

# ENDBERICHT

|                             |  |                           |                           |
|-----------------------------|--|---------------------------|---------------------------|
| <b>FFG Projektnummer</b>    | 879005   | <b>FörderungsnehmerIn</b> | ÖBV-GmbH                  |
| <b>Bericht Nr.</b>          | 2  | <b>Berichtszeitraum</b>   | 01.10.2019-<br>31.12.2020 |
| <b>Bericht erstellt von</b> | Claudia Baldermann, Ognjen Rudic, Prof. Tritthart und Prof. Krüger |                           |                           |

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

## 1. Ziele und Ergebnisse

Im 3. Forschungsjahr, das wegen der Corona-Einschränkungen bis Dezember 2020 verlängert wurde, sind die Laboruntersuchungen (Ausnahme AP 8 „Korrosionsgefährdung“) und die an den bestehenden Bauwerken durchzuführenden Untersuchungen im Wesentlichen abgeschlossen worden. Die Arbeiten zu AP1 „Projektmanagement“ und AP2 „Wissenschaftliche Projektleitung“ erfolgen laufend und sind nicht Gegenstand dieses Berichtes. Die AP´s 3-5 („Ausgangsstoffe / Bindemittelrezepturen“; „CO<sub>2</sub>-Bindekapazität und Porenlösungsanalyse“ sowie „Festigkeitsentwicklung“) waren schon vor dem laufenden Forschungsjahr abgeschlossen, sodass hier nur auf den Stand der Arbeiten der AP´s 6 bis 11 eingegangen wird.

### AP 6 „Mikrostrukturcharakterisierung“

Die Untersuchungen zu AP 6 „Mikrostrukturcharakterisierung“ mit Bestimmungen der spezifischen-Oberfläche (BET), Wasserdampfsorption und Quecksilberdruckporosität wurden planmäßig fortgesetzt und konnten im praktischen Teil abgeschlossen werden. Die Auswertungen laufen noch, aber es kommt klar zum Ausdruck, dass hydraulisch aktive und puzzolanischen Zementersatzstoffe die Porenverteilung stark zu Poren mit geringerem Radius verschieben, was sich positiv hinsichtlich der Dichtigkeit der Proben auswirkt.

### AP 7 „Chloridtransport und Karbonatisierungsfortschritt“

Die Untersuchungen zum Chloridtransport (Chloridprofil von Mörtelproben unterschiedlicher Vorlagerung - 7, 28 und 90 Tage - und nachfolgender Auslagerung in 3%iger NaCl-Lösung für 90 Tage, 6 und 9 Monate) wurden mit Ausnahme einiger Wiederholungsprüfungen abgeschlossen. Ebenso konnten die Untersuchungen zum Karbonatisierungsfortschritt von Mörtelproben mit unterschiedlichem W/B-Wert und „normaler“ (Lagerung in Luft) sowie beschleunigter Karbonatisierung (Lagerung in Luft mit 2 % CO<sub>2</sub>) und Bestimmung der Gesamtporosität, der spez. Oberfläche (BET), der Verteilung der Porenradien (1-100 nm) sowie Messungen der Wasserdampfsorption in Poren mit einem Radius von 1 - 30nm abgeschlossen werden. Die Auswertungen werden im 4. Forschungsjahr abgeschlossen. Es kam auch hier der positive Einfluss hydraulisch aktiver und puzzolanischer Zementersatzstoffe klar zum Ausdruck.

### AP 8 „Korrosionsgefährdung“

Hier verzögerte sich die zeitliche Durchführung gegenüber der ursprünglichen Zeitplanung. Es wurden aber die Probekörper hergestellt und die Messungen begonnen, so dass im 4. Forschungsjahr mit Ergebnissen gerechnet werden kann. Es wird kontinuierlich die Änderung des Potentials von Bewehrungsstahlproben mit unterschiedlicher Oberflächenvorbehandlung (ohne, schwache bzw. starke Reinigung), mittig in zylindrischen Mörtelproben enthalten sind und teilweise in Chloridlösung eintauchen, verfolgt. Zudem wird die elektrische Impedanz des Mörtels in unterschiedlichen Tiefen gemessen.

