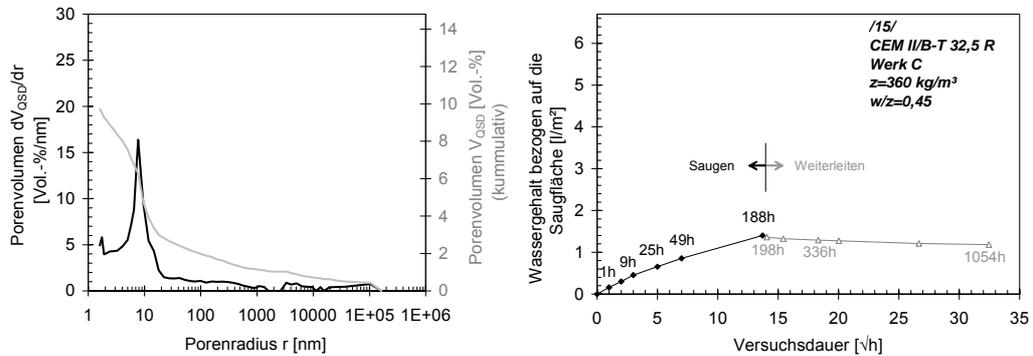


Abbildung A 14: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM II/B-T 32,5 R, Werk C, Zementgehalt 360 kg/m³, Wasserzementwert 0,45* (Kurzbezeichnung /15/)

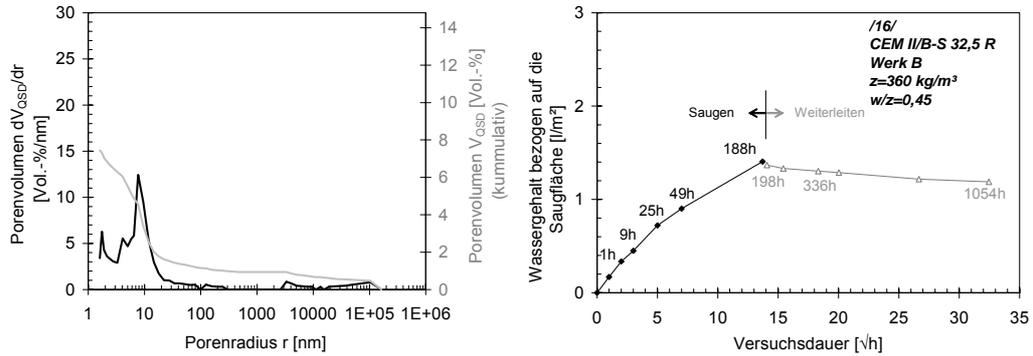


Abbildung A 15: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM II/B-S 32,5 R, Werk B, Zementgehalt 360 kg/m^3 , Wasserzementwert 0,45* (Kurzbezeichnung /16/)

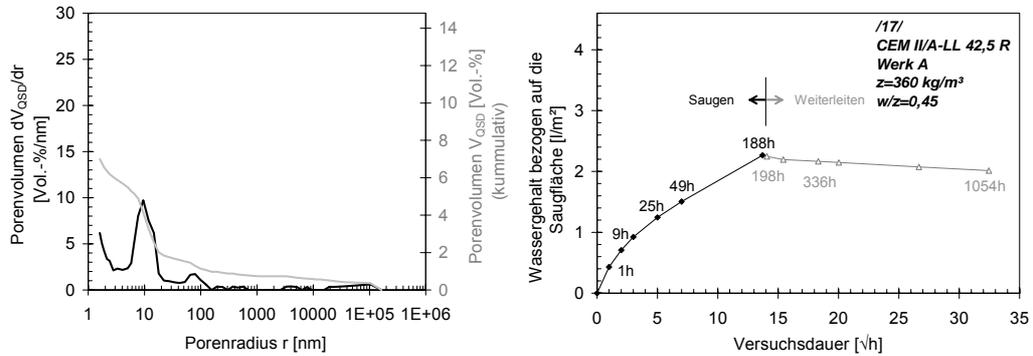


Abbildung A 16: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM II/A-LL 42,5 R, Werk A, Zementgehalt 360 kg/m^3 , Wasserzementwert 0,45* (Kurzbezeichnung /17/)

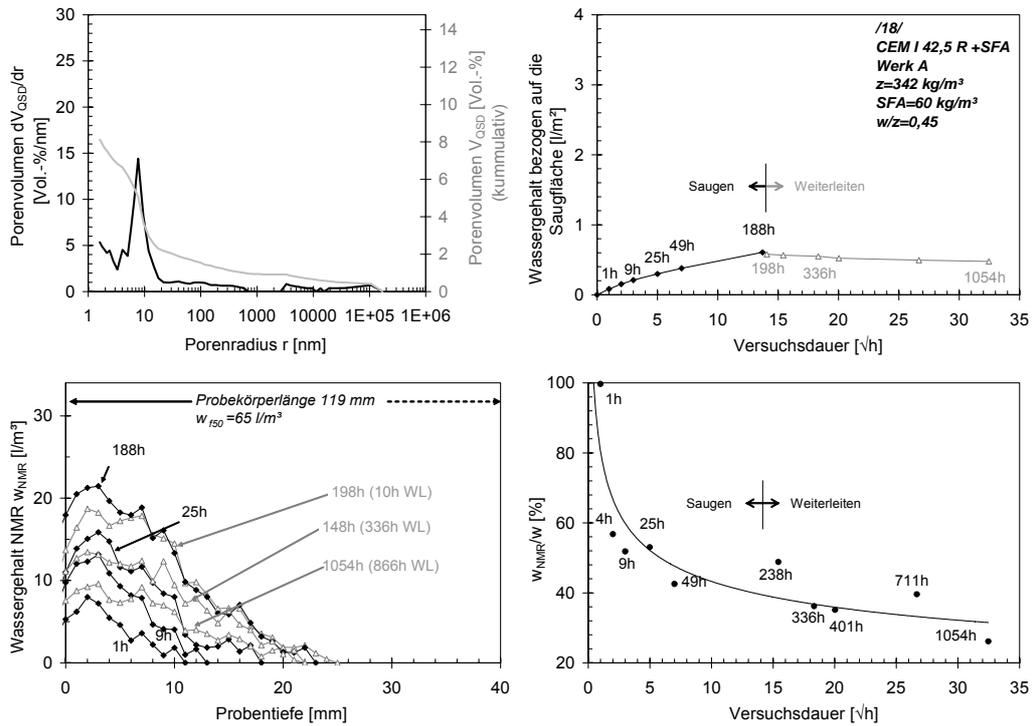


Abbildung A 17: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM I 42,5 R + SFA, Werk A, Zementgehalt 342 kg/m^3 , Gehalt SFA 60 kg/m^3 , Wasserzementwert $0,45$* (Kurzbezeichnung /18/)

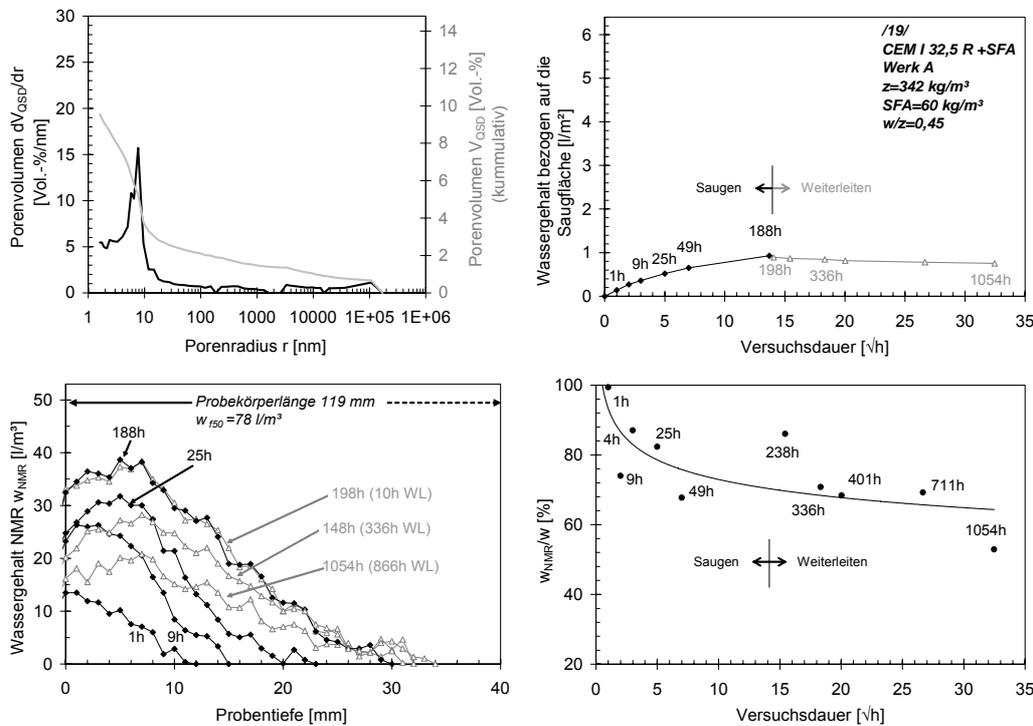


Abbildung A 18: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM I 32,5 R + SFA, Werk A, Zementgehalt 342 kg/m^3 , Gehalt SFA 60 kg/m^3 , Wasserzementwert $0,45$* (Kurzbezeichnung /19/)

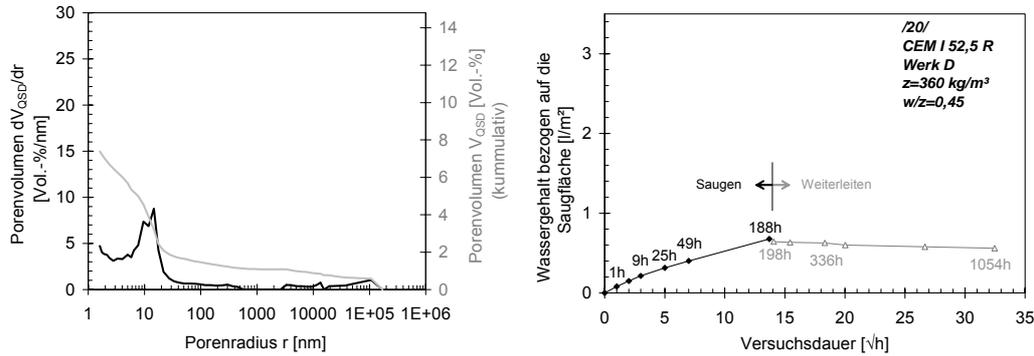


Abbildung A 19: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM I 52,5 R, Werk D, Zementgehalt 360 kg/m^3 , Wasserzementwert $0,45$* (Kurzbezeichnung /20/)

