

**ENDBERICHT**

<b>FFG Projektnummer</b>	864288	<b>FörderungsnehmerIn</b>	ÖBV-GmbH
<b>Bericht Nr.</b>	1	<b>Berichtszeitraum</b>	1.10.2018- 30.09.2019
<b>Bericht erstellt von</b>	Claudia Baldermann, Prof. Tritthart und Prof. Krüger, Ognijen Rudic		

**Richtwert für den Umfang: 10-20 Seiten**

## 1. Ziele und Ergebnisse

Die zum Erreichen der gesteckten Ziele wie die Erkennung von Tendenzen zum Einfluss hydraulisch aktiver bzw. inaktiver Zementbestandteile auf die Menge des abgespaltenen  $\text{Ca(OH)}_2$ , der Festigkeitsentwicklung, Mikrostruktur, Chloridtransport bzw. Karbonatisierung etc. erforderlichen Untersuchungen liegen im Wesentlichen im Plan.

Im zweiten Forschungsjahr wurden die Untersuchungen zu den AP 4 und 5 (AP4:  $\text{CO}_2$ -Bindekapazität und Porenlösungsanalyse; AP5: Festigkeitsentwicklung) abgeschlossen.

Für die Mikrostrukturcharakterisierung (AP 6) sind vor der Prüfung der Purzementsteinproben (Auspressen der Porenlösung und  $\text{Ca(OH)}_2$ -Gehaltsbestimmung) Teilproben abgeschlagen und bei  $105^\circ\text{C}$  getrocknet worden. Die nicht karbonatisierten Proben wurden zur Bestimmung der Porengrößenverteilung und des Porenvolumens mittels Quecksilberdruckporosimetrie an die TU-Darmstadt versandt. An einigen Proben sind dort bereits Untersuchungen durchgeführt worden. An einigen Proben sind am Zentrum für Elektronenmikroskopie der TU-Graz Untersuchungen hinsichtlich der Morphologie im Außen- und Innenbereich der Proben A C, D, F, G und I (s. Tabelle 3) durchgeführt worden. Die karbonatisierten Proben werden erst im 3. FJ untersucht. An der TVFA sind Untersuchungen mittels BET (innere Oberfläche) und dynamischer Dampfsorption geplant, die jedoch noch nicht begonnen werden konnten, weil die erforderlichen Messgeräte zwar bestellt aber noch nicht geliefert wurden.

Für das Arbeitspaket 7 wurde die Herstellung der Probekörper abgeschlossen, verpackt bzw. an Luft 7, 28 bzw. 90 Tage vorgelagert und in einer 3%igen Chloridlösung eingelagert. Die Analysen wurden bzw. werden gemäß EN 12390-11 nach 90 Tagen, 6 und 9 Monaten durchgeführt. Die Arbeiten liegen im Plan und Teilergebnisse liegen vor.

Die Arbeiten zum AP 8 (Korrosionsgefährdung) werden entgegen der ursprünglichen Planung erst im 3. FJ begonnen. Die hierfür beantragten Mittel wurden für AP 4 verwendet.

Drei bestehende Bauwerke (AP 9) wurden beprobt und die Untersuchungen sind teilweise abgeschlossen, teilweise noch im Laufen (Monitoring). Die Arbeiten liegen hier im Plan.

## 2. Arbeitspakete und Meilensteine

### 2.1 Übersichtstabellen

Tabelle 1: Arbeitspakete

AP Nr.	Arbeitspaket Bezeichnung	Fertigstellungsgrad	Basistermin		Aktuell		Erreichte Ergebnisse / Abweichungen
			Anfang	Ende	Anfang	Ende	
1	Projektmanagement	25%	01.10.17	30.09.21	01.10.17	30.09.21	Arbeiten im Plan
2	Wissenschaftliche Projektleitung	25%	01.10.17	30.09.21	01.10.17	30.09.21	Arbeiten im Plan
3	Ausgangsstoffe und Bindemittelrezepturen	100%	01.10.17	31.03.19	01.12.17	30.05.18	Ausgangsstoffe wurden charakterisiert; Rezepturen für die Bindemittel durch Vorversuche festgelegt und Herstellung abgeschlossen
4	CO <sub>2</sub> -Bindekapazität und Porenlösungsanalyse	80%	02.01.18	31.03.20	22.01.18	06.09.18	Labortätigkeiten zum Ca(OH) <sub>2</sub> -Gehalt in Abhängigkeit von der Exposition und Erhärtungsdauer und Porenlösungsanalysen für 28, 56, 91 und 182 Tage abgeschlossen.
5	Festigkeitsentwicklung	80%	02.04.18	31.06.19	28.02.18	01.01.19	Probekörper wurden hergestellt und geprüft, sowie ausgewertet.
6	Mikrostrukturcharakterisierung	10%	01.10.18	30.12.20			Probekörper wurden entnommen und erste Teilergebnisse liegen vor.
7	Chloridtransport und Karbonatisierungsfortschritt	5%	01.10.18	31.03.21	24.07.18		Die Probekörper wurden hergestellt. Die Chloridbeaufschlagung bzw. Karbonatisierungsprüfung ist im Laufen. Teilergebnisse liegen vor.
8	Korrosionsgefährdung	0%	02.07.18	31.03.21			Im 2. Forschungsjahr noch nicht begonnen.
9	Untersuchungen an bestehenden Bauwerken	15%	16.02.18	30.06.21	16.02.18		Festlegung der Bauwerke abgeschlossen; Installation des Monitoringsystems und Bohrkernentnahme aus 3. Bauwerk wurde durchgeführt.
10	Auswertung und Beurteilung	10	02.04.18	16.08.21	02.04.18		Auswertungen liegen plangemäß vor.
11	Empfehlungen für die Praxis		31.01.21	30.09.21			Im 2. Forschungsjahr nicht vorgesehen.

**Tabelle 2: Meilensteine**

Meilenstein	Meilenstein Bezeichnung	Basis-termin	Aktuelle Planung	Meilenstein erreicht am	Anmerkungen zu Abweichungen
1	Kick off meeting	01.11.17	05.12.17	05.12.17	---
2	Detaillierter Arbeitsplan	01.11.17	01.12.17	01.12.17	----
3	Abschlussmeeting über 1. Forschungsjahr	01.09.18	10.09.18	10.09.18	---
4	1. Endbericht	30.09.18	30.09.18	30.09.18	Liegt vor
5	Kennwerte für Ausgangsstoffe vorhanden/ermittelt	01.03.18	01.05.18	01.05.18	Liegt vor
6	Rezepturen festgelegt	01.06.18	01.03.18	01.03.18	Liegt vor
7	Erkennung der Tendenz des Einflusses der Zusatzstoffe bzw. Mikro- oder Mesokalk, der Erhärtungsbedingungen und -dauer auf die Menge des abgespaltenen $\text{Ca(OH)}_2$	31.05.20	im 2. FJ		Ergebnisse für 28, 56, 91 bereits vorhanden, für 182 Tage laufend, Auswertung und Erkennung von Tendenzen Siehe AP 4
8	Stärke des Einflusses des Wassergehaltes ( $W/B_G$ -Wert), auf die Menge des abgespaltenen $\text{Ca(OH)}_2$	31.05.20	im 2. FJ		Liegt vor
9	Porenlösung auspressen und analysieren	31.05.20	im 2. FJ		Liegt vor
10	Herstellung Probekörper für Festigkeitsentwicklung	01.07.18	01.07.18	20.07.18	Liegt vor
11	Ergebnisse für Festigkeitsentwicklung	31.05.20	01.02.19		Liegt vor
12	Festlegung einzubeziehender Bauwerke	01.03.18	10.09.18	10.09.18	Liegt vor
13	Inbetriebnahme der an den Bauwerken installierten Monitoringsysteme mit Online-Datenvisualisierung	01.08.18	Anfang 2. FJ		Installation erfolgt, kontinuierliche Messungen laufen.
14	Auswertung und Gegenüberstellung der ersten Ergebnisse	01.07.21	01.07.21		Laufend

## 2.2 Beschreibung der im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten

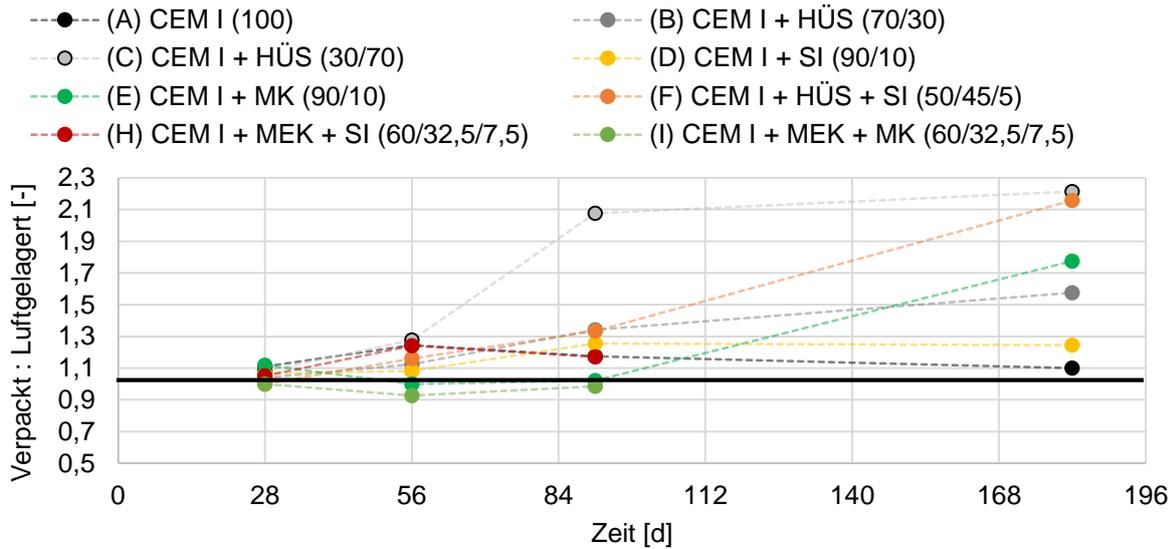
### 2.2.1 Einfluss des Wassergehaltes, der Erhartungsbedingung und der Erhärtungsdauer auf den $\text{Ca(OH)}_2$ -Gehalt

**Tabelle 3:  $\text{Ca(OH)}_2$  Gehalt der Mischungen mit Kalkstein und vorgegebenen Leimvolumen/ Konsistenz bei unterschiedlichen Erhartungsbedingungen (V = verpackt gelagert, L = Luft gelagert)**

Probe	Lagerungsart	W/B <sub>G</sub> -Wert	nasschemischen Methode nach EN 459-2				Thermogravimetrie			
			28d	56d	91d	182d	28d	56d	91d	182d
			M%	M%	M%	M%	M%	M%	M%	M%
G	L	0,36	12,8	14,8	15,4	12,8	-	-	-	-
G	V	0,36	14,0	16,5	15,1	16,8	14,6	10,5	13,5	12,2
G	L	0,6	12,0	13,0	13,3	16,2	-	-	-	-
G	V	0,6	17,4	17,8	17,1	6,0	14,5	10,9	15,8	12,9
H	L	0,45	10,0	10,0	9,6	8,8	-	-	-	-
H	V	0,45	12,2	11,9	12,6	10,2	8,3	5,6	7,3	9,2
H	L	0,6	10,8	8,3	10,0	6,6	-	-	-	-
H	V	0,6	11,4	10,3	11,7	--	12,0	10,5	10,9	-
I	L	0,45	10,4	9,7	9,7	7,4	-	-	-	-
I	V	0,45	9,4	10,5	10,0	11,7	9,4	8,6	10,2	7,5
I	L	0,6	10,5	12,6	11,9	5,4	-	-	-	-
I	V	0,6	10,5	11,7	11,7	12,3	10,0	9,3	9,5	6,0
J	L	0,45	13,1	14,3	12,0	17,1	-	-	-	-
J	V	0,45	14,3	14,5	13,4	16,8	13,1	12,4	13,2	9,8
J	L	0,6	14,8	14,3	11,7	6,0	-	-	-	-
J	V	0,6	15,7	15,4	15,7	16,0	13,5	13,3	10,3	9,8
K	L	0,45	14,0	12,8	14,8	8,8	-	-	-	-
K	V	0,45	14,5	14,3	16,5	12,5	13,2	13,3	12,8	7,0
K	L	0,6	13,7	11,4	10,3	6,8	-	-	-	-
K	V	0,6	15,1	14,5	15,1	13,4	12,5	14,0	13,0	12,5
L	L	0,45	10,0	9,1	8,6	8,6	-	-	-	-
L	V	0,45	10,8	11,7	12,3	5,1	10,5	5,3	8,1	6,0
L	L	0,6	10,3	9,3	8,8	2,3	-	-	-	-
L	V	0,6	11,7	11,9	11,7	9,1	6,8	9,5	8,6	8,3

In Tabelle 3 sind alle noch ausständigen Ergebnisse, die auf Basis der Nasschemie EN 459-2:2010 und Thermogravimetrie anfielen, enthalten. Der  $\text{Ca(OH)}_2$ -Gehalt der luftgelagerten Proben wurden mittels Thermogravimetrie nicht bestimmt. Dass bei dem niedrigerem W/B-Wert von 0,4 wurde weniger  $\text{Ca(OH)}_2$  gebildet wurde als bei W/B-0,6 lasst sich einfach durch den höheren Hydratationsgrad bei W/B-0,6 erklären.

