

Osmotische Prozesse im System zementärer Werkstoff - Reaktionsharzbeschichtung

Langfassung der Beschreibung der Arbeiten der TUHH

Heizmann, H., Opeldus, S., Sadeq, A., Schmidt-Döhl, F.,
Schulenberg, D., Tralow, F.

2026

Inhaltsverzeichnis

1	ALLGEMEINE ANGABEN	3
1.1	DFG-GESCHÄFTSZEICHEN	3
1.2	ANTRAGSTELLER	3
1.3	INSTITUT / LEHRSTUHL	3
1.4	THEMA	3
1.5	BERICHTSZEITRAUM, FÖRDERUNGSZEITRAUM INSGESAMT	3
1.6	LISTE DER PUBLIKATIONEN AUS DIESEM PROJEKT	3
2	ARBEITS- UND ERGEBNISBERICHT.....	4
2.1	DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN, ERGEBNISSE UND DISKUSSION	4
2.1.1	<i>Ziele des Projekts</i>	<i>4</i>
2.1.2	<i>Herstellung der zementären Werkstoffproben.....</i>	<i>4</i>
2.1.3	<i>Reaktionsharze und Herstellung der Verbundkörper</i>	<i>5</i>
2.1.4	<i>Charakterisierung von Komponenten und Proben, inklusive Bestimmung.....</i> <i>von Eingangsdaten für die rechnerische Simulation.....</i>	<i>5</i>
2.1.5	<i>Untersuchung der Mörtel bei Feuchtebelastung (Osmometerversuche)</i>	<i>20</i>
2.1.6	<i>Versuche mit Verbundkörpern.....</i>	<i>38</i>
2.1.7	<i>Simulationsberechnungen</i>	<i>38</i>
2.1.7.1	Grundlagen	38
2.1.7.2	Ausgeführte Vorgehensweise.....	38
2.1.7.3	Simulation der Osmometerversuche	39
2.1.7.4	Simulation der Verbundkörperversuche mit Fußbadlagerung und wassergesättigten Probekörpern	45
2.1.7.5	Simulation der Verbundkörperversuche mit Fußbadlagerung und trocken vorgelagerten Probekörpern	45
2.1.7.6	Simulation der Verbundkörperversuche mit trocken vorgelagerten Probekörpern	45
	und Kondensationsfeuchte	45
2.1.8	<i>Diskussion</i>	<i>45</i>
2.1.9	<i>Erarbeitung von Hinweisen und Erstellung eines Leitfadens.....</i>	<i>46</i>
2.1.10	<i>Literatur.....</i>	<i>47</i>
2.2	WIRTSCHAFTLICHE VERWERTBARKEIT	47
3	ZUSAMMENFASSUNG	47

1 Allgemeine Angaben

1.1 DFG-Geschäftszeichen

SCHM 1473/32-1 und OS 528/26-1

1.2 Antragsteller

Frank Schmidt-Döhl, Prof. Dr.-Ing.
Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie
Technische Universität Hamburg, B-3
Dienstadresse: Eißendorfer Straße 42, 21071 Hamburg
Tel: 040 30601 3021
schmidt-doehl@tuhh.de

Andrea Osburg, Prof. Dr.-Ing.
F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Lehrstuhl Bauchemie und Polymere
Bauhaus Universität Weimar
Dienstadresse: Coudraystr. 11A, 99423 Weimar
Tel: 03643 / 58 47 13
Andrea.osburg@uni-weimar.de

1.3 Institut / Lehrstuhl

Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie (B-3), Technische Universität Hamburg
F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Lehrstuhl Bauchemie und Polymere, Bauhaus Universität Weimar

1.4 Thema

Osmotische Prozesse im System zementärer Werkstoff - Reaktionsharzbeschichtung

1.5 Berichtszeitraum, Förderungszeitraum insgesamt

Berichtszeitraum: 01.01.2022 bis 31.03.2026
Förderungszeitraum: 01.01.2022 bis 31.03.2026 inklusive kostenneutraler Verlängerung

1.6 Liste der Publikationen aus diesem Projekt

Zum Zeitpunkt der Berichterstellung:

Kategorie A – Fachaufsätze in Peer Review-Zeitschriften, Beiträge zu Konferenzen mit Peer Review oder Sammelbänden sowie Buchpublikationen

- Vogt, F.; Osburg, A.: Blistering of Reactive Resin Coatings on Concrete – New Insights, In: Construction Materials, 2026, 6, 30, <https://doi.org/10.3390/constrmater6030030>
- Schulenberg, D: Osmotische Prozesse in mineralischen Baustoffen. Dissertation, TU Hamburg, 2024, <https://doi.org/10.15480/882.9144>

Kategorie B – Jede weitere Form öffentlich gemachter Ergebnisse

- Vogt, F.; Osburg, A.: Osmotische Prozesse im System zementärer Werkstoff-Reaktionsharzbeschichtung, Vortrag, 21. Internationale Baustofftagung (ibausil) 13.-15.09.2023, Weimar (Deutschland), <https://doi.org/10.1002/cepa.2848>
- Vogt, F.; Osburg, A.: Osmotic processes in the cementitious material-reactive resin coating system, Vortrag, ICCCM 2025, 08.-10.09.2025, Garching (Deutschland)

2 Arbeits- und Ergebnisbericht

2.1 Durchgeführte Arbeiten, Ergebnisse und Diskussion

2.1.1 Ziele des Projekts

Im Rahmen des Projektes wurden grundlegende Untersuchungen zu den osmotischen Prozessen im System zementärer Werkstoff - Reaktionsharzbeschichtung durchgeführt. Ausgangspunkt für das Forschungsprojekt war der Schadensprozess der Blasenbildung in Beschichtungssystemen auf Beton, der häufig auf osmotische Prozesse zurückgeführt wird. Hypothese war, dass die Wirkung des zementären Werkstoffs als semipermeable Membran im Verbund mit der darüber liegenden Reaktionsharzbeschichtung unter bestimmten Randbedingungen der Zusammensetzung und des Feuchte- und Stofftransports zu Schäden führt.

2.1.2 Herstellung der zementären Werkstoffproben

Es wurden insgesamt 7 verschiedene Mörtel hergestellt und eingesetzt, die in der folgenden Tabelle beschrieben sind. Mörtel dienten in dem Projekt als homogenere Ersatzmaterialien für die in der Praxis eingesetzten Betone. Alle Mörtel hatten ein gleiches Volumenverhältnis Bindemittel/Sand, um diesen Parameter konstant zu halten. Abweichend vom Antrag musste nach Vorversuchen der ursprünglich geplante Wasserzementwert von 0,6 auf 0,55 gesenkt und der ursprünglich geplante Wasserzementwert von 0,35 auf 0,4 angehoben werden, um dies ohne Zusatzmittel erreichen zu können. Der Einsatz von Zusatzmitteln wäre eine zusätzliche Einflussgröße gewesen, was vermieden werden sollte. Mörtel 5 entspricht Mörtel 2 plus einer nachträgliche Behandlung mit NaCl. Mörtel 5 und 6 wurden auf Anraten der Gutachter mit hinzugenommen, wobei die Flugasche in Mörtel 6 nicht über den Zement, sondern als Zusatzstoff eingebracht wurde. Das Blähglas Liaver in Mörtel 3 diente als alkalireaktives Material, das aber aufgrund seiner Porosität keinen Treibschaden hervorruft. Mörtel 1 und 2 unterscheiden sich nur in der Zementart, wobei hier vor allem ein deutlich unterschiedlicher Alkaligehalt vorliegt. Da sich der Mörtel 3 mit Blähglas in den Experimenten nicht bewährt hat, wurde ein weiterer Mörtel 7 in das Untersuchungsprogramm aufgenommen, bei dem die Gesteinskörnung durch bei 1,6 mm abgesiebten Normsand plus Glaskugeln mit 2 mm Durchmesser ersetzt wurde.

Diese Materialien konnten mit jeweils angepasster Einbringung und Verdichtung gut hergestellt werden. Hergestellt wurden Normmörtelprismen für die Messung mechanischer Größen, der Festmörtelroh-dichte, der kapillaren Wasseraufnahme und der Feuchtespeicherfunktion, Scheiben mit 100 mm Durchmesser und 10 mm Dicke für Osmometerversuche, die Messung der Wasseraufnahme, für die Quecksilberdruckporosimetrie und für Ionendiffusionsversuche, Scheiben mit 81 mm Durchmesser und 10 mm Höhe für die Messung der kapillaren Wasseraufnahme und der Wasserdampfdiffusion, quadratische Platten mit 30 cm Kantenlänge und 6 cm Höhe, die nach dem späteren Zersägen in Platten mit 15 cm Kantenlänge zur Herstellung von Verbundkörpern aus Mörtel und Reaktionsharz eingesetzt wurden (Weimar), Platten mit 2 cm Dicke die ebenfalls zur Herstellung von Verbundkörpern eingesetzt wurden (Weimar) sowie Würfel mit 5 cm Kantenlänge für CT-Untersuchungen (Weimar). Die Normmörtelprismen wurden z.T. nachträglich in Scheiben zersägt.

Der Mörtel 5 wurde hergestellt, indem Proben nach einer Vorlagerung von 28 Tagen im Klima 20°C / 65 % r.F. mit 10 mm Überstand seitlich abgeklebt wurden und 42 Tage mit einer 10 %-igen NaCl-Lösung beaufschlagt wurden. Die Lösung war oben abgedeckt. Nach der Chloridlagerung wurden die Proben wieder im Klima 20 °C / 65 % r.F. gelagert. Die festgestellte Chlorideindringtiefe betrug nach 7 Tagen 10,5 mm und nach 14 Tagen 12 mm.

Tabelle 1: Eingesetzte Materialien und Mörtelrezepturen.

Komponente	Mörtel 1	Mörtel 2	Mörtel 3	Mörtel 4	Mörtel 6	Mörtel 7
CEM I 42,5 R Na ₂ O-Äq. 1,17 % [kg]	1		1		0,6437	1
CEM I 42,5 R SR0 (na) Na ₂ O-Äq. 0,60 % [kg]		1		1		
CEN Normsand [kg]	3	3		3	3	
CEN Normsand auf 1,6 mm ab-gesiebt [kg]						2,79
Liaver 1-2 mm [kg]			0,1448			
Liaver 0,5 - 1 mm [kg]			0,1448			
Liaver 0,25-0,5 mm [kg]			0,0579			
Liaver 0,1-0,3 mm [kg]			0,2316			
Glaskugeln 2 mm [kg]						0,205
Flugasche Baumineral HP [kg]					0,2759	
Entionisiertes Wasser [kg]	0,55	0,55	0,55	0,40	0,4147	0,55
Äquivalenter W/Z-Wert (k Flug-asche 0,4)	0,55	0,55	0,55	0,40	0,55	0,55
Verhältnis Bindemittel Sand (Gewicht)	0,3333	0,3333	1,7269	0,3333	0,3065	0,3339
Verhältnis Bindemittel Sand (Volumen)	0,2849	0,2849	0,2849	0,2849	0,2849	0,2849

2.1.3 Reaktionsharze und Herstellung der Verbundkörper

Diese Arbeiten wurden in Weimar durchgeführt. Siehe DFG-Abschlussbericht.

2.1.4 Charakterisierung von Komponenten und Proben, inklusive Bestimmung von Eingangsdaten für die rechnerische Simulation

Die lichtmikroskopische Phasen- und Gefügeanalytik an Dünnschliffen der Mörtel 1 bis 6, bei denen auch die unhydratisierten Komponenten sichtbar sind, ergab folgende Ergebnisse. Der in den Mörteln vorhandene Normsand hat eine Korngröße von ca. 20 Mikrometer bis 2 mm. Er besteht größtenteils aus Quarz, enthält aber auch Feldspäte und verschiedene Gesteinsbruchstücke. Die hydratisierten Mörtel mit dem Zement mit hohem Alkaligehalt zeigen viel Portlandit in der Matrix und als Porenfüllungen. Die Kristalle sind bis 25 Mikrometer groß. Des Weiteren zeigen diese hydratisierten Bindemittel nadel-förmige Kristalle bis 30 Mikrometer Länge, bei denen es sich um Ettringit oder Syngenit handeln dürfte. Die C₄AF-Phase hat eine grünliche Farbe. Im Gegensatz dazu sind die ebenfalls zahlreich vorhandenen Portlanditkristalle in dem hydratisierten Bindemittel aus SR0 (na)-Zement mit bis zu 10 Mikrometer kleiner. Es sind weiterhin keine nadelförmigen Kristalle sichtbar und die C₄AF-Phase ist bräunlich. Die beiden unterschiedlichen Zemente lassen sich im hydratisierten Mörtel eindeutig unterscheiden. Im erhärteten Mörtel 3 sind die Blähglaspartikel sichtbar, im Mörtel 6 unhydratisierte Flugaschepartikel. Diese haben Durchmesser zwischen 30 und 200 Mikrometer, wobei bei der Hydratation typischerweise die kleinen Partikel reagieren, und die großen übrig bleiben.

Die Phasenanalytik der Mörtel mittels Infrarotspektroskopie wird naturgemäß sehr stark von der Gesteinskörnung dominiert, die hauptsächlich aus Quarz besteht mit geringen Anteilen an Feldspat. Die IR-Spektren sind mit Ausnahme des Mörtels 3 mit Blähglas als Gesteinskörnung sehr ähnlich. Darüberhinaus kann man feststellen, dass der Calciumhydroxidgehalt in dem Mörtel 6 mit dem Puzzolan Flugasche geringer ist als in den anderen Mörteln. Die Thermoanalyse ergab die im Folgenden dargestellten Ergebnisse.

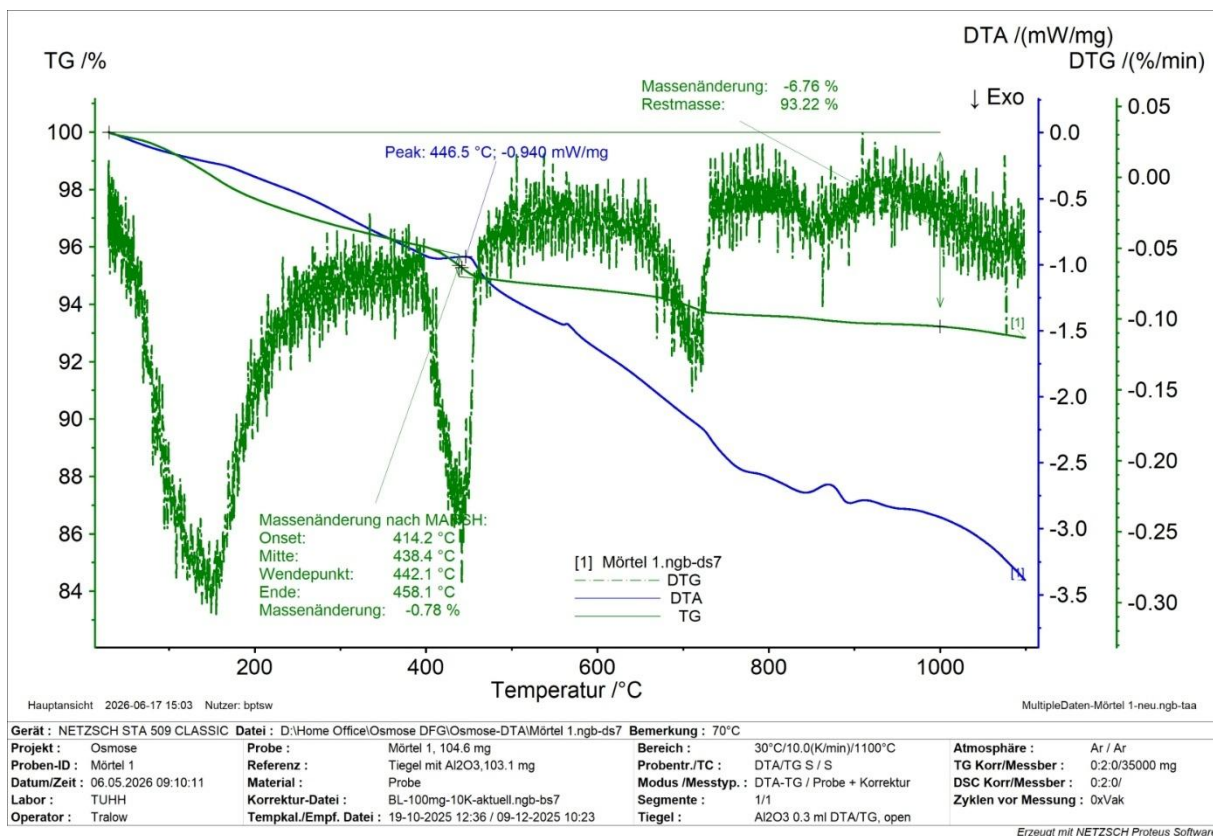


Abb. 1: DTA/TG-Analyse des Mörtels 1.

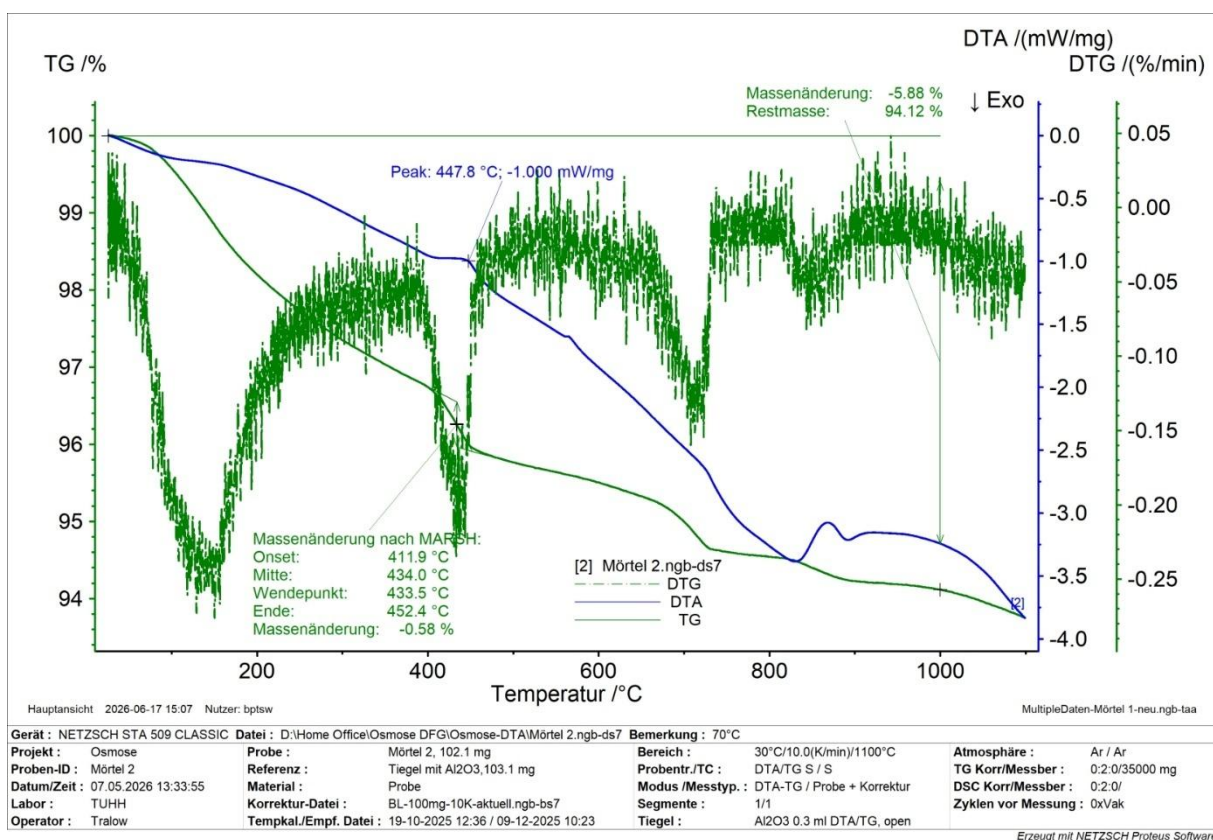


Abb. 2: DTA/TG-Analyse des Mörtels 2.

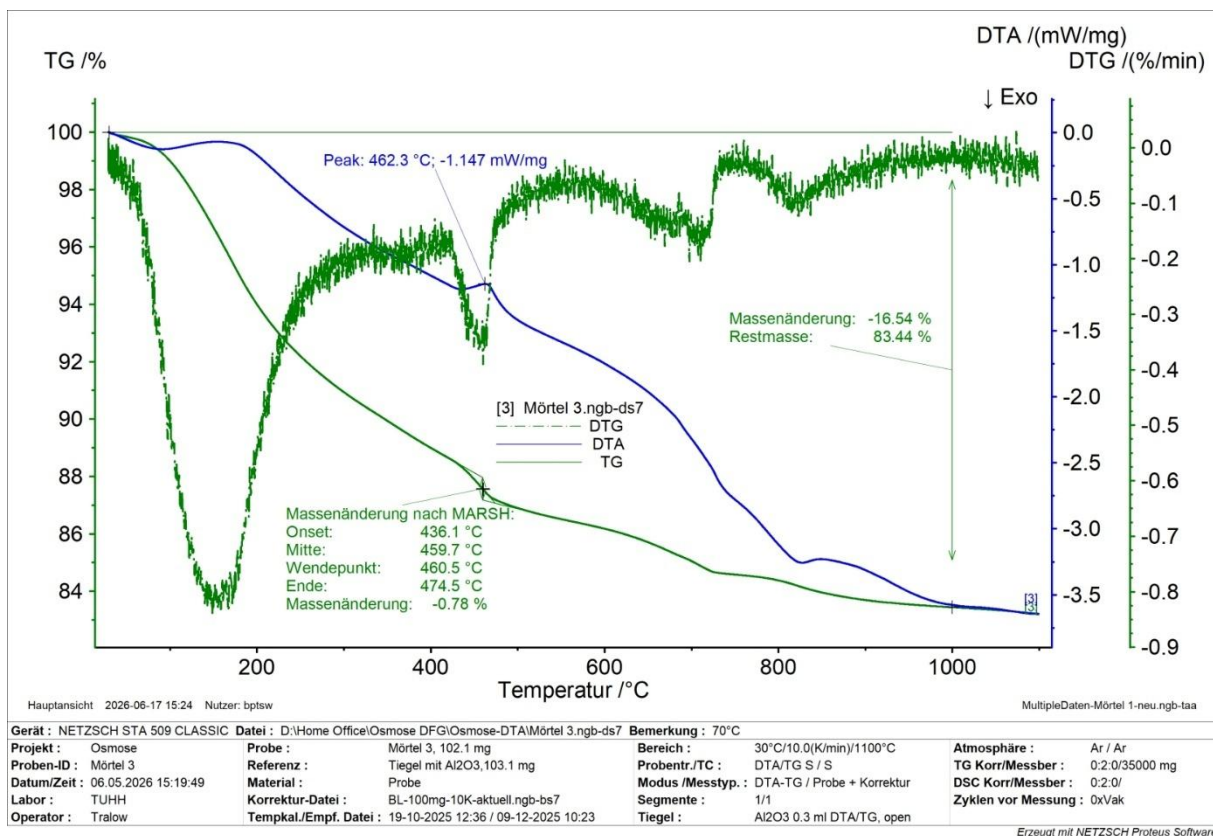


Abb. 3: DTA/TG-Analyse des Mörtels 3.