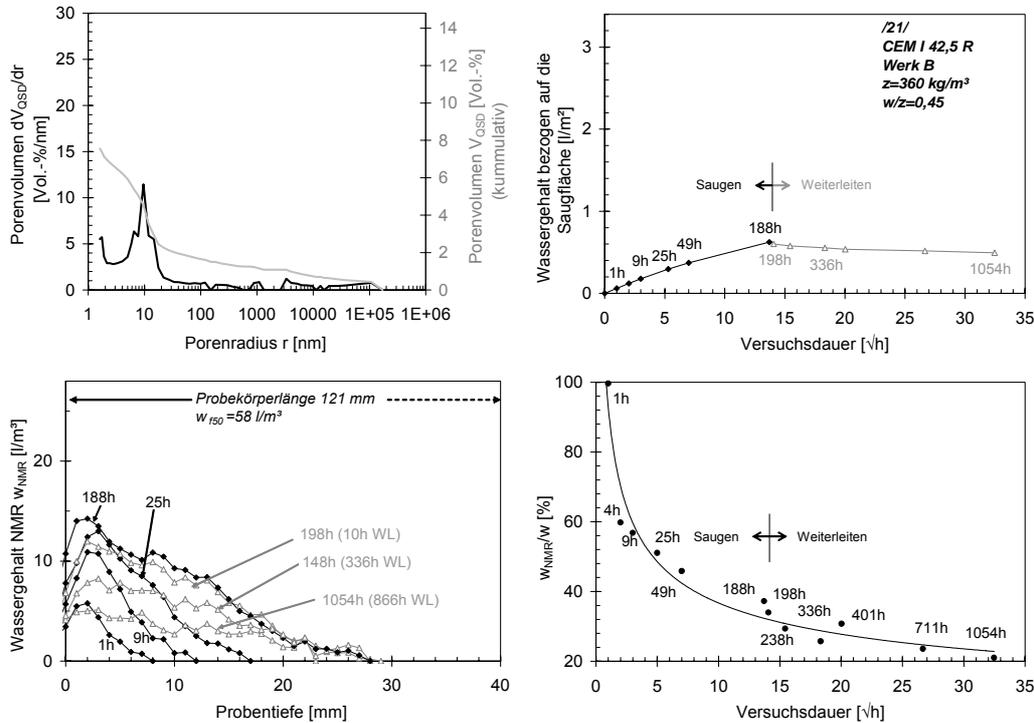


Abbildung A 20: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM I 42,5 R, Werk B, Zementgehalt 360 kg/m^3 , Wasserzementwert $0,45$* (Kurzbezeichnung /21/)

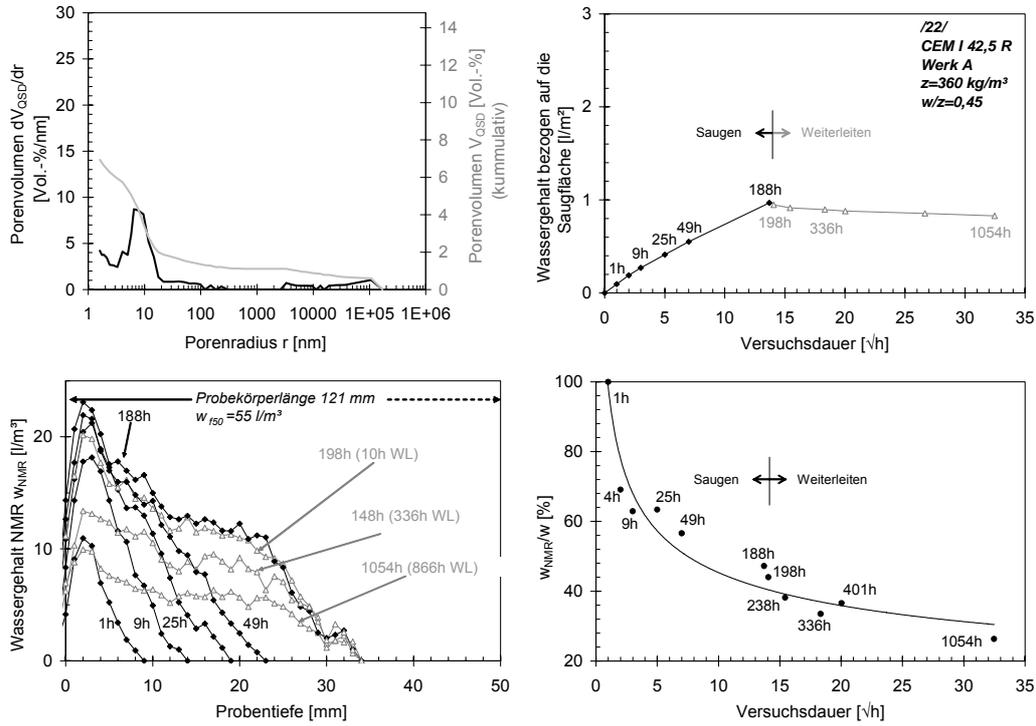


Abbildung A 21: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM I 42,5 R, Werk A, Zementgehalt 360 kg/m³, Wasserzementwert 0,45* (Kurzbezeichnung /22/)

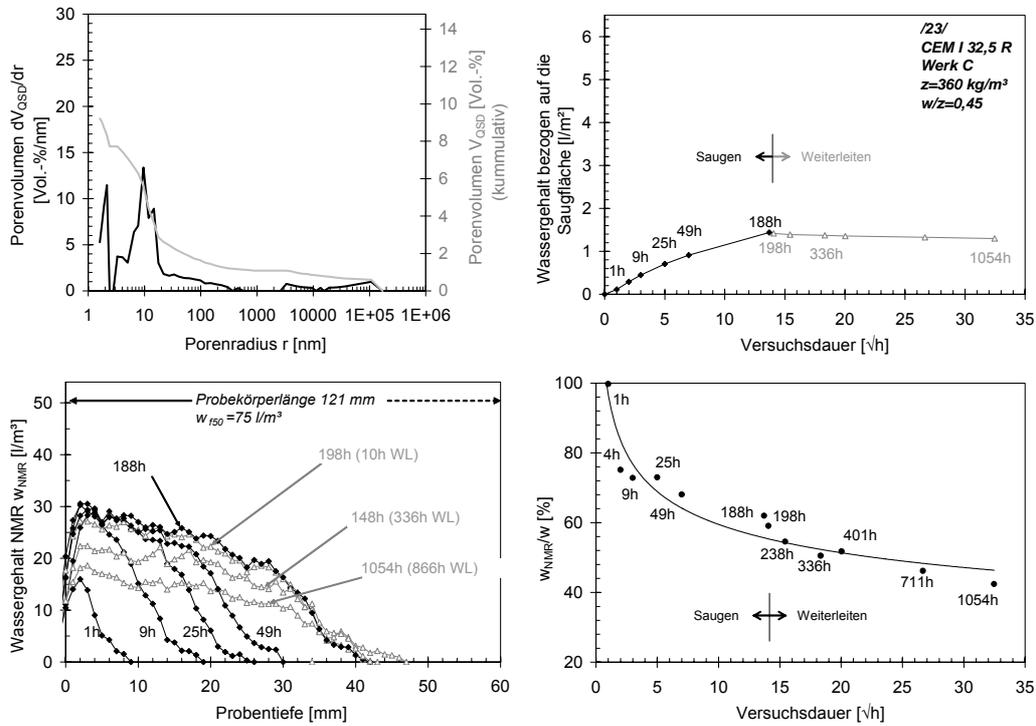


Abbildung A 22: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM I 32,5 R, Werk C, Zementgehalt 360 kg/m³, Wasserzementwert 0,45* (Kurzbezeichnung /23/)

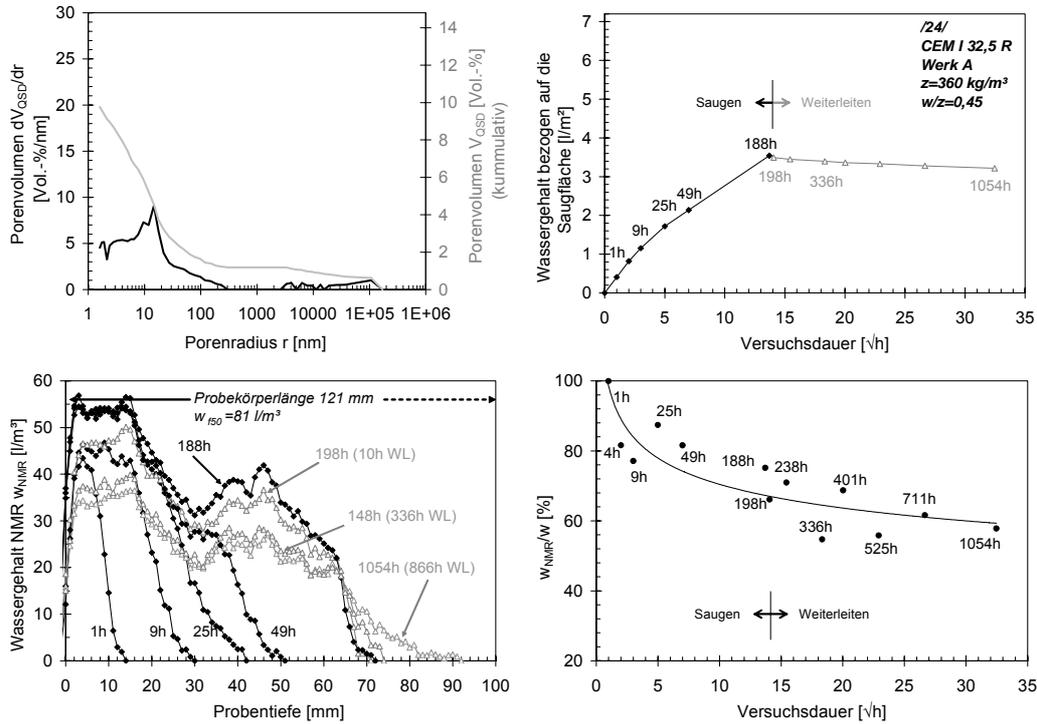


Abbildung A 23: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM I 32,5 R, Werk A, Zementgehalt 360 kg/m³, Wassermenge 81 l/m³, Wassermenge 81 l/m³, w/z=0,45* (Kurzbezeichnung /24/)