### AP 9 „Untersuchungen an bestehenden Bauwerken“

Die Laboruntersuchungen wurden abgeschlossen und die für die Dauer eines Jahres vorgesehenen Dauermessungen von Temperatur (Umwelt und im Beton), der relativen Luftfeuchtigkeit (Umwelt und im Beton) und der elektrischen Impedanz (im Beton) an den Bauwerken Zillergründl und Schlegeis laufen noch, weil sich zufolge Corona keine Möglichkeit ergab die Messgeräte zu demontieren. Die Messungen werden daher fortgesetzt bis die Geräte demontiert werden können oder bis die enthaltenen Batterien keinen Strom mehr liefern. Bisher zeigte sich u. a. dass die rel. Luftfeuchtigkeit im Beton ab einer bestimmten Tiefe unabhängig von der äußeren Wetterlage konstant bleibt (~ 80%). Die Ergebnisse sollen als Eingangsparameter für Modelle zur Einwirkungsbeschreibung und zur verbesserten Prognose der Carbonatisierung bzw. der Korrosionsgefährdung genutzt werden. Für das 4. Forschungsjahr (Ende 2021) ist vorgesehen die praktischen Messungen abzuschließen, die Auswertungen fortzusetzen, zu einem Abschluss zu bringen und die sich daraus ergebenden Folgerungen für die Praxis abzuleiten.

## 2. Arbeitspakete und Meilensteine

### 2.1 Übersichtstabellen

In der Tabelle 1 wurden die Arbeitspakete und in Tabelle 2 die Meilensteine mit den Basisterminen und aktuellen Terminen gemäß Förderungsansuchen und kostenneutraler Verlängerung beschrieben.

**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 | 31.12.21 | 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 und die Rezepturen für die Bindemittel nach Vorversuchen festgelegt   |
| 4      | CO <sub>2</sub> -Bindekapazität und Porenlösungsanalyse | 100%                | 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                                  | 100%                | 02.04.18    | 31.06.19 | 28.02.18 | 01.01.19 | Probekörper wurden hergestellt und geprüft, sowie ausgewertet   |
| 6      | Mikrostrukturcharakterisierung                          | 90%                 | 01.10.18    | 31.03.21 | 01.10.18 |          | Labormessungen abgeschlossen; Auswertung läuft.   |
| 7      | Chloridtransport und Karbonatisierungsfortschritt       | 90%                 | 01.10.18    | 30.06.21 | 24.07.18 |          | Die Chloridbeaufschlagung und Karbonatisierungsprüfungen sind mit Ausnahme von einigen Wiederholungsprüfungen abgeschlossen; die Auswertung der Ergebnisse sind im Laufen.  |
| 8      | Korrosionsgefährdung                                    | 15%                 | 02.07.18    | 30.06.21 | 02.07.19 |          | Probekörper wurden Großteils hergestellt und die Versuche wurden begonnen   |
| 9      | Untersuchungen an bestehenden Bauwerken                 | 90%                 | 16.02.18    | 30.09.21 | 16.02.18 |          | Die Laboruntersuchungen sind abgeschlossen. Die Bauwerksuntersuchungen laufen erfolgreich, wurden aber wegen Corona noch nicht abgeschlossen.                               |
| 10     | Auswertung und Beurteilung                              | 30%                 | 02.04.18    | 19.11.21 | 02.04.18 |          | Auswertungen liegen planmäßig vor.  |
| 11     | Empfehlungen für die Praxis                             | 0%                  | 31.01.21    | 31.12.21 |          |          | Im 3. Forschungsjahr nicht vorgesehen   |

Tabelle 2: Meilensteine

| Meilenstein Nr. | Meilenstein Bezeichnung  | Basistermin | 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               | 3. Endbericht  | 30.09.20    | 31.12.20         | 31.12.20                | Gemäß genehmigter kostenneutraler Verlängerung                 |
| 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 hydraulisch aktiver Zusatzstoffe bzw. Mikro- oder Mesokalk, der Erhärtungsbedingungen und -dauer auf die Menge des abgespaltenen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | 31.05.20    | im 2. FJ         | 31.12.20                | Liegt vor<br>Auswertung und Erkennung von Tendenzen Siehe AP 4 |
| 8               | Chlorideindiffusion und Karbonatisierungswiderstand von Mörtelproben   | im 2. FJ    | 31.09.20         | 31.12.20                | ----   |
| 9               | Stärke des Einflusses des Wassergehaltes ( $W/B_G$ -Wert), auf die Menge des abgespaltenen $\text{Ca}(\text{OH})_2$  | 31.05.20    | im 2. FJ         | 30.09.19                | Liegt vor  |
| 10              | Porenlösung auspressen und analysieren   | 31.05.20    | im 2. FJ         | 30.09.19                | Liegt vor  |
| 11              | Herstellung Probekörper für Festigkeitsentwicklung   | 01.07.18    | 01.07.18         | 20.07.18                | Liegt vor  |
| 12              | Ergebnisse für Festigkeitsentwicklung  | 31.05.20    | 01.02.19         | 31.09.19                | Liegt vor  |
| 13              | Festlegung einzubeziehender Bauwerke   | 01.03.18    | 10.09.18         | 10.09.18                | Liegt vor  |
| 14              | Laboruntersuchungen und Messungen der an den Bauwerken installierten Monitoringsysteme mit Online-Datenvisualisierung  | 01.08.18    | Anfang 2. FJ     |                         | Installation erfolgt, kontinuierliche Messungen laufen.        |
| 15              | Auswertung und Gegenüberstellung der Ergebnisse  | 31.12.21    | 31.12.21         |                         | Laufend  |