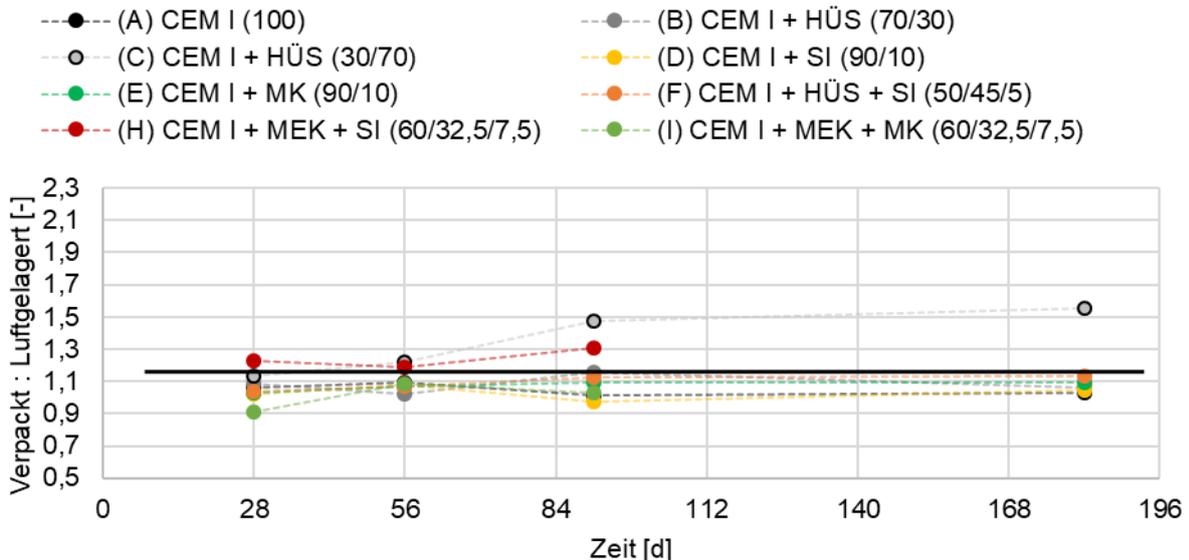
In Abbildung 1 ist erkennbar, dass die Art der Lagerung bei Bindemittelproben mit einem HÜS-Gehalt von bzw. über 30% einen starken Einfluss hatte. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei den Luftgelagerten Proben zufolge Wasserverdunstung der Hydratationsvorgang gestört wurde. Dies kam besonders bei den Proben mit W/B<sub>G</sub>-Wert 0,6 deutlich zum Ausdruck. Bei den Proben mit HÜS und vor allem erkennbar bei der Mischung C mit 30% Zement und 70% HÜS war der Verbrauch von  $\text{Ca(OH)}_2$  durch latent hydraulische Reaktionen höher als die Neubildung aus dem Zementklinker und somit kam es zur geringerer  $\text{Ca(OH)}_2$ -Abspaltung.



**Abbildung 1: Verhältnis von verpackt zu Luft gelagerten Proben (W/B<sub>G</sub>-Wert =0,6)**

Auf alle anderen Proben (W/B<sub>G</sub>-Wert 0,4) hatte die Lagerungsart und Zeit einen relativ geringen Einfluss, wobei aber auch hier die verpackt gelagerten Proben einen etwas höheren Ca(OH)<sub>2</sub>-Gehalt hatten, als die Proben die an Luft gelagert waren. Bei dem niedrigen W/B<sub>G</sub> -Wert hatte die Vorlagerung (in Kunststoff sack verpackt) von 2 Tagen offenbar ausgereicht, um ein recht dichtes Gefüge aufzubauen, aus dem die Wasserverdunstung nur langsam erfolgen konnte. Bei höheren W/B<sub>G</sub> -Werten (Abbildung 3) hingegen wäre eine längere geschützte Lagerung notwendig, damit es zu einer stärkeren Ca(OH)<sub>2</sub> Abspaltung kommen kann.

Allgemein war bei einem W/B<sub>G</sub>-Wert von 0,4 der Einfluss der Lagerungsart gering. Eine Ausnahme hiervon bildet, die Mischung B mit 70% HÜS.



**Abbildung 2: Verhältnis von Verpackt zu Luft gelagerten Proben (W/B<sub>G</sub>-Wert =0,4)**

In Abbildung 2 ist der Ca(OH)<sub>2</sub>-Gehalt der einzelnen Proben im Alter von 28 Tagen (W/B<sub>G</sub>-Wert 0,6; verpackt gelagert; Y-Achse) gegen den prozentuellen Anteil des aus dem Zement stammenden Ca(OH)<sub>2</sub>-Gehalt der jeweiligen Mischung gesetzt (X-Achse). Die Abweichung von der Geraden zeigt, dass der gemessene Ca(OH)<sub>2</sub>-Gehalt nicht nur durch die „Zementverdünnung“ erklärbar ist, sondern dass darüber hinaus Ca(OH)<sub>2</sub> verbraucht wurde (puzzolanische Reaktion).

**ARBEITSPAKET 5: FESTIGKEITSENTWICKLUNG VON MÖRTELN**

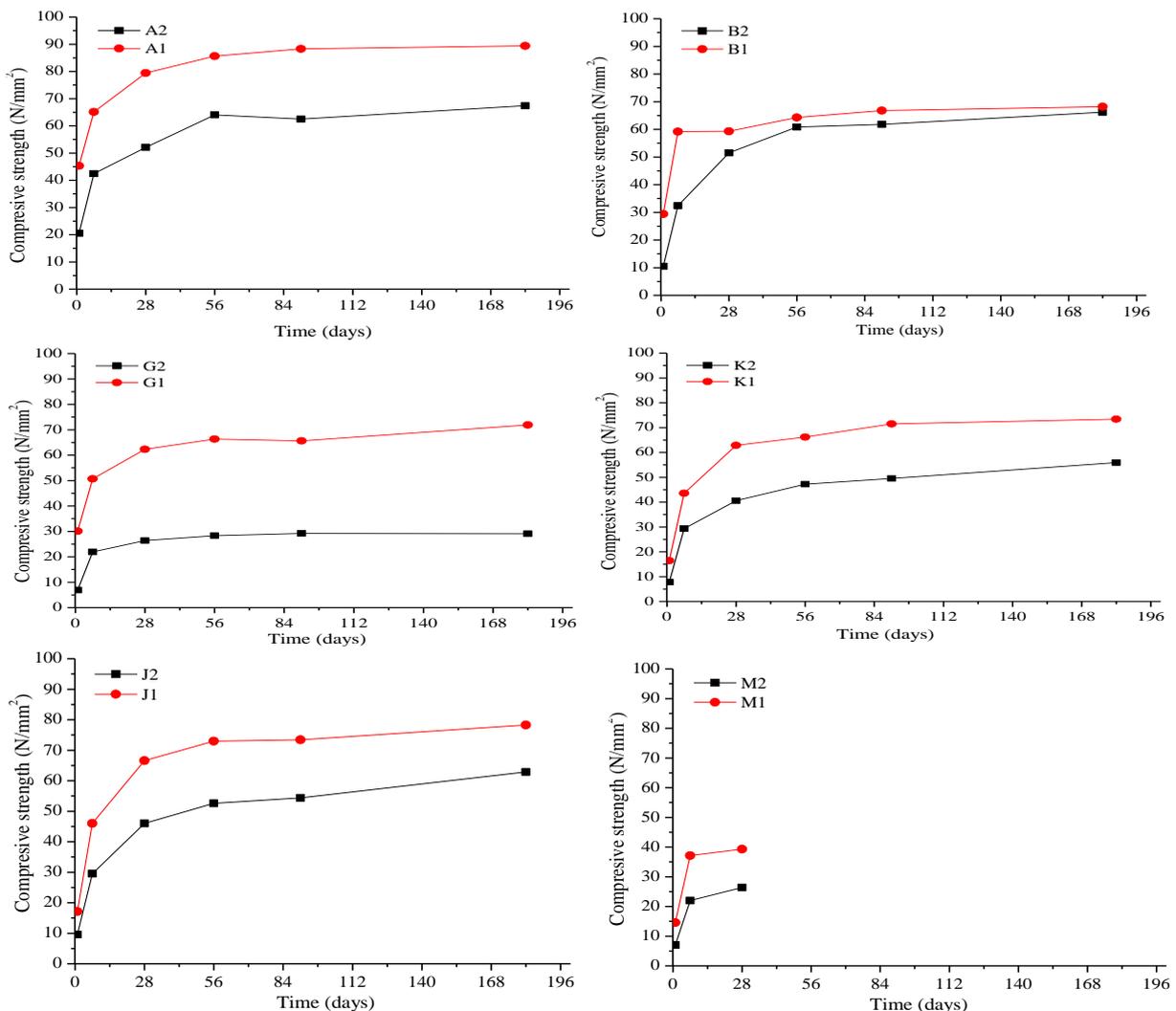
Die geplanten Arbeiten zu diesem Arbeitspaket wurden schon im ersten Forschungsjahr weitgehend abgeschlossen und die Ergebnisse sind im dazugehörigen Bericht enthalten. Es sind im laufenden Jahr aber noch einige zusätzliche Untersuchungen und Auswertungen durchgeführt worden, um den Einfluss des W/B-Wertes besonders von Mischungen mit Hüttensand (HS) bzw. inertem Material (Mikro-bzw. Mesokalk; MEK; MEK) im Bindemittel auf die Druckfestigkeitsentwicklung in jungem Alter bis zu 7 Tagen zum Ausdruck zu bringen. Die dafür ausgewählten Mischungen sind in nachstehender Tabelle enthalten.

Wie die schon im 1. Forschungsjahr erhaltenen Ergebnisse gezeigt haben, waren die Festigkeiten bei niedrigerem W/B-Wert mit 0.4 erwartungsgemäß höher als bei 0.6 (vgl, Abbildung 3).

**Tabelle 4: Für zusätzliche Auswertung verwendete Mischungen**

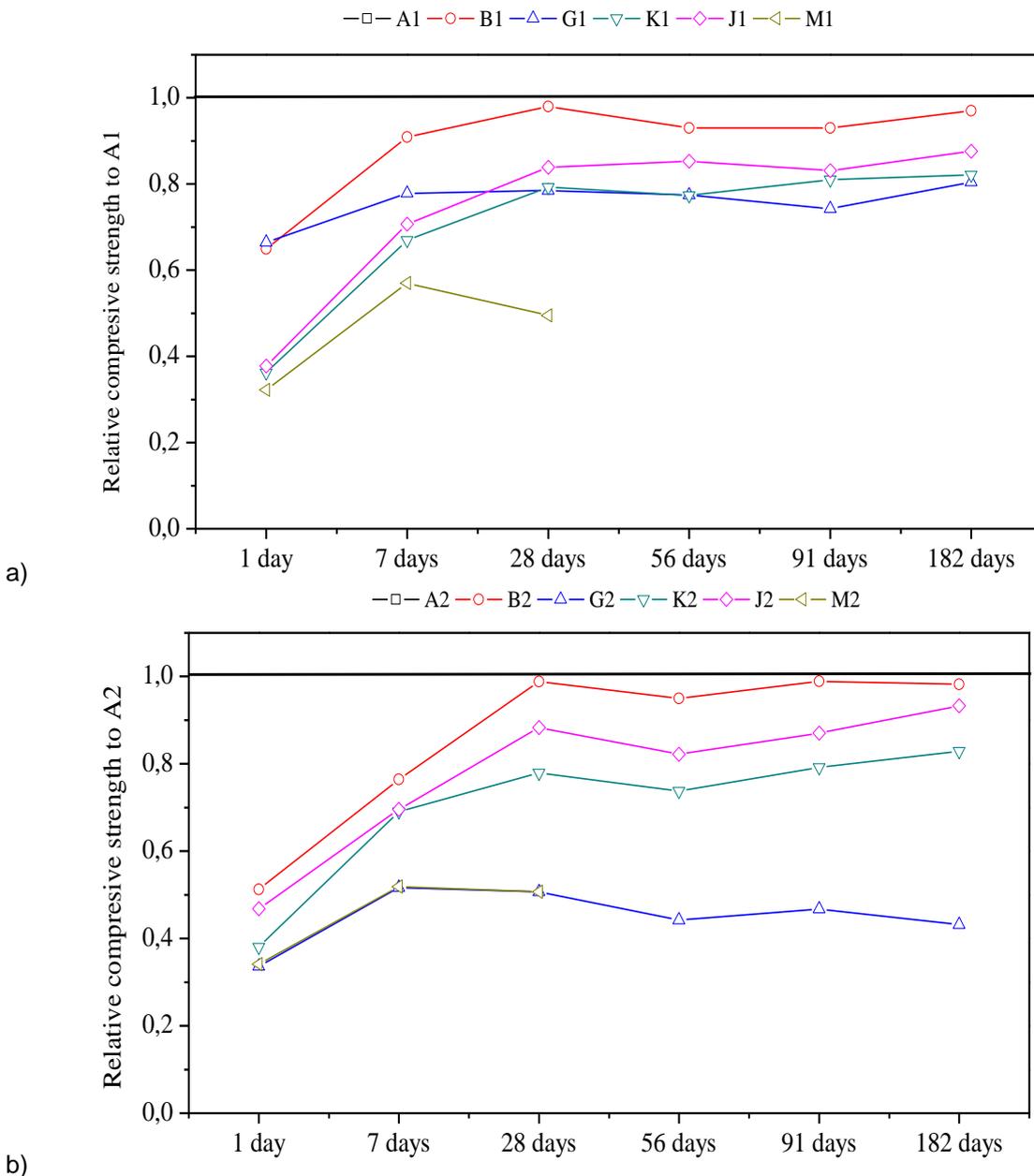
Kurzbezeichnung der Proben	Bindemittelzusammensetzung	Kurzbezeichnung	
		w/b=0,4	w/b=0,6
<b>A</b>	CEM I (100)	A1	A2
<b>B</b>	CEM I + HS (70/30)	B1	B1
<b>G</b>	CEM I + MEK + MIK (60/32,5/7,5)	G1	G2
<b>J</b>	CEM I + HS + MIK (60/30/10)	J1	J2
<b>K</b>	CEM I + HS + MEK + MIK (60/22,5/10/7,5)	K1	K2
<b>M*</b>	CEM I + MEK (60/40)*	M1	M2

\*zusätzlich hergestellte Proben.