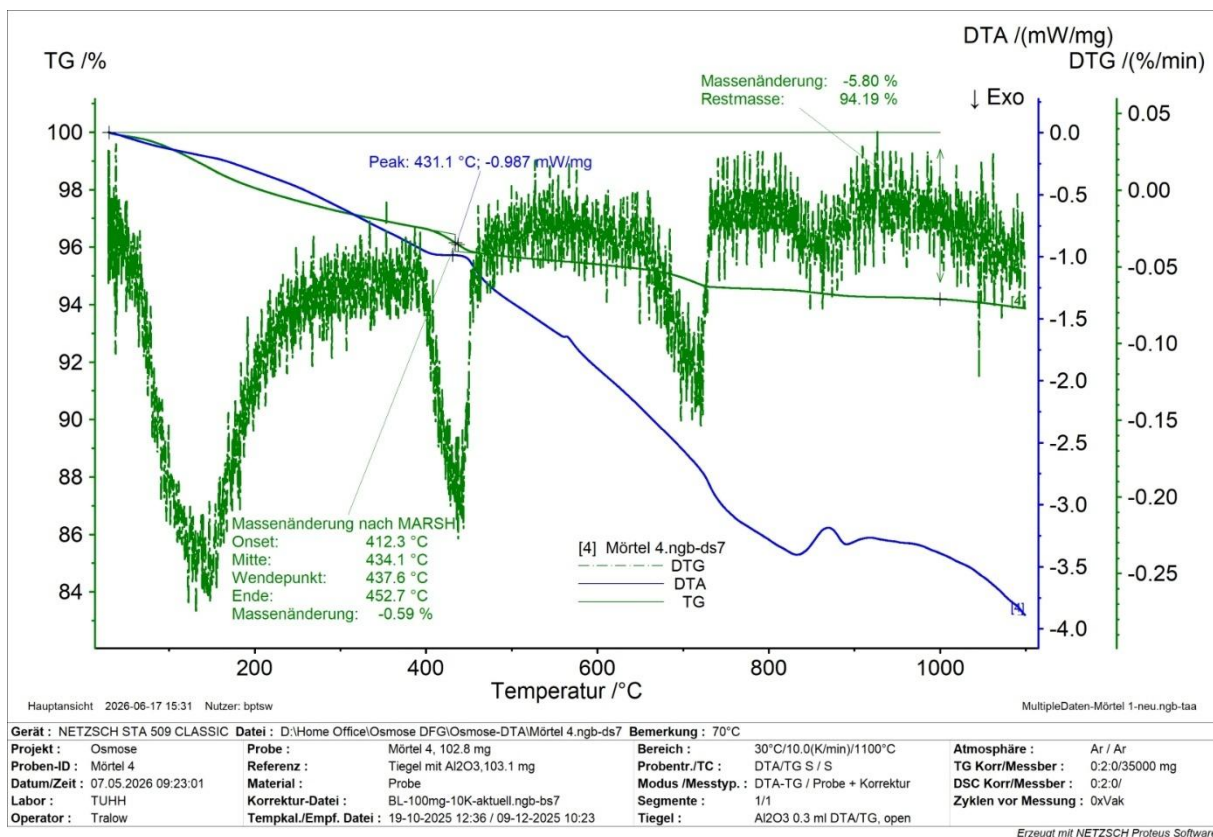


Abb. 4: DTA/TG-Analyse des Mörtels 4.

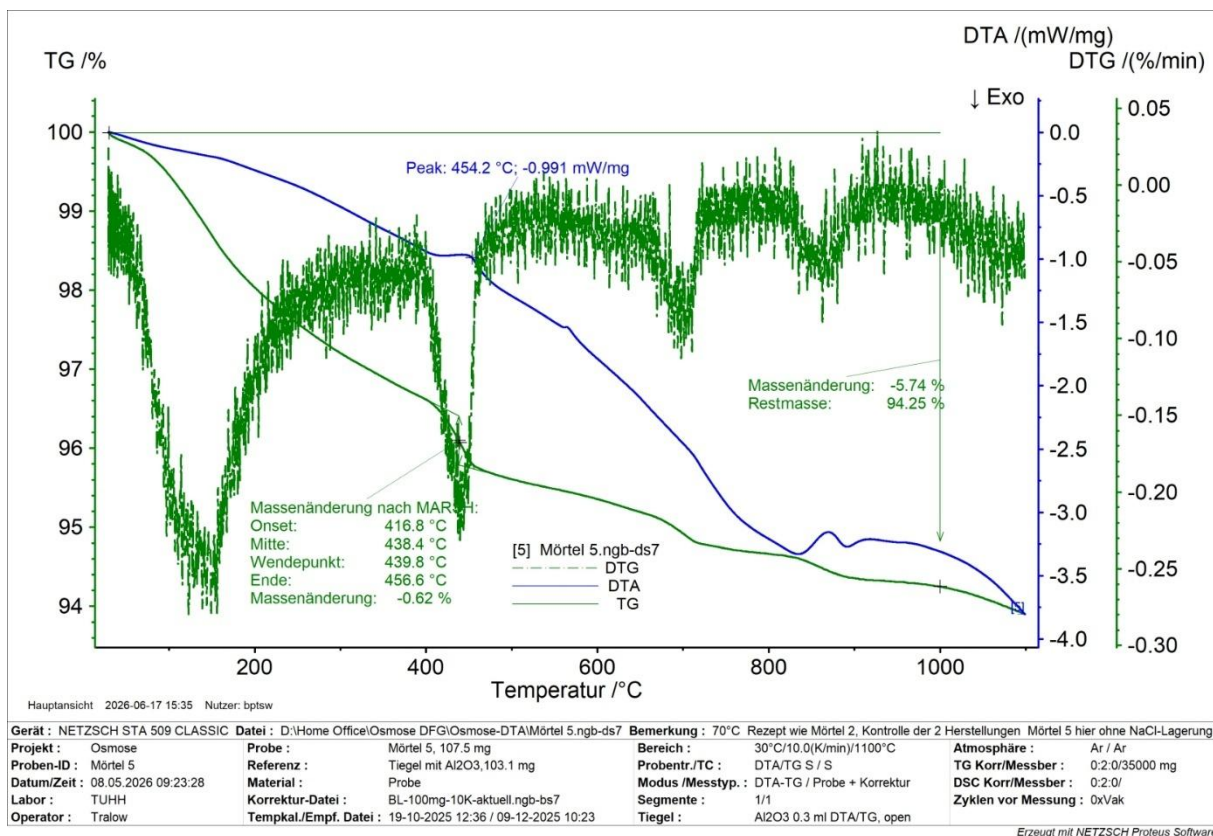


Abb. 5: DTA/TG-Analyse des Mörtels 5.

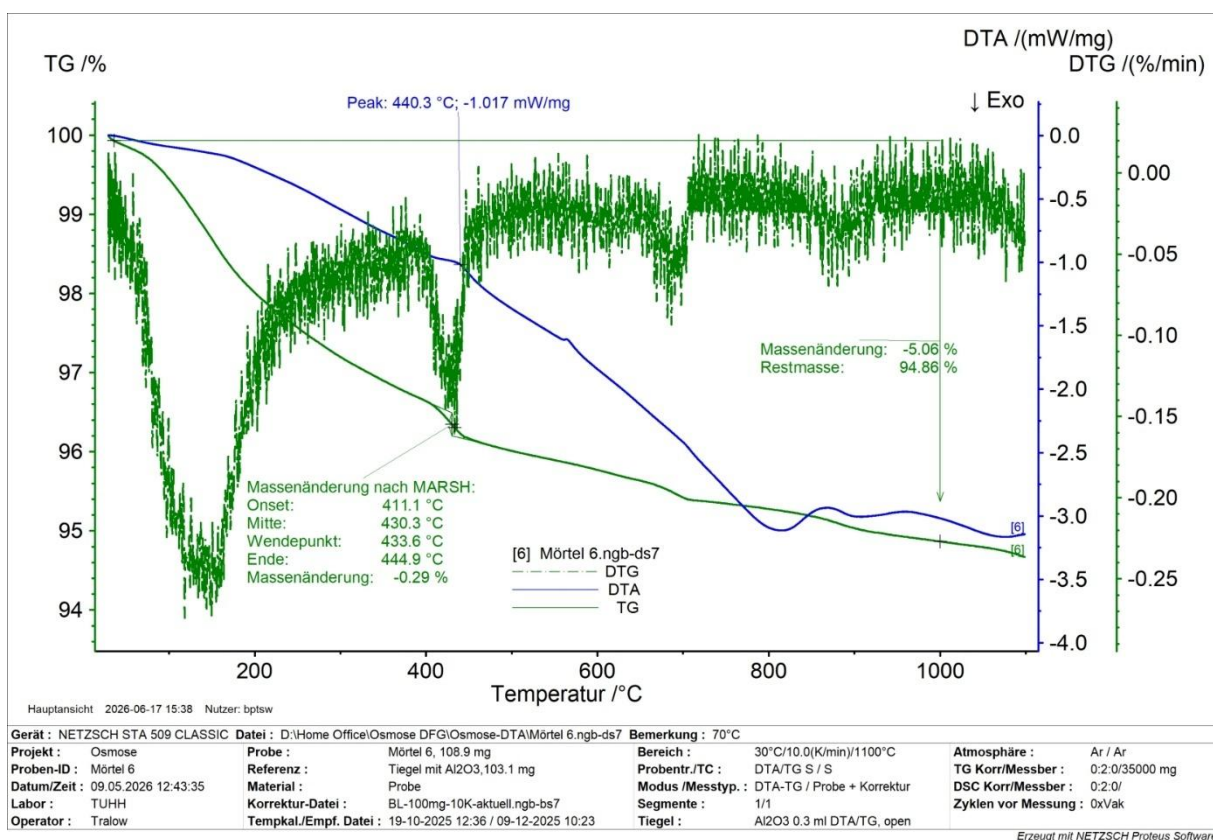


Abb. 6: DTA/TG-Analyse des Mörtels 6.

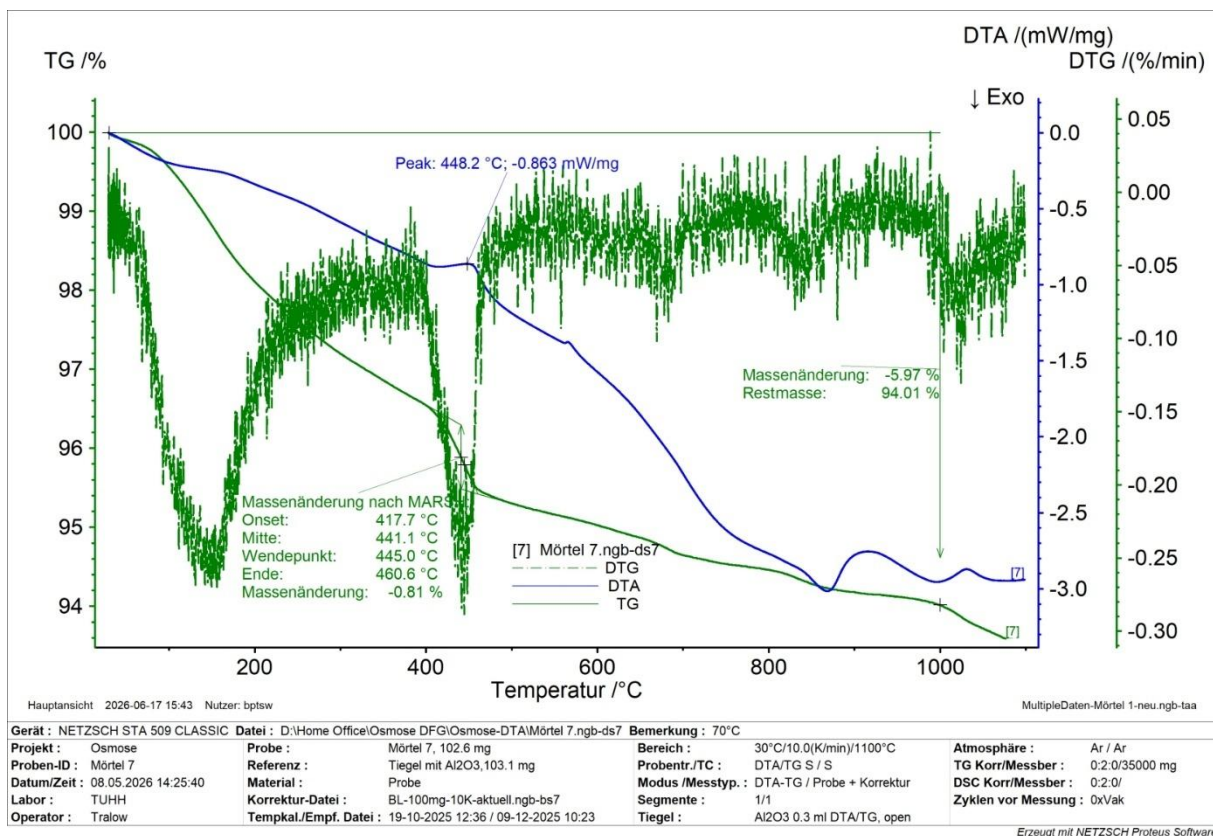


Abb. 7: DTA/TG-Analyse des Mörtels 7.

Die DTA/TG-Kurven zeigen den für entsprechende Mörtel typischen lang anhaltenden Gewichtsverlust durch die Entwässerung der Hydratphasen, den Gewichtsverlust durch die Entwässerung des Portlandits und einen gewissen Carbonatanteil. Bei allen Mörteln außer dem quarzfreien Mörtel 3 ist außerdem der endotherme Peak der Tief-/Hochquarzumwandlung sichtbar. Bei allen Mörteln außer dem Mörtel 6 liegt die Masseänderung durch die Entwässerung des Portlandits zwischen 0,58 und 0,81 M.-%. Der Mörtel 6 zeigt allerdings nur eine Masseänderung von 0,29 M.-%, was auf den Verbrauch an Portlandit durch die puzzolanische Reaktion der Flugasche zurückzuführen ist.

Die folgende Tabelle zeigt weitere wesentliche Kenndaten der hergestellten Mörtel in zusammengefasster Form.

Tabelle 2: Wesentliche Kenndaten der Mörtel. Mörtel 5 entspricht Mörtel 2 plus einer nachträglichen Behandlung mit NaCl.

Eigenschaft	Mörtel 1	Mörtel 2	Mörtel 5	Mörtel 4	Mörtel 6	Mörtel 3	Mörtel 7
Ausbreitmaß [mm] Hamburg	205	216		113	152	197	213
Ausbreitmaß [mm] Weimar	210	214		114	148	185	208
Frischmörtelrohddichte [kg/m ³] Hamburg	2230	2233		2279	2258	1094	2236
Frischmörtelrohddichte [kg/m ³] Weimar	2250	2260		2260	2290	1110	2240
Festmörtelrohddichte bei 20°C/65 % r.L. [kg/m ³]	2170	2140		2170	2170	1030	2160
Festmörtelrohddichte bei 70°C Trocknung [kg/m ³]	2070	2050		2090	2100	920	2050
Festmörtelrohddichte bei 105°C Trocknung [kg/m ³]	2060	2050		2080	2090	910	2050
LP-Gehalt [Vol.-%] Hamburg	2,6	2,2		3,0	2,6	13,0	2,2
LP-Gehalt [Vol.-%] Weimar	1,8	1,9		4,9	2,4	14,0	2,1
Biegezugfestigkeit [N/mm ²] DIN EN 1015	7,1	6,2		8,1	7,1	2,4	6,8
Druckfestigkeit [N/mm ²] DIN EN 1015	51,3	39,3		59,6	47,1	21,2	47,9
Oberflächenzugfestigkeit [N/mm ²]	3,1 ± 0,28	3,6 ± 0,64		3,6 ± 0,33	3,1 ± 0,62	1,5 ± 0,33	
Rautiefe [mm]	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	
Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl [-] ³	245 ± 9,5	154 ± 13,1	140 ± 5,3	257 ± 11,1	454 ± 11,5	208 ± 9,1	228 ± 4,0
Wasseraufnahmekoeffizient-W _{w24} [kg/m ² h ^{0,5}] ^{1, 4}	1,57 ± 0,02	2,07 ± 0,07	1,96 ± 0,02	1,19 ± 0,01	0,66 ± 0,01	1,80 ± 0,05	1,45 ± 0,06
Maximale freie Wasseraufnahme [M.-%] ¹	8,03 ± 0,17	8,19 ± 0,13	9,266	6,24 ± 0,04	6,76 ± 0,04	36,7 ± 0,9	8,34 ± 0,15
Rohddichte (70°C) für freie Wasseraufnahme [g/cm ³]	2,14 ± 0,01	2,13 ± 0,01	2,10	2,23 ± 0,00	2,17 ± 0,00	0,923 ± 0,001	2,13 ± 0,01
Reindichte MIP (70°C) [g/cm ³] ²	2,45 ± 0,01	2,48 ± 0,00	2,49 ± 0,03	2,50 ± 0,02	2,47 ± 0,01	2,12 ± 0,05	2,46 ± 0,06
Rohddichte MIP (70°C) [g/cm ³]	2,12 ± 0,01	2,12 ± 0,00	2,13 ± 0,02	2,21 ± 0,02	2,16 ± 0,01	0,93 ± 0,01	2,13 ± 0,02
Offene Porosität [Vol.-%]	17,2 ± 0,26	17,5 ± 0,20	19,7	14,0 ± 0,12	14,7 ± 0,10	35,5	17,8 ± 0,26
Porosität MIP [Vol.-%] ²	13,5 ± 0,29	14,5 ± 0,03	14,8 ± 0,42	11,8 ± 0,14	12,6 ± 0,70	56,1 ± 0,82	13,15 ± 0,52
Adsorption bei 98 % r.F [M.-%] ¹	6,88 ± 0,06	6,59 ± 0,06	6,99 ± 0,08	5,08 ± 0,09	5,84 ± 0,05	18,32 ± 0,19	7,57 ± 0,07
Adsorption bei 95 % r.F [M.-%] ¹	5,58 ± 0,04	5,78 ± 0,09	6,48 ± 9,04	4,23 ± 0,02	4,71 ± 0,07	15,36 ± 0,10	5,74 ± 0,01
Adsorption bei 85 % r.F [M.-%] ¹	4,44 ± 0,02	4,36 ± 0,05	4,72 ± 0,09	3,57 ± 0,03	3,71 ± 0,01	11,53 ± 0,08	4,44 ± 0,02
Adsorption bei 75 % r.F [M.-%] ¹	3,49 ± 0,05	3,20 ± 0,05	4,21 ± 0,05	2,78 ± 0,05	2,99 ± 0,02	8,21 ± 0,03	3,72 ± 0,03
Adsorption bei 65 % r.F [M.-%] ¹	2,08 ± 0,04	1,83 ± 0,04	3,19 ± 0,06	1,74 ± 0,01	1,67 ± 0,07	5,02 ± 0,05	2,47 ± 0,05
Desorption bei 98 % r.F [M.-%] ¹	8,13 ± 0,06	8,60 ± 0,02	9,02 ± 0,07	6,02 ± 0,09	6,79 ± 0,03	22,55 ± 0,09	7,49 ± 0,12
Desorption bei 95 % r.F [M.-%] ¹	7,97 ± 0,03	7,99 ± 0,02	8,24 ± 0,11	5,92 ± 0,10	6,68 ± 0,06	18,26 ± 0,16	7,14 ± 0,04

Desorption bei 85 % r.F [M.-%] ¹	7,20 ± 0,04	6,65 ± 0,02	6,51 ± 0,04	5,49 ± 0,04	6,07 ± 0,02	18,24± 0,01	6,55 ± 0,05
Desorption bei 75 % r.F [M.-%] ¹	5,89 ± 0,02	5,44 ± 0,04	5,18 ± 0,01	4,91 ± 0,02	5,29 ± 0,01	14,89± 0,09	4,71 ± 0,29
Desorption bei 65 % r.F [M.-%] ¹	4,50 ± 0,01	4,26 ± 0,01	3,95 ± 0,07	3,81 ± 0,02	4,24 ± 0,01	11,18± 0,08	3,83 ± 0,01
Diffusionskoeffizient Br ⁻ in LiBr-Lösung, In-Diffusion instationär [m ² /s]	6,00 · 10 ⁻¹² bis 7,00 · 10 ⁻¹²	2,00 · 10 ⁻¹¹	2,75 · 10 ⁻¹¹	7,02 · 10 ⁻¹²	6,00 · 10 ⁻¹³ im größte- ren Alter 4,00 · 10 ⁻¹³	5,00 · 10 ⁻¹²	5,00 · 10 ⁻¹²

Freie Wasseraufnahme Mörtel 3 wurde nach 237 Tagen abgebrochen, trotz weiter steigendem Wert.