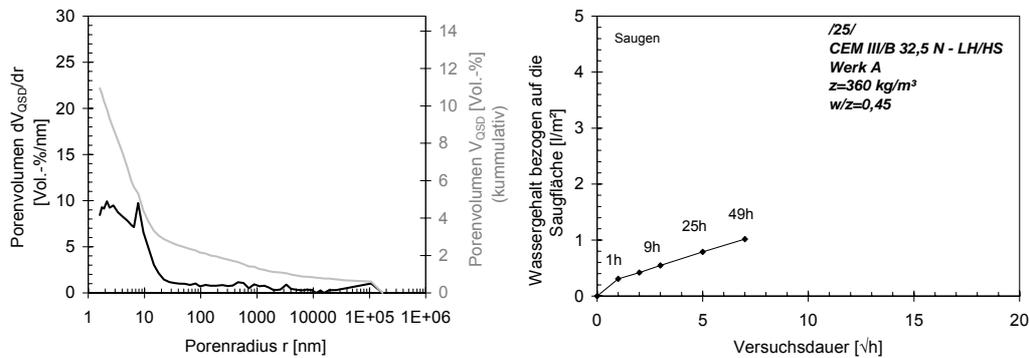


Abbildung A 24: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM III/B 32,5 N - LH/HS, Werk A, Zementgehalt 360 kg/m³, Wassermenge 81 l/m³, w/z=0,45* (Kurzbezeichnung /25/)

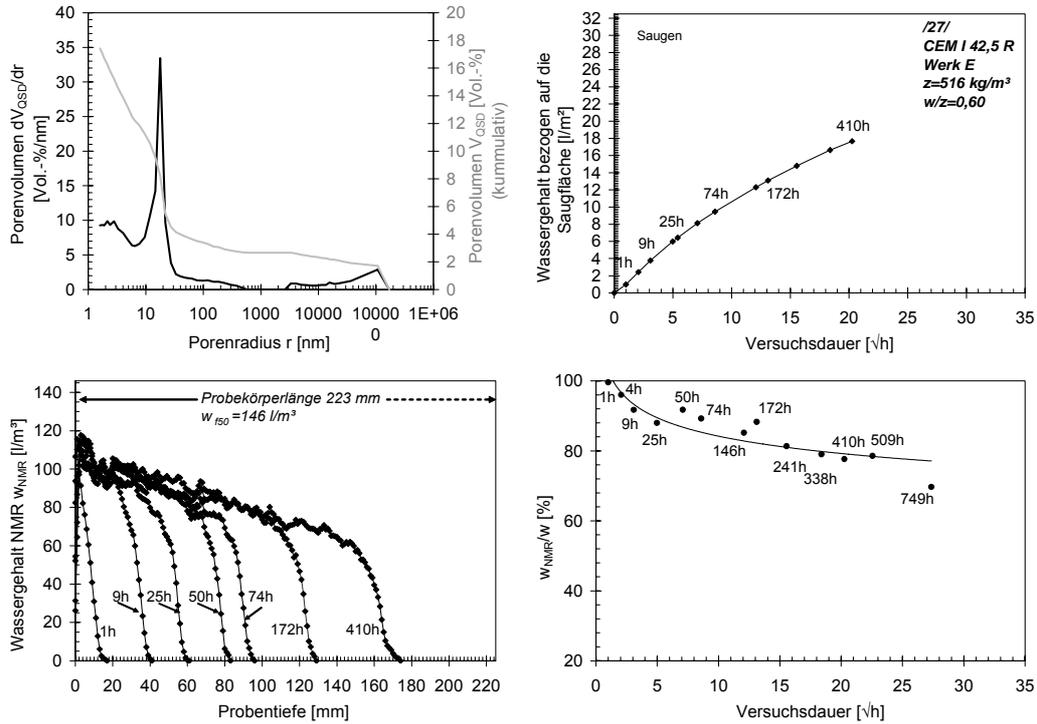


Abbildung A 25: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Mörtels mit der Bezeichnung *CEM I 42,5 R, Werk E, Zementgehalt 516 kg/m³, Wasserzementwert 0,60, Tabelle 1 (B)* (Kurzbezeichnung /27/)

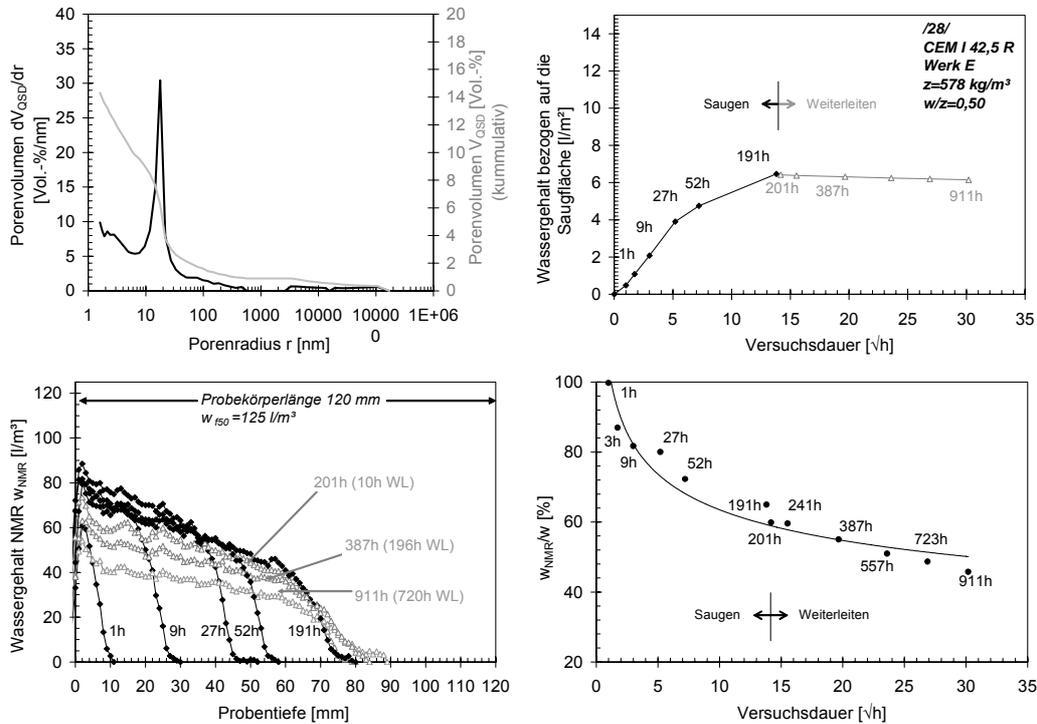


Abbildung A 26: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Mörtels mit der Bezeichnung *CEM I 42,5 R, Werk E, Zementgehalt 578 kg/m³, Wasserzementwert 0,50* (Kurzbezeichnung /28/)

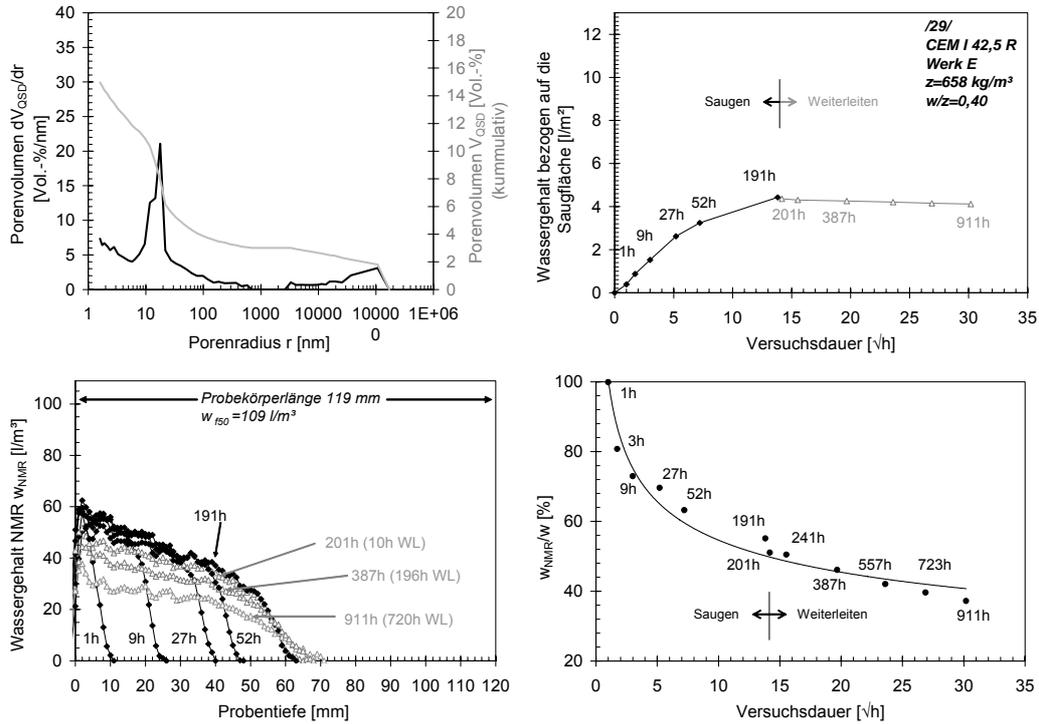


Abbildung A 27: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Mörtels mit der Bezeichnung *CEM I 42,5 R, Werk E, Zementgehalt 658 kg/m^3 , Wasserzementwert 0,40* (Kurzbezeichnung /29/)