**Abbildung 3: Druckfestigkeit von Mörteln derselben Zusammensetzung aber unterschiedlichem W/B-Wert**

Um den Einfluss der Bindemittelzusammensetzung besser zum Ausdruck zu bringen, sind die Druckfestigkeiten der ausgewählten Mischungen in Abbildung 4 als Relativwerte mit dem Festigkeitswert von 1 der Referenzmischung (Mörtel mit reinem Zement als Bindemittel) dargestellt.



**Abbildung 4: Relative Druckfestigkeit zu den Referenzmischungen a) A1 und b) A2**

Nach 1 Tag Erhärtung lagen die Druckfestigkeiten der Mischungen B und G mit W/B-0,4 (B1 bzw. G1) näher bei der Referenzmischung (A1) als die der übrigen Proben. Dass der Wert von G1 nach 1 Tag etwa gleich groß war wie bei B1 mit 30% hydraulisch reagierendem Hüttensand und deutlich höher als von den Mischungen K1, J1 und M1, die alle puzzolanische Bestandteile im Bindemittel enthielten, zeigt den signifikanten Einfluss des inerter Füllers MIK auf die Frühfestigkeit. Mit zunehmender Erhärtungsdauer lag die Festigkeit der Mischung B1 immer am nächsten bei der von A1 und zeigt den positiven Effekt des latent hydraulischen Hüttensandes. Bei G1 war die Festigkeit nach 7 Tagen schon deutlich niedriger als bei B1 und war ab 28 Tagen gleich bzw. niedriger als die von K1 und J1. Dies kann durch den „Verdünnungseffekt“ des Zementes durch die inerten Kalksteinpulver erklärt werden, durch den der anfänglich ausgeprägte Füllereffekt des MIK übertroffen wurde. Dass die Festigkeit von G1 im höheren Alter gleich bzw. nicht wesentlich niedriger lag als bei J1 und K1 zeigt auch den positiven Effekt des Füllers

(MIK). Es kann angenommen werden, dass der feine Füller auch als Keimbildner der Hydratationsprodukte wirkte, die dadurch gleichmäßiger verteilt wurden und weniger Agglomerate bildeten. Dass die Festigkeiten bei W/B-0,4 der zu Vergleichszwecken zusätzlich hergestellten Mischung M1 (mit zwar gleich viel inertem Kalksteinpulver aber nicht mit der hohen Feinheit wie in G1) am niedrigsten waren, ist leicht durch den Verdünnungseffekt des Zementes durch den MEK zu erklären.

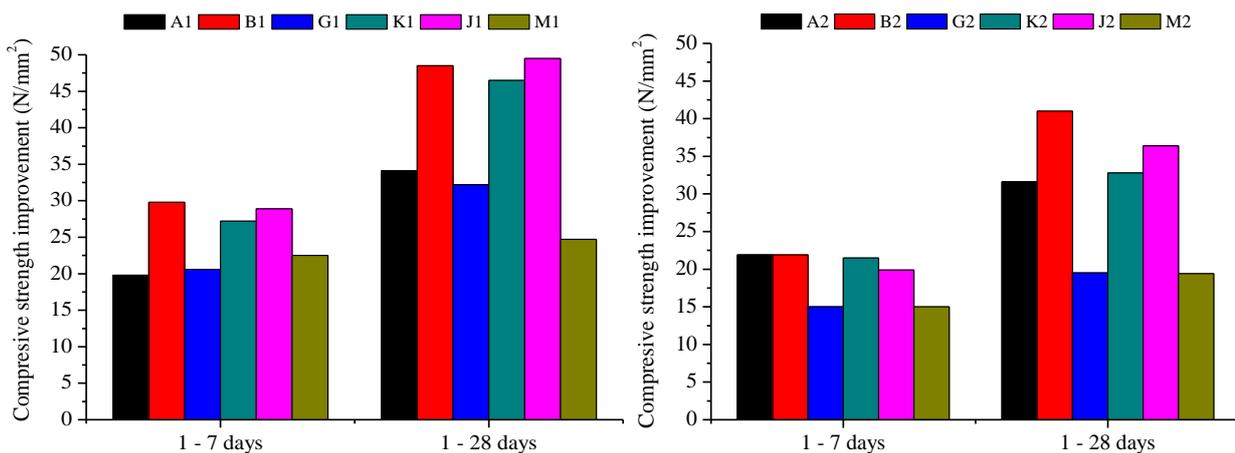
Bei W/B-0,60 waren die Festigkeiten zu allen Terminen bei G2 und M2 praktisch gleich hoch und am niedrigsten von allen Proben. Somit war kein positiver Effekt des MIK erkennbar. Die Gründe dafür sind derzeit nicht klar und dürften in der Mikrostruktur der Bindemittelmatrix liegen. Die Ergebnisse der Mikrostruktur dieser Bindemittel liegen derzeit aber noch nicht vor, weswegen die Klärung im kommenden Projektzeitraum herbeigeführt wird.

Zudem wurde versucht aus den Druckfestigkeitswerten bis ins Alter von 28 Tagen eine Geschwindigkeitsrate der Festigkeitsentwicklung zu erkennen. Diese Auswertung wurde gemacht, weil die erste Festigkeitsprüfung im Alter von 1 Tag durchgeführt wurde und die Zeit davor unbeachtet blieb. Nach 1 Tag waren die Festigkeiten beim Mörtel mit reinem CEM I als Bindemittel wegen des höchsten Gehaltes an Zementklinker am höchsten (A1 und A2). Zu Bestimmung der Rate der Erhärtungsgeschwindigkeit wurde folgende Formel benutzt:

$$\text{Festigkeitsdifferenz} = \text{CS}_{\text{Ende}} - \text{CS}_{\text{Beginn}}$$

(CS: Druckfestigkeit; Ende: Festigkeit nach 1 Tag; Ende: Festigkeit nach 28 Tagen)

Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 enthalten.



**Abbildung 5: Zunahme der Druckfestigkeit von 1 bis 7 bzw. 28 Tagen der Mörtel mit w/b = 0,4 (links) und w/b = 0,6 (rechts)**

Wie aus den Abbildungen ersichtlich, war die Festigkeitsdifferenz zwischen 1 - 7 Tagen beim W/B-Wert von 0,4 in allen Fällen höher als die des Mörtels mit reinem Zement (Mischung A1) und zwischen 1 und 28 Tagen nur die Mischungen B, J und K. Demnach können die Mischungen B, J und K im Vergleich zum CEM I unabhängig vom W/B-Wert als diejenigen mit der größten Festigkeitsentwicklung bezeichnet werden. Der Grund dafür, dass im Falle der Mischungen G und M zwischen 1 und 7 Tagen auch höhere Festigkeitszunahmen eingetreten sind als bei der Mischung A1 liegt, im Füllereffekt des MIK (Mischung G) bzw. dem Einfluss des inertem Kalksteins auf den Hydratationsprozess (siehe oben).

Bei W/B-0,6 war die Festigkeitszunahme zwischen 1 und 7 Tagen bei keiner der Mischungen höher als beim CEM I (A1), während zwischen 1 und 28 Tagen die Mischungen B2, J2 und K2 höhere Festigkeitszunahmen aufwiesen als die Mischung mit CEM I (A2). Der Grund dafür liegt an der langsamen Reaktion der hydraulisch aktiven Zementersatzstoffe (1 - 7 Tage). Die Zunahme der Druckfestigkeiten zwischen 1 und 28 Tagen zeigt den positiven Effekt der hydraulisch aktiven Zementersatzstoffe während bei den Mischungen G2 und M2 kein solch positiver Effekt zu erkennen war. Um Hinweise für den Grund zu bekommen, dass bei W/B-0,6 kein positiver Effekt auf die Festigkeitszunahme gegeben war, müssen die Ergebnisse der Mikrostruktur- und Phasenanalysen abgewartet werden (XRD, FTIR, MIP, BET, etc.).

**ARBEITSPAKET 6: MIKROSTRUKTURCHARAKTERISIERUNG AN REINEN BINDEMITELEIMEN**

Im Rahmen der Mikrostrukturcharakterisierung wurden Untersuchungen an Bindemittelleimen durchgeführt, welche verpackt bei 20 °C gelagert wurden. An ausgewählten Bindemittelleimen, insbesondere solchen mit hohem Gehalt an in Österreich verfügbaren Zusatzstoffen, wurde die Porenstrukturparameter mittels der Quecksilberdruckporosimetrie sowie der Heliumpknymetrie (Kooperation mit der TU Darmstadt) bestimmt. Die Bindemittelleime F, H, I, L mit Mikrosilika und Metakaolin wurden daher nicht näher charakterisiert. Auch die Art der Lagerung wurde bei den Mikrostrukturcharakterisierungen zunächst nicht näher differenziert. Insgesamt wurden neun Mischungen (A, B, C, D, E, G, J, K und M) mit W/B-Werten von 0,4 und 0,6 für eine Mikrostrukturuntersuchung ausgewählt (siehe Tabelle 5). Die Proben wurden zunächst 28 Tage verpackt gelagert und dann bei 105°C für 24 Stunden getrocknet, um die Hydratation zu stoppen. Die Porenstrukturparameter der nicht karbonatisierten Proben wurde direkt im Anschluss an die Trocknung bestimmt.

**Tabelle 5: Zusammensetzung und Bezeichnung der Bindemittelleime**

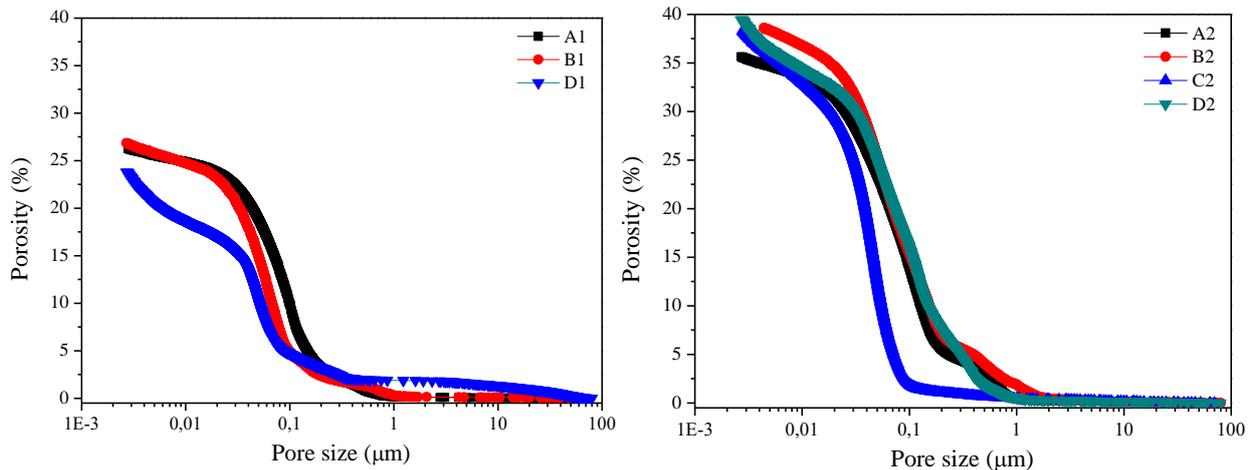
Nr.	Bindemittelzusammensetzung (M.-%)	Nicht karbonatisiert		karbonatisiert	
		w/b=0,4	w/b=0,6	w/b=0,4	w/b=0,6
<b>A</b>	CEM I (100)	A1	A2	A1_c	A2_c
<b>B</b>	CEM I + HÜS (70/30)	B1	B1	B1_c	B1_c
<b>C</b>	CEM I + HÜS (30/70)	C1	C2	C1_c	C2_c
<b>D</b>	CEM I + SI (90/10)	D1	D2	D1_c	D2_c
<b>E</b>	CEM I + MK (90/10)	E1	E2	E1_c	E2_c
<b>G</b>	CEM I + MEK + MIK (60/32,5/7,5)	G1	G2	G1_c	G2_c
<b>J</b>	CEM I + HÜS + MIK (60/30/10)	J1	J2	J1_c	J2_c
<b>K</b>	CEM I + HÜS + MEK + MIK (60/22,5/10/7,5)	K1	K2	K1_c	K2_c
<b>M</b>	CEM I + MEK (60/40)*	M1		M1_c	