Adsorptionsversuch Mörtel 3 wurde nach 387 Tagen abgebrochen, trotz leicht steigender Verläufe.

MIP-Porosität Mörtel 3 ist wesentlich größer als offene Porosität, da geschlossene Porosität aufgebrochen wird.

- ¹ Vorlagerung 1 Tag in Form bei <95 % r.L. / 20 °C. Danach mindestens bis zum Alter von 56 Tagen in gesättigter Ca(OH)₂-Lösung. Trocknung bei 70 °C. Kriterium für Massekonstanz: 3 mal in 24 Stunden < 0,1 M.-% Veränderung.
- ² Bei Untersuchungen mittels Quecksilberdruckporosimetrie (MIP) wurde eine Trocknung bei 70°C durchgeführt. Als Kontaktwinkel wurde 140 ° verwendet, als Oberflächenspannung 480 dynes/cm.
- ³ Gemessen bei 0 / 54,4 % r.L. und 20°C. Probentrocknung bei 70°C.
- ⁴ Seitlich mit Harz versiegelte Proben. Saugen mit Leitungswasser. Mörtel 3 zeigt Rissbildung zwischen Harz und Mörtel. Wiederholungsversuch mit seitlich offenen Proben in 100 % r.F..

Zu bemerken ist, dass der flugaschehaltige Mörtel 6 im kapillaren Saugversuch eine extreme Selbstabdichtung mit stagnierender Feuchtefront zeigte. Unterhalb der Feuchtefront konnte mittels MIP eine deutliche Verfeinerung des Porensystems durch die puzzolanische Reaktion der Flugasche festgestellt werden.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Summenporenkurve und die Porenradienverteilung der Mörtel.

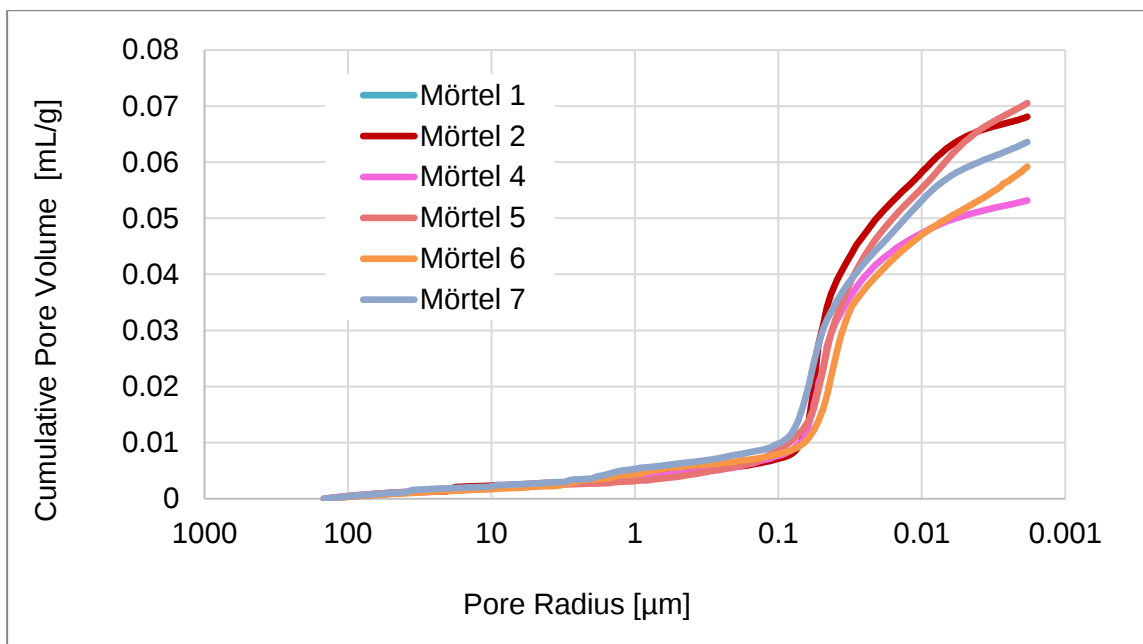
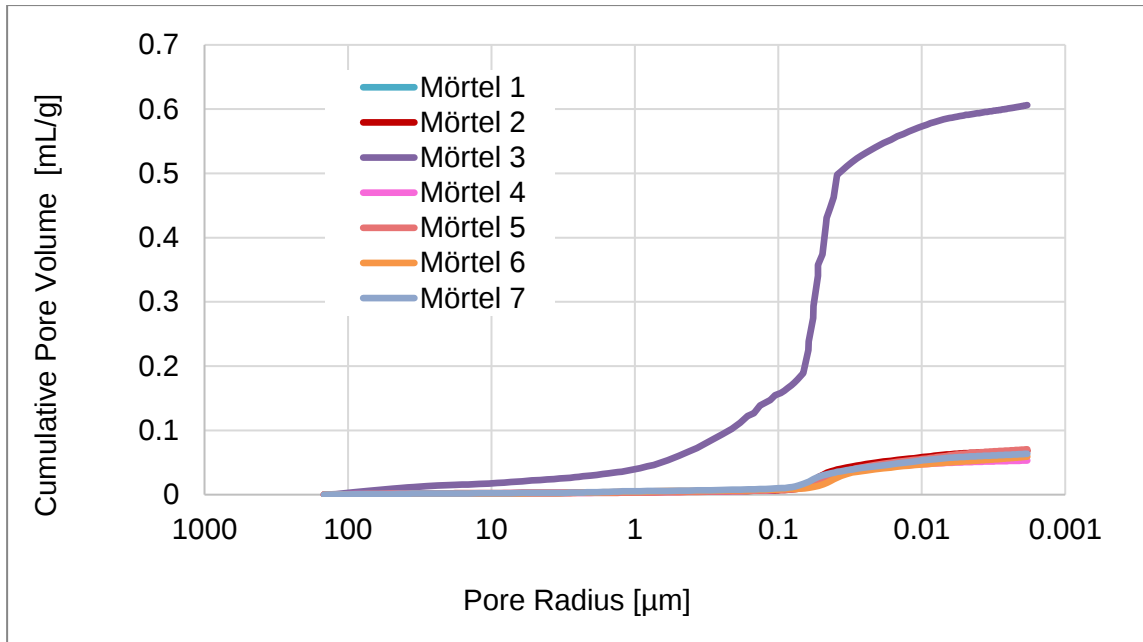


Abb. 8: Summenporenkurven der Mörtel. Mörtel 5 entspricht Mörtel 2 plus einer nachträglichen Behandlung mit NaCl. Oben mit, unten ohne Mörtel 3.

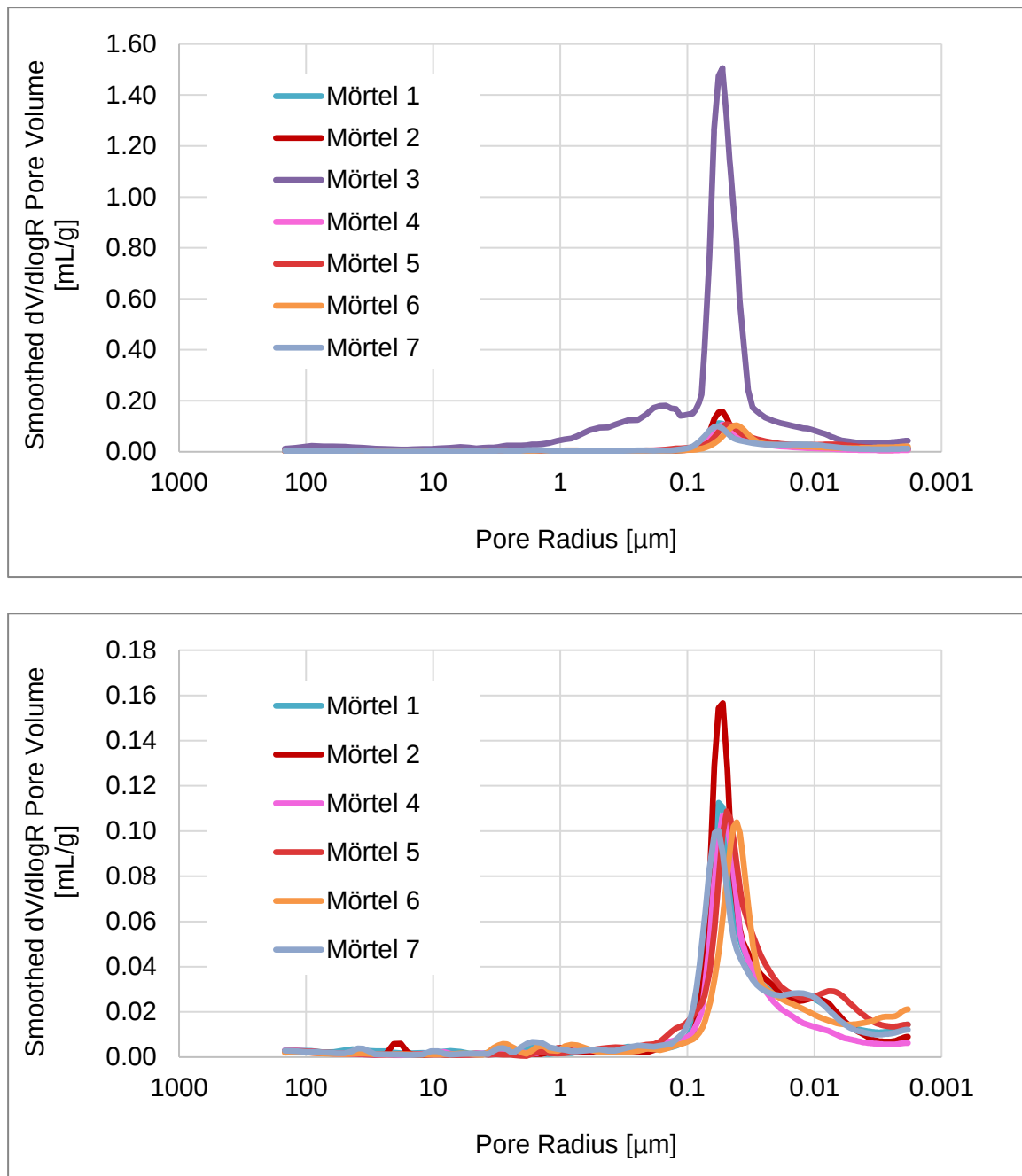


Abb. 9: Porenradienverteilung der Mörtel. Mörtel 5 entspricht Mörtel 2 plus einer nachträgliche Behandlung mit NaCl. Oben mit, unten ohne Mörtel 3.

Erstaunlich ist, dass sowohl durch die Osmometerversuche der Mörtel, als auch durch die Beaufschlagungsversuche der Verbundproben eine erhebliche Veränderung der Porenradienverteilung beobachtet werden konnte, die durch die bloße Lagerung in portlanditgesättigter Lösung nicht auftrat. Dies ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Während sich die Porenradienverteilung des Mörtels 2 durch die bloße Lagerung nicht wesentlich verändert hat, zeigten sowohl die Proben aus den Osmometerversuchen, als auch Proben aus den Verbundversuchen mit Fußbadlagerung eine deutliche Reduktion des Maximalpeaks und eine Verschiebung des entsprechenden Porenradius des Maximums zu kleineren Porenradien. Dies zeigt, dass es schwierig ist, den exakten Zustand entsprechender Proben während einer Beaufschlagung anzugeben.

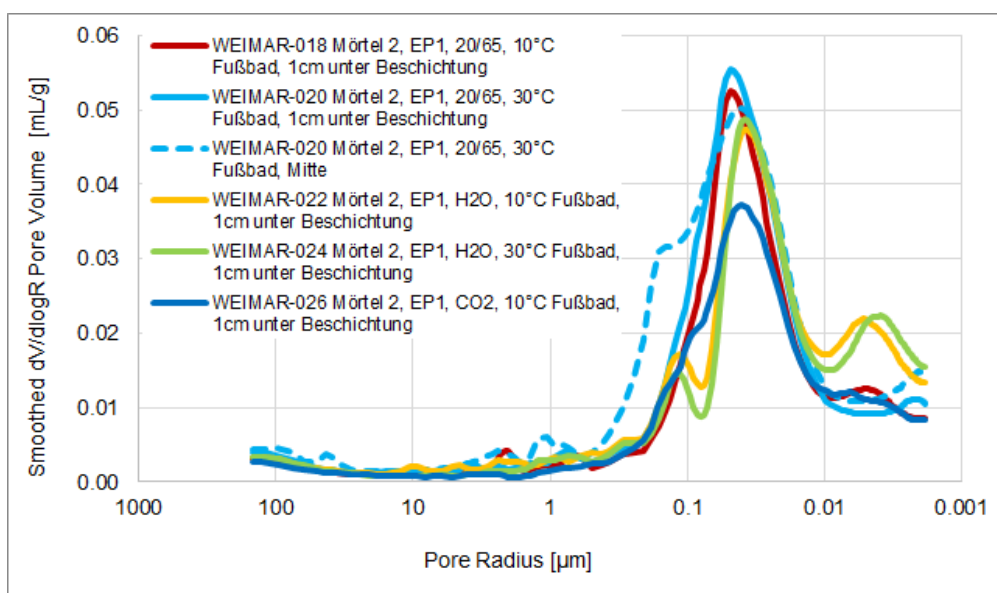
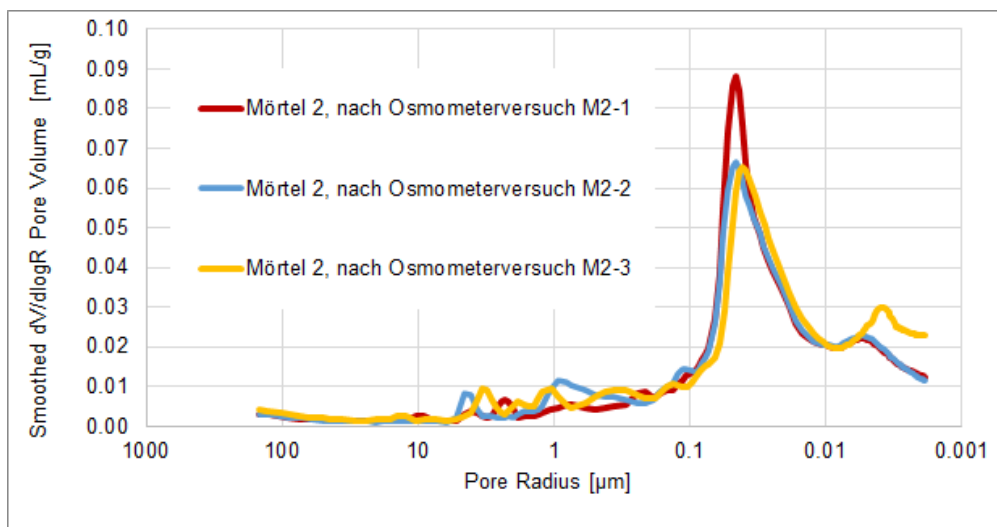
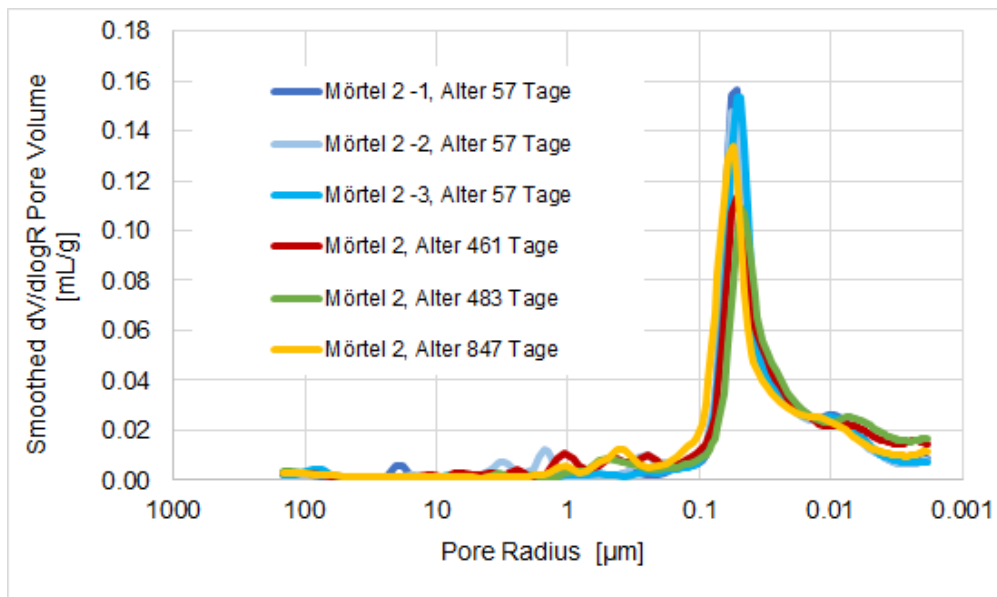


Abb. 10: Porenradienverteilung des Mörtels 2 nach Lagerung in portlanditgesättigter Lösung (oben), nach Osmometerversuchen (mittig) und nach Fußbadlagerung von Verbundkörpern (unten).

Zumindest der Mörtel 6 zeigt auch einen deutlichen Alterseinfluss auf die Porenradienverteilung, wie aus der folgenden Abbildung hervorgeht.

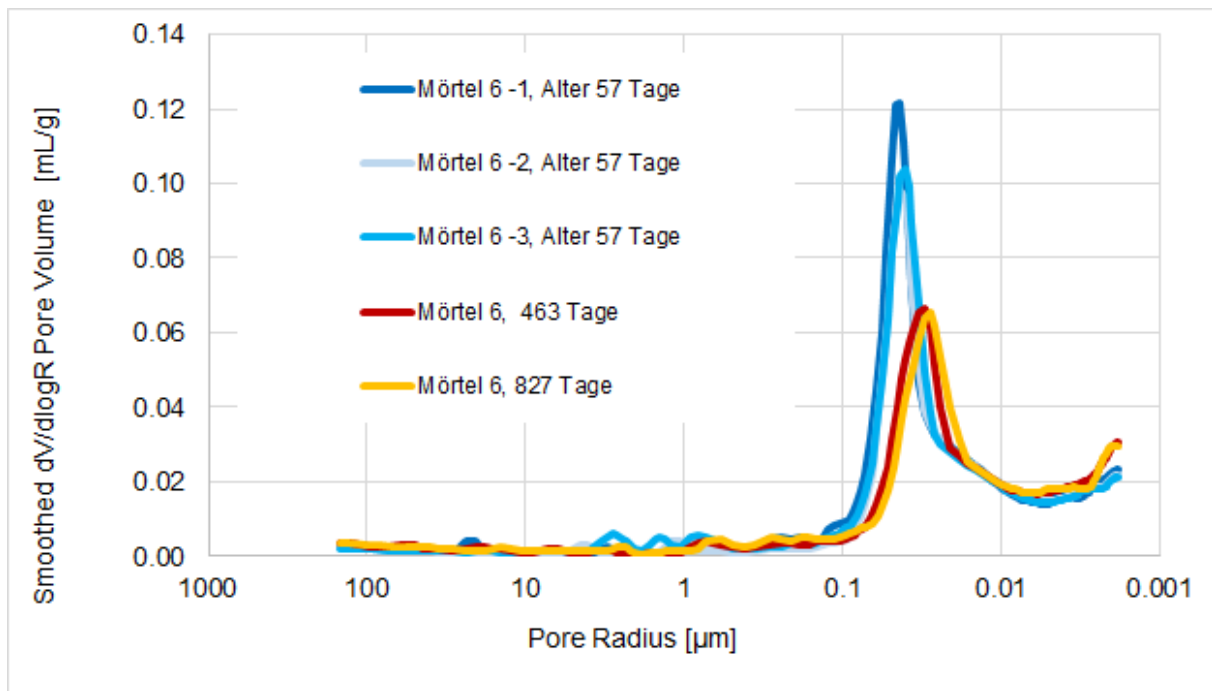


Abb. 11: Porenradienverteilung des Mörtels 6 im verschiedenen Alter.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Diagramme für die Ermittlung der Ionendiffusionskoeffizienten. Nach Einlagerung über 14 ± 2 Tagen (Ausnahme Mörtel 3: 7 Tage) in LiBr-Lösung erfolgte die Messung des Eindringprofils von Bromid mittels orts aufgelöster RFA und die iterative Nachrechnung mit dem Simulationsmodell Transreac zur Ermittlung des zugehörigen Ionendiffusionskoeffizienten. Die Hypothese, dass die großen Streuungen der Osmometerversuche auf das unterschiedliche Alter von Proben und sich daraus ergebende unterschiedliche Diffusionskoeffizienten zurückführen lassen, haben sich i.W. nicht bestätigt. Lediglich beim Mörtel 6 mit Flugasche lässt sich im jungen Alter ein etwas größerer Diffusionskoeffizient vermuten.