## 2.2 Beschreibung der im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten

### 2.2.1 Arbeitspaket 6: Mikrostrukturcharakterisierung an reinen Bindemitteln

Innerhalb des Arbeitspaketes 6 zur Untersuchung der Porenstruktur wurden Untersuchungen an den erhärteten Leimproben der reinen Bindemittel durchgeführt. Zum Einem wurden diese vor Umwelteinflüssen geschützt (verpackt) gelagert und zum Anderem an der Luft bei 20 °C mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65% ( $\cong$  Luft gelagert). Die Proben wurden der i) natürlichen CO<sub>2</sub> = 0,04 Vol.% und der ii) beschleunigten Karbonatisierung CO<sub>2</sub> = 2 Vol.-% für 140 Tage ausgesetzt.

Die verschiedenen frischen Bindemittelmischungen wurden in zylindrischen Kunststoffrohren (Durchmesser 70 mm, Höhe 150 mm) eingefüllt und für 24h in einem Überkopfdrehstand gedreht, zur Vermeidung von Ausbluten und Entmischung der einzelnen Bestandteile. Nach dem Entformen wurden die Proben in Plastiktüten verpackt und für weitere 27 Tage bei 20 °C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit gelagert. Nach der 28-tägigen Nachbehandlung wurden die Leimproben der reinen Bindemittel ausgepackt und für 24 Stunden bei 105 °C getrocknet, um weitere Hydratationsprozesse zu stoppen. Dann wurden sie erneut in Plastiktüten versiegelt und bei Raumtemperatur gelagert. Die Mikrostrukturuntersuchungen wurden bei einem Probenalter von etwa 3 Monaten an Leimproben der reinen Bindemittel durchgeführt (Tabelle 3).

**Tabelle 3: Zusammensetzung der Bindemittel in M.%, W/B-Wert (Wasser zu Bindemittel) und W/B<sub>hy</sub>-Wert (Wasser zu hydraulischen/puzzolanischen Bindemittelanteil – z.B. OPC + GGBFS)**

| Probe | CEM I<br>(M. %) | GGBFS* (Hüttensand)<br>(M. %) | MEK*<br>(M. %) | MIK*<br>(M. %) | Si*<br>(M. %) | MK*<br>(M. %) | W/B-<br>Wert | W/B <sub>hy</sub> -<br>Wert |
|-------|-----------------|-------------------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|--------------|-----------------------------|
| A1    | 100             |                               |                |                |               |               | 0.40         | 0.42                        |
| A2    | 100             |                               |                |                |               |               | 0.60         | 0.63                        |
| B1    | 70              | 30                            |                |                |               |               | 0.40         | 0.42                        |
| B2    | 70              | 30                            |                |                |               |               | 0.60         | 0.62                        |
| C1    | 30              | 70                            |                |                |               |               | 0.40         | 0.42                        |
| C2    | 30              | 70                            |                |                |               |               | 0.60         | 0.63                        |
| D1    | 90              |                               |                |                | 10            |               | 0.40         | 0,47                        |
| D2    | 90              |                               |                |                | 10            |               | 0.60         | 0,69                        |
| E1    | 90              |                               |                |                |               | 10            | 0.40         | 0.42                        |
| E2    | 90              |                               |                |                |               | 10            | 0.60         | 0.62                        |
| G1    | 60              |                               | 32.5           | 7.5            |               |               | 0.36         | 0.63                        |
| G2    | 60              |                               | 32.5           | 7.5            |               |               | 0.60         | 1.05                        |
| J1    | 60              | 30                            |                | 10             |               |               | 0.45         | 0.52                        |
| J2    | 60              | 30                            |                | 10             |               |               | 0.60         | 0.69                        |
| K1    | 60              | 22.5                          | 10             | 7.5            |               |               | 0.45         | 0.57                        |
| K2    | 60              | 22.5                          | 10             | 7.5            |               |               | 0.60         | 0.75                        |
| M1    | 60              |                               | 40             |                |               |               | 0.45         | 0.79                        |
| M2    | 60              |                               | 40             |                |               |               | 0.60         | 1.05                        |