Für die Untersuchung des Einflusses der Karbonatisierung auf die Porenstruktur wurde ein Teil der Proben einer beschleunigten Karbonatisierung in einer Klimakammer bei 2% CO<sub>2</sub> und 65% r.F. für 140 Tage unterzogen. Vor der eigentlichen Mikrostrukturuntersuchung wurden Proben unter Zuhilfenahme von Isopropanol in Stücke mit den Abmessungen  $a \leq 8\text{mm}$ ,  $b \leq 8\text{mm}$  und  $h \geq 10\text{mm}$  gesägt und danach über einen Zeitraum von etwa 12 Stunden bei 45°C bis zur Massekonstanz getrocknet. Danach wurden die Proben bis zur Prüfung in kleinen Plastikbeuteln verpackt. Für jede Bindemittelleimzusammensetzung wurden so mindestens 3 Proben hergestellt und untersucht. Zum Ende des zweiten Forschungsjahrs konnten die Mischungen A1, A2, B1, B2, C2, D1, D2 so bereits charakterisiert werden (siehe Tabelle 6).

**Tabelle 6: Erste Ergebnisse zur Mikrostrukturcharakterisierung**

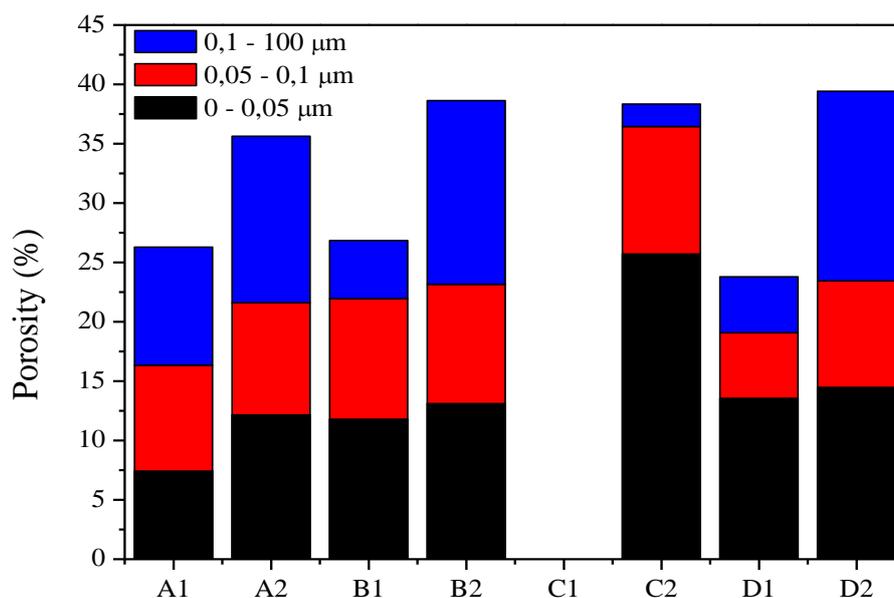
Mix	Hg-Porosität (%)	He Porosität (%)	Rohdichte (g/cm <sup>3</sup> )	Innere Porenoberfläche (m <sup>2</sup> /g)	Gesamtporosität (mm <sup>3</sup> /g)
A1	26,28	32,94	2,336	18,03	167
A2	35,63	36,82	2,122	30,69	265
B1	26,84	29,31	2,174	25,20	174
B2	38,61	44,25	2,115	31,25	327
C2	38,35	41,29	2,078	34,98	314
D1	23,68	26,98	2,078	42,24	156
D2	39,43	36,00	1,966	55,30	313

Die ersten Ergebnisse zeigen, dass wie erwartet die Porosität der Bindemittelleime mit W/B-Wert 0,6 gegenüber solchen mit W/B-Werten von 0,4 höhere Porositäten aufweisen und auch die Rohdichte mit zunehmenden W/B-Wert abnimmt. Besonderheiten ergeben sich bei den Mischungen mit Hüttensand, wo die Mischungen mit hohem Hüttensandanteil C2 zwar eine ähnliche Gesamtporosität wie B2 aufweist, aber Poren vorwiegend im Bereich der Mikro- und Mesoporen (bis ca. 50nm) anzutreffen sind. Weitere Unterschiede der Porenradienverteilung sind auch bei den anderen Mischungen, bei denen diverse Zusatzstoffe eingesetzt wurden, erkennbar. Die mittels der Quecksilberporosimetrie erhaltenen Porenverteilungen sind in Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 6: Kumulative Porenradienverteilung verschiedener Bindemittelleime; w/b=0,4 (links) und w/b=0,6 (rechts)**

Zur besseren Veranschaulichung der verschiedenen Porenradienverteilungen und deren Anteil an der Gesamtporosität wurde eine Klassifizierung von Porenradienverteilungen in drei Klassen (in Anlehnung an IUPAC) vorgenommen: Mikro-/Mesoporen (0-0,05 µm), Makroporen bzw. kleine Kapillarporen (0,05-0,1 µm) und Makroporen bzw. mittlere Kapillarporen (0,1-100 µm). Die Ergebnisse diesbezüglich sind in Abbildung 7 eingetragen. Wie zu erwarten war, wird insbesondere die Kapillarporosität und hier die mittleren Kapillarporen durch den w/b-Wert maßgeblich beeinflusst. Aber auch die Art und der Gehalt an Zusatzstoffen führt zu veränderten Porenradienverteilungen, die in den kommenden Arbeiten im Forschungsprojekt, wenn die weiteren Ergebnisse vorliegen, näher betrachtet werden.



**Abbildung 7: Porositätsklassifizierung der untersuchten Bindemittelleime in Mesoporen, mittlere und große Kapillarporen.**

Zudem sind elektronenmikroskopische Untersuchungen am Institut für Elektronenmikroskopie und Nanoanalytik der TU Graz an den Proben A (CEM I), C 30% CEM I/70 /0% Hüttensand, D (90 % CEM I/10% Silikastaub) F (50% CEM I/45% Hüttensand/5% Silikastaub), G (60% CEM I/32,5 Mesokalk/7,5% Mikrokalk) und I (60% CEM I/30% Hüttensand/10% Mikrokalk) durchgeführt worden. Es zeigten sich deutliche morphologische Unterschiede zwischen a) äußeren und inneren Bereichen und b) unter den zusatzstoffhaltigen Proben ergaben. Eine genauere Auswertung erfolgt im 3. Forschungsjahr.

## ARBEITSPAKET 7: CHLORIDTRANSPORT UND KARBONATISIERUNGSFortschritt von Mörteln

### Chloridtransport

Mit der Herstellung der Probekörper für den Chloridtransport wurde am 24.07.2018 begonnen. In Tabelle 77 ist das Versuchsprogramm für die direkte Beaufschlagung mit einer 3%igen Natriumchlorid (NaCl-Lösung) aufgezeigt. Untersuchung hinsichtlich des verändertes W/B<sub>G</sub>-Wertes, der Art der Erhärtingsbedingung und die Zeit der Erhärtung an allen 12 Proben für eine Beaufschlagung von 90 Tagen, 6 und 9 Monaten wäre ein zu umfangreiches Programm, daher wurde das komplette Programm nur an den Proben mit der Kurzbezeichnung A, C, D und E durchgeführt.

**Tabelle 7: Arbeitsprogramm für die Chlorideindringung in Mörtelproben (10 cm Würfel)**

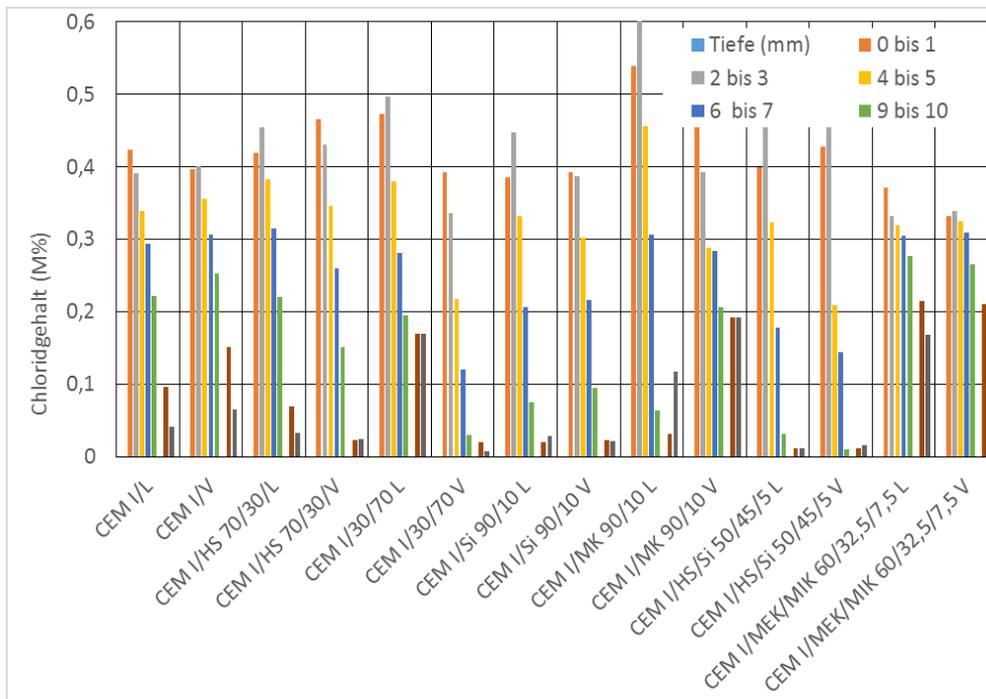
W/B <sub>G</sub> -Wert	Kurzbez. Probe	Art der Erhärtingsbedingung	Zeit der Erhärtung
W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,4 bzw. angepasst bei den optimierten Mischung	A, C, D, E, G, H, I, J, K, L	Verpackt gelagert	28d
W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,6	A, B, C, D, E, F	Verpackt gelagert	7d
W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,6	A, B, C, D, E, F	Verpackt gelagert	90d
W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,6	A, B, C, D, E, F	Luft gelagert	7d
W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,6	A, B, C, D, E, F	Luft gelagert	90d

Für jede Probe wurden zwei Würfel mit 10 cm Kantenlänge hergestellt, 2 Tage vor Austrocknung geschützt gelagert und danach verpackt bzw. an Luft weitergelagert. Zwei Tage vor der Chloridbeaufschlagung wurden die Proben unter Vakuum mit Wasser gesättigt und danach alle Flächen mit einem Cl-freien Epoxidharz versiegelt. Zu Prüfbeginn ist zunächst das Epoxidharz von der Probenunterseite (die der abgezogenen Oberfläche gegenüberliegende Fläche) abgeschliffen und die Probe in der Folge in die NaCl-Lösung eingetaucht worden (Prüffläche nach unten). Dabei betrug das Volumen der Prüflösung mindestens 12,5 ml je cm<sup>2</sup> der zu beaufschlagenden Oberfläche (EN 12390-11).

Start der Einlagerung der ersten Proben in die Chloridlösung war der 21.08.2018. Für jeden Prüftermin sind von jeder Rezeptur und Lagerungsart zwei Würfel untersucht worden. Aus den Ergebnissen der beiden Würfel ist der Mittelwert als Ergebnis angegeben. Hier ist zu erwähnen, dass die Ergebnisse der beiden Würfel zumeist sehr gut übereinstimmten, dass aber naturgemäß Schwankungen auftraten, die in Einzelfällen bis zu ~0,1 M% Chlorid betrug. Nach 90 Tagen (EN 12390-11), 6 und 9 Monaten Chloridkontakt wurde von den Proben Bohrmehl in 1 mm Abstufungen entnommen. Dazu wurden die Würfel in einer Vorrichtung eingespannt und eine Fläche ca. 42 cm<sup>2</sup> in genau einstellbaren Tiefenabstufungen von 1 mm mittels diamantbesetzter Schleifscheibe abgeschliffen (Abbildung 8).