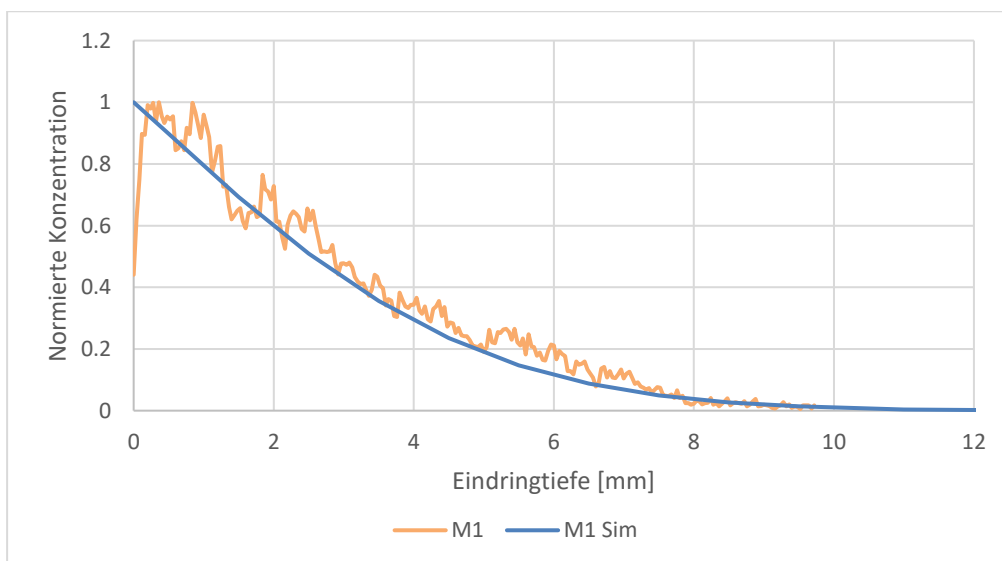


Abb. 12: Diffusionskoeffizient für Mörtel 1: $6,00 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

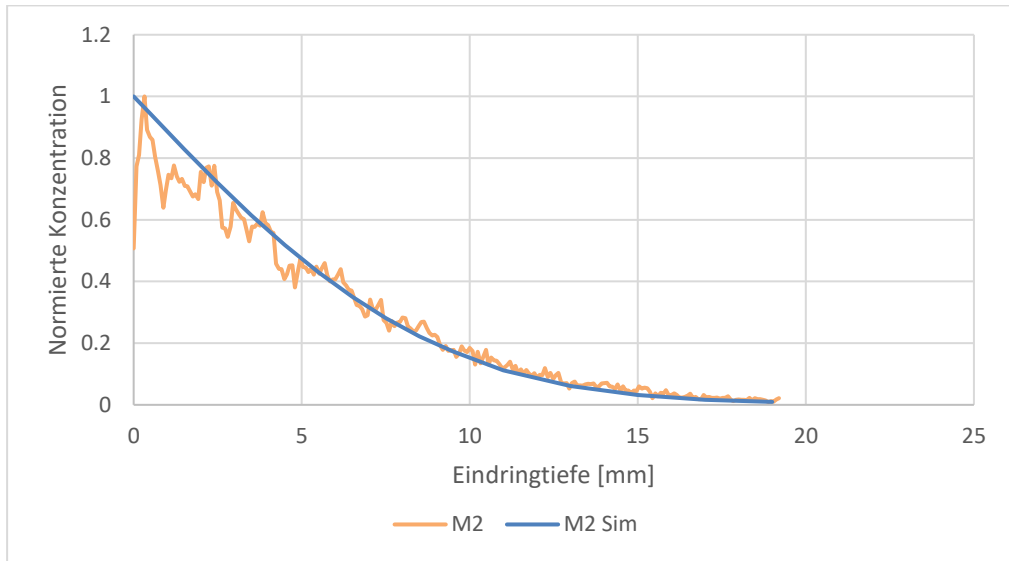


Abb. 13: Diffusionskoeffizient für Mörtel 2: $2,00 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$

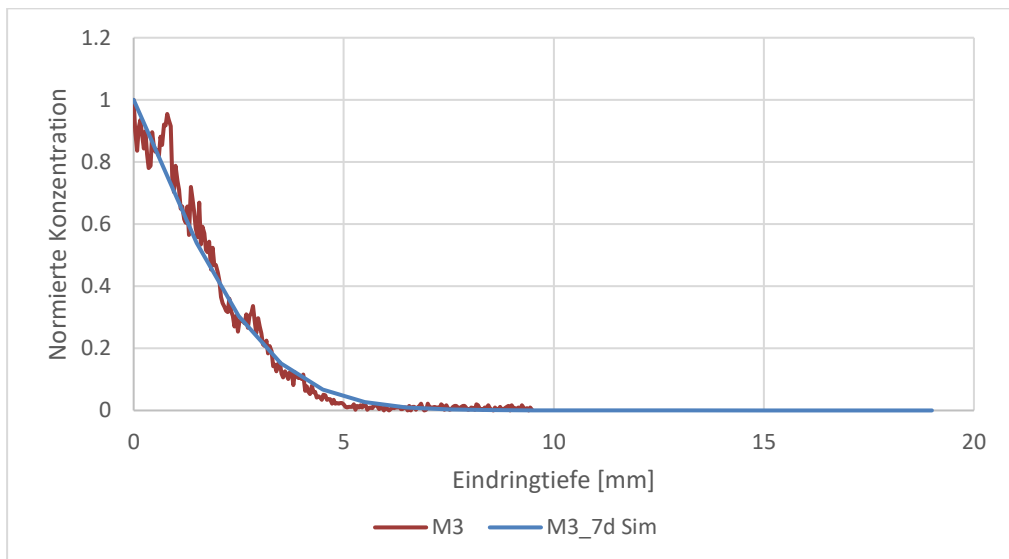


Abb. 14: Diffusionskoeffizient für Mörtel 3: $5,00 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

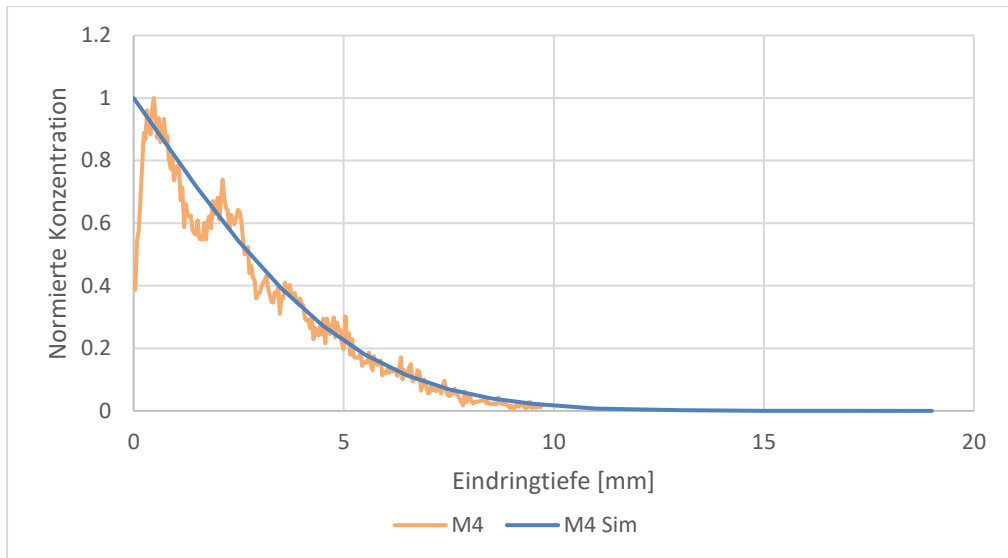


Abb. 15: Diffusionskoeffizient für Mörtel 4: $7,02 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

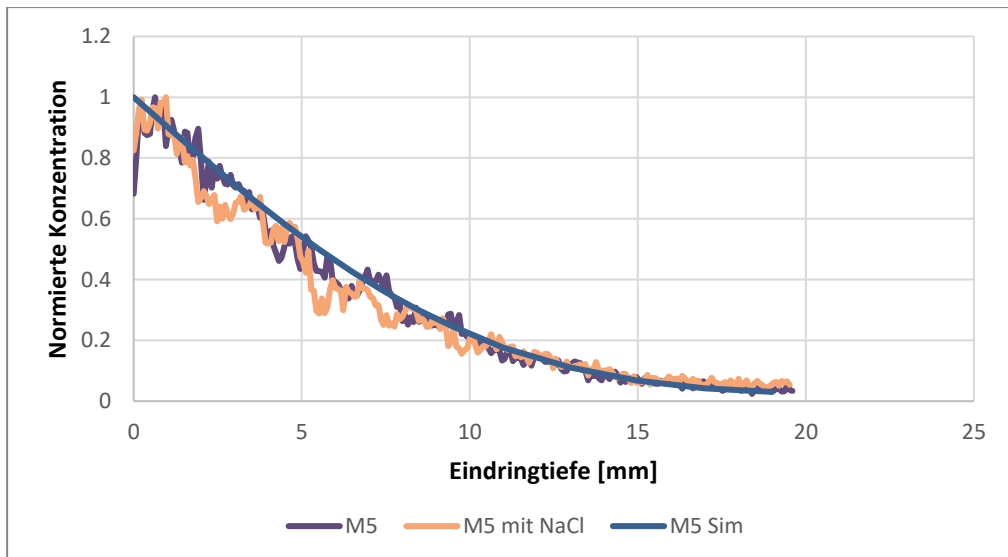


Abb. 16: Diffusionskoeffizient für Mörtel 5: $2,75 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$

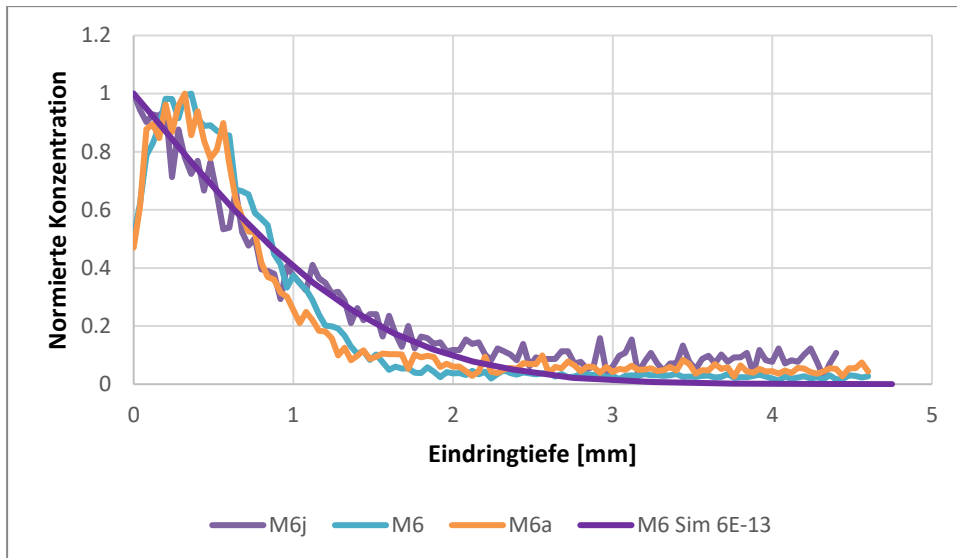


Abb. 17: Diffusionskoeffizient für Mörtel 6: $6,00 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$. Im größeren Alter etwas geringer: $4,00 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$.

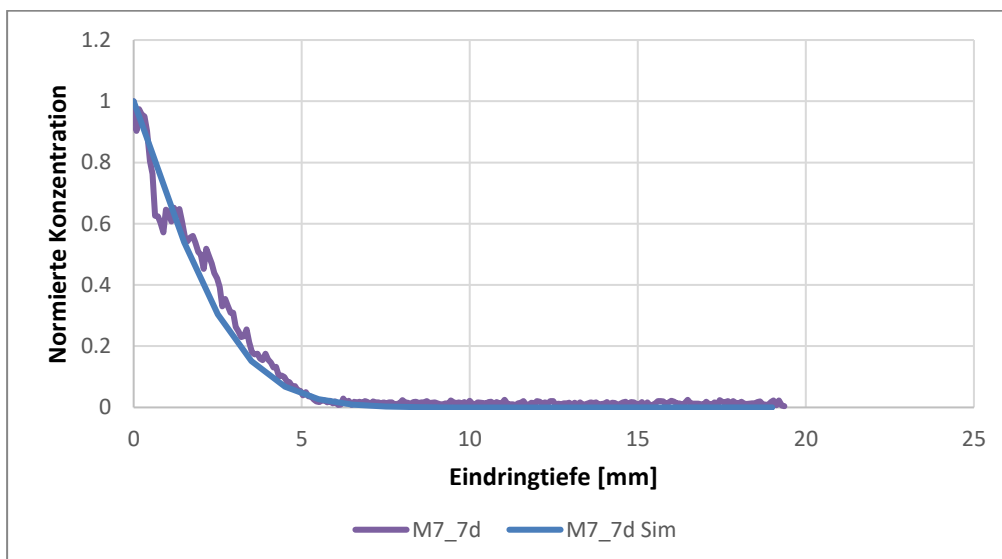


Abb. 18: Diffusionskoeffizient für Mörtel 7: $5,00 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

An den Mörtelproben konnten mittels SEM-Untersuchungen folgende Beobachtungen gemacht werden. Mörtel 1 zeigt eine sehr gute Einbindung der Quarzkörner in die Matrix. Porenfüllungen bestehen aus plättchenförmigen und langprismatischen Kristallen. Besonderheiten hinsichtlich der Kapillarporosität sind bei hoher Auflösung nicht erkennbar. Es gibt in dem Material Wegsamkeiten in Form von Kanälen, die keine untersuchungsbedingten Risse zu sein scheinen.

Das Bindemittel von Mörtel 2 verhält sich sehr ähnlich wie das von Mörtel 1. Allerdings treten um die Gesteinskörner herum Hohlräume auf, die als Wegsamkeiten dienen können. Am Rande der Gesteinskörner sind auch deutliche strukturierte Ansammlungen von Calciumhydroxidplättchen erkennbar. Die erkennbare Kapillarporosität zeigt keine Besonderheiten.

Der Mörtel 4 unterscheidet sich per Augenschein nicht wesentlich vom Mörtel 2.

Mörtel 6 erscheint sehr dicht. Bei diesem Mörtel treten im Gegensatz zu den anderen Proben auch kurzprismatische Kristalle auf. Offensichtliche Reste von Flugaschekörner sind wenige vorhanden, was auf einen hohen Hydratationsgrad der Flugasche schließen lässt.

Auch Mörtel 7 zeigt im Hinblick auf die Kapillarporenstruktur keine Besonderheiten.

Zur Beschreibung der chemischen Elementanalyse mittels Röntgenfluoreszenzanalyse der Komponenten, der Phasenanalytik der Komponenten und Mörtel inklusive Hydratationsgradermittlung mittels Röntgenpulverdiffraktometrie, der Phasenanalytik der Mono- und Polymere mittels Infrarotspektroskopie, der CT-Untersuchungen, der Analysen der Zusammensetzung der Porenflüssigkeiten nach unterschiedlichen Hydratationszeiten, der Oberflächenzugfestigkeit der carbonatisierten Mörtel, der Rautiefe der carbonatisierten Mörtel, der Haftzugfestigkeit mit Beschichtung, der Schälfestigkeit mit Beschichtung sowie der Ergebnisse des Blister Test mit Beschichtung soweit vorhanden: siehe Angaben der Universität Weimar im DFG Abschlussbericht. Ebenso zur Darstellung der Ergebnisse der Beschichtungen bzw. von Einzelschichten hinsichtlich der Zugfestigkeit nach DIN EN ISO 527, der Zugdehnung nach DIN EN ISO 527, der Biegezugfestigkeit nach DIN EN ISO 178, der Durchbiegung nach DIN EN ISO 178, der Druckfestigkeit nach EN 12190, der Wasserdampfdurchlässigkeit nach EN ISO 7783, der Wasseraufnahme nach EN 13580, der Alkalibeständigkeit nach EN 13580, von Auslaugversuche in synthetischer Porenflüssigkeit sowie von Untersuchungen mittels Thermoanalyse und Infrarotspektroskopie zu unterschiedlichen Zeiten inklusive Bestimmung des Aushärtegrades.

2.1.5 Untersuchung der Mörtel bei Feuchtebelastung (Osmometerversuche)

Osmometerversuche dienen zur Untersuchung der Wirkung der Mörtel als semipermeable Membran. Die scheibenförmigen Proben für die Osmometerversuche wurden 1 Tag in Form bei >95 % r.L. / 20 °C belassen und danach mindestens bis zum Alter von 56 Tagen in Ca(OH)_2 -gesättigter Lösung vorgelagert, um kapillare Transporte auszuschließen und eine Auslaugung der Proben zu vermeiden. Mit den angeschliffenen Proben wurden dann Messungen des osmotischen Druckes mit Osmometern durchgeführt. Vier Osmometer waren zu Beginn des Projektes bereits vorhanden. Zwei weitere wurden im Rahmen des Projektes durch die TUHH zusätzlich gebaut. Die Mörtel wurden als Membran zwischen den beiden Osmometerkammern verwendet. Eine Kammer war geschlossen und mit einem Drucksensor ausgestattet. Diese Kammer wurde mit einer Lösung von 1 Mol NaCl (58,44 g), 1 Mol KBr (119,01 g), 0,5 Mol RbNO_3 (73,74 g), 1 Mol Ethylenglykol (62,07 g) in 1000,00 g vollentsalztem Wasser gefüllt. Ethylenglykol musste als Ersatz für die ursprünglich angedachte Saccharose gewählt werden, da diese den Mörtel angreift. Die andere Kammer stand im Druckausgleich mit der Umgebungsluft und war mit vollentsalztem Wasser gefüllt. Die folgende Abbildung zeigt vier der vorhandenen Osmometer, die sich in einem bei 20 °C betriebenen Klimaraum befinden.



Abb. 19: Vier der sechs Osmometer des Instituts für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie.

Im Gegensatz zu älteren Versuchen wurden die Mörtelproben jeweils in einen Plexiglasring eingearzt, der dann als Dichtebene benutzt wurde. Dies ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Diese Vorgehensweise hat die Zuverlässigkeit der Apparaturen wesentlich verbessert.

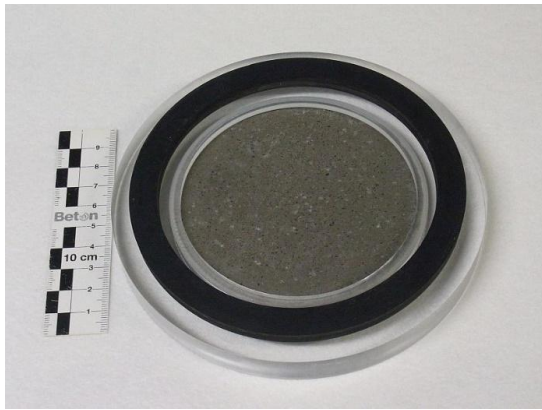


Abb. 20: In Plexiglasring eingearzte Mörtelprobe.

In größeren Zeitabständen wurde das Wasser der offenen Seite ausgetauscht und chemisch analysiert. Voruntersuchungen erfolgten mittels Röntgenfluoreszenzanalyse und Infrarotspektroskopie. Quantitative Analysen erfolgten mittels ICP-OES, Ionenchromatographie und GC-FID (Ethylenglycol) durch das Zentrallabor chemische Analytik der TU Hamburg. Typische Entwicklungen des osmotischen Druckes in der geschlossenen Kammer der einzelnen Mörtel zeigt die folgende Abbildung. Man kann erkennen, dass bei den Osmometerversuchen erhebliche Streuungen der Ergebnisse auftreten. Trotzdem sind charakteristische Unterschiede zwischen den einzelnen Materialien erkennbar.

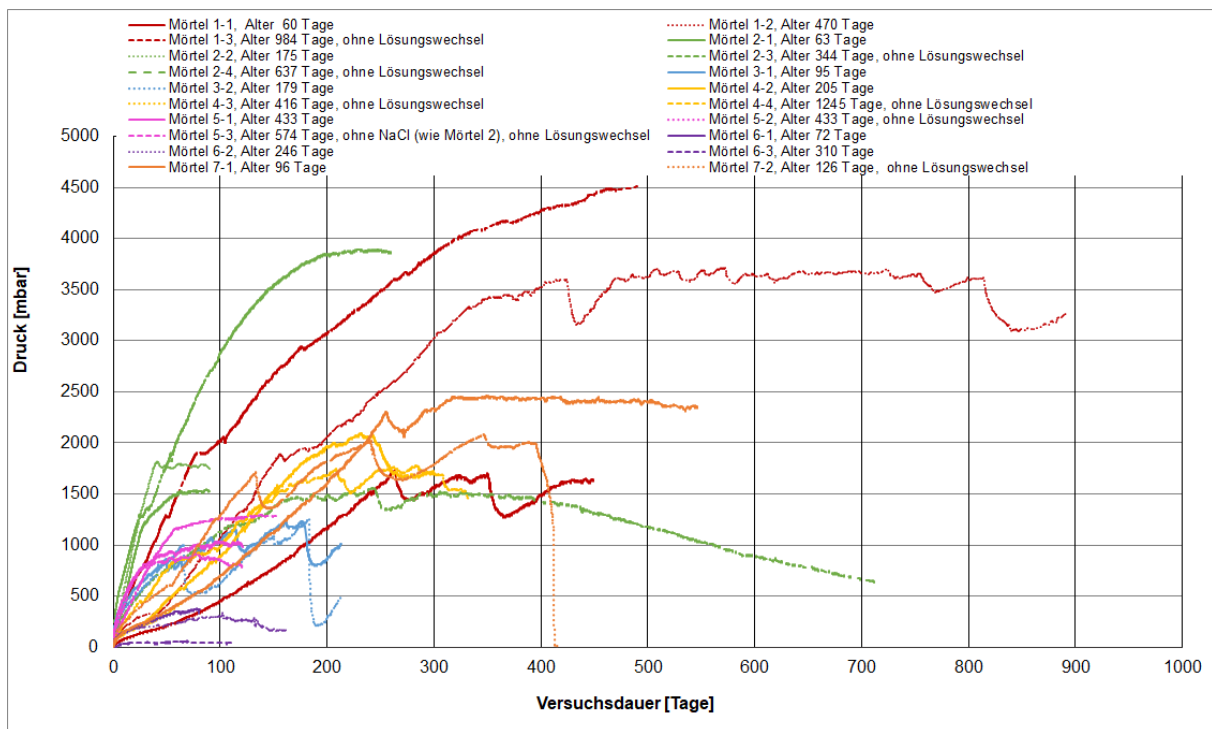


Abb. 21: Entwicklung des osmotischen Druckes in der geschlossenen Kammer bei den verschiedenen Mörteln. Ohne LSGs-Wechsel bedeutet, dass bei diesem Versuch kein Lösungswechsel auf der Seite des vollentsalzten Wassers vorgenommen wurde.