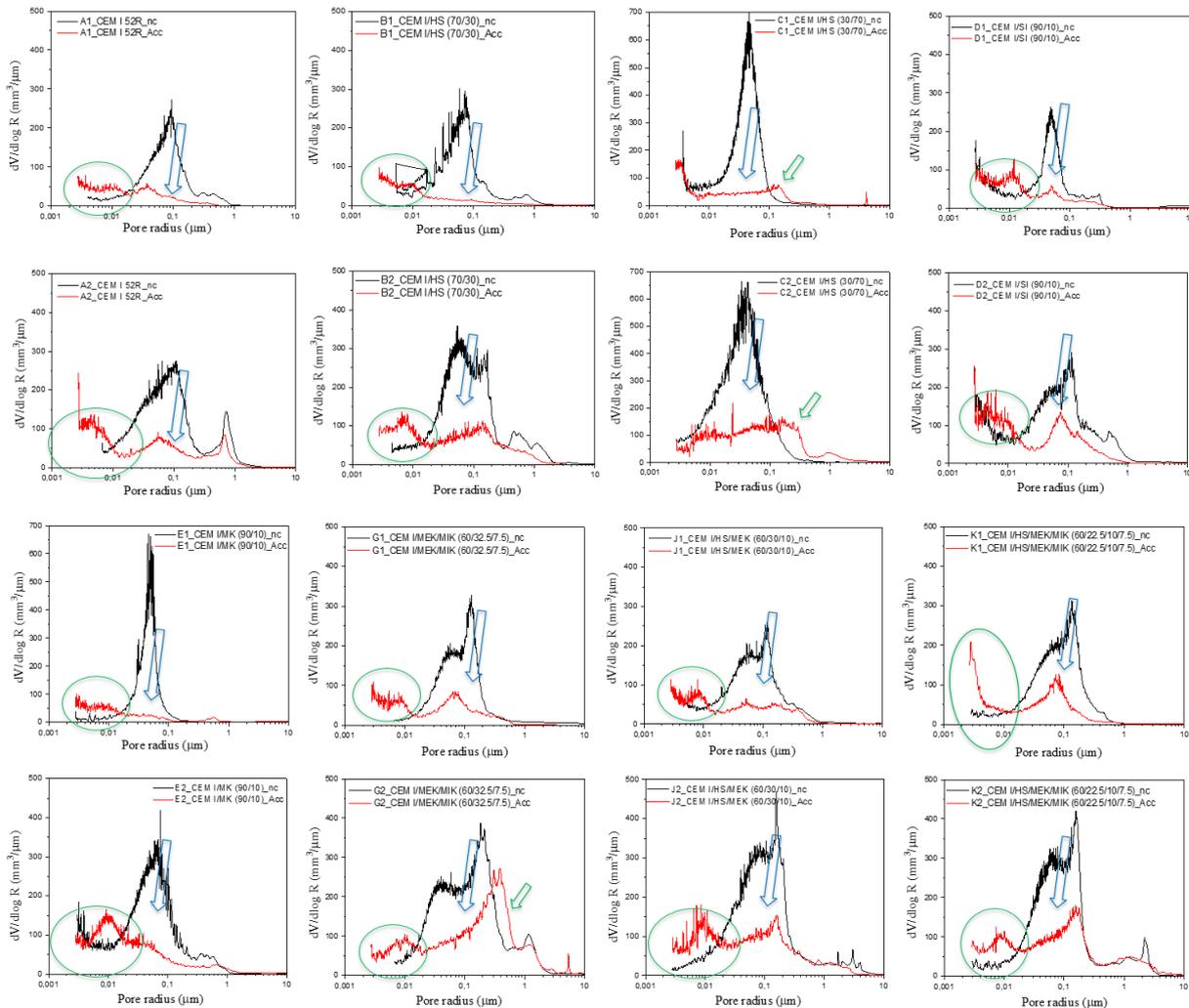
\* GGBFS – „Ground granulated blast furnace slag (Hüttensand); MEK – grober Kalkstein, MIK – feiner Kalkstein, SI – Silikastaub und MK - Metakaolin

Zur Beendigung der Hydratationsprozesse wurden alle Bindemittelproben im Ofen bei 105 °C für 24h getrocknet. Innerhalb dieses Projektes wird die Porenstruktur mittels folgender 3 Methoden untersucht:

- 1) *Quecksilberdruckporosimetrie (MIP, mercury intrusion porosimetry)* mittels „Pascal 440“ der Firma Thermo-Scientific, gemessen von den Kollegen an der TU Darmstadt (Deutschland). Untersuchte Porengrößenverteilung liegt in dem Bereich zwischen 2nm und 50 nm.
- 2) *Niedrigtemperatur-Stickstoffadsorption* mittels „BELSORP - mini X“ der Firma MicrotracBEL zur Untersuchung der spezifischen Oberfläche (BET) und der Porengrößenverteilung (PSD); Untersuchte Porengrößenverteilung liegt zwischen 2nm und 50 nm.
- 3) *Dynamische Wasserdampfsorption (DVS)* mittels „GraviSorp120“ der Firma POROTEC (dynamische gravimetrische Wasserdampfsorption); Untersuchte Porengrößenverteilung liegt zwischen 1nm und 50 nm.
  - a. Diese Methode wurden auch für Leim- und Mörtelproben mit einem geringen Wassergehalt im AP 7 Karbonatisierungsfortschritt verwendet.