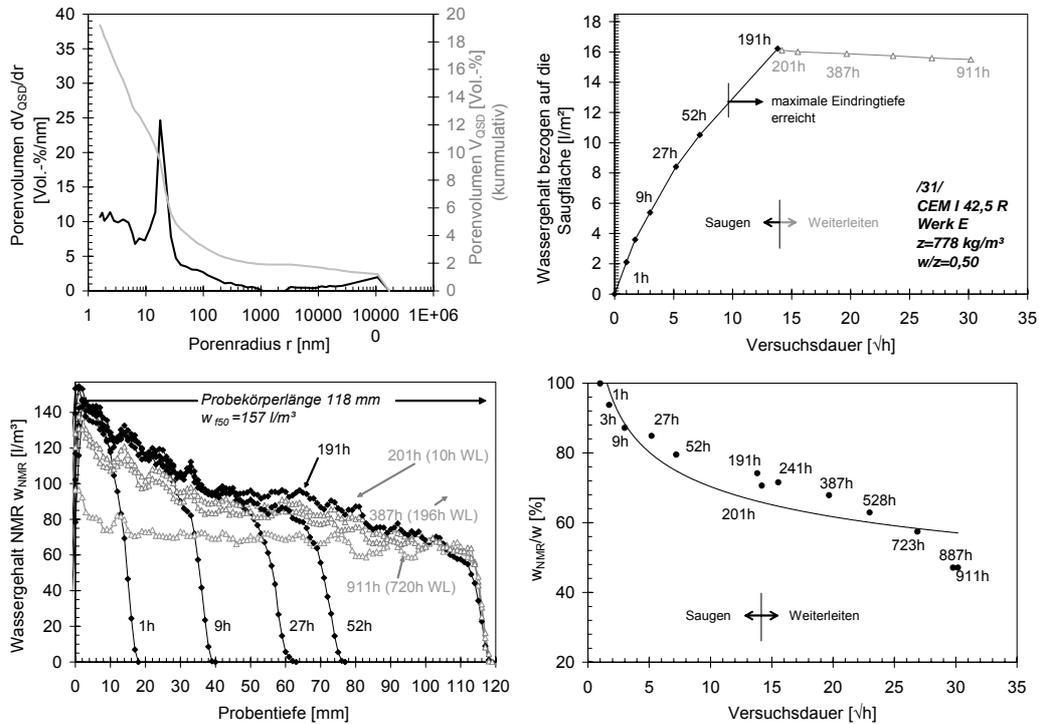


Abbildung A 28: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Mörtels mit der Bezeichnung *CEM I 42,5 R, Werk E, Zementgehalt 778 kg/m^3 , Wasserzementwert 0,50* (Kurzbezeichnung /31/)

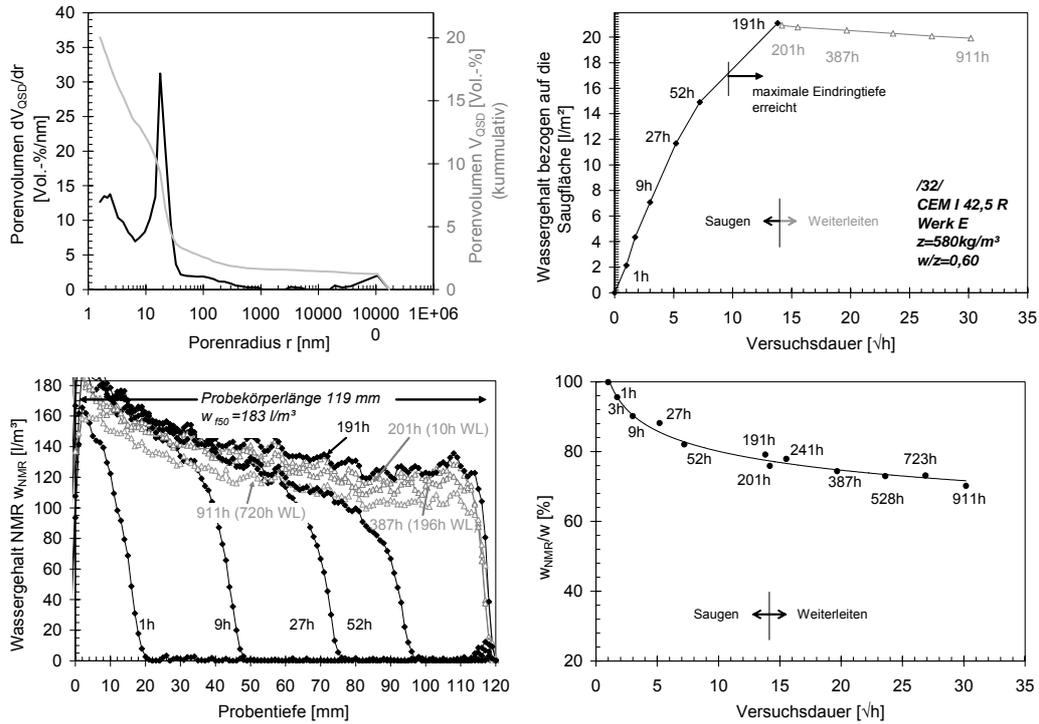


Abbildung A 29: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Mörtels mit der Bezeichnung *CEM I 42,5 R, Werk E, Zementgehalt 580 kg/m³, Wasserzementwert 0,60* (Kurzbezeichnung /32/)

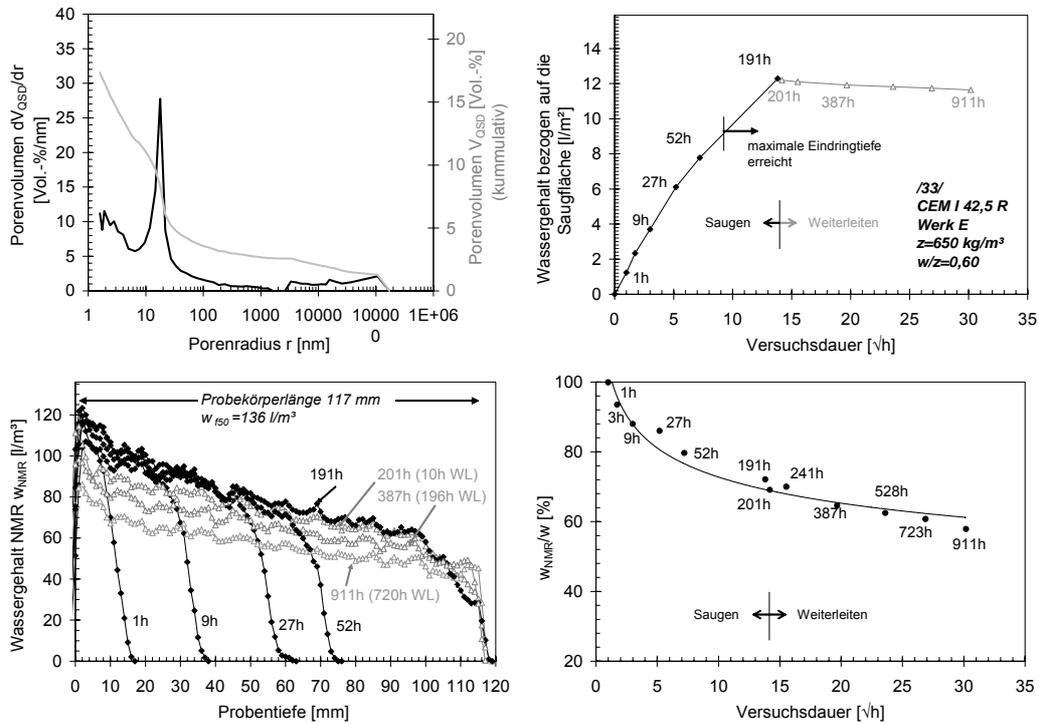


Abbildung A 30: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Mörtels mit der Bezeichnung *CEM I 42,5 R, Werk E, Zementgehalt 650 kg/m³, Wasserzementwert 0,50* (Kurzbezeichnung /33/)

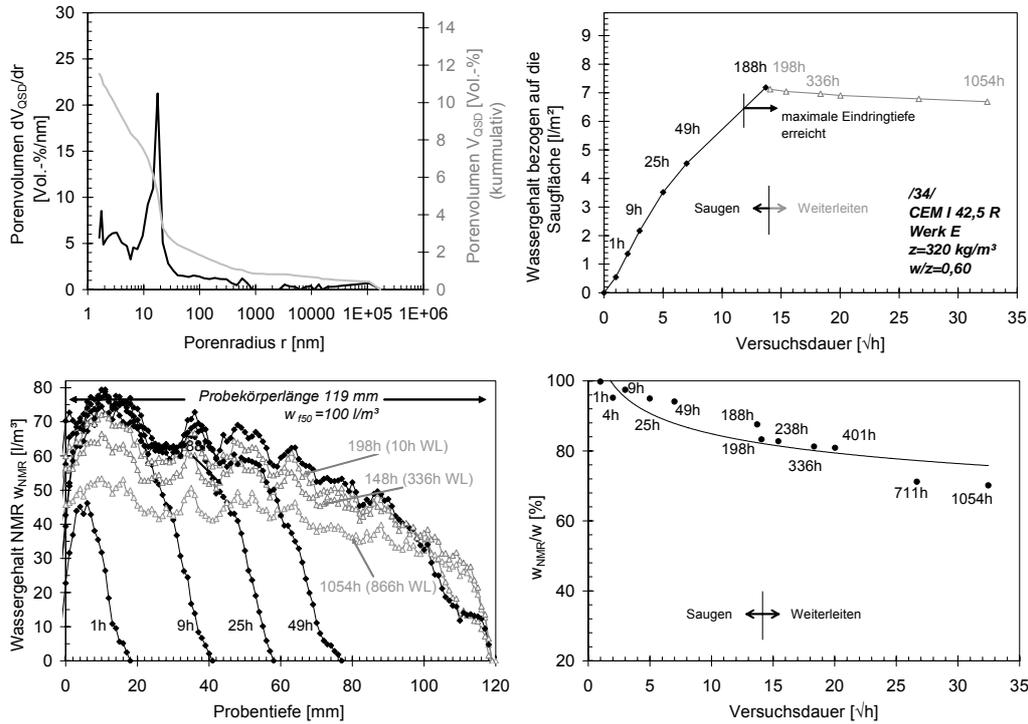


Abbildung A 31: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM I 42,5 R, Werk E, Zementgehalt 320 kg/m³, Wasserzementwert 0,60* (Kurzbezeichnung /34/)