Daneben wurden auch Auslaugversuche durchgeführt, bei denen beide Kammern der Osmometer entweder mit vollentsalztem Wasser oder mit der oben beschriebenen Lösung gefüllt waren. Dabei konnten im Falle der Lösung folgende Druckverläufe festgestellt werden. Bei den Versuchen mit Wasser konnte kein Druckaufbau festgestellt werden.

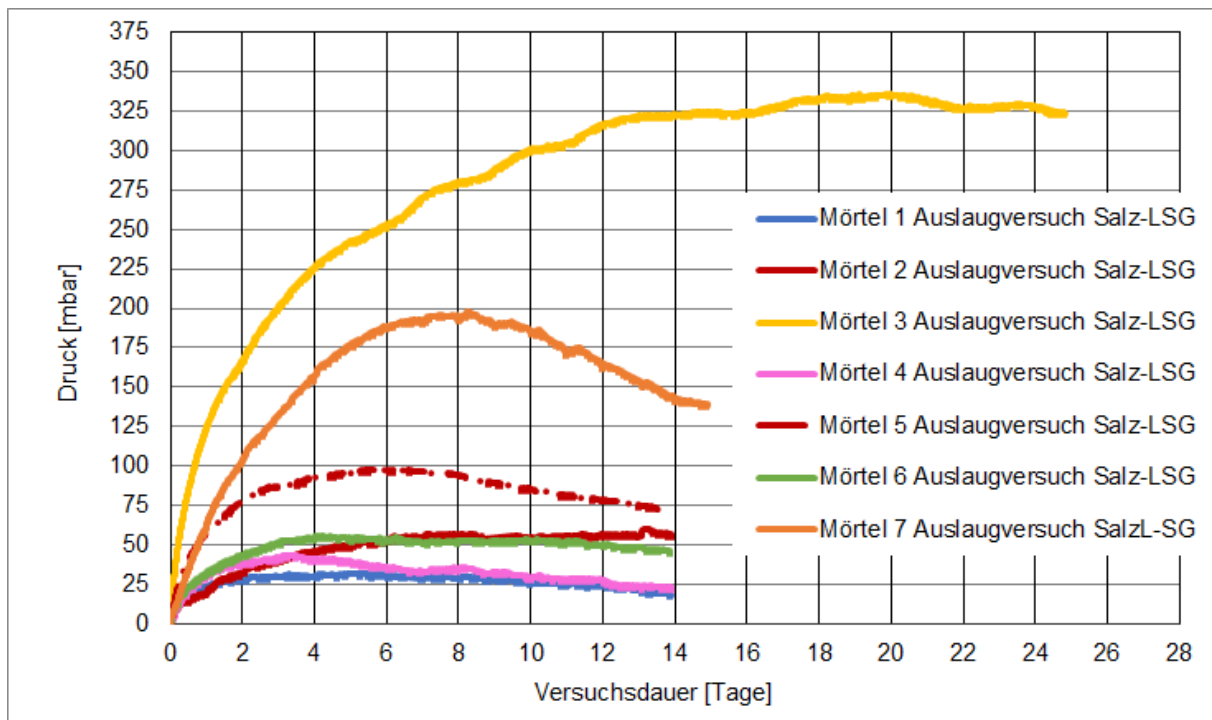


Abb. 22: Entwicklung des osmotischen Druckes in der geschlossenen Kammer bei den Auslaugversuchen der verschiedenen Mörtel. Bei diesen Versuchen befand sich auf beiden Seiten der Mörtelproben die gleiche im Text beschriebene Lösung.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Osmometerversuche jeweils für die einzelnen Mörtel gezeigt. Der Druckverlauf wird in einem Diagramm dargestellt, die Ergebnisse der chemischen Analysen in einer Tabelle.

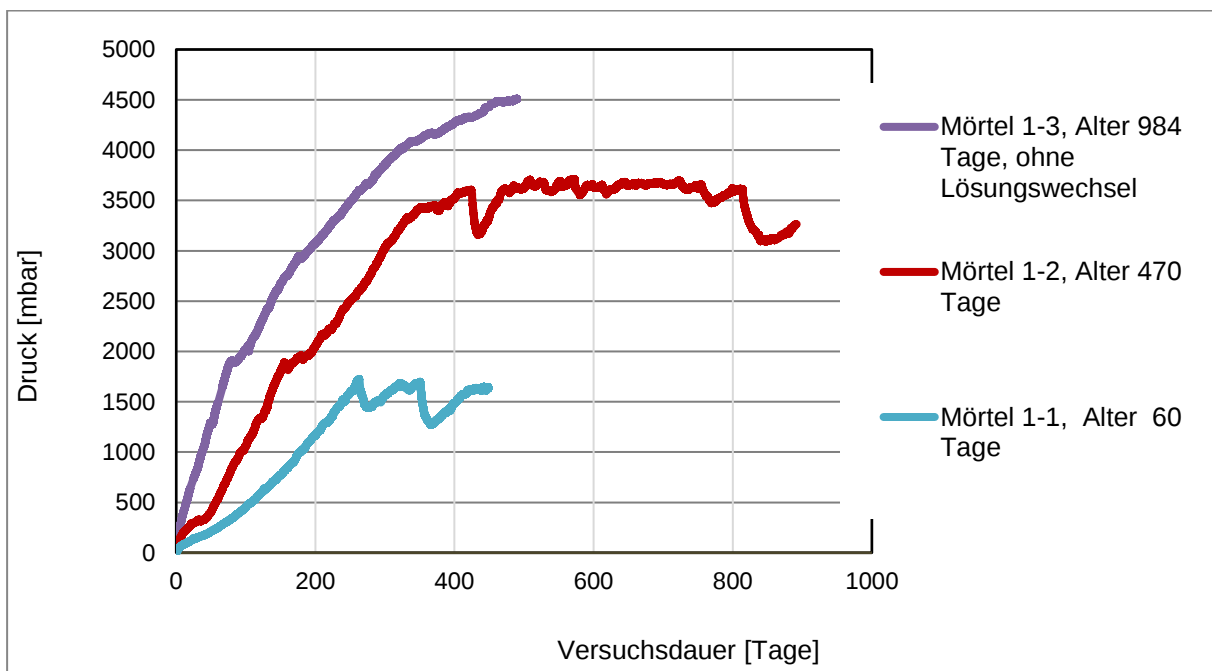


Abb. 23: Entwicklung des osmotischen Druckes in der geschlossenen Kammer von Mörtel 1. Bei Probe 1-2 konnten Risse auf der Zugseite festgestellt werden. Versuch 1-3 wird über die Projektlaufzeit hinaus fortgesetzt.

Tabelle 3: Chemische Analyse der Lösungen der Versuchsserie 1.

Mörtel 1: Zement Dyckerhoff "PZ Doppel CEM I 42,5 R" mit hohem Alkaligehalt, CEN Normsand, Mischungsverhältnis 1:3, w/z 0,55								
	Ethylenglykol	Na	Chlorid	K	Bromid	Rb	Nitrat	Ca
Probe	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L
Salzlösung	52,0	20,3	33,0	33,8	75,0	37,9	30,0	0,0065

Mörtel 1 Auslaugversuch mit Salzlösung, offene Seite	52,0	20,3	32,0	33,9	73,0	37,9	29,0	0,140
Mörtel 1 Auslaugversuch mit Salzlösung, Druckseite	55,0	19,7	31,0	32,7	71,0	36,6	28,0	0,110

Mörtel 1 Auslaugversuch mit VE-Wasser, offene Seite	–	0,011	0,020	0,037	0,030	< 5,0	< 0,02	0,210
Mörtel 1 Auslaugversuch mit VE-Wasser, Druckseite	–	0,017	0,020	0,044	0,047	< 5,0	< 0,02	0,160

Versuch 1-1 mit Lösungswechsel

Mörtel 1-1: 1. Lösungswechsel, VE Seite	< 2	0,018	0,020	0,058	< 0,02	< 5,0	<0,02	0,240
Mörtel 1-1: 2. Lösungswechsel, VE Seite	< 2	0,023	0,130	0,110	0,170	0,078	< 0,004	0,242
Mörtel 1-1: 5. Lösungswechsel, VE Seite	< 2	0,0758	0,240	0,225	0,460	0,231	0,100	0,198
Mörtel 1-1: 8. Lösungswechsel, VE Seite	< 2	0,088	0,280	0,244	0,580	0,260	< 0,40	0,247
Mörtel 1-1: Versuchsende, VE-Seite	-----							
Mörtel 1-1: Versuchsende, Druckseite (Salz)	44	23,0	21,0	35,8	50,0	38,9	22,0	0,108

Versuch 1-2 mit Lösungswechsel

Mörtel 1-2: 1. Lösungswechsel, VE Seite	< 1,0	< 0,05	0,021	< 0,1	0,016	< 0,05	0,0012	< 0,025
Mörtel 1-2: Versuchsende, Druckseite (Salz)	29	10,1	10	13,1	24	14,4	12	0,053

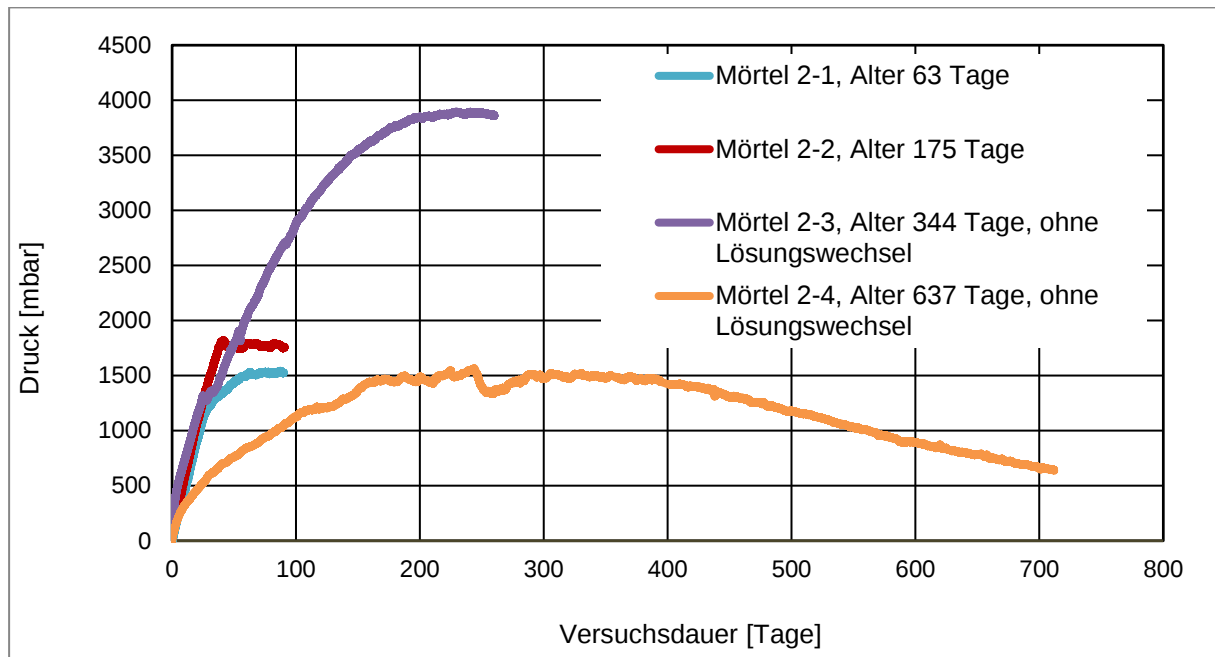


Abb. 24: Entwicklung des osmotischen Druckes in der geschlossenen Kammer von Mörtel 2. Bei Probe 2-4 konnten Risse auf der Zugseite festgestellt werden.

Tabelle 4: Chemische Analyse der Lösungen der Versuchsserie 2.

Mörtel 2: Zement CEM I 42,5 R-SR 0 (na), CEN Normsand, Mischungsverhältnis 1:3, w/z 0,55								
	Ethylenglykol	Na	Chlorid	K	Bromid	Rb	Nitrat	Ca
Probe	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L
Salzlösung	52,0	20,3	33,0	33,8	75,0	37,9	30,0	0,0065

Mörtel 2 Auslaugversuch mit Salzlösung, offene Seite	50,0	19,7	30,0	32,7	69,0	36,7	27,0	0,190
Mörtel 2 Auslaugversuch mit Salzlösung, Druckseite	49,0	19,2	30,0	31,9	67,0	35,7	27,0	0,240

Mörtel 2 Auslaugversuch mit VE-Wasser, offene Seite	–	0,003	0,020	0,012	0,030	< 5,0	< 0,02	0,280
Mörtel 2 Auslaugversuch mit VE-Wasser, Druckseite	–	0,004	0,030	0,026	0,060	< 5,0	0,02	0,340

Versuch 2-1 mit Lösungswechsel

Mörtel 2-1: 1. Lösungswechsel, VE Seite	< 2	0,130	0,490	0,530	0,970	0,560	0,200	0,454
Mörtel 2-1: 2. Lösungswechsel, VE Seite	< 2	0,420	1,000	1,200	2,100	1,300	0,590	0,467
Mörtel 2-1: Versuchsende, VE Seite	< 2	0,550	1,100	1,290	2,300	1,410	0,710	0,448
Mörtel 2-1: Versuchsende, Druckseite (Salz)	39	20,00	24,00	33,10	56,00	35,90	24,00	0,192

Versuch 2-2 mit Lösungswechsel

Mörtel 2-2: 1. Lösungswechsel, VE Seite	< 1,0	0,199	0,650	0,649	1,300	0,680	0,310	0,494
Mörtel 2-2: Versuchsende, VE Seite	< 2	0,629	1,30	1,50	2,90	1,670	0,850	0,575
Mörtel 2-2: Versuchsende, Druckseite (Salz)	44	16,20	24,0	26,3	55,0	28,4	24,0	0,322

Versuch 2-3 , ohne Lösungswechsel

Mörtel 2-3: Versuchsende, VE Seite	4,3	5,17	7,3	10,6	15	11,5	5,6	0,617
Mörtel 2-3: Versuchsende, Druckseite (Salz)	36	14,7	16	20,9	36	22,7	16	0,033

Versuch 2-4, ohne Lösungswechsel

Mörtel 2-3: Versuchsende, VE Seite	11	8,75	12	16,1	25	17,5	9,4	0,718
Mörtel 2-3: Versuchsende, Druckseite (Salz)	28	13,2	14	18,4	30	20,3	13	0,264

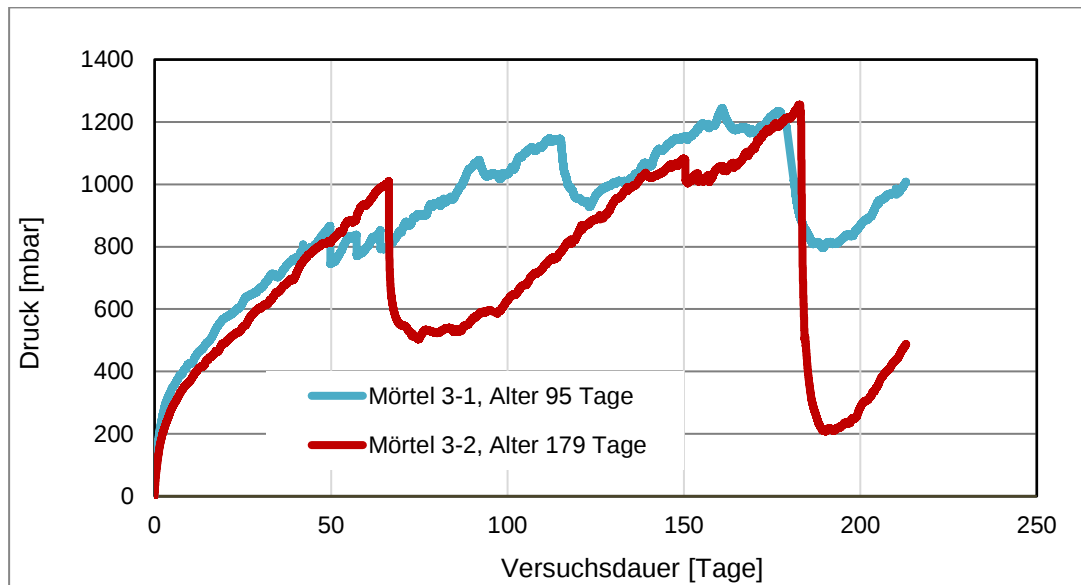


Abb. 25: Entwicklung des osmotischen Druckes in der geschlossenen Kammer von Mörtel 3.

Tabelle 5: Chemische Analyse der Lösungen der Versuchsserie 3.

Mörtel 3: Zement Dyckerhoff "PZ Doppel CEM I 42,5 R" mit hohem Alkaligehalt, Liaver, w/z 0,55								
	Ethylenglykol	Na	Chlorid	K	Bromid	Rb	Nitrat	Ca
Probe	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L
Salzlösung	52,0	20,3	33,0	33,8	75,0	37,9	30,0	0,0065

Mörtel 3 Auslaugversuch mit Salzlösung, offene Seite	51	19,4	30,0	33,6	70,0	35,9	29,0	0,227
Mörtel 3 Auslaugversuch mit Salzlösung, Druckseite	45	22,4	28,0	39,1	66,0	41,9	26,0	0,150

Mörtel 3 Auslaugversuch mit VE-Wasser, offene Seite	–	0,054	0,0038	0,068	< 0,004	< 0,01	< 0,004	0,295
Mörtel 3 Auslaugversuch mit VE-Wasser, Druckseite	–	0,076	0,0040	0,110	0,014	< 0,01	< 0,004	0,274

Versuch 3-1 mit Lösungswechsel

Mörtel 3-1: 1. Lösungswechsel, VE Seite	< 2	0,202	0,033	0,193	0,055	0,156	0,022	0,179
Mörtel 3-1: 2. Lösungswechsel, VE Seite	< 2	0,177	0,036	0,100	0,043	0,064	0,0089	0,211
Mörtel 3-1: 5. Lösungswechsel, VE Seite	< 2	0,168	< 0,20	0,148	< 0,40	0,118	< 0,40	0,123
Mörtel 3-1: Versuchsende, VE Seite	-----							
Mörtel 3-1: Versuchsende, Druckseite (Salz)	49	23,2	26,0	37,4	62,0	39,8	25,0	0,0945

Versuch 3-2 mit Lösungswechsel

Mörtel 3-2: 1. Lösungswechsel, VE Seite	< 1,0	0,175	0,019	0,123	0,027	0,070	0,011	0,174
Mörtel 3-2: Versuchsende, VE Seite	-----							
Mörtel 3-2: Versuchsende, Druckseite (Salz)	47	25,0	25,0	39,0	58,0	42,9	24,0	0,142

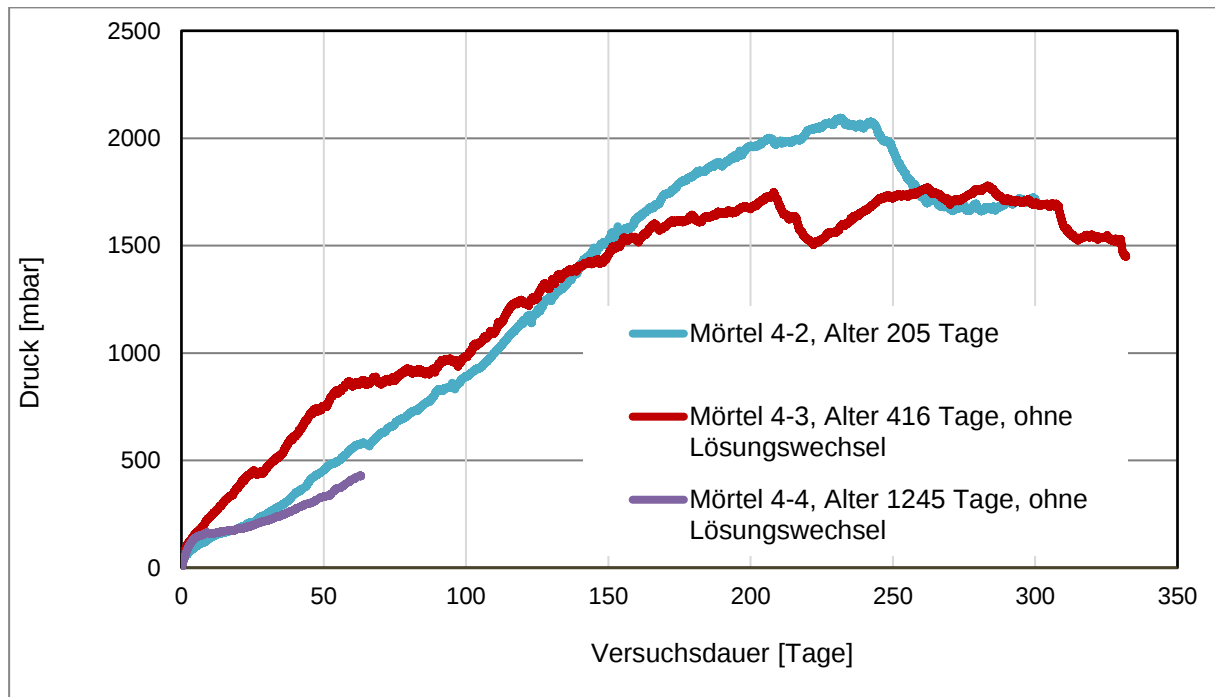


Abb. 26: Entwicklung des osmotischen Druckes in der geschlossenen Kammer von Mörtel 4. Versuch 4-4- diente vor allem zur Klärung des anfänglichen Druckverlaufs bei schnellem Aufbau und schnellem Beginn der Messung. Es konnte dabei wie in den anderen Versuchen ein stetig steigender Druck beobachtet werden. Auch wenn die hier eingesetzten Drucksensoren keine negativen Drücke messen können, gibt es keine Hinweise darauf, dass solche überhaupt auftreten.