**Quecksilberdruckporosimetrie (MIP)**

Für die Kalkulation der Porenradienverteilung (PSD) unter Verwendung der „Washburn Gleichung“ [1] wurde Quecksilber (Dichte = 13,53 g/cm<sup>3</sup>, Oberflächenspannung = 0,485 N/m und einem Kontaktwinkel von 130°) verwendet. Die Unterteilung der Porenradienverteilung die aus der MIP Methode erhalten wurden erfolgte in drei Hauptgruppen: i) Gel und kleinere kapillare Poren mit einem Porenradius von 0-0,05 µm, ii) mittlere kapillare Poren mit einem Porenradius von 0,05-0,1 µm und iii) große kapillare Poren mit einem Porenradius von 0,1-100 µm. Die kumulative Porosität (maximale Porengröße = 3 nm) wurde an zwei Proben der Bindemittelmischung gemessen [2]. Die Ergebnisse der PSD-Untersuchung und kumulativen Porosität durch MIP sind in den Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt.



**Abbildung 1: Vergleich der PSD-Kurven von nicht karbonatisierten mit karbonatisierten Bindemittelleimen bestimmt bei der MIP Methode.**

Die Substitution von CEM I durch SCMs beeinflusste eindeutig die Mikrostrukturen von nicht karbonatisierten Proben, einhergehend mit einer Änderung der kumulativen Porosität und der porösen Mikrostruktur (Abbildung 1 und Abbildung 2).

Allgemein ist bei den nicht karbonatisierten Proben zu erkennen, dass die Bindemittelleime mit einem höheren Wassergehalt eine höhere Porosität besitzen, im Vergleich zu den Proben mit einem geringeren W/B-Wert. Bei (fast) konstanten w/b-Verhältnissen (w/b = 0.36 - 0,45; Abbildung 2a) vs. w/b = 0,6 (Abbildung 2b) sind jedoch je nach Gehalt der Zementersatzstoffe bemerkenswerte Unterschiede vorhanden. Die Mischung mit 30% GGBFS als OPC-Ersatz (B1 und B2) hatten nur eine geringfügig höhere gesamt offene Porosität im Vergleich zu den Referenzleimen (A1, A2), was in Übereinstimmung zu [3] steht. Der Gehalt an Gelporen hat hier zu-, und der an größeren Kapillarporen abgenommen. Bei 70%-GGBS war die MIP-Gesamtporosität deutlich höher (C1- und C2-Mischungen). Hier ist besonders der hohe Gehalt der

Gelporosität bemerkenswert. Mit OPC-Ersatz durch SI und MEK wurde bei w/b-Wert ~0,4 (D1 bzw. E1) eine geringere (D1) bzw. etwa gleich hohe (E1) MIP-Gesamtporosität aber ein deutlich höherer Anteil an Gelporen gemessen als bei der Referenzprobe A1 (Abbildung 1 und Abbildung 2). Dies zeigt einen positiven Einfluss des vergleichsweise geringeren SI- und MK-Gehaltes (10 M%) auf die Entwicklung der Porenradienverteilung (Abbildung 1 und Abbildung 2). Bei w/b = 0,6 war im Vergleich zu A2 bei Kieselsäure als OPC-Ersatzstoff ein etwa gleich großer Gehalt an Gelporen (Probe E2) aber ein höherer Gehalt an Kapillarporen vorhanden. Das deutet auf einen sehr starken Einfluss des W/B-Wertes der D-Proben auf die Mikrostruktur hin (Abbildung 2b). Bei den E2-Proben war ein solch starker Einfluss nicht zu erkennen, denn ihre MI-Gesamtporosität war gleich groß, jedoch der Anteil an Kapillarporen kleiner und der an Gelporen größer als bei der A2-Probe.