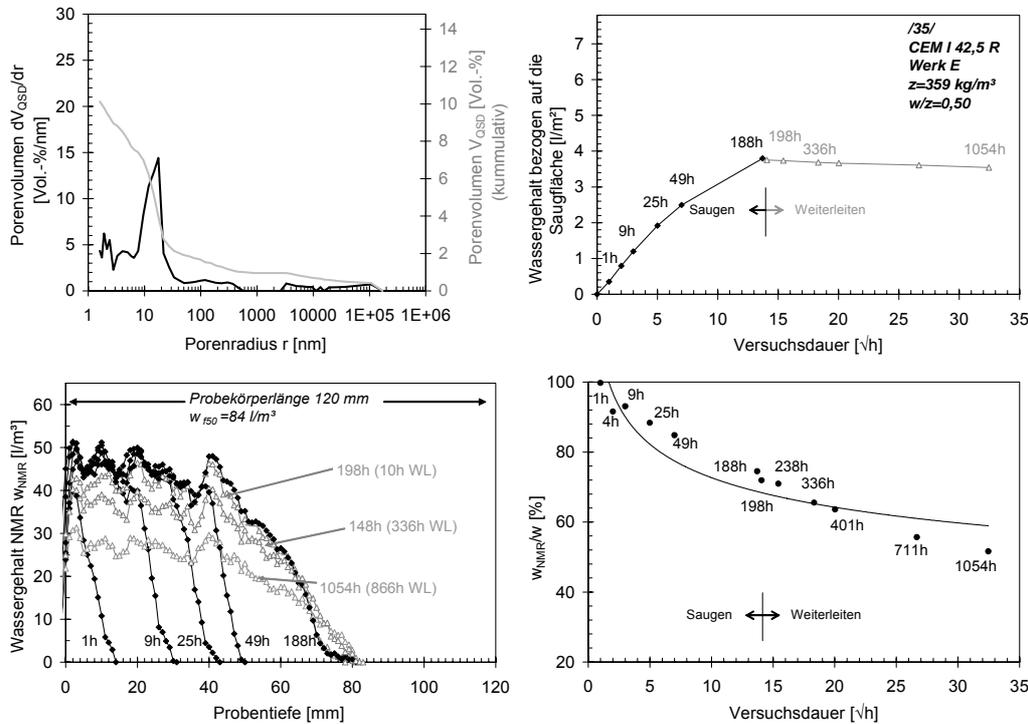


Abbildung A 32: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM I 42,5 R, Werk E, Zementgehalt 359 kg/m³, Wasserzementwert 0,50* (Kurzbezeichnung /35/)

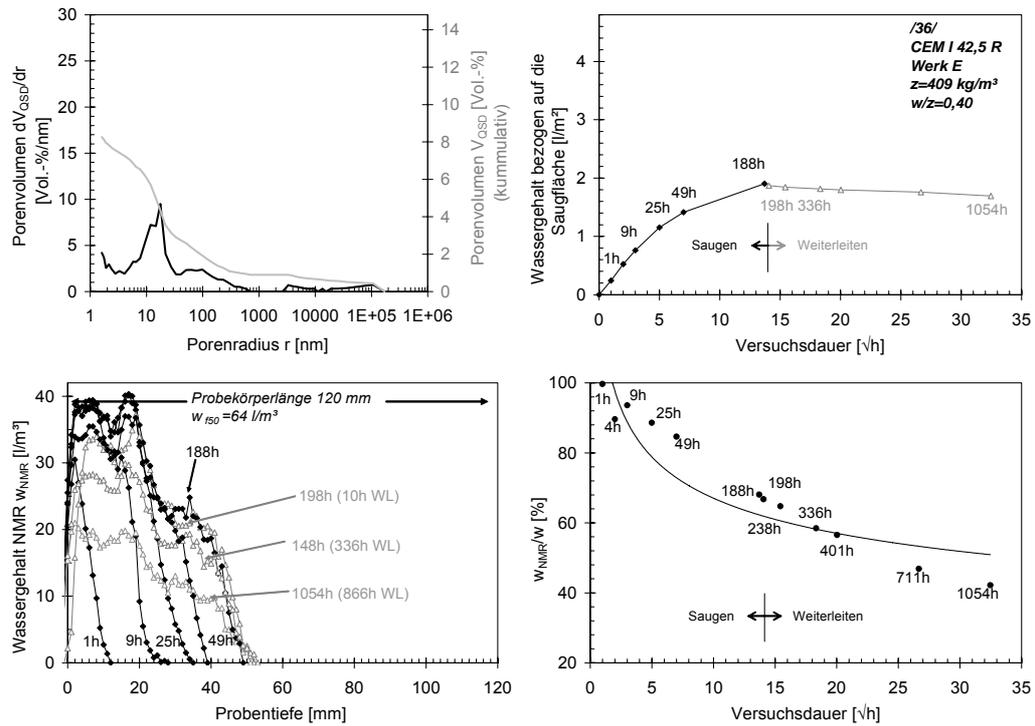


Abbildung A 33: Ergebnisse der Untersuchungen an Probekörpern des Betons mit der Bezeichnung *CEM I 42,5 R, Werk E, Zementgehalt $409 kg/m^3$, Wassierzementwert 0,40* (Kurzbezeichnung /36/)

Baustoffparameter		Ausgangszustand des Baustoffs	
$w(\varphi=22\% \text{ r.F.}) = 54,0 \text{ kg/m}^3$	$\rho_{tr} = 2120 \text{ kg/m}^3$	$\varphi_{ini} = 50,0\% \text{ r.F.}$	
$w(\varphi=50\% \text{ r.F.}) = 76,0 \text{ kg/m}^3$		$T_{ini} = 23,0 \text{ }^\circ\text{C}$	
$w_f = 194,0 \text{ kg/m}^3$		$\delta_a = 1,95 \times 10^{-10} \text{ kg}((\text{msPa})$	
$W_{kap,50} = 95,0 \text{ kg/m}^3$			
Feuchtespeicherfunktion		Wasserdampfdiffusion	
$b = 1,3$		$\mu = 172$	$\beta = 7,0 \times 10^{-9} \text{ kg}(\text{m}^2\text{sPa})$
Kapillartransport			
Saugen:		Weiterleiten:	
$D_{WS,min} = 5,6 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$		$D_{WW,min} = 8,00 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2$	Selbstabdichtung:
$D_{WS,max} = 8,0 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$		$D_{WW,max} = 2,00 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$	$t_u = 1200$
$\psi_{WS,min} = 0,26$		$\psi_{WW,min} = 0,24$	$q = 1,1$
$\psi_{WS,max} = 0,78$		$\psi_{WW,max} = 0,56$	
$\gamma = 1,83 \times 10^{-5} \text{ m/s}$			
Binden von Chlorid		Ionendiffusion	
$s_{g,max} = 5,3 \text{ kg/m}_B^3$		$D_{eff} = 2,37 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	
$k_s = 3$			
$t_k = 2 \text{ d}$			
Wärmetransport			
$\lambda_{tr} = 1,4 \text{ W}/(\text{mK})$		$c_{tr} = 1,4 \text{ J}/(\text{kgK})$	
$b_w = 8$		$\alpha = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	

Abbildung A 34: Eingabeparameter zur Berechnung der in Kapitel 7 beschriebenen Validierungsversuche. Die einzelnen Eingangsgrößen zur Beschreibung des Feuchte- und Chloridtransports können entsprechend dem in Kapitel 3.3 beschriebenen Vorgehen bestimmt werden.

Erläuterung zu Abbildung A 34: Verweis auf die entsprechenden Kapitel, die die Vorgehensweise zur Bestimmung der Kenngrößen beschreiben:

$w(\varphi=22, 50\% \text{ r.F.})$:	Kapitel 3.3.2
w_f :	Kapitel 3.3.2.1
$w_{kap,50}$:	$= w_{f,50} - w_{u,50}$ (w_u : siehe Kapitel 4.7)
b :	Kapitel 2.2.3
μ :	Kapitel 3.3.4 (DIN EN ISO 12572:2001, dry-cup: 23 °C; 0-50 % r.F.)
D_W, ψ_W :	Kapitel 3.3.3.6
γ :	Kapitel 5
t_u, q :	Kapitel 4.7
$s_{g,max}, k_s, t_k$:	Kapitel 3.3.6
D_{eff} :	Kapitel 3.3.5

Tabelle A 1: Frischbetonrohddichte $\rho_{Frischb.}$, Luftporengehalt, Ausbreitmaß, Stoffraumanteil des Zementsteins, Rohddichte ρ_R und Druckfestigkeit β_D (Prüfung nach DIN 1048-5:1991), innere Oberfläche O_i , Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ (in Anlehnung an DIN EN ISO 12572:2001 dry-cup: 23°C; 0-50% r.F. und wet-cup: 23°C; 50-93 % r.F.), Diffusionskoeffizient D_{RCM}

Kurz- bez.	Bezeichnung ¹⁾ (Zementart w/z-Wert Zementwerk Zementgehalt (+SFA))	$\rho_{Frischb.}$ [kg/m ³]	LP- Gehalt [Vol.-%]	Aus- breit- maß [cm]	Stoffraum- anteil des Zementsteins [m ³ Zementstein/ m ³ Beton]	ρ_R [kg/m ³]	β_D [N/ mm ²]	O_i [m ² /g]	O_i [m ² / m ³ Beton]	μ_{drycup} [-]	μ_{wetcup} [-]	D_{RCM} ⁴⁾ [*10 ⁻¹² m ² /s]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
/1/	CEM III/A 32,5 N - LH 0,45 A 360	2454	0,9	43	0,29	2420	59	66	158	6358	735	0,3
/2/	CEM III/B 32,5 N - LH/HS 0,5 A 360	2429	1,5	46	0,31	2410	44	45	105	-	379	-
/3/	CEM II/B-S 42,5 N 0,45 A 360	2478	0,5	42	0,29	2450	64	53	128	1865	747	0,9
/4/	CEM I 32,5 R 0,45 B 300	2502	0,8	40	0,25	-	-	36	88	1881	-	-
/5/	CEM I 32,5 R 0,45 B 330	2502	0,8	46	0,27	-	-	37	92	1383	-	-
/6/	CEM I 32,5 R 0,45 B 360	2507	0,4	48	0,29	-	-	38	93	5961	-	-
/7/	CEM I 32,5 R 0,45 B 390	2456	1,2	47	0,32	-	-	40	94	529	-	-
/8/	CEM I 32,5 R 0,45 B 420	2423	1,9	44	0,34	-	-	41	96	1322	-	-
/9/	CEM I 32,5 R 0,45 B 450	2421	1,3	44	0,36	-	-	42	98	708	-	-
/10/	CEM III/A 32,5 N - LH 0,50 A 360	2425	1,5	45	0,31	2410	45	38	92	-	-	0,5
/11/	CEM II/B-T 32,5 R 0,50 C 360	2425	1,7	44	0,31	2400	55	38	90	1649	-	3,8
/12/	CEM II/B-S 32,5 R 0,50 B 360	2454	0,9	45	0,31	2420	44	30	72	2035	-	2,7
/13/	CEM II/A-LL 42,5 R 0,50 A 360	2453	0,6	43	0,31	2420	64	37	87	645	-	-
/15/	CEM II/B-T 32,5 R 0,45 C 360	2435	2,4	37	0,29	2420	63	38	90	3306	-	2,6
/16/	CEM II/B-S 32,5 R 0,45 B 360	2474	0,7	43	0,29	2430	52	37	87	4176	-	2,6
/17/	CEM II/A-LL 42,5 R 0,45 A 360	2481	0,65	42	0,29	2430	70	35	83	1054	-	9,2
/18/	CEM I 42,5 R +SFA 0,45 A 342+60	2475	1	46	0,31	2430	77	55	131	-	-	0,6
/19/	CEM I 32,5 R +SFA 0,45 A 342+60	2458	1,1	48	0,31	2430	64	45	107	-	-	1,1
/20/	CEM I 52,5 R 0,45 D 360	2477	1,1	43	0,29	2440	72	57	136	3983	-	3,3
/21/	CEM I 42,5 R 0,45 B 360	2468	1,4	43	0,29	2450	72	53	128	5047	-	1,8
/22/	CEM I 42,5 R 0,45 A 360	2494	0,5	37	0,29	2450	70	53	126	1760	-	5,2
/23/	CEM I 32,5 R 0,45 C 360	2455	2	43	0,29	2440	58	38	90	1538	-	2,8
/24/	CEM I 32,5 R 0,45 A 360	2454	0,33	44	0,29	2420	47	38	90	688	-	11,5
/25/	CEM III/B 32,5 N - LH/HS 0,45 A 360	2446	1,5	47	0,29	2440	49	-	-	-	-	-