Tabelle 6: Chemische Analyse der Lösungen der Versuchsserie 4.

Mörtel 4: Zement CEM I 42,5 R-SR 0 (na), CEN Normsand, Mischungsverhältnis 1:3, w/z 0,40								
	Ethylenglykol	Na	Chlorid	K	Bromid	Rb	Nitrat	Ca
	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L
Salzlösung	52,0	20,3	33,0	33,8	75,0	37,9	30,0	0,0065

Mörtel 4 Auslaugversuch mit Salzlösung, offene Seite	50	22,1	30,0	37,7	70,0	40,7	29,0	0,238
Mörtel 4 Auslaugversuch mit Salzlösung, Druckseite	50	21,2	31,0	26,3	69,0	39,1	28,0	0,236

Mörtel 4 Auslaugversuch mit VE-Wasser, offene Seite	-	< 0,025	< 0,20	< 0,10	< 0,40	< 0,050	< 0,40	0,268
Mörtel 4 Auslaugversuch mit VE-Wasser, Druckseite	-	< 0,025	< 0,20	< 0,10	< 0,40	< 0,050	< 0,40	0,316

Versuch 4-2 mit Lösungswechsel

Mörtel 4-2: 1. Lösungswechsel, VE Seite	< 1,0	< 0,050	0,051	0,104	0,063	0,0866	0,012	0,369
Mörtel 4-2: 2. Lösungswechsel, VE Seite	< 2	0,0468	0,230	0,189	< 0,40	0,189	< 0,40	0,345
Mörtel 4-2: Versuchsende, VE Seite	-----							
Mörtel 4-2: Versuchsende, Druckseite (Salz)	41	23,7	22,0	37,2	50,0	40,7	21,0	0,220

Versuch 4-3 ohne Lösungswechsel

Mörtel 4-3: Versuchsende, VE Seite	3	2,54	3,40	5,75	7,30	5,95	2,10	1,01
Mörtel 4-3: Versuchsende, Druckseite (Salz)	43	22,9	22,0	36,7	51,0	39,0	21,0	0,165

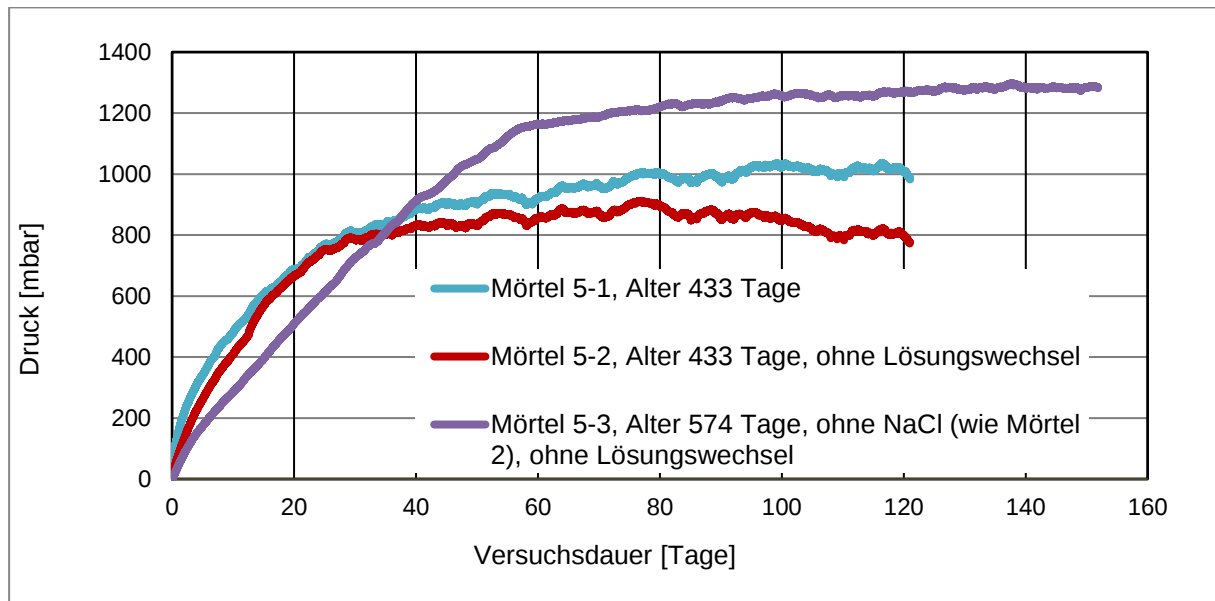


Abb. 27: Entwicklung des osmotischen Druckes in der geschlossenen Kammer von Mörtel 5.

Tabelle 7: Chemische Analyse der Lösungen der Versuchsserie 5.

Mörtel 5: Zement CEM I 42,5 R-SR 0 (na), CEN Normsand, Mischungsverhältnis 1:3, w/z 0,55 mit NaCl Lagerung								
	Ethylenglykol	Na	Chlorid	K	Bromid	Rb	Nitrat	Ca
Probe	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L
Salzlösung	52,0	20,3	33,0	33,8	75,0	37,9	30,0	0,0065

Mörtel 5 Auslaugversuch mit Salzlösung, offene Seite	50,0	19,7	30,0	32,7	69,0	36,7	27,0	0,19
Mörtel 5 Auslaugversuch mit Salzlösung, Druckseite	49,0	19,2	30,0	31,9	67,0	35,7	27,0	0,24

Mörtel 5 Auslaugversuch mit VE-Wasser, offene Seite	–	0,003	0,020	0,012	0,03	< 5,0	< 0,02	0,28
Mörtel 5 Auslaugversuch mit VE-Wasser, Druckseite	–	0,004	0,030	0,026	0,06	< 5,0	0,02	0,34

Versuch 5-1 mit Lösungswechsel

Mörtel 5-1: 1. Lösungswechsel, VE Seite	< 1,0	0,508	1,50	1,460	2,00	1,540	0,530	0,405
Mörtel 5-1: Versuchsende, VE Seite	-----							
Mörtel 5-1: Versuchsende, Druckseite (Salz)	40	21,2	21,0	33,4	46,0	35,4	20,0	0,158

Versuch 5-2 ohne Lösungswechsel

Mörtel 5-2: Versuchsende, VE Seite	4,5	2,22	5,10	7,624	9,60	8,20	2,80	0,846
Mörtel 5-2: Versuchsende, Druckseite (Salz)	38	18,8	21,0	28,8	45,0	30,5	19,0	0,194

Versuch 5-3 ohne Lösungswechsel, ohne NaCl-Lagerung

Mörtel 5-3: Versuchsende, VE Seite	4,8	3,95	5,90	9,46	13,0	9,98	3,70	0,632
Mörtel 5-3: Versuchsende, Druckseite (Salz)	39	17,5	19,0	26,1	42,0	27,8	18,0	0,0643

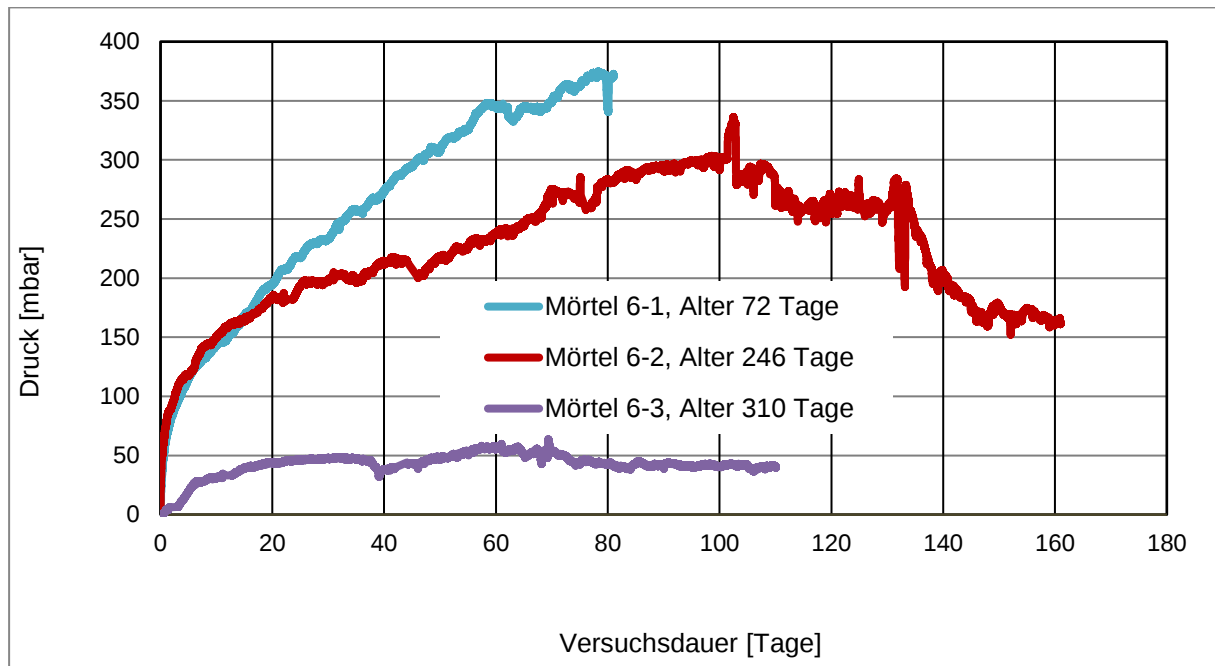


Abb. 28: Entwicklung des osmotischen Druckes in der geschlossenen Kammer von Mörtel 6.

Tabelle 8: Chemische Analyse der Lösungen der Versuchsserie 6.

Mörtel 6: Zement Dyckerhoff "PZ Doppel CEM I 42,5 R" mit hohem Alkaligehalt, Flugasche, CEN Normsand, Mischungsverhältnis 1:3, w/z 0,55								
	Ethylenglykol	Na	Chlorid	K	Bromid	Rb	Nitrat	Ca
Probe	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L
Salzlösung	52,0	20,3	33,0	33,8	75,0	37,9	30,0	0,0065

Mörtel 6 Auslaugversuch mit Salzlösung, offene Seite	43	19,0	29,0	36,0	68,0	39,0	27,0	0,159
Mörtel 6 Auslaugversuch mit Salzlösung, Druckseite	42	20,0	29,0	35,0	69,0	40,0	26,0	0,0983

Mörtel 6 Auslaugversuch mit VE-Wasser, offene Seite	–	< 0,01	0,0024	0,019	< 0,004	< 0,01	< 0,004	0,173
Mörtel 6 Auslaugversuch mit VE-Wasser, Druckseite	–	< 0,01	0,0022	0,034	0,01	< 0,01	< 0,004	0,126

Versuch 6-1 mit Lösungswechsel (Undichtigkeit nach 81 Tagen)

Mörtel 6-1: 1. Lösungswechsel, VE Seite	< 2	0,028	0,020	0,066	0,039	0,040	0,016	0,159
Mörtel 6-1: Abbruch, VE Seite	< 2	< 0,010	0,003	< 0,020	0,0053	< 0,010	< 0,004	0,066
Mörtel 6-1: Versuchsende, Druckseite (Salz)	-----							

Versuch 6-2 mit Lösungswechsel

Mörtel 6-2: 1. Lösungswechsel, VE Seite	< 1,0	< 0,05	0,0056	< 0,1	0,010	< 0,05	0,002	0,026
Mörtel 6-2: Versuchsende, VE Seite	-----							
Mörtel 6-2: Versuchsende, Druckseite (Salz)	46	26,547	28,0	44,717	63,0	46,841	25,0	0,044

Versuch 6-3 mit Lösungswechsel

Mörtel 6-3: 1. Lösungswechsel, VE Seite	< 1,0	< 0,05	0,005	< 0,1	0,009	< 0,05	0,002	< 0,025
Mörtel 6-3: Versuchsende, VE Seite	-----							
Mörtel 6-3: Versuchsende, Druckseite (Salz)	47	21,7	27,0	35,8	61,0	39,3	24,0	0,059

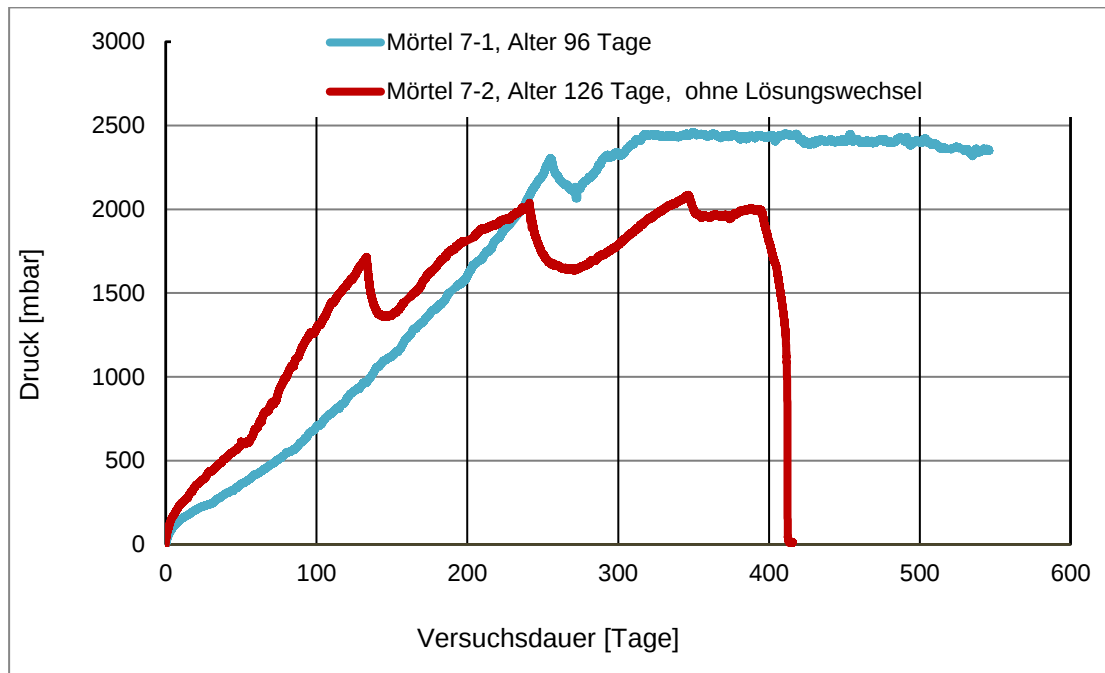


Abb. 29: Entwicklung des osmotischen Druckes in der geschlossenen Kammer von Mörtel 7. Der Grund für den plötzlichen Druckabfall von Probe 7-2 konnte nicht festgestellt werden. Die Glaskugeln des Mörtels 7 zeigten nach den Osmometerversuchen Reaktionsränder.

Tabelle 9: Chemische Analyse der Lösungen der Versuchsserie 7.

Mörtel 7: Zement Dyckerhoff "PZ Doppel CEM I 42,5 R" mit hohem Alkaligehalt, CEN Normsand, Glaskugeln								
	Ethylenglykol	Na	Chlorid	K	Bromid	Rb	Nitrat	Ca
Probe	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L	g/L
Salzlösung	52,0	20,3	33,0	33,8	75,0	37,9	30,0	0,0065
Mörtel 7 Auslaugversuch mit Salzlösung, offene Seite	53,0	24,4	30,0	40,7	67,0	43,8	26,0	0,0964
Mörtel 7 Auslaugversuch mit Salzlösung, Druckseite	52,0	24,8	29,0	41,2	65,0	44,3	25,0	0,0689
Mörtel 7 Auslaugversuch mit VE-Wasser, offene Seite	-	0,0539	0,035	0,141	0,034	0,103	0,014	0,180
Mörtel 7 Auslaugversuch mit VE-Wasser, Druckseite	-	0,110	0,091	0,230	0,150	0,192	0,063	< 0,025

Versuch 7-1 mit Lösungswechsel

Mörtel 7-1: 1. Lösungswechsel, VE Seite	< 1,0	< 0,05	0,110	< 0,1	0,016	< 0,05	0,0017	0,301
Mörtel 7-1: 8. Lösungswechsel, VE Seite	< 1,0	0,201	0,37	0,366	0,68	0,398	< 0,49	0,309
Mörtel 7-1: 11. Lösungswechsel, VE Seite	< 1,0	0,257	0,48	0,593	0,95	0,605	< 0,49	0,215
Mörtel 7-1: Versuchsende, VE-Seite	< 1,0	< 0,100	< 0,25	0,185	< 0,50	0,187	< 0,49	0,167
Mörtel 7-1: Versuchsende, Druckseite (Salz)	29	14,5	19	21,2	43	22,9	19	0,152

Versuch 7-2 ohne Lösungswechsel, Abbruch wegen Druckabfall

Mörtel 7-2: Versuchsende, VE Seite	2,2	1,60	3,5	3,75	7,4	3,84	2,1	0,741
Mörtel 7-2: Versuchsende, Druckseite (Salz)	40	16,6	22	25,4	50	27,9	21	0,116

Die Ergebnisse der Osmometerversuche lassen sich wie folgt zusammenfassen. Es zeigte sich in den Versuchen deutlich ein Aufbau eines osmotischen Druckes, was gleichzeitig bedeutet, dass die Mörtelscheiben als semipermeable Membranen wirken. Der maximale gemessene Druck liegt bei deutlich über 4 bar. Die gemessenen Drücke sind deutlich größer als in Auslaugversuchen bei denen auf beiden Seiten der Mörtelscheiben die gleiche Lösung anlag. Mit Wasser auf beiden Seiten gab es gar keinen Druckaufbau. Der osmotische Druck erreicht ein Maximum und anschließend ein Plateau bzw. einen langsamen Wiederabfall. Die Versuche sind sehr langwierig und einzelne Versuche haben über 2 Jahre gedauert. Ein systematischer Einfluss der vorgenommenen Lösungswechsel und des Probenalters zu Beginn des Versuchs war nicht erkennbar. Die Mörtel zeigen deutliche Unterschiede im maximal erreichten Druck und in der Geschwindigkeit des Druckaufbaus, allerdings mit einer erheblichen Streuung der Ergebnisse.

- Mörtel 1 erreichte innerhalb des Berichtszeitraumes maximal 4,5 bar (Minimum 1,6 bar). Der Druckaufbau innerhalb von 30 Tagen reicht von 0,15 bis 0,9 bar. Generell erfolgt der Druckaufbau relativ langsam. Es konnte ein lang anhaltendes Plateau des Maximaldruckes beobachtet werden.
- Mörtel 2 erreichte einen maximalen Druck von 3,9 bar (Minimum 1,5 bar). Der Druckaufbau innerhalb von 30 Tagen reicht von 0,6 bis 1,5 bar.
- Mörtel 3 erreichte maximal 1,2 bar. Der Druckaufbau innerhalb von 30 Tagen lag bei 0,65 bar. Mörtel 3 zeigte deutliche periodische Einbrüche des Drucks, die mit dem Kollaps von Blähglaskugeln in Verbindung gebracht werden können.
- Mörtel 4 erreichte 1,8 bis 2,1 bar. Der Druckaufbau innerhalb von 30 Tagen erfolgte mit 0,2 bis 0,5 bar relativ langsam.
- Mörtel 5 erreichte maximal 1,3 bar (Minimum 0,9 bar). Der Druckaufbau innerhalb von 30 Tagen lag bei 0,7 bis 0,8 bar. Es konnte ein lang anhaltendes Plateau des Maximaldruckes beobachtet werden.
- Mörtel 6 erreichte nur einen geringen Maximaldruck von 0,35 bar (Minimum 0,07 bar). Der Druckaufbau innerhalb von 30 Tagen lag bei 0,05 bis 0,25 bar.
- Mörtel 7 erreichte maximal 2,4 bar (Minimum 2,1 bar). Der Druckaufbau innerhalb von 30 Tagen betrug 0,25 bis 0,45 bar.

Die chemischen Analysen der Lösungen aus den Osmometerversuchen lassen folgende Schlüsse zu:

- Ausgelaugt aus den Mörtelproben wird wie zu erwarten vor allem Calcium.
- Bei den Mörteln konnte der Durchtritt aller in der Salzlösung gelösten Ionen festgestellt werden (Natrium, Chlorid, Kalium, Bromid, Rubidium, Nitrat). Die Konzentrationen waren deutlich größer als in den Auslaugversuchen.
- Im Falle des Ethylenglycols ist die Nachweisgrenze sehr schlecht. Bei den Versuchen 2-3, 4-3, 5-2 und 5-3 ohne Lösungswechsel konnte jedoch auch direkt der Durchtritt von Ethylenglycol beobachtet werden. Bei den anderen Versuchen konnte beobachtet werden, dass auf der Seite der hochkonzentrierten Lösung nach Versuchsende deutlich weniger Ethylenglycol enthalten war, das auch in diesen Fällen in die Mörtelprobe eingetreten sein muss und diese wahrscheinlich auch durchdrungen hat.
- Die hindurchgetretenen Mengen der verschiedenen Komponenten liegen alle in der gleichen Größenordnung. Dies korrespondiert mit der Beobachtung, dass die Diffusionskoeffizienten gelöster Spezies in Wasser sich nicht wesentlich (nicht um Größenordnungen) voneinander unterscheiden.

Demnach sind insbesondere die Mörtel 1 und 2 mit Wasserzementwert 0,55 für die Entstehung hoher osmotischer Drücke prädestiniert, wobei der Mörtel 2 mit alkaliarmem Zement besonders schnell reagiert. Mörtel 1 mit alkalireichem Zement und Mörtel 4 mit niedrigerem Wasserzementwert sind weniger gefährdet. Mörtel 6 mit Flugasche führt kaum zum Aufbau eines osmotischen Druckes. Mörtel 3 mit alkaliempfindlichem Blähglas zeigt nur am Anfang einen schnellen Druckaufbau. Mörtel 5, der bis auf

die Chloridbelastung Mörtel 2 entspricht, zeigt innerhalb der möglichen Streuungen keinen deutlichen Unterschied zu Mörtel 2. Mörtel 7 mit alkaliempfindlichem Zuschlag zeigt in den Osmometerversuchen keine Abweichungen gegenüber dem Mörtel 1.