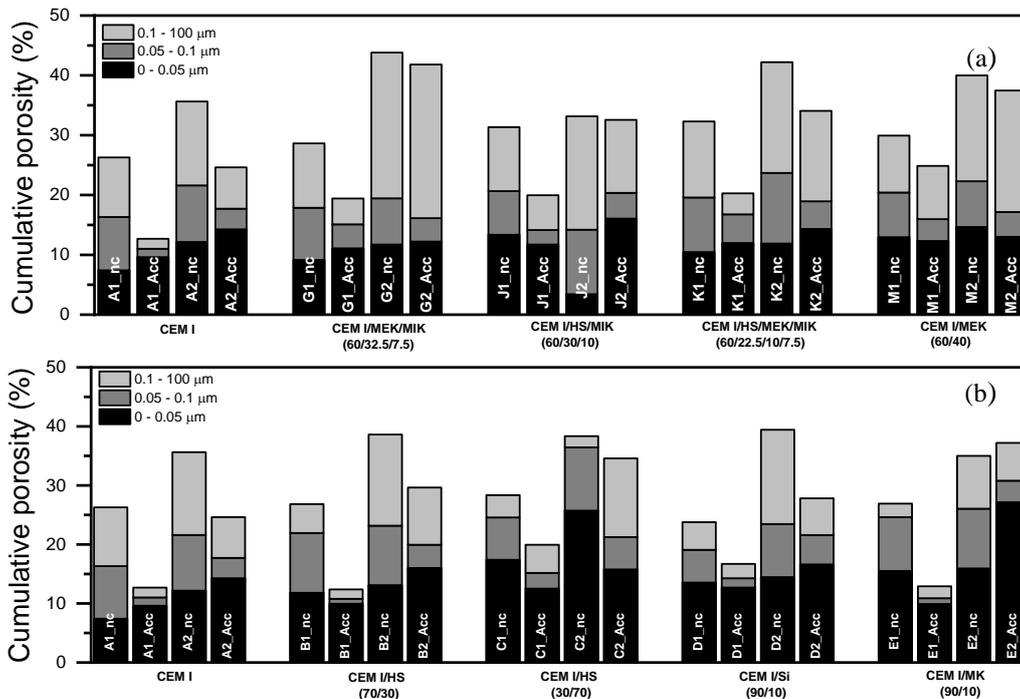


Abbildung 2: Ergebnisse der Gesamt Porosität von nicht karbonatisierten (nc) und karbonatisierten (Acc) Proben (erhärtet)

Mit einem zunehmenden Anteil an hydraulisch inaktivem Kalkstein (MIK und MEK) steigt die MIP-Gesamtporosität, wobei der Gehalt an Gelporen größer (w/b-Wert ~0,4) bzw. etwa gleich groß war (w/b-Wert ~0,6) wie bei den A-Proben, der an Kapillarporen aber höher (Abbildung 2). Die Mehrheit der Mischungen (J1 vs. B1, J2 vs. B2, K1 vs. J1; G2 und M2 vs. A2) zeigen auch mit zunehmendem Kalksteingehalt einen zunehmenden Anteil an größeren Kapillarporen (0,1-100 µm). Eine weitere Bestätigung der beschriebenen Zunahme der MIP-Gesamtporosität bei Verwendung von Kalkstein als Zementersatzstoff ist zu erkennen, wenn der MIK und MEK Gehalt bei Mischungen mit GGBFS erhöht wurde, wie der Vergleich von J- und K-Proben mit B-Proben unabhängig vom W/B-Wert zeigt. Der beobachtete Anstieg trat aufgrund einer Veränderung der Porengrößenverteilung hauptsächlich im Kapillarbereich auf, insbesondere bei höheren Wassergehalten (Abbildung 2).

Hinsichtlich der Bindemittelproben die einer 2%igen CO<sub>2</sub> Konzentration ausgesetzt waren, wurde eine signifikante Veränderung der Mikrostruktur aller Bindemittelproben beobachtet (Abbildung 1 und Abbildung 2). Hier verursachte die Karbonatisierung eine deutliche Reduktion der kapillaren Poren (mit einem Porenradius > 50nm) und einen signifikanten Anstieg der Gelporen (verstärkt bei einem Porenradius < 25nm). Hierbei ist die Probe C mit 70% Hüttsand im Bindemittel eine Ausnahme wie in Abbildung 1 erkennbar ist. Bei dieser Probe kommt es zu einem Anstieg der gröberen kapillaren Porosität und einer Reduktion der feineren Poren. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die mittleren und gröberen kapillaren Poren mit Karbonatisierungsprodukten (u.a. Kalzit) gefüllt werden und somit ihr Beitrag für die Gesamtporosität drastisch reduziert wird (Abbildung 1 und Abbildung 2). Andererseits deuten die MIP Ergebnisse darauf hin, dass es zu einem Anstieg in den feinen Poren <25 nm kommt, was darauf hindeuten könnte, dass auch aus den Hydratationsprodukten Ca<sup>2+</sup> ausgelaugt wird und somit für eine zusätzliche Karbonatisierung zur Verfügung stehen kann. Dies könnte darauf hindeuten, dass mit steigender CO<sub>2</sub> Konzentration es zu einer stärkeren Dekalzifizierung der C-S-H und C-A-S-H Mineralphasen und damit zu einer Verdichtung der Porenstruktur kommen könnte. Mit Auslagerung der reinen Bindemittelproben kommt