**Abbildung 8: Vorrichtung zur Probenentnahme**

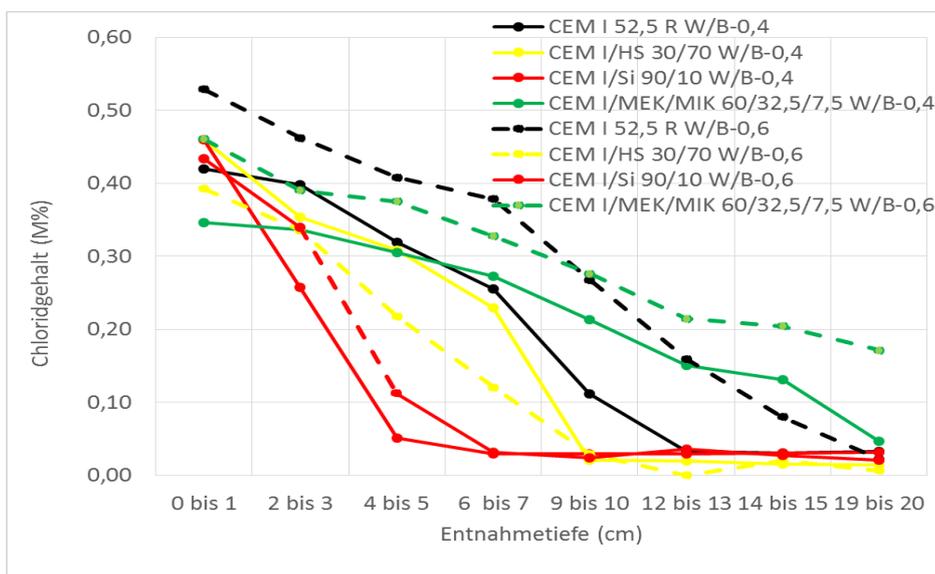


**Abbildung 9: Chloridprofil nach 7 Tagen Vorlagerung und 3 Monaten Cl-Beaufschlagung (W/B-0,60)**

Abbildung 9 zeigt die Chloridprofile der Proben mit W/B-0,60 nach 7 Tagen Vorlagerung und nachfolgend 3 Monaten Chloridbeaufschlagung. Wie ersichtlich, nimmt der Chloridgehalt bei den verpackt gelagerten Proben von außen nach innen ab. Bei den an Luft vorgelagerten Proben besteht zumeist eine Zunahme des Chloridgehaltes von 0-1 mm auf 2-3 mm. Vermutlich ist das darauf zurückzuführen, dass hier schon eine teilweise Karbonatisierung stattgefunden hat, wodurch die Chloridaufnahmefähigkeit vermindert wird, da karbonatisierter Zementstein Chlorid chemisch nicht binden kann. Beim luftgelagerten CEM I war jedoch der Chloridgehalt in der äußersten Zone höher als in der nächsten Tiefe und auch höher als bei der verpackten Probe. Dies könnte damit in Zusammenhang stehen, dass die Luftlagerung erst im Alter von 2 Tagen begonnen wurde und dass bis dahin schon eine so hohe Verfestigung eingetreten ist, dass hier die Karbonatisierung nicht ins Gewicht fiel, dass aber die OH-Konzentration der Porenlösung merklich geringer war als bei der verpackten Probe und dass daher die Chloridbindungsfähigkeit zugenommen hat. Bei einigen Proben besteht zwischen 0-1mm und 2-3 mm kein nennenswerter Unterschied, was möglicherweise

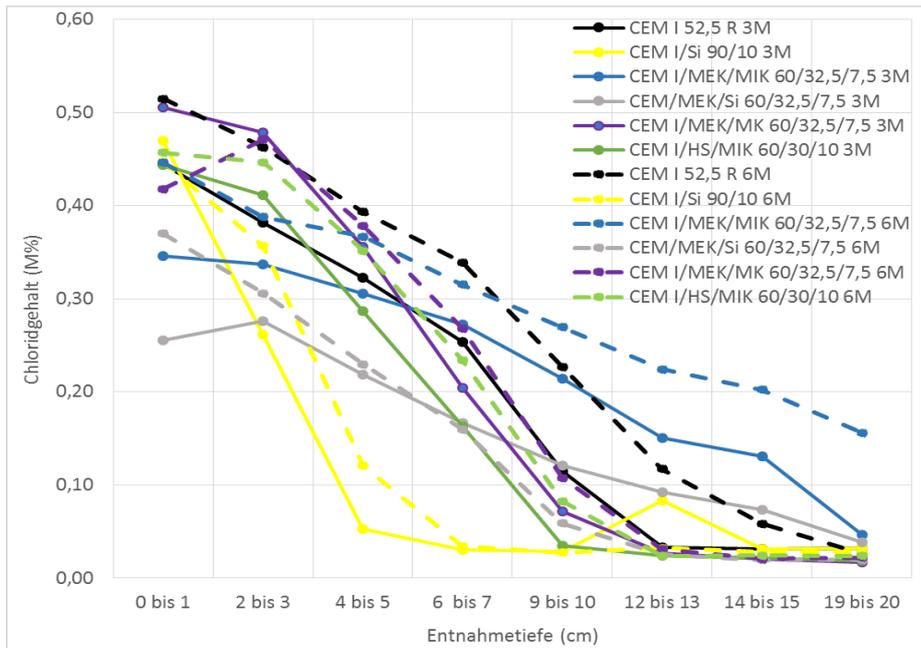
darauf zurückzuführen ist, dass die maximale Chloridaufnahmefähigkeit dieser Proben bis in diese Tiefe schon gegeben war (natürlich sind auch Messunsicherheiten zu beachten und der Umstand, dass durch die Probenbehandlung unterschiedliche Einflüsse zur Geltung kamen; die Proben wurden nach der Cl-Lagerung mit Papier abgetupft und es könnte unterschiedlich viel Restlösung verblieben sein, was den Messwert vom Bohrmehl des ersten Millimeters beeinflussen kann).

Von den zusatzstoffhaltigen Proben wurde bei Vorlagerung an Luft mit Ausnahme der äußersten Zone mehr Chlorid aufgenommen als bei den verpackt vorgelagerten Proben. Dies begründet sich vornehmlich wohl damit, dass die luftgelagerten Proben austrocknen konnten und dass daher der Hydratationsgrad geringer und die Porosität höher war als bei den verpackt vorgelagerten Proben. In Anwesenheit von Silikastaub (CEM I/Si 90/10) wurde in den äußeren Zonen bis ca. 4 mm Tiefe etwa gleich viel Chlorid aufgenommen wie beim CEM I, in größeren Tiefen aber weniger. Durch die relativ hohe Reaktionsgeschwindigkeit des Silikastaubes hat offenbar eine Verdichtung des Bindemittelgefüges stattgefunden wodurch die Diffusionsgeschwindigkeit des Chlorids abgenommen hat. Dass die metakaolinhaltigen Proben (CEM I/MK 90/10) mit Abstand am meisten Chlorid aufgenommen haben begründet sich in erster Linie wohl damit, dass im Metakaolin viel reaktives  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vorhanden, wodurch viel Friedel'sches Salz entstehen kann –  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ .



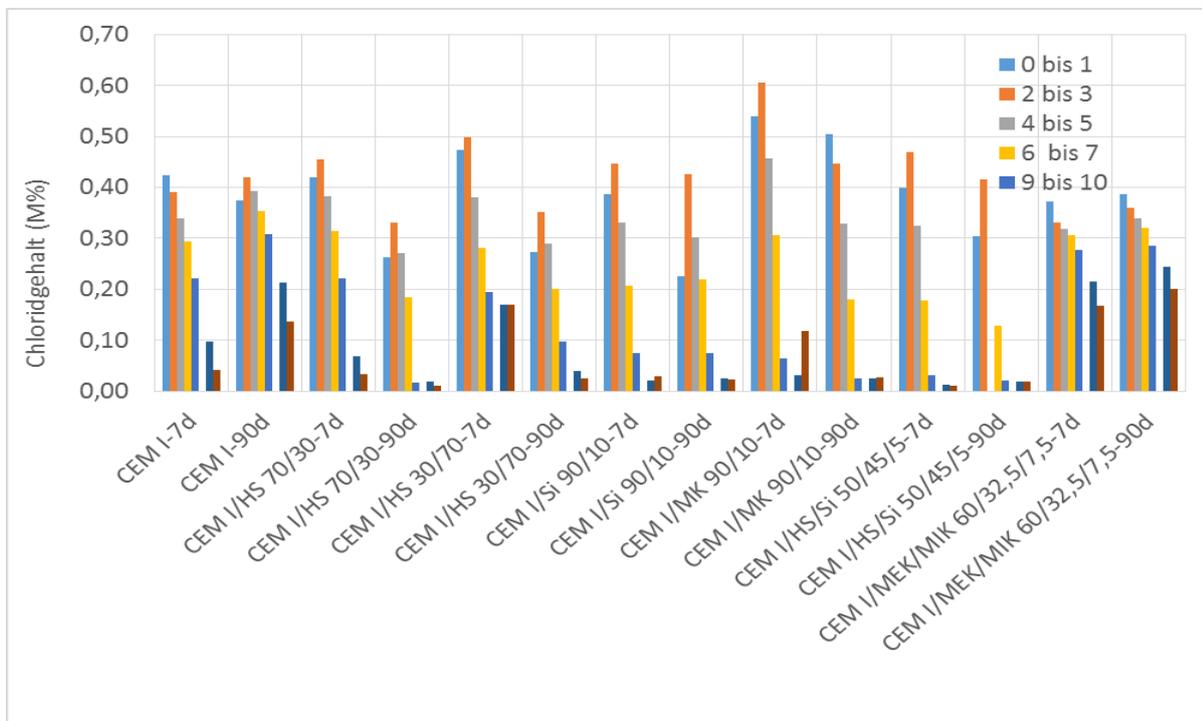
**Abbildung 10: Vergleich W/B-0,40 und 0,60 nach 3 Monaten Cl-Beaufschlagung (Proben verpackt vorgelagert 28 Tage bei W/B-0,4 und 7 Tage bei W/B-0,6)**

Aus Abbildung 10 kommt der Einfluss des W/B-Wertes zum Ausdruck. Mit Ausnahme des Bindemittels bestehend aus 30% CEM I und 70% Hüttensand (gelbe Linien) wurde von den Proben mit höherem W/B-Wert (0,60) mehr Chlorid aufgenommen als von den Proben mit W/B-0,40. Dies ist einfach mit der höheren Porosität und der damit einhergehenden leichteren Eindiffusion des Chlorids erklärbar. Warum dies bei dem stark hüttensandhaltigen Proben nicht der Fall war ist derzeit noch nicht geklärt. Eine Überprüfung wird daher noch vorgenommen.



**Abbildung 11: Chloridprofil nach 3 und 6 Monaten Chlorid-Auslagerung (7 Tage verpackt vorgelagerte Proben mit W/B-0,40)**

Abbildung 11 gibt den Einfluss der Dauer der Chlorideindringung wieder (nach 3 Monaten Beaufschlagung). Wie ersichtlich ist der Chloridgehalt mit zunehmender Lagerungsdauer erwartungsgemäß angestiegen, wobei auch hier zumindest ein Ergebnis unplausibel erscheint, nämlich, dass sich die Linien der Probe mit dem Bindemittel bestehend aus 60% CEM I, 32,5%Metakaolin und 7,5% Silikastaub (CEM I/MEK/Si 60/32,5/7,5; graue Linien) kreuzen und dass ab einer Tiefe von 6-7 mm nach 3 Monaten in höhere Tiefen mehr Chlorid eingedrungen ist als nach 6 Monaten. Auch diese Ergebnisse müssen kontrolliert werden.



**Abbildung 12: Chloridprofil nach 3 Monaten der an Luft 7 bzw. 90 Tage vorgelagerten Proben (W/B-0,60)**

Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse, die nach 7 und 90 Tagen Vorlagerung an Luft und nachfolgender 3-

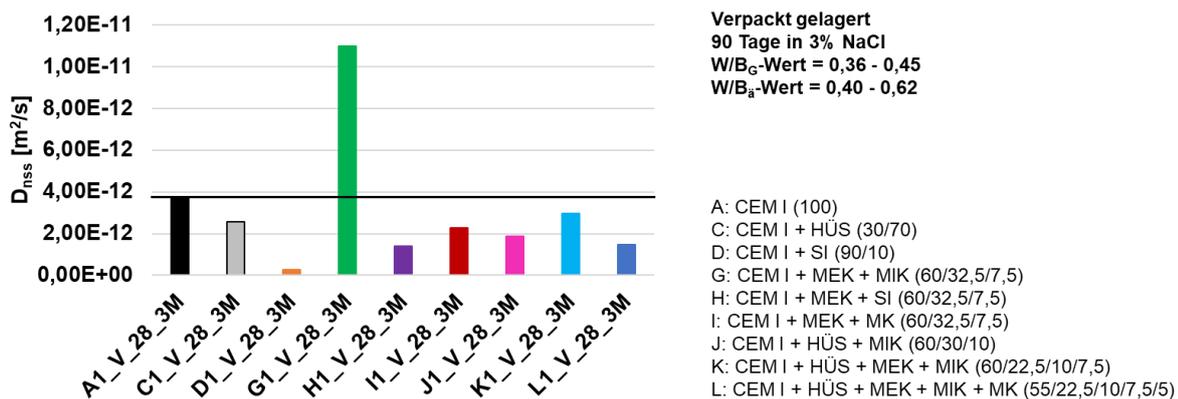
monatiger Chloridbeaufschlagung erhalten wurden. Beim CEM I und der Mischung des Zements mit inertem Material (Mikro- bzw. Mesokalk, CEM I/MEK/ MIK 60/32,5/7,5) war die Eindringtiefe nach 90 Tagen höher als nach 7 Tagen. Dies entspricht der Erwartung, weil die Proben nach 90 Tagen Lagerung bei 65%r.F./20°C stärker ausgetrocknet und somit weniger stark hydratisiert waren als nach 7 Tagen und das Chlorid daher etwas leichter eindiffundieren konnte. Überrascht hat aber, dass dies bei den Proben mit hydraulisch aktiven Zumahlstoffen im Bindemittel nicht der Fall war. Bei all diesen Proben war der Chloridgehalt nach 90 Tagen Vorlagerung niedriger als nach 7 Tagen. Offenbar ist die Hydratation bei den Proben mit hydraulisch aktiven Komponenten im Bindemittel trotz der Luftlagerung so gut fortgeschritten, dass sich die Poren so verengt haben, dass die Chloriddiffusion deutlich langsamer erfolgt ist als bei den Proben mit CEM I als Bindemittel (ohne Zusatzstoffe).