Fortsetzung Tabelle A 1: Frischbetonrohddichte $\rho_{\text{Frischb.}}$, Luftporengehalt, Ausbreitmaß, Stoffraumanteil des Zementsteins, Rohddichte ρ_R und Druckfestigkeit β_D (Prüfung nach DIN 1048-5:1991), innere Oberfläche O_i , Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ (in Anlehnung an DIN EN ISO 12572:2001 dry-cup: 23°C; 0-50% r.F und wet-cup: 23°C; 50-93 % r.F.), Diffusionskoeffizient D_{RCM}

Kurz- bez.	Bezeichnung ¹⁾ (Zementart w/z-Wert Zementwerk Zementgehalt (+SFA))	$\rho_{\text{Frischb.}}$ [kg/m ³]	LP- Gehalt [Vol.-%]	Aus- breit- maß [cm]	Stoffraum- anteil des Zementsteins [m ³ Zementstein/ m ³ Beton]	ρ_R [kg/m ³]	β_D [N/ mm ²]	O_i [m ² /g]	O_i [m ² / m ² Beton]	μ_{drycup} [-]	μ_{wetcup} [-]	D_{RCM} ⁴⁾ [*10 ⁻¹² m ² /s]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
/27/	CEMI 42,5 R 0,60 E 516	2230	0,9	2 ²⁾	0,50	2210	48	48	104	102	99	21,9
/28/	CEMI 42,5 R 0,50 E 578	2289	1,4	42	0,50	2280	56	53	120	170	131	9,0
/29/	CEMI 42,5 R 0,40 E 658	2301	3	42	0,50	2300	62	66	147	264	220	3,9
/31/	CEMI 42,5 R 0,50 E 778	2127	1,3	2 ²⁾	0,66	2140	62	58	120	119	99	8,7
/32/	CEMI 42,5 R 0,60 E 580	2183	1,5	2 ²⁾	0,56	2170	51	63	128	90	75	21,8
/33/	CEMI 42,5 R 0,50 E 650	2252	1,8	2 ²⁾	0,56	2230	62	54	118	156	133	11,1
/34/	CEMI 42,5 R 0,60 E 320	2410	1,3	47	0,31	2370	41	34	78	186	126	-
/35/	CEMI 42,5 R 0,50 E 359	2429	1,7	36	0,31	2430	51	35	80	297	195	-
/36/	CEMI 42,5 R 0,40 E 409	2450	2,2	30 ³⁾	0,31	2430	52	44	101	693	300	-

1) Die Zusammensetzung ist Abbildung 23 zu entnehmen. /27/ entspricht der Zusammensetzung des Mörtels Tabelle 1 (B).

2) sehr flüssige Konsistenz

3) sehr steife Konsistenz

4) [138] Betonalter bei Prüfung: 1 Jahr (Werte im Prüfaliter von 28, 56, 91 und 182 Tagen für die Betone /1/-/25/ sind [138] zu entnehmen)

Tabelle A 2: Porosität bzw. freie Wassersättigung $w_f (=w_{100})$, Ausgleichswassergehalte w_ϕ (gemessen in Anlehnung an DIN EN ISO 12571:2000), Gleichgewichtsfeuchten $w_{kf}(\phi)$ (berechnet aus QSD), Gleichgewichtsfeuchten $w_{ad}(\phi)$ (berechnet aus O_i), Approximationsfaktor b zur Näherung der Feuchtespeicherfunktion nach Künzel

Kurz- bez.	Bezeichnung ¹⁾ (Zementart w/z-Wert Zementwerk Zementgehalt (+SFA))	Ausgleichswassergehalt w_ϕ ²⁾										$w_{kf}(\phi)$ ³⁾					$w_{ad}(\phi)$ ³⁾					b ⁴⁾
		ϕ : 100	93	75	50	22	3	8	9	95	91	80	72	60	50	30	10	[Vol.-%]				
[-]	[-]	[Vol.-%]										[Vol.-%]					[Vol.-%]					[-]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	95	91	80	72	60	50	30	10						17
/1/	CEM III/A 32,5 N - LH 0,45 A 360	14,4	10,4	7,6	6,1	4,6	2,9	13,0	11,3	9,1	8,4	7,5	6,4	4,9	3,2	1,8						1,8
/2/	CEM III/B 32,5 N - LH/HS 0,5 A 360	14,8	9,2	4,7	4,4	3,0	1,6	12,9	11,1	8,4	7,0	5,5	4,3	3,3	2,1	1,5						1,5
/3/	CEM II/B-S 42,5 N 0,45 A 360	13,5	10,2	6,9	5,2	1,8	1,9	12,3	10,2	7,7	7,0	6,1	5,2	4,0	2,6	1,5						1,5
/4/	CEM I 32,5 R 0,45 B 300	10,8	5,2	4,1	3,4	2,6	1,5	9,7	7,6	5,1	4,5	4,0	3,6	2,8	1,8	1,3						1,3
/5/	CEM I 32,5 R 0,45 B 330	10,5	6,4	3,7	3,4	2,7	1,1	9,1	7,7	5,2	4,8	4,3	3,8	2,9	1,9	1,3						1,3
/6/	CEM I 32,5 R 0,45 B 360	10,8	7,6	4,3	4,1	2,6	2,3	9,6	8,4	5,5	4,9	4,4	3,8	2,9	1,9	1,4						1,4
/7/	CEM I 32,5 R 0,45 B 390	12,2	6,0	3,1	2,7	2,0	0,8	11,2	8,9	6,0	5,2	4,4	3,8	2,9	1,9	1,3						1,3
/8/	CEM I 32,5 R 0,45 B 420	11,3	6,3	4,4	3,7	2,4	1,6	10,1	8,4	5,7	5,1	4,4	3,9	3,0	2,0	1,3						1,3
/9/	CEM I 32,5 R 0,45 B 450	12,3	5,1	5,0	4,1	3,4	2,0	9,8	7,4	5,8	5,2	4,6	4,0	3,1	2,0	1,3						1,3
/10/	CEM III/A 32,5 N - LH 0,50 A 360	12,9	7,1	4,5	3,8	2,3	1,5	11,7	9,5	6,9	5,9	4,7	3,7	2,9	1,9	1,4						1,4
/11/	CEM II/B-T 32,5 R 0,50 C 360	13,2	4,7	5,4	3,7	2,6	1,6	11,3	8,3	6,1	5,2	4,3	3,7	2,8	1,8	1,3						1,3
/12/	CEM II/B-S 32,5 R 0,50 B 360	11,6	8,4	4,2	2,9	2,1	0,5	10,5	7,3	5,2	4,4	3,6	2,9	2,3	1,5	1,3						1,3
/13/	CEM II/A-LL 42,5 R 0,50 A 360	12,5	6,2	2,6	3,5	3,3	1,7	11,9	8,8	6,8	5,9	4,6	3,5	2,7	1,8	1,4						1,4
/15/	CEM II/B-T 32,5 R 0,45 C 360	11,3	7,5	3,8	4,4	2,6	2,3	10,6	9,5	5,8	5,0	4,3	3,7	2,8	1,8	1,4						1,4
/16/	CEM II/B-S 32,5 R 0,45 B 360	9,8	5,8	3,7	3,5	1,8	1,6	9,4	8,4	5,5	4,7	4,1	3,5	2,7	1,8	1,5						1,5
/17/	CEM III/A-LL 42,5 R 0,45 A 360	9,1	5,5	3,0	3,4	1,9	2,2	8,5	7,1	4,9	4,5	4,0	3,4	2,6	1,7	1,4						1,4
/18/	CEM I 42,5 R +SFA 0,45 A 342+60	11,8	8,8	5,5	4,8	4,1	2,5	11,3	10,5	7,2	6,6	5,9	5,3	4,1	2,7	1,7						1,7
/19/	CEM I 32,5 R +SFA 0,45 A 342+60	12,2	7,3	5,6	5,1	2,6	2,6	11,2	10,6	7,0	6,0	5,0	4,4	3,4	2,2	1,5						1,5
/20/	CEM I 52,5 R 0,45 D 360	11,6	8,2	6,1	4,4	2,9	2,0	10,8	9,0	7,2	6,7	6,1	5,5	4,3	2,8	1,7						1,7
/21/	CEM I 42,5 R 0,45 B 360	11,0	7,7	5,7	5,2	3,4	2,1	10,5	9,2	6,8	6,3	5,8	5,2	4,0	2,6	1,7						1,7
/22/	CEM I 42,5 R 0,45 A 360	10,6	9,2	5,4	5,2	3,3	2,1	10,2	9,3	6,7	6,1	5,6	5,1	4,0	2,6	1,8						1,8
/23/	CEM I 32,5 R 0,45 C 360	11,2	5,1	2,8	4,0	2,6	2,6	10,3	8,5	5,8	5,2	4,6	3,7	2,8	1,8	1,4						1,4
/24/	CEM I 32,5 R 0,45 A 360	11,8	-	-	-	-	-	10,2	8,2	6,0	5,1	4,3	3,7	2,8	1,8	1,4						1,4
/25/	CEM III/B 32,5 N - LH/HS 0,45 A 360	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						-