es zu einer Reduktion der Gesamtporosität und es scheint, dass die Dichte größer wird, wie aus den Ergebnissen der zunehmenden Massen nach der Karbonatisierung hervor geht (Abbildung 3). Zusammen mit der beobachteten Reduktion der größeren Porosität könnte das bedeuten, dass die Poren, die durch die MIP-Methode bestimmt werden können, entweder i) bereits durch Mineralneubildung während der Hydrationszeit oder ii) durch Mineralneubildung während der Karbonatisierung gefüllt worden sind.

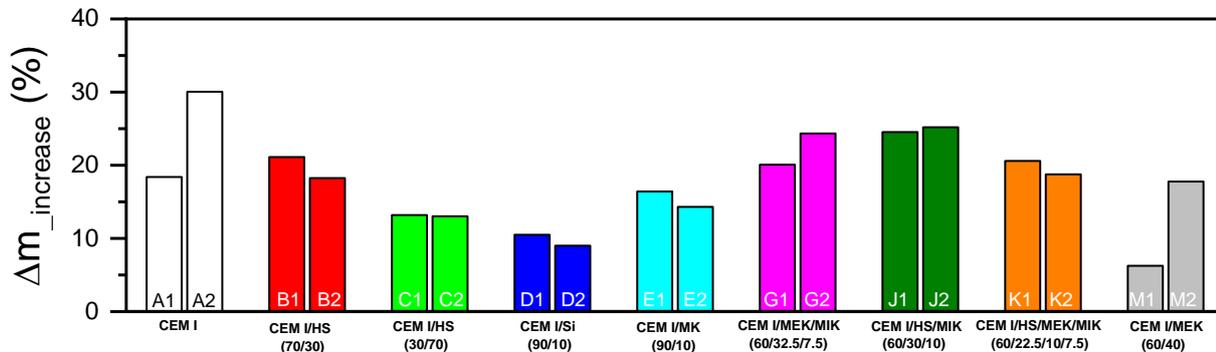


Abbildung 3: Zunahme der Masse (in %) der untersuchten reinen Bindemittelleime nach der Karbonatisierung.

Die Gesamtporosität, welche durch die MIP-Methode bestimmt wurde, kann ins Verhältnis zum volumetrischen, reaktivem Pulver/Wasser-Anteil gesetzt werden, was in Übereinstimmung mit der Gleichung 1 modifiziert nach dem Power's Model ist. Diese Gleichung beinhaltet die Annahmen, dass der Grad der Hydratation von allen Mischungen vergleichbar ist und, dass das inerte Kalkstein als Füller keinen signifikanten Einfluss auf die Gesamtporosität hat:

$$P_{rel}(\%) = \frac{P_{MIP}}{V_{red}} = \frac{P(\%)_{MIP}}{\frac{\sum \frac{m_{hy} \cdot w}{d_{hy}} + \sum m_{hy}}{\sum \frac{m_i \cdot w}{d_i} + 100}} \tag{1}$$

In der Gleichung wurde das Porenvolumen  $P_{rel}$  (%) auf das reduzierte Gesamtvolumen ( $P_{rel} = V_{pore}/V_{red}$ ) bezogen und das  $V_{red}$  bildet sich aus der Summe vom Wasseranteil ( $w/b$ ) und volumetrischen Anteil des hydraulischen/puzzolanischen Bindemittels (z.B wird das totale Leimvolumen durch den volumetrischen Anteil vom inerten Kalkstein reduziert). Die Massenanteile und die Dichte der hydraulischen Bindemittel werden durch  $m_{hy}$  und  $d_{hy}$  beschrieben. Wohingegen  $m_i$  und  $d_i$  den Massenanteil und die Dichte von allen hydraulischen, puzzolanischen und inerten Zementersatzstoffen beschreibt.