2.1.6 Versuche mit Verbundkörpern

Diese Untersuchungen wurden in Weimar durchgeführt. Siehe DFG-Abschlussbericht.

2.1.7 Simulationsberechnungen

2.1.7.1 Grundlagen

Voraussetzung zur Entstehung eines osmotischen Druckes sind mindestens zwei Halbzellen, von denen mindestens eine ein näherungsweise konstantes Volumen hat sowie eine semipermeable Membran, die die Halbzellen trennt und die zumindest für eine der vorhandenen Spezies durchlässig ist. Im allgemeinen Fall ist die Membran nicht nur für eine Spezies durchlässig. In der Realität hat jede Halbzelle mit konstantem Volumen eine gewisse Nachgiebigkeit, kann ihr Volumen bei Druckerhöhung also in begrenztem Maße vergrößern. Näherungsweise wird von einem konstanten Volumen ausgegangen. Befinden sich in den Halbzellen unterschiedliche Lösungen führt dies zu Diffusionsprozessen der Spezies, für die die Membran durchlässig ist. Dieser Ausgleichsprozess führt zu einer Druckveränderung in den Halbzellen mit konstantem Volumen. Die entstehende Druckdifferenz ist der osmotische Druck. Das antreibende Potential für Diffusionsprozesse sind Unterschiede im chemischen Potential. Die Halbzellen müssen keine lösungsgefüllten Hohlkörper sein. Es können auch lösungserfüllte Poren in porösen Körpern sein, z.B. in mineralischen Baustoffen.

2.1.7.2 Ausgeführte Vorgehensweise

Der zunächst durchgeführte Versuch den osmotischen Druck theoretisch auf der Basis von Gleichgewichtsbetrachtungen zu berechnen, die auch die Grundlage des Van-'t Hoffschen Gesetzes bzw. seiner Abwandlungen bilden, ist gescheitert. Damit berechnete Drücke sind viel größer als die experimentell messbaren. Diese stellen einen theoretischen Grenzzustand unter Gleichgewichtsbedingungen dar. Bei der praktischen Nachrechnung eines Osmometerversuchs auf der Basis einer solchen Gleichung treten auch mehrere Unbekannte auf. Gleichungen auf der Basis solcher Gleichgewichtsbetrachtungen sind generell auch nicht geeignet, den zeitlichen Verlauf eines sich aufbauenden osmotischen Druckes zu beschreiben.

Deshalb wurde ein weiteres Berechnungsmodell für den osmotischen Druck und seiner Zeitfunktion in die Software Transreac implementiert. Es beruht darauf, die Transportprozesse der Stoffe zu berechnen, die die Membran durchdringen. Wasser wird dabei wie jede andere diffusionsfähige Spezies betrachtet. Als Selbstdiffusionskoeffizient von Wasser bei 25 Grad wurde $2,299 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ angesetzt (Holz et al. 2000). Dieser Wert wurde über das Verhältnis zum Bromdiffusionskoeffizient in Wasser in den Selbstdiffusionskoeffizient von Wasser in den verschiedenen Mörteln umgerechnet. Bei diesen Diffusionsberechnungen war es notwendig, das chemische Potential als antreibendes Potential zu benutzen, da nur so die Verlangsamung und das Zum-Erliegen-Kommen der Transportprozesse durch den Druckaufbau simuliert werden kann, und zwar für jede diffundierende Spezies. Entsprechende Ergänzungen wurden in Transreac vorgenommen. Die Berechnung des chemischen Potentials erfolgte wie in Schmidt-Döhl (1996) beschrieben, einschließlich der Benutzung des Pitzer-Modells. Grundlegend für die Diffusionsberechnung auf der Basis des chemischen Potentials ist die folgende Gleichung:

$$J = -K \delta\mu/\delta x = -K (R T / c) \delta c/\delta x = -D \delta c/\delta x \quad (\text{Gl. 1})$$

Dabei ist J die Teilchenstromdichte in $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, μ das chemische Potential in J mol^{-1} , x die Länge in m, R die allgemeine Gaskonstante in $\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, T die Temperatur in K, c die Stoffmengenkonzentration

in mol m^{-3} (in den Berechnungen wurde die mittlere Konzentration auf beiden Seiten der betrachteten Grenzfläche verwendet), D der Diffusionskoeffizient in $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ und K der Transportkoeffizient in $\text{mol}^2 \text{s kg}^{-1} \text{m}^{-3}$. Daraus ergibt sich, dass in den Transportberechnungen die Konzentration durch das chemische Potential ersetzt werden muss und der Diffusionskoeffizient D durch $D \cdot c \cdot R^{-1} \cdot T^{-1}$. Wenn in den Transportgleichungen bisher die Molalität im antreibenden Potential genutzt wird, muss im Ersatz von D auch die Molalität genutzt werden. Aus den transportierten Stoffmengen multipliziert mit dem jeweiligen partiellen molaren Volumen ergibt sich die Volumendifferenz ΔV in den Halbzellen mit dem Volumen V .

Die thermodynamischen Daten und die Pitzer-Parameter zur Berechnung der chemischen Potentiale wurden soweit möglich aus der Thereda-Datenbank entnommen (thereda.de). Diese basiert im Bereich der zementären Spezies auf der CEMDATA18-Datenbank (Lothenbach et al., 2019), ist jedoch durch die Verknüpfung mit dem Pitzer-Modell und entsprechenden Wechselwirkungsparametern anwendbar bis zu größten Ionenstärken. Die partiellen molaren Volumina gelöster Spezies in wässriger Lösung wurden soweit möglich aus Lothenbach et al. (2019) entnommen. Die thermodynamischen Daten von Br^- und Rb^+ wurden aus Wagmann et al. (1982) entnommen, das partielle molare Volumen aus Murthy (2020). Die thermodynamischen Daten von KBr und RbNO_3 wurden aus Wagmann et al. (1982) entnommen, die Dichte von KBr aus der Gestis Stoffdatenbank, die Dichte von RbNO_3 aus dem Sigma Aldrich Datenblatt. Die thermodynamischen Daten von Ethylenglykol wurden aus der Datenbank des NIST und der Korean Thermophysical Properties Datenbank entnommen, die Dichte aus der Gestis Stoffdatenbank. Die thermodynamischen Daten und die Dichte von Benzylalkohol wurden aus Synowitz (1983) entnommen. Die partiellen molaren Volumina von Ethylenglykol und Benzylalkohol wurden aus der Dichte und dem Molvolumen berechnet. Diese Werte unterscheiden sich nur sehr geringfügig von Literaturwerten (Striteska et al. 2004, Sakurai, 1991).

Mit Hilfe des Kompressionsmoduls kann man nach der folgenden Gleichung die entstehende Druckdifferenz ausrechnen. Als Kompressionsmodul K wurde der Wert von Wasser ($2,08 \text{ GPa}$) angesetzt. Bei Versuchen bei denen eingeschlossene Luft komprimiert wurde, wurde der Mittelwert aus dem isothermen Kompressionsmodul K ($1,01 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) und dem adiabatischen Kompressionsmodul K ($1,42 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) von Luft verwendet: $1,22 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Der osmotische Druck entspricht der Summe der Druckdifferenzen der Halbzellen. Im Falle nur einer geschlossenen Halbzelle ist die Druckdifferenz der offenen Halbzelle gleich Null und die Druckdifferenz der geschlossenen Halbzelle entspricht dem osmotischen Druck. Die Druckdifferenzen finden wiederum bei der Berechnung des chemischen Potentials Berücksichtigung.

$$\Delta p = K \Delta V / -V. \quad (\text{Gl. 2})$$

2.1.7.3 Simulation der Osmometerversuche

Zunächst wurden die Osmometerversuche simuliert. Simuliert wurden die Mörtel 1, 2, 4 und 6. Die Mörtel 3 und 7 stellten Varianten des Mörtels 1 dar, bei denen alkaliempfindliche Gesteinskörnung vorhanden war. Im Osmometerversuch zeigten diese Varianten ein ähnliches Verhalten wie die jeweiligen Basismörtel. Beim Mörtel 3 kamen Druckeinbrüche hinzu, die mit hoher Wahrscheinlichkeit auf das Kollabieren von geschlossener Porosität in dem hier vorhandenen Blähglas zurückzuführen sind. Dies ist ein Effekt, der mit Transreac nicht simuliert werden kann. Der Mörtel 5 entsprach dem Mörtel 2 mit einer Anreicherung von Chlorid auf der Oberfläche. Auch er zeigte im Osmometerversuch ein ähnliches Verhalten wie der Basismörtel und wurde aus diesem Grund nicht simuliert.

Die beiden Lösungen der Osmometerversuche wurden durch ihre tatsächliche Zusammensetzung abgebildet. Die Mörtel wurden in den Simulationen aus Gründen der Rechenzeit vereinfacht über ihre Porenflüssigkeit abgebildet. Zusätzlich wurde noch Calciumhydroxid mit modelliert. Die Konzentration der anderen Feststoffe wurde als konstant angesehen und nicht mit modelliert. Ermittelt wurden diese

Startzusammensetzungen der Mörtel durch eine vorherige thermodynamische Modellierung des kompletten Mörtels unter Berücksichtigung aller möglichen hier relevanten Phasen, über die thermodynamische Größen bekannt sind, der chemischen Analyse der Zemente und Annahmen hinsichtlich der Hydratationsgrade der Zementkomponenten. Diese Annahmen können aus Schmidt-Döhl (1996) entnommen werden. Bei der Flugasche in Mörtel 6 wurde näherungsweise angenommen, dass sie aus amorphem SiO_2 besteht und einen Hydratationsgrad von 30 % aufweist. Die benutzten Startzusammensetzungen sind in der folgenden Tabelle wiedergegeben. Bei den Porenlösungszusammensetzungen wurden sehr kleine Korrekturen vorgenommen, um die für die Simulationen der Versuche notwendige elektrische Neutralität sicherzustellen. Der kleinere Portlanditgehalt des Mörtels 6 ist deutlich erkennbar.

Tab. 10: Startzusammensetzungen der Lösungen und Materialien in Mol/m^3 . Fett gesetzte Konzentrationen wurden in den Simulationen der Osmometerversuche und Verbundversuche berücksichtigt. Sehr kleine Konzentrationen sind nicht dargestellt, ss-solid solution.

	Mörtel 1	Mörtel 2	Mörtel 4	Mörtel 6	Wasser	Salzlösung
Goethit	152,4	416,3	439,4	104,14		
Al(OH)_4^-	0,131	$8,41 \cdot 10^{-2}$	$9,15 \cdot 10^{-2}$	$8,529 \cdot 10^{-2}$		
OH^-	114,63	61,801	64,088	77,459		
$\text{SiO}_2(\text{OH})_2^{2-}$	$6,82 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$2,02 \cdot 10^{-3}$	$3,11 \cdot 10^{-3}$		
H_2O	9680,7	9680,7	7726,8	8143,1	55509,0	55509,0
Ca(OH)_2	2339,6	2519,9	2661,5	695,39		
8 Endglieder CNASH-ss						
INFCA	11,4	12,3	13,0	13,497		
5CNA	16,3	8,27	9,31	12,873		
5CA	399,1	418,9	443,1	470,695		
INFCNA	5,72	2,27	2,61	3,89		
INFCN	17,3	6,92	7,89	12,397		
TobH	0,55	0,55	0,574	0,659		
T5C	122,1	121,4	127,6	144,83		
T2C	863,6	851,2	896,2	1023,19		
2 Endglieder SO_4 OH AFm ss						
C_4AH_{13}	8,59	15,7	13,38	3,86		
Monosulfat	140,4	139,1	146,72	60,139		
2 Endglieder Ettringit-ss						
30 H_2O	5,73			6,18		
32 H_2O	23,9	$2,10 \cdot 10^{-4}$	$2,10 \cdot 10^{-4}$	26,03		
SO_4^{2-}	0,55	$5,50 \cdot 10^{-2}$	$9,019 \cdot 10^{-2}$	0,240		
Na^+	5,622	2,33	1,6582	2,617		1000,0
K^+	109,89	59,187	62,369	75,187		1000,0
Ca^{2+}	0,109	0,197	0,12059	0,113		
$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$						1000,0
NO_3^-						500,0
Cl^-						1000,0
Br^-						1000,0
Rb^+						500,0

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die Simulation der Osmometerversuche.

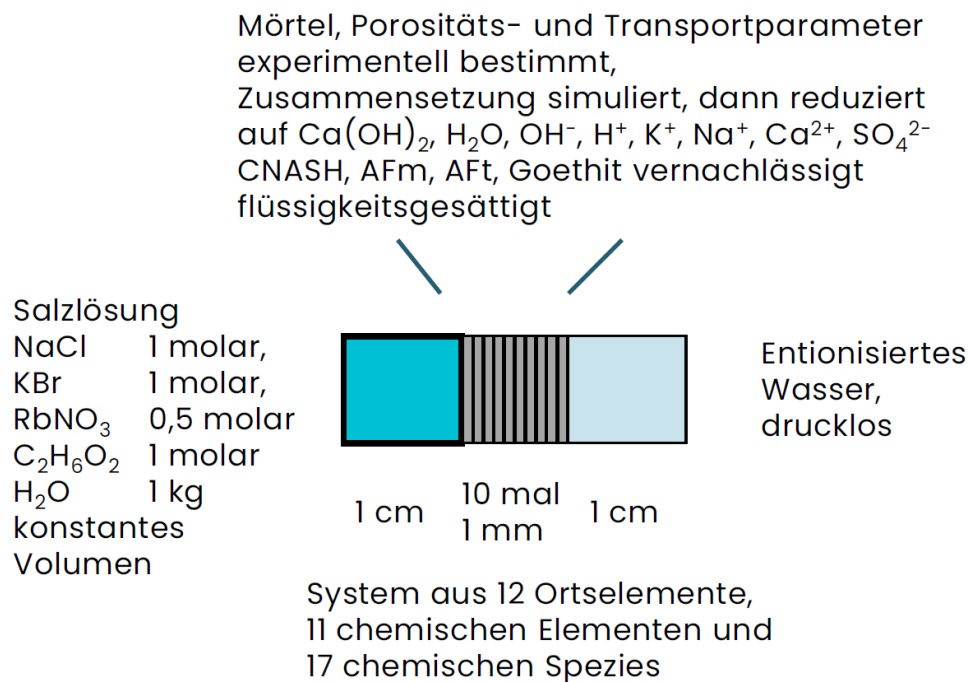


Abb. 30: Überblick über die Simulation der Osmometerversuche.

Die Simulationen der Osmometerversuche haben gezeigt, dass es notwendig ist, die durch die Transportprozesse bedingten Druckänderungen an jedem Ortselement zu berechnen, auch in den Feststoffelementen, nicht nur in den Lösungselementen. Ansonsten wird bei den Simulationen der Osmometerversuchen z.B. sehr viel Wasser in das am Reinwasser anliegende Ortselement hinein transportiert. Erst wenn der dadurch entstehende Druckaufbau simuliert wird, unterbleibt dieser in der Realität nicht auftretende Wassertransport und die Feuchtegehalte in den Feststoffproben übersteigen nicht die vorhandene Porosität. Es hat sich weiterhin als wichtig herausgestellt, bei der Simulation der Osmometerversuche kapillare Transportprozesse und Wasserdampfdiffusion auszuschalten, da bereits sehr geringe Transportleistungen dieser Prozesse die Druckberechnung empfindlich stören. Weil bereits sehr kleine Konzentrationsänderungen große Drucksprünge auslösen, ist es auch notwendig, mit sehr kleinen Zeitschrittweiten zu simulieren.

Die Berechnung der Osmometerversuche mit Hilfe der Diffusion von Wasser und der gelösten Spezies, den partiellen molaren Volumen und dem Kompressionsmodul von Wasser lieferte eine realistische Zeitfunktion des osmotischen Drucks, aber im Vergleich mit den experimentellen Messwerten einen zu großen osmotischen Druck, in der Spitze etwa 18 bar. Im Einzelnen wurden folgende Ergebnisse berechnet:

Mörtel 1	Simulation:	17 bar nach 290 Tagen
	Osmometerversuch:	1,6 bis 4,5 bar nach 250 bis 500 Tagen
Mörtel 2	Simulation:	18 bar nach 100 Tagen
	Osmometerversuch:	1,5 bis 3,9 bar nach 40 bis 230 Tagen
Mörtel 4	Simulation:	17,3 bar nach 1 Jahr
	Osmometerversuch:	1,8 bis 2,1 bar nach 230-290 Tagen
Mörtel 6	Simulation:	6 bar nach 12 Tagen
	Osmometerversuch:	0,07 bis 0,35 bar nach 60 bis 100 Tagen

Um die Ursache für das insgesamt zu große Druckniveau zu finden wurden mehrere Parameter der Simulation variiert. Die Ergebnisse waren wie folgt:

1. Der Kompressionsmodul ist eine sehr wichtige Größe, um die Volumenveränderungen durch die Transportprozesse in einen Druck umzurechnen. Er hängt wiederum vom Druck selbst ab. Der Kompressionsmodul von Wasser beträgt bei Luftdruck 2,08 GPa und bei 1000 bar 2,68 MPa. Die Druckabhängigkeit des Kompressionsmoduls wurde in dieser Forschungsarbeit näherungsweise vernachlässigt, da nur ein eingeschränkter Bereich moderater Drücke auftritt. In dieser Arbeit wurde der Kompressionsmodul von Wasser bei Luftdruck verwendet. Wie die Berechnungsgleichung vermuten lässt, ist der Maximaldruck in etwa proportional zum Kompressionsmodul. Auch wenn die Versuchsanlage eine gewisse Nachgiebigkeit hat, kann der zu hohe berechnete osmotische Druck nicht auf einen zu großen angesetzten Kompressionsmodul zurückgeführt werden.
2. Als nächstes wurde untersucht, inwieweit eine mögliche Sperrwirkung des Mörtels gegenüber einzelnen Spezies den osmotischen Druck verändert. Die Annahme, dass Ethylenglykol, Nitrat, oder gelöstes Rubidium nicht diffundieren (Diffusionskoeffizient gleich Null), veränderte die Ergebnisse jedoch nur wenig. Bei allen anderen an den Osmometerversuchen beteiligten gelösten Spezies ist bekannt, dass sie in zementären Werkstoffen diffusionsfähig sind, so dass diese Werte nicht variiert wurden. Des Weiteren haben die experimentellen Analysenergebnisse der Lösungen gezeigt, dass auch Ethylenglykol, Nitrat und gelöstes Rubidium durch die Mörtel diffundieren.
3. Versuchsweise wurde die Druckberechnung auch mit den Aktivitäten der gelösten Spezies anstatt mit der Konzentration durchgeführt. Dies hat den maximalen osmotischen Druck etwas erniedrigt, aber nicht wesentlich.
4. Schließlich wurden die Diffusionskoeffizienten aller Spezies um den gleichen Faktor variiert. Die Vergrößerung aller Diffusionskoeffizienten hat sowohl die Geschwindigkeit des Anstiegs des osmotischen Druckes vergrößert, als auch den berechneten Maximaldruck.

Aus diesen Parameterstudien kann man schließen, dass eine realistische Berechnung des maximalen osmotischen Druckes im Allgemeinen nur möglich ist, wenn man einen zusätzlichen Permeationsprozess annimmt, der die entstehenden Druckunterschiede erniedrigt. Um diesen zu berücksichtigen wurde das Modul zur Berechnung von Permeationsprozessen von Transreac verwendet, das laminare Strömungen nach Darcy berechnen kann. Bei diesen Berechnungen konnte nicht der in den Diffusionsberechnungen erhaltene Druckverlauf im Feststoff zugrunde gelegt werden, da dieser in der Regel in den Feststoffelementen einen größeren Druck ergab, als in den Lösungselementen, was in der Permeationsberechnung dazu führt, dass zusätzliche Lösung in die Lösungselemente hineingedrückt wird. Für die Permeationsberechnung wurde daher die Druckdifferenz zwischen den Lösungselementen zugrunde gelegt und, da hier eine homogene Mörtelprobe vorliegt, mit einem linearen Druckverlauf dazwischen. Damit konnte durch Einstellung des Permeabilitätskoeffizienten ein den experimentellen Versuchen sehr ähnlicher Druckverlauf erzielt werden. Die dafür notwendigen Permeabilitätskoeffizienten sind aber kleiner, als für die hier verwendeten Mörtel zu erwarten sind. Die Erklärung dafür dürfte darin zu finden sein, dass hier kein „normaler“ Permeationsprozess vorliegt mit einem linearen Druckverlauf über die homogene Probe. Die folgenden Abbildungen zeigen die berechneten Druckverläufe bei den einzelnen Mörteln.

Man kann erkennen, dass bei allen Simulationen ein starker Anfangspeak auftritt, der in den Laborexperimenten nicht beobachtet werden konnte. Die Ursache für diesen Anfangspeak ist unklar. Er handelt sich aber nur um einen Anfangseffekt. Ähnlich verhält es sich auch mit der anfänglichen Druckabnahme, z.T. bis in den negativen Bereich. Dies konnte in den hier durchgeführten Osmometerversuchen ebenfalls nicht beobachtet werden.