Fortsetzung Tabelle A 2: Porosität bzw. freie Wassersättigung $w_f (=w_{100})$, Ausgleichswassergehalte w_φ (gemessen in Anlehnung an DIN EN ISO 12571:2000), Gleichgewichtsfeuchten $w_{KZ}(\varphi)$ (berechnet aus QSD), Gleichgewichtsfeuchten $w_{ad}(\varphi)$ (berechnet aus O_i), Approximationsfaktor b zur Näherung der Feuchtespeicherfunktion nach Künzel

Kurz- bez.	Bezeichnung ¹⁾ (Zementart w/z-Wert Zementwerk Zementgehalt (+SFA))	Ausgleichswassergehalt w_φ ²⁾							$w_{KZ}(\varphi)$ ³⁾					$w_{ad}(\varphi)$ ³⁾			b ⁴⁾
		φ : 100	93	75	50	22	3	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
[-]	[-]	[Vol.-%]							[Vol.-%]					[Vol.-%]			[-]
/1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
/27/	CEMI 42,5 R 0,60 E 516	18,8	7,8	3,7	4,2	2,8	2,4	16,2	11,1	8,6	7,1	5,4	4,2	3,3	2,1	1,3	
/28/	CEMI 42,5 R 0,50 E 578	17,4	9,9	5,5	4,4	3,5	2,1	15,4	10,7	8,6	7,4	5,9	4,9	3,7	2,4	1,3	
/29/	CEMI 42,5 R 0,40 E 658	16,9	9,9	7,5	6,0	4,6	3,1	14,8	10,6	8,7	7,9	6,8	6,0	4,6	3,0	1,4	
/31/	CEMI 42,5 R 0,50 E 778	20,6	10,5	4,7	4,9	4,0	2,0	16,8	12,8	9,8	8,1	6,2	4,9	3,7	2,4	1,3	
/32/	CEMI 42,5 R 0,60 E 580	23,5	9,0	4,3	5,0	3,7	2,6	18,8	13,7	10,9	9,1	6,8	5,2	4,0	2,6	1,3	
/33/	CEMI 42,5 R 0,50 E 650	18,4	7,7	4,3	4,2	3,4	2,9	16,1	11,6	9,3	7,8	6,1	4,8	3,7	2,4	1,3	
/34/	CEMI 42,5 R 0,60 E 320	13,2	4,0	2,8	3,2	2,1	1,5	11,4	7,7	5,9	5,0	3,9	3,2	2,4	1,6	1,3	
/35/	CEMI 42,5 R 0,50 E 359	11,6	6,0	2,4	3,2	2,2	1,7	10,6	7,1	5,3	4,5	3,8	3,2	2,5	1,6	1,3	
/36/	CEMI 42,5 R 0,40 E 409	10,5	8,5	4,4	4,4	-	1,8	8,8	6,7	5,3	5,0	4,6	4,1	3,2	2,1	1,3	

1) Die Zusammensetzung ist Abbildung 23 zu entnehmen. /27/ entspricht der Zusammensetzung des Mörtels Tabelle 1 (B).

2) Ausgleichswassergehalte Desorption, Bestimmung entsprechend Kapitel 3.3.2.1

3) Bestimmung entsprechend Kapitel 3.3.2.3

4) Bestimmung entsprechend Kapitel 2.2.3

Tabelle A 3: Flüssigkeitstransportkoeffizienten $D_{\mathcal{W}}$ mit den zugehörigen Sättigungsgraden ψ zur Beschreibung der Abhängigkeit von $D_{\mathcal{W}}$ vom Sättigungsgrad des Materials, Kenngrößen zur Beschreibung der Selbstabdichtung: q und t_u

Kurz- bez.	Bezeichnung ¹⁾ (Zementart w/z-Wert Zementwerk Zementgehalt (+SFA))	$D_{\mathcal{W},min}$ [m/s ²]	$D_{\mathcal{W},max}$ [m/s ²]	$\psi_{\mathcal{W},min}$ [-]	$\psi_{\mathcal{W},max}$ [-]	q [-]	t_u [-]
[-]	[-]	3	4	5	6	7	8
/1/	CEM III/A 32,5 N - LH 0,45 A 360	6,0E-11	4,0E-10	0,16	0,18	1,1	800
/2/	CEM III/B 32,5 N - LH/HS 0,5 A 360	3,0E-10	3,0E-09	0,29	0,40	1,1	900
/3/	CEM II/B-S 42,5 N 0,45 A 360	2,0E-11	2,7E-10	0,08	0,27	1,1	800
/4/	CEM I 32,5 R 0,45 B 300	1,0E-10	9,6E-10	0,19	0,35	1,1	1200
/5/	CEM I 32,5 R 0,45 B 330	1,3E-10	2,9E-10	0,19	0,42	1,1	1000
/6/	CEM I 32,5 R 0,45 B 360	1,0E-10	9,90E-10	0,18	0,22	1,1	1200
/7/	CEM I 32,5 R 0,45 B 390	1,0E-10	5,0E-09	0,15	0,50	1,1	1000
/8/	CEM I 32,5 R 0,45 B 420	8,0E-11	7,0E-09	0,20	0,54	1,1	1000
/9/	CEM I 32,5 R 0,45 B 450	1,8E-10	7,8E-09	0,23	0,52	1,1	800
/10/	CEM III/A 32,5 N - LH 0,50 A 360	4,0E-10	2,2E-09	0,32	0,47	1,1	600
/11/	CEM II/B-T 32,5 R 0,50 C 360	2,4E-10	2,2E-09	0,32	0,47	1,1	1000
/12/	CEM II/B-S 32,5 R 0,50 B 360	8,0E-11	3,0E-09	0,18	0,30	1,1	1050
/13/	CEM II/A-LL 42,5 R 0,50 A 360	3,2E-10	4,6E-09	0,18	0,44	1,1	400
/15/	CEM II/B-T 32,5 R 0,45 C 360	-	-	-	-	-	-
/16/	CEM II/B-S 32,5 R 0,45 B 360	-	-	-	-	-	-
/17/	CEM II/A-LL 42,5 R 0,45 A 360	-	-	-	-	-	-
/18/	CEM I 42,5 R +SFA 0,45 A 342+60	8,0E-11	7,0E-10	0,18	0,40	1,1	1200
/19/	CEM I 32,5 R +SFA 0,45 A 342+60	8,0E-11	7,0E-10	0,18	0,53	1,1	800
/20/	CEM I 52,5 R 0,45 D 360	-	-	-	-	-	-
/21/	CEM I 42,5 R 0,45 B 360	2,8E-11	9,0E-10	0,12	0,19	1,1	1200
/22/	CEM I 42,5 R 0,45 A 360	1,3E-10	9,0E-10	0,18	0,28	1,1	1200
/23/	CEM I 32,5 R 0,45 C 360	1,0E-10	1,8E-09	0,18	0,28	1,1	1000
/24/	CEM I 32,5 R 0,45 A 360	5,0E-10	2,8E-08	0,36	0,67	1,1	1000
/25/	CEM III/B 32,5 N - LH/HS 0,45 A 360	-	-	-	-	-	-

Fortsetzung Tabelle A 3: Flüssigtransportkoeffizienten D_{FS} mit den zugehörigen Sättigungsgraden ψ zur Beschreibung der Abhängigkeit von D_{FS} vom Sättigungsgrad des Materials, Kenngrößen zur Beschreibung der Selbstabdichtung: q und t_u

Kurz- bez.	Bezeichnung ¹⁾ (Zementart w/z-Wert Zementwerk Zementgehalt (+SFA))	$D_{FS,min}$ [m/s ²]	$D_{FS,max}$ [m/s ²]	$\psi_{FS,min}$ [-]	$\psi_{FS,max}$ [-]	q [-]	t_u [-]
[-]	[-]	3	4	5	6	7	8
/27/	CEM I 42,5 R 0,60 E 516	1,5E-10	6,4E-08	0,23	0,75	1,1	2600
/28/	CEM I 42,5 R 0,50 E 578	1,0E-10	7,0E-08	0,30	0,71	1,1	800
/29/	CEM I 42,5 R 0,40 E 658	2,0E-10	1,0E-08	0,26	0,38	1,1	1000
/31/	CEM I 42,5 R 0,50 E 778	1,5E-10	7,0E-08	0,31	0,72	1,1	2100
/32/	CEM I 42,5 R 0,60 E 580	8,0E-10	1,0E-07	0,30	0,75	1,1	2100
/33/	CEM I 42,5 R 0,50 E 650	3,9E-10	1,3E-07	0,34	0,78	1,1	1800
/34/	CEM I 42,5 R 0,60 E 320	3,6E-10	4,6E-08	0,21	0,69	1,1	900
/35/	CEM I 42,5 R 0,50 E 359	1,5E-10	1,0E-08	0,18	0,50	1,1	750
/36/	CEM I 42,5 R 0,40 E 409	6,0E-11	3,2E-08	0,26	0,60	1,1	800

1) Die Zusammensetzung ist Abbildung 23 zu entnehmen. /27/ entspricht der Zusammensetzung des Mörtels Tabelle 1 (B).