**Chloriddiffusionskoeffizient**

Aus den Ergebnissen der Chloridanalysen, die an den verpackt erhärteten Proben mit W/B=0,40 nach 90 tägiger Chloriddiffusion (3 Monaten) erhalten wurden, sind die Chlorid-Diffusionskoeffizienten berechnet worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 enthalten und grafisch in Abbildung 13 dargestellt.

**Tabelle 8: Chloriddiffusionskoeffizient der verpackt vorgelagerten Proben nach 90 Tagen Chlorid-Beaufschlagung**

Probenbezeichnung (alle Proben waren bis zum Prüfbeginn nach 28 Tagen verpackt gelagert)	Chloriddiffusionskoeffizient nach 90 Tagen
A (W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,40; W/B <sub>a</sub> -Wert = 0,40)	3,78E-12
C (W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,40; W/B <sub>a</sub> -Wert = 0,47)	1,77E-12
D (W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,40; W/B <sub>a</sub> -Wert = 0,36)	2,63E-13
G (W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,36; W/B <sub>a</sub> -Wert = 0,60)	1,10E-11
H (W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,45; W/B <sub>a</sub> -Wert = 0,60)	1,41E-12
I (W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,45; W/B <sub>a</sub> -Wert = 0,60)	2,26E-12
J (W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,45; W/B <sub>a</sub> -Wert = 0,54)	1,87E-12
K (W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,45; W/B <sub>a</sub> -Wert = 0,58)	2,97E-12
L (W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,45; W/B <sub>a</sub> -Wert = 0,62)	1,47E-12



**Abbildung 13: Chloriddiffusionskoeffizient der verpackt vorgelagerten Proben nach 90 Tagen Chlorid-Beaufschlagung**

Wie aus der Tabelle 8 bzw. aus Abbildung 13 ersichtlich, lag der Diffusionskoeffizient erwartungsgemäß bei der Mischung, deren Bindemittel aus 60% Zement und 40% hydraulisch nicht aktiven Kalksteins unterschiedlicher Feinheit (32,5% MEK/ 7,5% MIK) bestand deutlich über dem des reinen Zementes, bei allen übrigen Mischungen mit hydraulisch aktiven Bestandteilen des Bindemittels jedoch darunter.

### Karbonatisierung und Luftpermeabilität

Zur Untersuchung der Karbonatisierung wurden Mörtelproben mit den gleichen Materialien hergestellt wie für die Chloriddiffusion (Sand 0/4mm) aber keine Würfel, sondern Prismen mit den Abmessungen 10 cm x 14 cm x 36 cm. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Rezepturen der Bindemittel.

**Tabelle 9: Bindemittelzusammensetzung**

Kurzbezeichnung	Zusammensetzung	Mischungsbestandteile	Zusammensetzung [%]	W/B <sub>G</sub> -Wert	W/B <sub>A</sub> -Wert	W/B <sub>G</sub> -Wert	W/B <sub>A</sub> -Wert
A	CEM I (100)	Referenzzement: CEM I 52,5 R	100	0,40	0,40	0,60	0,60
B	CEM I + HÜS (70/30)	CEM I + Hüttensand (CEM II/B-S)	70 / 30	0,40	0,43	0,60	0,64
C	CEM I + HÜS (30/70)	CEM I + Hüttensand	30 / 70	0,40	0,47	0,60	0,70
D	CEM I + SI (90/10)	CEM I + Silikastaub (CEM II/A-D)	90 / 10	0,40	0,36	0,60	0,55
E	CEM I + MK (90/10)	CEM I + Metakaolin	90 / 10	0,40	0,36	0,60	0,55
F	CEM I + HÜS + SI (50/45/5)	CEM I + Hüttensand + Silikastaub	50 / 45 / 5	0,40	0,42	0,60	0,63
G	CEM I + MEK + MIK (60/32,5/7,5)	CEM I + Mesokalk (MEK) + Mikrokalk (MIK)	60 / 32,5 / 7,5	0,36	0,60	0,60	1,00
H	CEM I + MEK + SI (60/32,5/7,5)	CEM I + MEK + Silikastaub	60 / 32,5 / 7,5	0,45	0,60	0,60	0,80
I	CEM I + MEK + MK (60/32,5/7,5)	CEM I + MEK + Metakaolin	60 / 32,5 / 7,5	0,45	0,60	0,60	0,80
J	CEM I + HÜS + MIK (60/30/10)	CEM I + Hüttensand + MIK	60 / 30 / 10	0,45	0,54	0,60	0,71
K	CEM I + HÜS + MEK + MIK (60/22,5/10/7,5)	CEM I + Hüttensand + MEK + MIK	60 / 22,5 / 10 / 7,5	0,45	0,58	0,60	0,77
L	CEM I + HÜS + MEK + MIK + MK (55/22,5/10/7,5/5)	CEM I + Hüttensand + MEK + MIK + Metakaolin	55 / 22,5 / 10 / 7,5 / 5	0,45	0,62	0,60	0,72
M	CEM I + MEK (60/40)*	CEM I + MEK	60 / 40	0,40	0,62	0,60	0,72

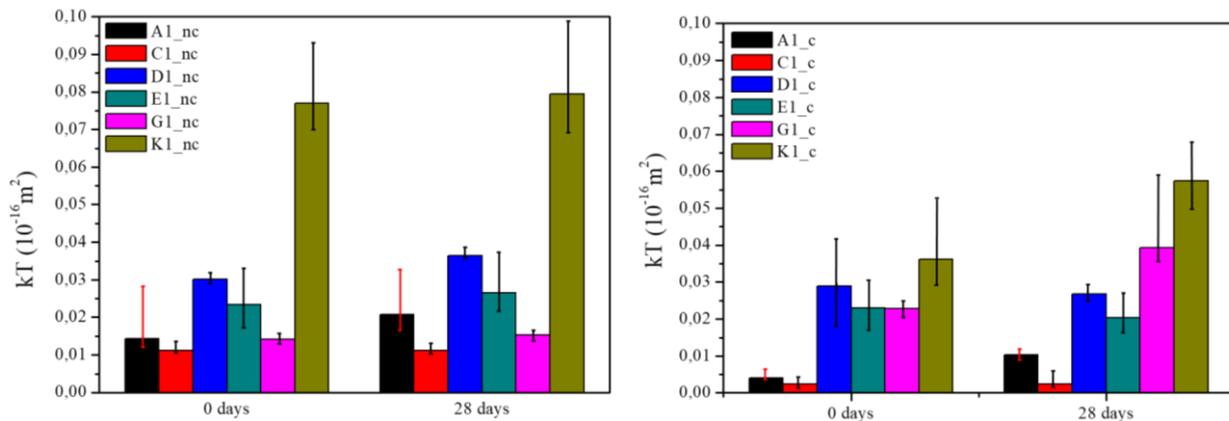
Von jeder Mischung wurden pro Prüfung 2 Prismen hergestellt. Mit der Herstellung der Proben wurde am 20. Mai 2019 begonnen und die Probenherstellung soll am 18. November 2019 abgeschlossen werden. Bislang befinden sich 12 Mischungen in Untersuchung. Die Formen sind nach der Probenherstellung mit einer Kunststoffolie abgedeckt nach 2 Tagen entformt und dann bis ins Probenalter von 28 Tagen im Klimaraum an Luft mit 65% r.F. und 20°C bzw. verpackt gelagert worden. Danach wurde die Verpackung entfernt und die Prismen weitere 14 Tage im Klimaraum weitergelagert und so eine annähernd gleichmäßige Feuchteverteilung sichergestellt, was eine notwendige Voraussetzung der Karbonatisierung ist, um vergleichbare Werte zu erhalten.

Die Karbonatisierung wurden nach zwei verschiedenen Methoden durchgeführt, nämlich a) durch eine beschleunigte Prüfung gemäß Fib Bulletin 34 „Model Code for Service Life Design“ (fib Task Group 5.6), 2006 durch Lagerung der Proben in einer Kammer mit 2Vol% CO<sub>2</sub>, 65% r. F., 20°C und b) durch natürliche Karbonatisierung durch Lagerung im Klimaraum bei 65% r.F., 20°C. Die Karbonatisierungstiefe wurde zu Beginn (Nullmessung), nach 28, 70 und 140 Tagen durchgeführt, wobei von den Prismen etwa ca. 7 cm von einer Stirnseite entfernt gespalten wurden und die Fläche des Spaltstücks mit Lösung von Phenolphthalein besprüht wurde. Das verbliebene Stück des Prismas wurde weitergelagert. Beim nächsten Prüftermin wurde gleich vorgegangen.

Die Luftpermeabilität wurde gemäß dem Torrent-Verfahren durch Messung der Luftdurchlässigkeit nach Anlegen eines Vakuums gemessen. Diese Messung wurde an jeder Probe an zwei Stellen gemessen (abgezogene Oberfläche und gegenüberliegende Schallfläche) und zwar vor Beginn der Auslagerung in der CO<sub>2</sub>-Kammer bzw. an Luft und danach alle 14 Tage bis zum Ende der Lagerung nach 140 Tagen.

Derzeit sind folgende Mörtel in Untersuchung: A1, C1, D1, E1, G1 und K1. Ergebnisse bis zu 28 Tagen

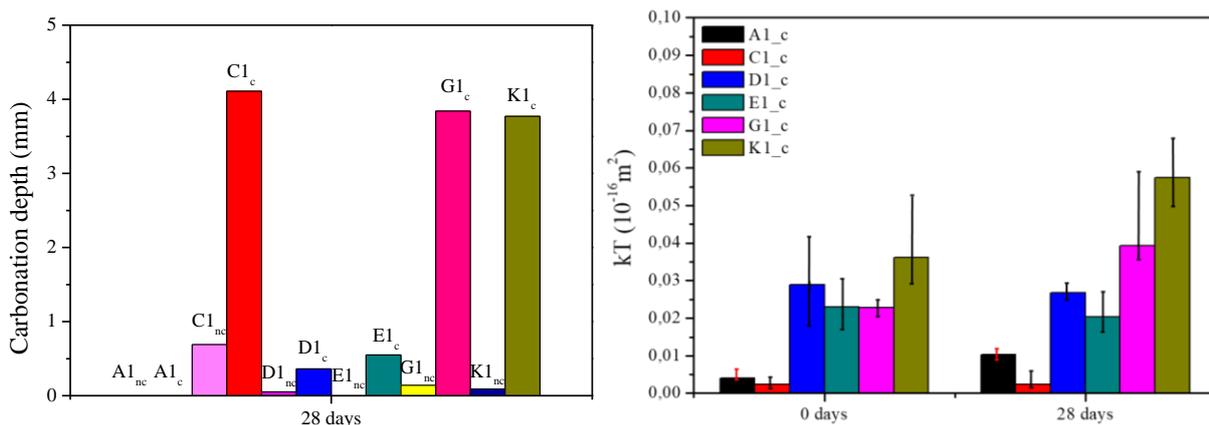
Auslagerung liegen vor. Die Ergebnisse der Messung der Luftpermeabilität sind in Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellt.