Die Simulationen der Mörtel 1 und 2 zeigen im Vergleich mit den experimentellen Daten eine gute Übereinstimmung des zeitlichen Verlaufs des Druckes. Auch die deutlich unterschiedlichen Zeitfunktionen

des Druckverlaufs der beiden Mörtel lassen sich gut simulieren. Mit einem Permeabilitätskoeffizienten $k=5 \cdot 10^{-16}$ m/s (Mörtel 1) und $k=1 \cdot 10^{-15}$ m/s (Mörtel 2) entspricht auch der Maximaldruck den experimentellen Daten. Rechnet man den Mörtel 1 mit den Diffusionskoeffizienten und dem Permeabilitätskoeffizienten des Mörtels 2 ergibt sich ein Druckverlauf der weitgehend dem des Mörtels 2 entspricht. Die Diffusionskoeffizienten sind also die entscheidenden Größen. Die unterschiedliche chemische Zusammensetzung der Porenflüssigkeit hat dagegen nur einen geringen Einfluss.

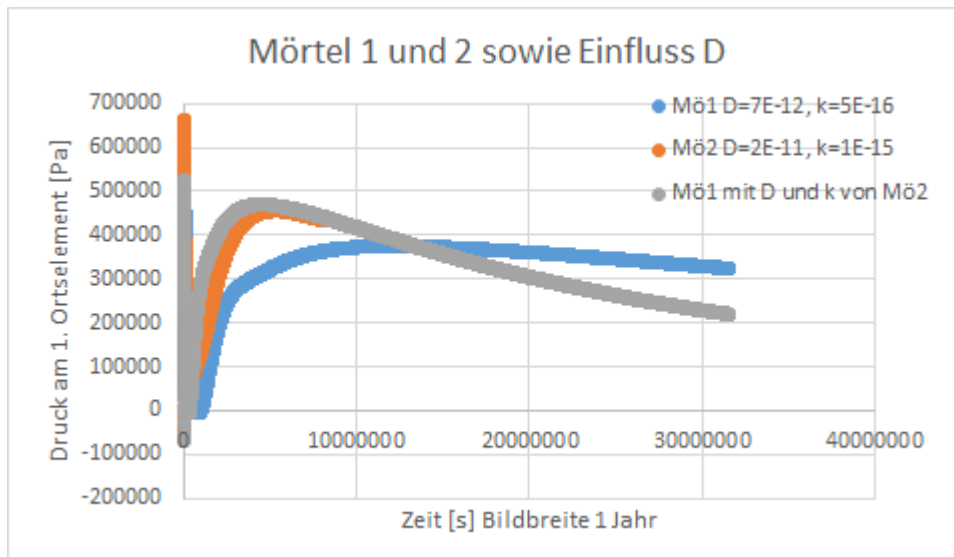


Abb. 31: Simulierter Verlauf des Druckes (absolut) am 1. Ortselement für Mörtel 1 und Mörtel 2.

Der Druckaufbau bei Mörtel 4 ist in der Simulation im Vergleich zu den Osmometerversuchen etwas zu schnell, aber nicht wesentlich. Mörtel 1 und 4 haben den gleichen Diffusionskoeffizienten und verhalten sich deshalb auch ähnlich. Mit einem Permeabilitätskoeffizienten $k=2 \cdot 10^{-16}$ m/s (Mörtel 4) entspricht auch der Maximaldruck den experimentellen Daten.

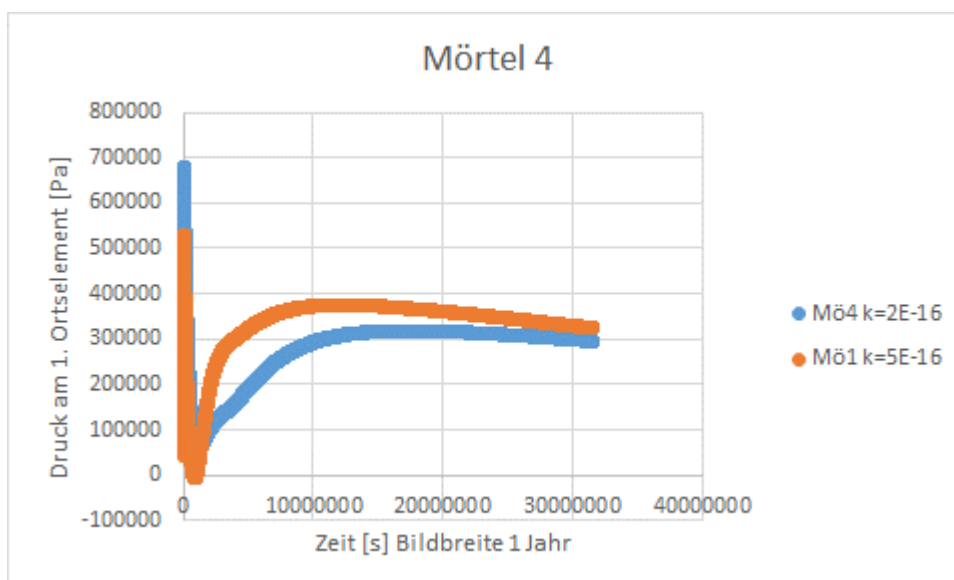


Abb. 32: Simulierter Verlauf des Druckes (absolut) am 1. Ortselement für Mörtel 4 im Vergleich mit Mörtel 1. Mörtel 4: $k=2 \cdot 10^{-16}$ m/s.

Der Mörtel 6 zeigt in den Osmometerversuchen teilweise Drücke, wie sie auch in den Blindversuche mit Salzlösung auftreten. Ob überhaupt ein osmotischer Druck entsteht ist daher bei diesem sehr dichten Mörtel fraglich. Bis auf den Anfangspeak entspricht die Simulation diesem Verhalten.

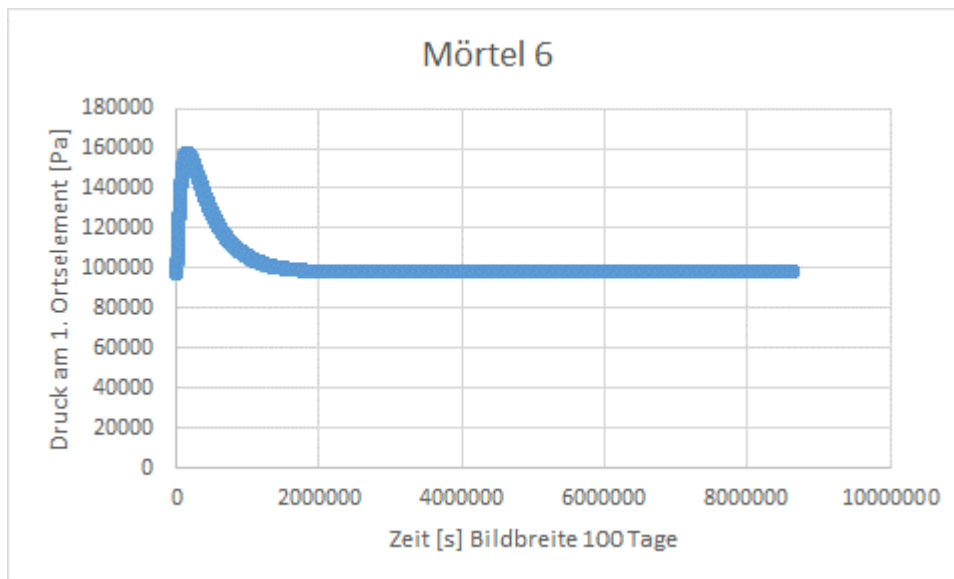


Abb. 33: Simulierter Verlauf des Druckes (absolut) am 1. Ortselement für Mörtel 6, $k=1 \cdot 10^{-14}$ m/s.

Bei den durchgeführten Osmometerversuchen haben die gelösten Stoffe der Salzlösung in der Regel ein positives partielles molares Volumen, so dass durch die Ausdiffusion der gelösten Stoffe der Druck in der geschlossenen Halbzelle erniedrigt wird. Die Ausdiffusion von Bestandteilen der Porenlösung des Baustoffs in die angrenzenden Lösungen wirkt dem wiederum entgegen, spielt aber nur eine untergeordnete Rolle. Auch Spezies mit negativem partiellem molarem Volumen spielen nur eine untergeordnete Rolle. Da die Probe anfänglich viele Bestandteile der Salzlösung jedoch nicht enthält, ist diese Ausdiffusion von gelösten Stoffen aus der geschlossenen Halbzelle in die Baustoffprobe am Anfang sehr viel schneller als später. Es muss sich erst ein diffusiv bedingtes Konzentrationsprofil in der Probe einstellen, was neben der Veränderung des chemischen Potentials durch den Druck selbst ein Aspekt der Zeitfunktion liefert.

Man kann in den Simulationen auch feststellen, dass beim Kontakt von porösen Werkstoffen mit einer Lösung innerhalb des Werkstoffs hohe osmotisch bedingte Drücke auftreten können. Der osmotische Druck innerhalb eines porösen Werkstoffs ist i.d.R. jedoch ein hydrostatischer Druck auf das Feststoffgerüst und führt daher nicht zu einer Rissbildung. Geschlossene Porosität kann jedoch kollabieren, wie dies im Falle des Mörtel 3 auch beobachtet wurde. Am Rande eines beschichteten porösen Bauteils wirkt dieser Druck jedoch gegen die Beschichtung und könnte diese wegdrücken, alleine aufgrund der osmotischen Druckwirkung der Porenflüssigkeit, ohne dass dafür ein größerer Hohlraum vorhanden sein muss. Eine weitere Konsequenz ist, dass die Phasen in einem Bauteil aus einem porösen Werkstoff, das in Kontakt steht mit Lösung, aufgrund von osmotischen Prozessen unter hohem Druck stehen können. Diese hohen Drücke werden bei thermodynamischen Berechnungen von Bauteilen mit einer Porenflüssigkeit bisher i.d.R. nicht berücksichtigt. Der Druck hat aber eine Wirkung auf die chemischen Potentiale, die zurzeit nicht berücksichtigt wird. Thermodynamische Berechnungen mineralischer Baustoffe werden zurzeit i.d.R. bei 1 bar durchgeführt.

2.1.7.4 Simulation der Verbundkörperversuche mit Fußbadlagerung und wassergesättigten Probekörpern

Diese Simulationen wurden mit einem System aus 10 Mörtel-Ortselementen mit je 6 mm Dicke (Ortselemente 2-11) und einem anschließenden Wasser-Ortselement mit 1 cm Dicke durchgeführt (Ortselement 1). Die Feststoff-Ortselemente waren wassergesättigt. Die Zusammensetzung des Wasser-Ortselementes wurde nicht konstant gesetzt und das Wasser wurde auch nicht regelmäßig ausgetauscht, so dass dort eine Aufkonzentration von Spezies auftrat, die aus dem Festkörper hindusdiffundierten. Die Temperatur wurde auf 20 Grad Celsius gesetzt. Dies entspricht den experimentellen Laborversuchen. Die Reaktionsharzbeschichtung wurde nicht als Ortselement abgebildet, sondern nur über die Systemgrenze am Ortselement 11. Simuliert wurden analog zu den Laborexperimenten die Mörtel 1, 2 und 4. Simuliert wurde ein Zeitraum von 1 Jahr. Die Mörtel entsprachen denen der Simulationen der Osmometerversuche. Bei all diesen Berechnungen trat an Ortselement 11 kein Überdruck auf und dementsprechend auch kein möglicher Schaden der Grenzfläche zur Reaktionsharzbeschichtung. Durch Ausdiffusion gelöster Spezies konnte vielmehr ein geringe Druckabnahme beobachtet werden. Die fehlende Schädigung entspricht weitgehend den Beobachtungen aus den Laborversuchen in Weimar.

2.1.7.5 Simulation der Verbundkörperversuche mit Fußbadlagerung und trocken vorgelagerten Probekörpern

Diese Simulationen wurden analog zu denen der Fußbadlagerung wassergesättigter Probekörper durchgeführt. Abweichend wurde den Probekörpern die Desorptionsfeuchte bei 65 % relativer Luftfeuchte vorgegeben, so dass eine kapillare Feuchteaufnahme bis zur maximalen freien Wasseraufnahme berechnet wurde. Parallel zum kapillaren Transportprozess entwickelte sich in den Ortselementen durch die zusätzlich eindringende Stoffmenge von Wasser und gelösten Spezies ein Überdruck, der aber nicht als osmotischer Druck aufzufassen ist, sondern durch die Kompression der eingeschlossenen Luft entsteht. Dementsprechend wurde als Kompressionsmodul für die Druckberechnung der Mittelwert aus dem isothermen und dem adiabatischen Kompressionsmodul der Luft von $1,22 \cdot 10^5$ Pa benutzt. Bei diesen Simulationen wurde für den Mörtel 1 ein maximaler Überdruck von 0,09 bar berechnet, beim Mörtel 2 von 0,10 bar und beim Mörtel 4 von 0,07 bar. Diese Daten zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem Verhalten der verschiedenen beschichteten Mörtel in den Laborversuchen in Weimar.

2.1.7.6 Simulation der Verbundkörperversuche mit trocken vorgelagerten Probekörpern und Kondensationsfeuchte

Es wurden keine Simulationen der Verbundkörperversuche mit trocken vorgelagerten Probekörpern und der Erzeugung einer Kondensationsfeuchte durchgeführt, da daraus keine neuen Erkenntnisse zu erwarten waren. Die Kondensationsfeuchte wird kapillar aufgenommen und erzeugt dann einen ähnlichen Prozess wie bei der Fußbadlagerung trocken vorgelagerter Probekörper.

2.1.8 Diskussion

Es hat sich herausgestellt, dass in den Verbundkörperversuchen mit wassergesättigten Probekörpern und Fußbadlagerung kein Druckaufbau unter der Abdichtung berechnet wurde. Dies entspricht den experimentellen Ergebnissen, bei denen unter diesen Bedingungen nahezu keine Blasenbildung beobachtet werden konnte. Bei den Verbundkörperversuchen mit trocken vorgelagerten Probekörpern und Fußbadlagerung wurde ein Druckaufbau unter der Abdichtung berechnet. Dabei handelt es sich jedoch nicht um einen osmotischen Druck. Dieser Druck entsteht durch das Eindringen von zusätzlicher Porenlösung in die entsprechenden Ortselemente der Mörtel aufgrund der kapillaren Transportprozesse. Dabei wird die dort vorher vorhandene Luft komprimiert. Die Abfolge der Drücke in Abhängigkeit vom Mörtel entspricht dabei dem Verhalten in den experimentellen Laborversuchen. Laborexperiment und rechnerische Simulation führen daher zu gleichen Ergebnissen. Man muss allerdings feststellen, dass die Entstehung von Blasen zwischen Betonuntergrund und Reaktionsharzbeschichtung in der Regel nicht auf die Bildung osmotischer Drücke zurückgeführt werden kann, mit dem Betonuntergrund als semipermeable Membran. Gleichzeitig konnte nachgewiesen werden, dass Mörtel und Beton als semipermeable

Membran wirken und bei entsprechend aufgebauten Systemen dadurch osmotische Drücke entstehen können, die im Bereich von mehreren bar liegen.

2.1.9 Erarbeitung von Hinweisen und Erstellung eines Leitfadens

Hinweise zur Vermeidung von Blasen zwischen Betonuntergrund und Reaktionsharzbeschichtung, aufbauend auf den experimentellen und rechnerischen Ergebnissen des Projektes, sind in dem DFG-Arbeitsbericht aufgeführt. Hier werden nur Hinweise aufgeführt, die sich aus den Osmometerversuchen und deren Simulation ergeben haben und die für entsprechende Systeme relevant sind, bei denen Beton oder Mörtel als semipermeable Membran wirkt. Als Beispiel sei eine Mörtelbeschichtung auf der Innenseite eines Wasserbehälters genannt.

1. Betone und Mörtel wirken als semipermeable Membranen und können daher unter geeigneten Randbedingungen zur Bildung von osmotischen Drücken führen.
2. Die Bildung von osmotischen Drücken setzt keine flüssigkeitsgefüllte Schicht voraus. Auch der Porenraum eines porösen Baustoffs kann als osmotische Halbzelle wirken.
3. Die Diffusion von Wasser in Richtung des negativeren chemischen Potentials (der höher konzentrierten Lösung bzw. Porenlösung) erhöht dort den Druck, da das molare Volumen von Wasser positiv ist. Dies ist lange bekannt und ist die Grundlage der „klassischen“ Osmose. In einem gesättigten geschlossenen System wird der Wassergehalt in der Probe selbst durch die Wasserdiffusion in die Halbzelle mit höher konzentrierter Lösung kaum verändert.
4. Die im Lösungsmittel gelösten Stoffe diffundieren in Richtung des negativeren chemischen Potentials. In der Regel ist dies der Ort niedrigerer Konzentration. Ob die dadurch hervorgerufene Konzentrationsänderung den Druck erhöht oder erniedrigt hängt vom partiellen molaren Volumen der Spezies ab. So haben Ca^{2+} , Na^+ , OH^- , Fe^{3+} , Al^{3+} und CO_3^{2-} ein negatives partielles molares Volumen. Eine Konzentrationserhöhung dieser Spezies erniedrigt also den Druck. Bei NO_3^- , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Br^- , Rb^+ , Ethylenglykol, Benzylalkohol sowie HSiO_3^- , CO_2^0 , HCO_3^- und HSO_4^- ist es umgekehrt. Konzentrationsveränderungen des H^+ Ions haben praktisch keinen Einfluss auf den Druck.
5. Die Summe der Bewegungen von Wasser und gelösten Stoffen zusammen mit deren partiellen molaren Volumina und dem relevanten Kompressionsmodul bestimmt die zeit- und ortsabhängige Veränderung des Druckes.
6. Der Einfluss der chemischen Zusammensetzung der Betonporenflüssigkeit ist bei Betonen und Mörteln mit üblichen Normalzementen nur sehr gering. Allerdings hat die chemische Zusammensetzung der Zemente bei gleichem Wasserzementwert über den Einfluss auf die Struktur auch einen Einfluss auf die Transportkoeffizienten.
7. Je größer die Diffusionskoeffizienten des zementären Werkstoffs sind (je weniger dicht der Werkstoff), umso schneller baut sich der Druck auf. Gleichzeitig steigt auch der Maximaldruck an.
8. Die mit dem Aufbau osmotischer Drücke einsetzende Permeation wirkt diesem Druckaufbau entgegen. Je größer der Permeationskoeffizient ist (je weniger dicht der Werkstoff), umso größer ist diese Verminderung. Allerdings ist dieser Effekt nur wirksam, wenn es in dem osmotischen System eine offene Halbzelle gibt, über die der Druck abgebaut werden kann. Außerdem hat die Permeation im Gegensatz zur Diffusion näherungsweise keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit des Druckaufbaus. Da die negativen Folgen eines schnellen Druckanstieges weniger stark durch Relaxationsprozesse abgebaut werden können, ist es sinnvoll die Geschwindigkeit des Druckanstieges durch Verminderung des Diffusionskoeffizienten zu verringern.
9. Das Beispiel des Mörtels 6 zeigt, dass im Falle eines Materials mit hoher Dichtigkeit der Maximaldruck deutlich absinkt. Die druckaufbauende Wirkung hoher Diffusion überwiegt also die druckabbauende Wirkung hoher Permeabilität.
10. Ideal zur Vermeidung von großen osmotischen Drücken durch die Wirkung von Beton und Mörtel als semipermeable Membran sind also Betone und Mörtel mit kleinen Diffusionskoeffizienten und geringen Konzentrationen gelöster Spezies in der Porenflüssigkeit.

2.1.10 Literatur

Gestis Stoffdatenbank. www.gestis.dguv.de

Holz, M.; Heil, S.R.; Sacco, A.: Temperature-dependent self-diffusion coefficients of water and six selected molecular liquids for calibration in accurate 1H NMR PFG Measurements. In: Phys. Chem. Chem. Phys. Vol. 2, p. 4740–4742; doi:10.1039/b005319h, 2000.

Korean Thermophysical Properties Databank. www.mdldb.com/

Lothenbach, B.; Kulik, D.; Matschei, T.; Balonis, M.; Baquerizo, L.; Dilnesa, B.; Miron, G.D.; Myers, R.J.: Cemdata18: A chemical thermodynamic database for hydrated Portland cements and alkali-activated materials. Cement and Concrete Research, Vol. 115, p. 472-506, 2019.

Murthy, T.S.: Partial molar volumes and thermodynamic properties of alkali metal halides in 10% (w/w) 2-(Ethoxy) ethanol water mixture. Int. J. Chem. Tech., Vol. 4, p. 109-120, DOI 10.32571/ijct.726469, 2020.

NIST, National Institute of Standards and Technology. www.nist.gov/

Sakurai, M.: Partial Molar Volumes of Ethylene Glycol and Water in Their Mixtures. J. Chem. Eng. Data, Vol. 36, p. 424-427, 1991.

Schmidt-Döhl, F.: Ein Modell zur Berechnung von kombinierten chemischen Reaktions- und Transportprozessen und seine Anwendung auf die Korrosion mineralischer Baustoffe. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1996. Auch als Heft 125 der Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, ISBN 3-89288-104-9. Digitale Bibliothek Braunschweig, <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201409231252-0>.

Sigma Aldrich Datenblatt RbNO₃. www.sigmaaldrich.com

Striteska, L.; Hnedkovsky, L.; Cibulka, I.: Partial molar volumes of organic solutes in water. XI. Phenylmethanol and 2-phenylethanol at T=(298 to 573) K and at pressures up to 30 MPa. J. Chem. Thermodynamics, Vol. 36, p. 401–407, 2004.

Synowietz, C. (Hrsg.): D'Ans Lax Taschenbuch für Chemiker und Physiker, 4. Aufl., Springer, Berlin, 1983.

Wagmann, D.D. et al.: The NBS tables of chemical thermodynamic properties. National Bureau of Standards. J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 11, Supl. 2, 1982.

2.2 Wirtschaftliche Verwertbarkeit

Die Ergebnisse gestatten Planern und Herstellern von Reaktionsharz- und Mörtelbeschichtungen auf Betonuntergründen Schadensfälle durch Blasenbildung und Enthaftung besser zu vermeiden.

3 Zusammenfassung

Erfolgt im gemeinsamen DFG-Abschlussbericht.