Fortsetzung Tabelle A.4: Trockenrohddichte ρ_r und Rohdichte nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte im Klima 23°C/50 % r.F. $\rho_{23/50}$, Übergangskoeffizient für das kapillare Saugen γ , kapillaraktives Wasser w_{kap} , maximal umstrukturierbares Wasser $w_{u,max}$, W-Wert w_{1h} , w_{4h} , w_{9h} , w_{24h} , w_{49h} , w_{188h} gemessen in Anlehnung an DIN EN ISO 15148:2003 nach 1, 4, 9, 24, 49 bzw. 188 Stunden Saugzeit

Kurz-bez.	Bezeichnung ¹⁾ (Zementart w/z-Wert Zementwerk Zementgehalt (+SFA))	ρ_r [kg/m ³]	$\rho_{23/50}$ [kg/m ³]	γ [m/s]	w_{kap} [Vol.-%]	$w_{u,max}$ [Vol.-%]	w_{1h}	w_{4h}	w_{9h}	w_{24h}	w_{49h}	w_{188h}
[-]	[-]	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		[kg/m ³]	[kg/m ³]	[m/s]	[Vol.-%]	[Vol.-%]				[kg/(m ² ·√h)]		
/27/	CEMI 42,5 R 0,60 E 516	2166	2179	2,12E-05	12,2	6,7	0,98	1,21	1,26	1,22	1,16	1,00 ⁶⁾
/28/	CEMI 42,5 R 0,50 E 578	2242	2260	1,56E-05	9,7	7,7	0,48	0,62 ²⁾	0,69	0,75 ³⁾	0,66 ³⁾	0,47 ⁷⁾
/29/	CEMI 42,5 R 0,40 E 658	2213	2240	1,31E-05	7,5	9,4	0,39	0,50 ²⁾	0,51	0,50 ³⁾	0,45 ³⁾	0,32 ⁷⁾
/31/	CEMI 42,5 R 0,50 E 778	2075	2083	2,85E-05	12,9	7,7	2,11	2,08 ²⁾	1,80	1,62 ³⁾	1,46 ³⁾	1,17 ⁷⁾
/32/	CEMI 42,5 R 0,60 E 580	2031	2049	2,93E-05	15,3	8,2	2,14	2,51 ²⁾	2,36	2,25 ³⁾	2,07 ³⁾	1,53 ⁷⁾
/33/	CEMI 42,5 R 0,50 E 650	2185	2204	2,30E-05	10,9	7,5	1,24	1,35 ²⁾	1,23	1,18 ³⁾	1,08 ³⁾	0,89 ⁷⁾
/34/	CEMI 42,5 R 0,60 E 320	2284	2307	1,04E-05	8,2	5,0	0,54	0,68	0,72	0,70 ³⁾	0,65	0,52
/35/	CEMI 42,5 R 0,50 E 359	2306	2335	1,03E-05	6,5	5,1	0,35	0,40	0,40	0,38 ³⁾	0,36	0,89
/36/	CEMI 42,5 R 0,40 E 409	2331	2376	1,29E-05	4,0	6,5	0,24	0,26	0,25	0,23 ³⁾	0,20	0,14

1) Die Zusammensetzung ist Abbildung 23 zu entnehmen. /27/ entspricht der Zusammensetzung des Mörtels Tabelle 1 (B).

- 2) nach 3 h Saugzeit
- 3) nach 27 h Saugzeit
- 4) nach 25 h Saugzeit
- 5) nach 52 h Saugzeit
- 6) nach 172 h Saugzeit
- 7) nach 191 h Saugzeit

Tabelle A 5: Aufnahme von 3,3 M.-% NaCl-Lösung: L-Wert L_{1h} , L_{4h} , L_{9h} , L_{25h} , L_{49h} , L_{188h} gemessen in Anlehnung an DIN EN ISO 15148:2003 nach 1, 4, 9, 25 bzw. 188 Stunden Saugzeit

Kurz- bez.	Bezeichnung ¹⁾ (Zementart w/z-Wert Zementwerk Zementgehalt (+SFA))	$[V \text{ (m}^2 \cdot \text{h)}]^{0,5}$							
		3	4	5	6	7	8		
/1/	CEM III/A 32,5 N - LH 0,45 A 360	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
/2/	CEM III/B 32,5 N - LH/HS 0,5 A 360	0,30	0,24	0,21	0,18	0,17	0,17	0,15	0,15
/3/	CEM II/B-S 42,5 N 0,45 A 360	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,04	0,04
/10/	CEM III/A 32,5 N - LH 0,50 A 360	0,31	0,25	0,23	0,19	0,16	0,16	0,12	0,12
/11/	CEM II/B-T 32,5 R 0,50 C 360	0,35	0,31	0,28	0,23	0,19	0,19	0,15	0,15
/12/	CEM II/B-S 32,5 R 0,50 B 360	0,24	0,24	0,23	0,20	0,17	0,17	0,14	0,14
/13/	CEM II/A-LL 42,5 R 0,50 A 360	0,33	0,31	0,29	0,26	0,23	0,23	0,18	0,18
/15/	CEM II/B-T 32,5 R 0,45 C 360	0,19	0,16	0,15	0,13	0,11	0,11	0,09	0,09
/16/	CEM II/B-S 32,5 R 0,45 B 360	0,12	0,12	-	0,11	0,11	0,11	0,09	0,09
/17/	CEM II/A-LL 42,5 R 0,45 A 360	0,12	0,12	0,12	0,10	0,09	0,09	0,06	0,06
/18/	CEM I 42,5 R +SFA 0,45 A 342+60	0,11	0,10	0,09	0,07	0,06	0,06	0,04	0,04
/19/	CEM I 32,5 R +SFA 0,45 A 342+60	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,07	0,05	0,05
/20/	CEM I 52,5 R 0,45 D 360	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,07	0,05	0,05
/21/	CEM I 42,5 R 0,45 B 360	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
/22/	CEM I 42,5 R 0,45 A 360	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07
/23/	CEM I 32,5 R 0,45 C 360	0,11	0,11	0,11	0,10	0,09	0,09	0,06	0,06
/24/	CEM I 32,5 R 0,45 A 360	0,35	0,37	0,33	0,26	0,21	0,21	0,13	0,13
/25/	CEM III/B 32,5 N - LH/HS 0,45 A 360	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13	0,13	-	-
/34/	CEM I 42,5 R 0,60 E 320	0,68	0,69	0,67	0,54	0,43	0,43	0,28	0,28
/35/	CEM I 42,5 R 0,50 E 359	0,43	0,41	0,40	0,34	0,29	0,29	0,20	0,20
/36/	CEM I 42,5 R 0,40 E 409	0,27	0,26	0,25	0,22	0,19	0,19	0,12	0,12

1) Die Zusammensetzung ist Abbildung 23 zu entnehmen. /27/ entspricht der Zusammensetzung des Mörtels Tabelle 1 (B).

2) Der L-Wert gibt in Analogie zum w-Wert das Volumen an aufgenommener Flüssigkeit über die Saugfläche in Abhängigkeit der Wurzel der Saugzeit an.

Tabelle A 6: Eigenschaften der verwendeten Zemente: Blaine-Wert nach DIN EN-196-6:1990, Wasseranspruch für Normsteifigkeit und Erstarrungsbeginn nach DIN EN 196-3:2005, Druckfestigkeit R_c nach DIN EN 196-1:2005, Gehalt an Zuhaltstoffen (Kalkstein, Hüttsand und Ölschiefer), Gehalt an Klinkerphasen

Zementart	Werk	Blaine [cm ² /g]	Wasser- anspruch für Norm- steifig- keit	Erstar- rungs- beginn [min]	Druck- festig- keit R_c [N/mm ²]	Kalk- stein [%]	Hütten- sand [%]	Öl- schiefer [%]	C ₃ S [%]	C ₂ S [%]	C ₃ A [%]	C ₄ AF [%]
[-]	[-]	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
CEM I 32,5 R	C	3300	24,5	130	48,0	-	-	-	-	-	-	-
	A	2869	24,9	185	49,5	-	-	-	65	12	10	10
	B	3250	27,8	190	49,4	-	-	-	50,3	22,6	11,1	8,1
CEM I 42,5 R	B	4030	28,6	150	60,8	-	-	-	53,6	20	11	8
	A	4072	26,4	175	57,6	-	-	-	65	12	10	10
	E	3932	28,5	125	60,1	-	-	-	-	-	-	-
CEM I 52,5 R	D	4990	29,5	120	70,1	-	-	-	60,2	19,6	8,7	4,3
CEM II/B-T 32,5 R	C	4400	28,0	230	49,0	-	-	23	-	-	-	-
CEM II/B-S 32,5 R	B	2780	25,4	250	47,2	-	31,0	-	-	80,1	15,8	11
CEM II/A-LL 42,5 R	A	5363	30,5	185	58,3	15,3	-	-	65	12	10	10
CEM II/B-S 42,5 N	A	3898	29,4	190	53,2	-	31,3	-	65	12	10	10
CEM III/A 32,5 N - LH	A	3830	30,0	195	47,1	-	51,3	-	65	12	10	10
CEM III/B 32,5 N - LH/HS	A	4849	32,7	215	46,8	-	71,6	-	65	12	10	10

Tabelle A 7: Eigenschaften der verwendeten Zemente: Glühverlust L , Anteile der Klinkerminerale, Alkaligehalt, Chloridgehalt, bestimmt nach DIN EN 196-2:2005

Zementart	Werk	Glüh- verlust L	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl
[-]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	C	1,2	19,2	6,2	3	63,9	1,8	2,9	1,2	0,1	0,01
CEM I 32,5 R	A	2,61	20,28	5,52	3,05	65,73	1,21	2,98	0,57	-	-
	B	-	21,1	5,88	2,67	64,34	1,23	2,73	0,86	0,11	0,01
	B	-	21,07	5,82	2,62	65,14	1,19	2,94	0,86	0,12	0,01
CEM I 42,5 R	A	1,66	20,3	5,54	3,07	65,83	1,15	2,96	0,55	-	-
	E	2,8	20,2	6,25	2,46	60,3	1,7	3,89	1,03	0,08	-
CEM I 52,5 R	D	-	22,68	4,16	1,4	66,64	0,83	3,07	0,74	0,26	-
CEM II/B-T 32,5 R	C	2,7	22,6	7,3	3,8	55,8	1,8	4,2	1,4	0,2	0,01
CEM II/B-S 32,5 R	B	-	25,11	7,37	2,21	59,03	3,45	2,97	0,76	0,21	0,03
CEM II/A-LL 42,5 R	A	7,09	18,87	5,1	2,85	67,99	1,11	3	0,55	-	-
CEM II/B-S 42,5 N	A	1,35	25,4	6,61	2,18	56,42	3,52	3,1	0,72	-	-
CEM III/A 32,5 N - LH	A	1,13	28,57	7,27	1,63	50,4	5,03	3,11	0,8	-	-
CEM III/B 32,5 N - LH/HS	A	1,29	30,73	8,51	1,08	45,63	6,28	3,38	0,73	-	-