**Abbildung 14: Luftpermeabilität von nicht karbonatisierten (links) und karbonatisierten (rechts) Proben**

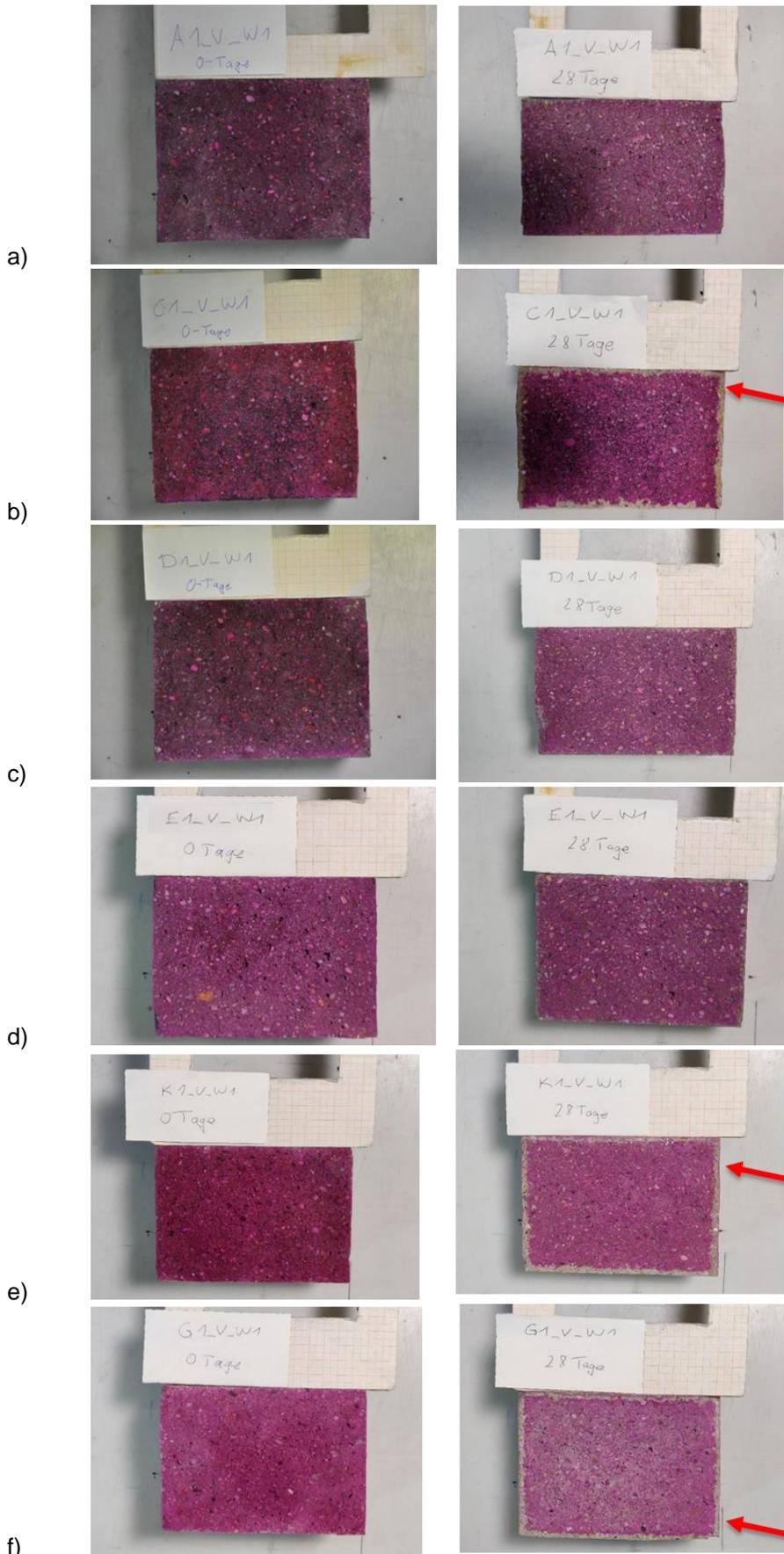
Die Ergebnisse sind derzeit noch nicht besonders gut interpretierbar, weil die Messunsicherheit relativ groß war. Dies zeigt ein Vergleich der Werte in den Abbildungen a) und b) etwa der Proben A und C zu Beginn der Messung. Bei guter Reproduzierbarkeit sollten sie gleich hoch sein. Daher können derzeit keine Trends angegeben werden, sondern es muss zugewartet werden bis die Ergebnisse zu Versuchsende vorliegen. Bezüglich der Einordnung in die Permeabilitätsklassen gemäß der SIA 262-1:2013 sind sie sowohl bei den nicht karbonatisierten wie auch den karbonatisierten Proben der Klasse PK2 zuzuordnen ( $0,01-0,1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ; geringe Permeabilität).

Ein sichtbarer Einfluss der Zementersatzstoffe ist aber erkennbar, denn die Permeabilitätswerte waren bei den Proben D1, E1, G1 und K1 deutlich höher als bei A1. Der mit Abstand höchste Wert wurde bei der Mischung K1 erhalten was einen ausgeprägten Einfluss des Mesokalks (MEK) auf die Porosität bzw. Porenverteilung anzeigt. Das ist auch klar erkennbar, wenn man die Werte der Proben K1 und G1 vergleicht (beide Proben enthalten gleich viel Zement, die Mischung K1 aber 22,5M% HÜS und nur 10 M% MEK, während die Probe G1 keinen Hüttensand aber 32,5 M% MEK enthält). Es ist auch erkennbar, dass das Mikrosilika (Si) und das Metakaolin (MK) die Luftpermeabilität zu einem gewissen Grad beeinflusst hat.



**Abbildung 15: Ergebnisse der Luftpermeabilitätsmessungen von nicht karbonatisierten Prismen (links) und karbonatisierten Prismen (rechts)**

Abbildung 16 zeigt die nach 28 Tagen Karbonatisierung mit Phenolphthalein besprühten Proben.



**Abbildung 16: Nach 28 Tagen Karbonatisierung mit Phenolphthalein besprühten Proben a) Probe A1; b) Probe C1, c) Probe D1, d) Probe E1, e) Probe K1 und f) Probe G1**

Die bislang vorliegenden Ergebnisse machen deutlich, dass die Karbonatisierung ein komplexer Vorgang ist, weil sie die Mikrostrukturstruktur (Porenverteilung) und die mineralogische Zusammensetzung (Zersetzung der C-S-H-Phasen und Umwandlung des vorhandenen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sowie des aus den zersetzten C-S-H-Phasen zusätzlich abgespaltenen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in  $\text{CaCO}_3$ ; etc.). Die Untersuchung der durch die Karbonatisierung eintretenden Veränderungen der Mikrostruktur auf die Korrosion von Stahl und die Luftpermeabilität wird im 3. Forschungsjahr fortgesetzt.

### ARBEITSPAKET 8: KORROSIONSGEFÄHRDUNG

Hier war für das 2. Forschungsjahr zumindest der Beginn der Probenherstellung geplant. Dies ist aber nicht erfolgt, weil die Probenherstellung für die Chloridbeaufschlagung und deren Untersuchung vorgezogen wurde.

### ARBEITSPAKET 9: UNTERSUCHUNGEN AN BESTEHENDEN BAUWERKEN

Da sich die Untersuchungen auf den Erhalt des Korrosionsschutzes von Bauten mit hohem Anteil an Zementzusatzstoffen beziehen, wurde angestrebt, Proben aus schon länger bestehenden Bauwerken mit hohem Anteil an Zementersatzstoffen zu bekommen. Durch Vermittlung von BR H. Huber (Konsulent im gegenständlichen Forschungsprojekt) bzw. der Firma Pöyry Austria GmbH wurde erreicht, dass Bohrkerne aus a) dem Krafthaus Häusling des Kraftwerks Zillergründl und b) aus dem Grundablass der Sperre Schlegeis entnommen werden durften. In der Folge wurde die Firma Pöyry Austria GmbH seitens der TVFA beauftragt aus diesen Bauwerken die benötigten Bohrkerne zu entnehmen. Um den Einfluss der Bewitterung zu erfassen wurde eine Außen- und Innenwand des Krafthauses Häusling beprobt (Bohrkerne mit einem Durchmesser von 150 mm; Bezeichnung der Entnahmestellen: Schlegeis: S1; Krafthaus Häusling a) Wand Außenseite: H1 und b) Wandinnenseite: H2).

Als drittes Bauwerk wurde seitens Vorschlag von Herrn Dipl.-Ing Alfred Hüngsberg die Unterführung Himberg untersucht, deren Beton als „weisse Wanne“ ausgeführt wurde. Die Entnahme der Bohrkerne (3 Bohrkerne;  $\varnothing$  15 cm) erfolgte seitens der TVFA am 2. Juli 2019 durch die TVFA. Die Untersuchungen des Betons erfolgen gleich wie bei den erstgenannten Bauwerken. Im Labor wurden Scheiben abgetrennt, die jedoch leider nicht überall nur 1 cm dick waren, weil die Bohrkerne Betonstähle enthielten und diese nicht der Länge nach durchgeschnitten werden wollten. Die von zwei der Bohrkerne abgetrennten Scheiben wurden mit Wasser gesättigt und lagern in Kunststoffsäcken verpackt bei 20°C. Nach Ende der für die Erreichung des Gleichgewichtes zwischen Porenlösung und Feststoffen benötigten Wartezeit von 3 Monaten, kommen die Scheiben zur Prüfung. Bislang wurde von diesem Objekt lediglich die Karbonatisierungstiefe im Zuge der Entnahme zu 1,2-1,3 cm sowie die Druckfestigkeit des Betons am verbliebenen Bohrkern zu 59,5 N/mm<sup>2</sup> bestimmt.

Tabelle 10 enthält die dem Bericht der Firma Pöyry Austria entnommen Angaben hinsichtlich Betonalter, Art und Gehalt an Zusatzstoff, W/B-Wert sowie der unmittelbar nach der Entnahme gemessenen Karbonatisierungstiefe des Betons der jeweiligen Entnahmestelle.

**Tabelle 10: Angaben zu den drei Probeentnahmestellen**

Bezeichnung der Entnahmestelle	Bauwerk	Alter des Betons (Jahre)	Gehalt und Art an Zusatzstoff (% v. Zement)	W/B-Wert	Bohrkernlänge (mm)	Karbonatisierungstiefe [mm]
H1	Krafthaus Häusling (Außenwand Außenseite)	~36	~30% Flugasche	0,75	300 (alle 3 Bohrkerne)	37
H2	Krafthaus Häusling (Außenwand Innenseite)	~36	~30% Flugasche	0,75	170 – 370 mm	34
S1	Speicher Schlegeis	~48	~65% Hüttensand	0,68-0,69	340 - 375	25

Nach Eingang der Bohrkerne an der TU Graz wurden von zwei der je Entnahmestelle erhaltenen drei Bohrkerne 1 cm dicke Scheiben abgetrennt (um Porenlösung auspressen zu können, ist eine bestimmte Menge an Zementstein nötig weshalb mit nur einer Scheibe nicht das Auslangen gefunden wurde). Da die Trennscheibe 5mm dick war betrug der Schnittverlust 5 mm. Die Scheiben stammten daher aus den Tiefen

0 - 1cm, 1,5 - 2,5; 3 - 4; 4,5 - 5,5 und 6 - 7cm. Zusätzlich wurde eine Scheibe aus großer Tiefe entnommen, wo der Beton durch äußere Einflüsse (Luftkontakt, Regen, etc.) nicht verändert worden sein kann, um feststellen zu können bis in welche Tiefe Veränderungen stattgefunden haben. An allen Scheiben sollte neben dem Redoxpotential die Konzentration der Inhaltsstoffe der Porenlösung (OH<sup>-</sup>; Na<sup>+</sup>; K<sup>+</sup>-Konzentration, etc.) auch der Ca(OH)<sub>2</sub>- und Sulfat Gehalt der Feststoffe bestimmt werden. Vom dritten Bohrkern je Entnahmestelle wurde eine Probe für die Bestimmung der Druckfestigkeit herausgeschnitten (Höhe/Durchmesser: 1:1). An den verbliebenen Resten der jeweiligen Bohrkern wurde die Luftpermeabilität mittels des Torrent-Verfahrens (Torrent, 1992) bestimmt. Die Ergebnisse der Druckfestigkeit und der Luftpermeabilität sind in Tabelle 11 enthalten.

**Tabelle 11: Druckfestigkeit der Bohrkern**

Entnahmestelle	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Luftpermeabilität [10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ]
H1	40,02	0,009
H2	36,10	Probhöhe zu gering, kein plausibler Wert
S1	37,69	0,077

Für das Auspressen von Porenlösung ist es erforderlich, dass die Poren des Betons wassergefüllt sind. Dazu wurden die Scheiben zunächst in einem Vakuum-Exsikkator gelegt, der Exsikkator evakuiert und das Vakuum ca. 1 Stunde lang aufrecht erhalten um die in den Poren enthaltene Luft zu entfernen. Danach wurde bei laufender Vakuumpumpe langsam Wasser in den Exsikkator eingefüllt bis alle Scheiben vollständig im Wasser eintauchten. Dann wurde das Vakuum aufgehoben und 2 - 3 Stunden gewartet um die Proben bei Atmosphärendruck weitgehend mit Wasser zu sättigen. Um ganz sicher eine vollständige Wassersättigung zu erreichen, wurden die Scheiben in der Folge in einen speziellen Drucktopf gelegt, mit Wasser überschichtet und mittels Handpumpe ein Innendruck von 100 bar erzeugt, der 4 - 6 Stunden aufrecht gehalten wurde. Danach wurden die Scheiben in Kunststoffsäcken verpackt und vor dem Auspressen 3 Monate lang bei 20°C gelagert. Diese Lagerungszeit ist erfahrungsgemäß notwendig um sicher sein zu können, dass sich zwischen den Feststoffen und der Porenlösung ein chemisches Gleichgewicht eingestellt hat.

In der Folge wurden die pro Tiefenstufe vorhandenen beiden Bohrkernscheiben aus dem Plastiksack entnommen, auf die Öffnung des auf der Bodenplatte stehenden Auspresszylinders gelegt und mittels Hammer soweit zerkleinert, dass die Bruchstücke in den Auspresszylinder hineinfelen. Dann wurden die Teflondichtung, Prüfstempel und Druckplatte aufgebracht und mit der Druckbeaufschlagung begonnen. Dabei wurde der Druck langsam gesteigert bis Porenlösung austropfte bzw. – wenn keine Porenlösung austrat - auf einen Maximaldruck von 6200 bar erhöht. Eine weitere Druckerhöhung war aus Sicherheitsgründen nicht vertretbar. Leider konnte trotz des hohen Drucks nicht aus allen Proben Porenlösung ausgepresst werden. Bei den Proben, wo dies gelang schwankten die erhaltenen Porenlösungsmengen sehr stark. Bei einigen Proben tropfte gar keine Porenlösung aus der Vorrichtung, wohl aber befand sich etwas davon auf der Bodenplatte, von wo sie mittels Pipette aufgesammelt wurde. Daher war es nur vereinzelt möglich das Redoxpotential zu messen, weil dafür die Lösung in das stickstoffgespülte Auffanggefäß tropfen muss um nicht mit Luft in Berührung zu kommen. Auch muss für die Messung der Elektrodenkopf in die Porenlösung eintauchen, wofür eine Menge an Porenlösung von 1-2 ml notwendig ist. Woran es liegt, dass das Auspressen einmal problemlos gelang und dann wieder nicht bzw. warum so unterschiedliche Mengen an Porenlösung gewonnen wurden, kann nicht gesagt werden. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Tabellen enthalten.

**Tabelle 12: Ergebnisse der chemischen Untersuchung der von der Außenwand des Krafthauses Häusling stammenden Bohrkern (Entnahmestelle H1)**

Entnahmetiefen [cm]	Porenlösung				Beton	
	Mol OH/l	pH-Wert	mg OH/l	Redoxpotential [mV]	Ca(OH) <sub>2</sub> Gehalt (M%)	[SO <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup> Gehalt (M%)
0-1	<10 <sup>-4</sup> *	~8,5	<0,1	n.b.**)		
1,5-2,5	keine Porenlösung auspressbar					
3,0-4,0	<10 <sup>-4</sup> *	~8,5	<0,1	n.b.**)		
4,5-5,5	0,030	12,48	510	-111		
6,0-7,0	0,094	12,97	1598	-157		
19,5-20,5	0,130	13,11	2210	-147		

\*) Beton karbonatisiert; n.b.\*\*): nicht bestimmt; zu wenig Porenlösung

**Tabelle 13: Ergebnisse der chemischen Untersuchung der von der Innenwand des Krafthauses Häusling stammenden Bohrkern (Entnahmestelle H2)**

Entnahmetiefe [cm]	Porenlösung				Beton	
	Mol OH-/l	pH-Wert	mg OH-/l	Redoxpotential [mV]	Ca(OH) <sub>2</sub> Gehalt (M%)	[SO <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup> Gehalt (M%)
0-1	<10 <sup>-4*</sup> )	~8,5	<0,1	-5		
1,5-2,5				n.b.**)		
3,0-4,0	0,06	12,75	952	-113		
4,5-5,5	0,07	12,83	1148	n.b.**)		
6,0-7,0	0,15	13,16	2482	-132		
13,0-14,0	0,14	13,13	2295	-167		

\*) Beton karbonatisiert; n.b.\*\*): nicht bestimmt; zu wenig Porenlösung

**Tabelle 14: Ergebnisse der chemischen Untersuchung der von der Außenwand des Speichers Schlegeis stammenden Bohrkern (Entnahmestelle S1)**

Entnahmetiefe [cm]	Porenlösung				Beton	
	Mol OH-/l	pH-Wert	mg OH-/l	Redoxpotential [mV]	Ca(OH) <sub>2</sub> Gehalt (M%)	[SO <sub>4</sub> ] <sup>2-</sup> Gehalt (M%)
0-1	<10 <sup>-4*</sup> )	~8,5	<0,1	n.b.**)		
1,5-2,5	keine Porenlösung auspressbar					
3,0-4,0	keine Porenlösung auspressbar					
4,5-5,5	0,040	12,60	680			
6,0-7,0	0,076	12,88	1292			
24,0-25,0	0,073	12,86	1233			

\*) Beton karbonatisiert; n.b.\*\*): nicht bestimmt; zu wenig Porenlösung

In den Bereichen, wo die oben genannten Bohrkern wurden sowohl am Kraftwerk Häusling und am Staudamm Schlegeis zwei Monitoringsysteme installiert (vgl. Abbildung 17 und Abbildung 18). Gemessen wird mit diesen beiden Systemen die Luftfeuchte und Lufttemperatur im Außenbereich und tiefengestaffelt im Beton. Zudem wurden 6 Elektrodenpaare in unterschiedlichen Tiefen im Beton zur Messung der elektrischen Impedanz installiert. Messwerte werden alle 30 Minuten erfasst und in einer Datenbank gespeichert. Die Visualisierung erfolgt über einen Webbrowser (vgl. Abbildung 19). Ziel der Messungen ist, über den Jahresverlauf die Temperaturen, die Luftfeuchte und auch die Materialfeuchte zu erfassen und die gewonnenen Daten mit der Exposition bzw. der Expositionsklasse zu korrelieren. Erste Ergebnisse werden hierzu im 3. Forschungsjahr erwartet.



**Abbildung 17: Sensorinstallation am Staudamm Schlegeis**



Abbildung 18: Sensorinstallation am Kraftwerk Häusling

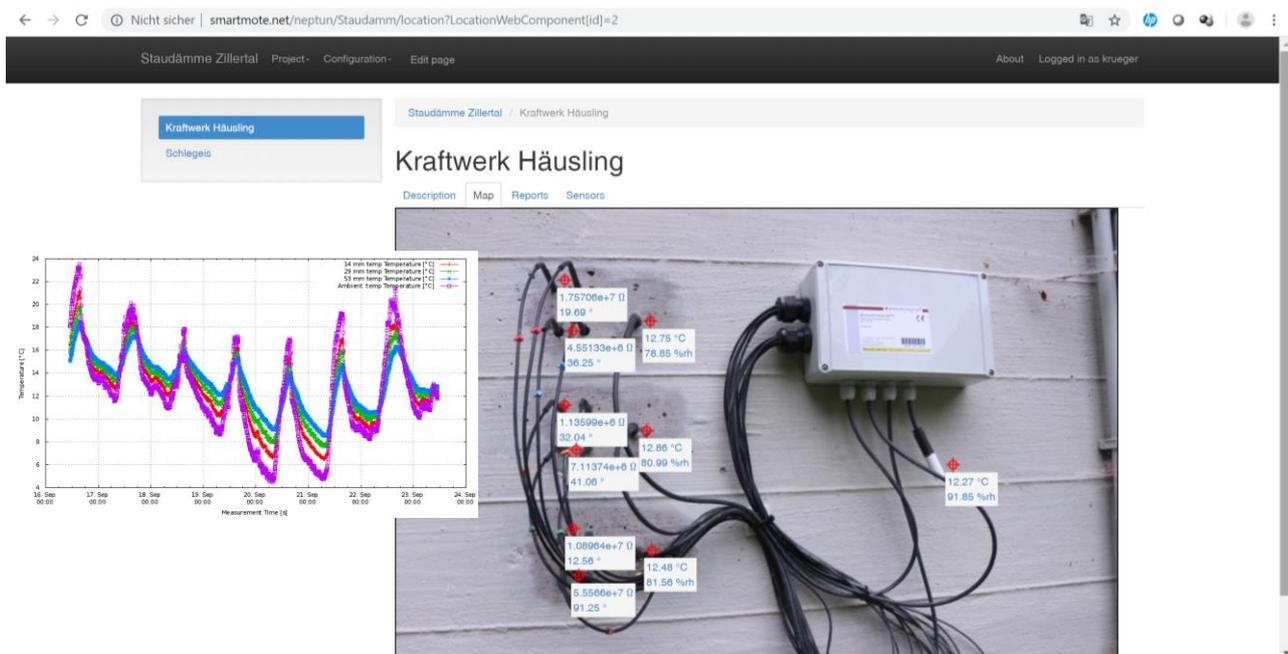


Abbildung 19: Beispiel einer Online-Visualisierung der Messdaten über Webbrowser

### ARBEITSPAKET 10: AUSWERTUNG UND BEURTEILUNG

Ein Bericht über die im 2. Forschungsjahr durchgeführten Arbeiten, die vorliegenden Messergebnisse und die daraus abgeleiteten Aussagen wurde für die Arbeitspakete 3 bis 9 erstellt (s. Kapitel 2.2). Die Arbeitspakete 3, 4 und 5 können als abgeschlossen angesehen werden. Die weiteren Auswertungen der noch laufenden Arbeitspakete 6 – 9 erfolgen nach Arbeitsfortschritt.

### ARBEITSPAKET 11: EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PRAXIS

Empfehlungen für die Praxis können erst im vierten Forschungsjahr abgegeben werden, da die gewonnenen Ergebnisse aus dem Projekt Grundlage für Empfehlungen darstellen. Daher liegen im ersten Forschungsjahr planmäßig auch keine Ergebnisse vor.

### 3. Projektteam und Kooperationen

- Projektmanagement: Dipl.-Ing. Michael Pauser (ÖBV)
- Wissenschaftliche Projektleitung: Univ.-Prof. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Dr.-Ing. Markus Krüger (IMBT)
- Projektmitarbeiter:
  - Ao.Univ.-Prof.i.R. Dr.phil. Josef Tritthart (IMBT)
  - Joachim Juhart, Dipl.-Ing. Dr.techn. (IMBT)
  - Dissertantin: Claudia Baldermann, M.Sc., Rudic Ognijen, M.Sc. (IMBT)
  - Laboranten: Rudolf Panik; Gregor Brunensteiner, Jürgen-Peter Liederer (IMBT)
- Externe Partner/Dritteleister (Sichtung und Probenahme zweier Bauwerke (AP 9):
  - Firma Pöyry Austria GmbH  
Materialversuchsanstalt Strass  
Prüf- und Inspektionsstelle für Baustoffe, Boden und Fels  
6261 Strass 103  
Austria  
Ansprechpartner: Roland Murr  
Baurat h. c. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Huber
  - Institut für Elektronenmikroskopie und Nanoanalytik (FELMI-ZFE) - Zentrum für Elektronenmikroskopie  
Steyrergasse 17  
8010 Graz
  - Andre Baldermann (Institut für Angewandte Geowissenschaften; TU Graz)

Es gibt keine Auswirkungen auf die Kosten- /Finanzierungsstruktur bzw. der Zielsetzung.

### 4. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung

Am Beginn des 4-jährigen Forschungsprojekts wurden die Grundlagen gelegt. Endgültige Verwertungen sind daher noch nicht möglich. Das Programm und erste Ergebnisse wurden den Partnern laufend und werden bei der Fachtagung „4. Grazer Betonkolloquium 2018“ vorgestellt.

#### 4. Grazer Betonkolloquium 2018:

- Baldermann, Claudia; Tritthart, Josef; Juhart, Joachim, Krüger, Markus: Einfluss des reduzierten  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalts in zusatzstoffoptimierten Bindemitteln auf das Korrosionspotential
- C. Baldermann, A. Baldermann, O. Furat, M. Krüger, M. Nachtnabel, H. Schreottner, J. Juhart, V. Schmidt, J. Tritthart: „Mineralogical and microstructural response of hydrated cement blends to leaching“, Construction and Building Materials, 229, 116902, pp 1-15, 2019.

Geplant sind studentische Abschlussarbeiten zu vergeben.

### 5. Erläuterungen zu Kosten & Finanzierung

Keinen Abweichungen vom Kostenplan laut Beantragung.

### 6. Projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen

- Gehen Sie auf projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen (laut §6 des Förderungsvertrags) ein, sofern diese im Förderungs- bzw. Werkvertrag vereinbart wurden.

## **7. Meldungspflichtige Ereignisse**

Gibt es besondere Ereignisse rund um das geförderte Projekt, die der FFG mitzuteilen sind (siehe auch Richtlinien – Anhang zu 5.3., 5.3.5), z.B.

- Änderungen der rechtlichen und wirtschaftlichen Einflussmöglichkeiten bei dem/der Förderungsnehmer/in
- Insolvenzverfahren
- Ereignissen, die die Durchführung der geförderten Leistung verzögern oder unmöglich machen
- Weitere Förderungen für dieses Projekt