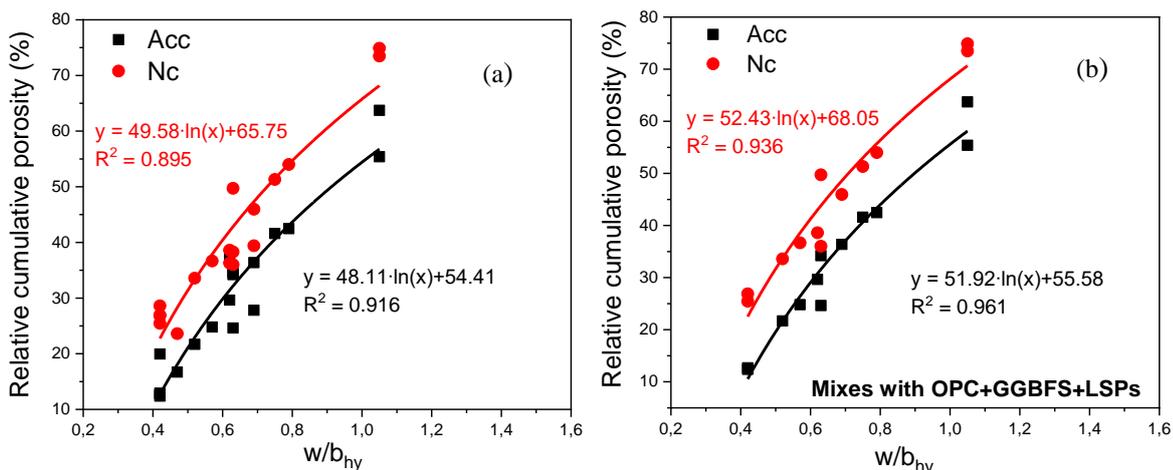


Abbildung 4: Korrelation zwischen der relativen kumulativen Porosität ( $P_{rel}$ ) und dem hydraulischen  $w/b_{hy}$  von a) allen Bindemittelmischungen und b) den Mischungen mit OPC, Hüttensand und Kalkstein (LSP) im Bindemittel

Das hier neu beschriebene Verhältnis zwischen der kumulativen Porosität ( $P_{rel}$ ) und dem  $w/b_{hy}$  ist in Übereinstimmung mit dem modifizierten Power's Model (Abbildung 4). In der Abbildung 4a ist erkennbar, dass das logarithmische Verhältnis zwischen der relativen kumulativen Porosität und dem  $w/b_{hy}$ -Wert von allen karbonatisierten (Acc) und nicht karbonatisierten (Nc) Bindemittelmischungen einen

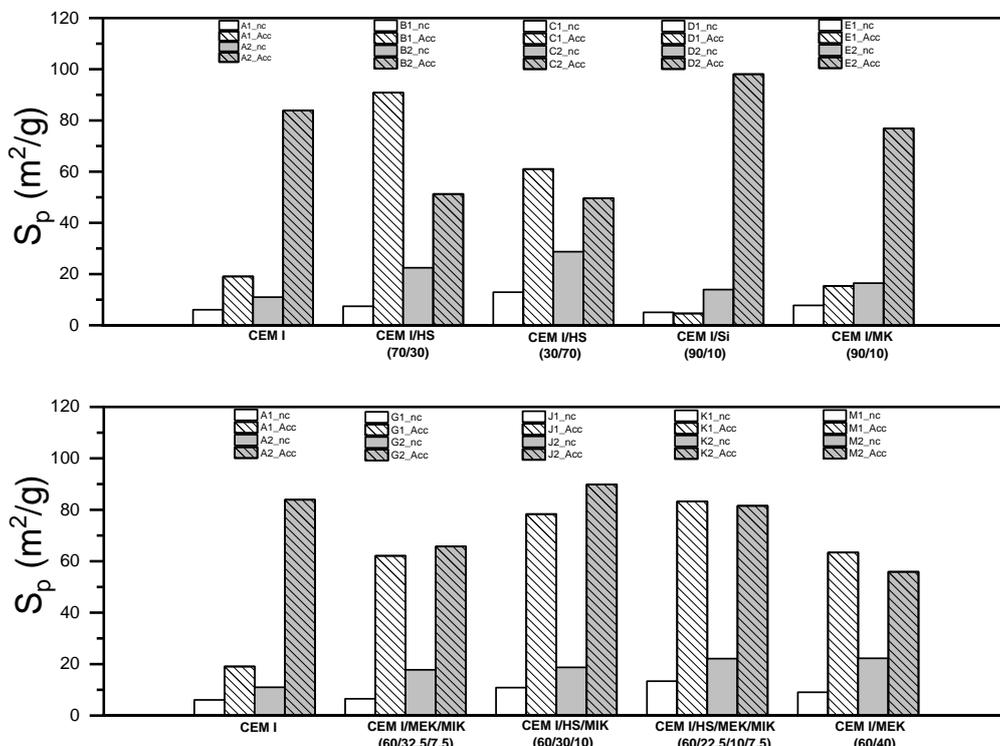
Korrelationskoeffizienten von 0,9 hervorbringt. Daraus ergibt sich, dass die Entwicklung der kumulativen Porosität stark beeinflusst wird durch i) den volumetrischen Anteil an hydraulischen reaktiven Pulver/Bindemittel; ii) der Menge des zugegebenen Wassers, modifiziert durch den volumetrischen Anteil vom inerten Kalkstein). Eine höhere Übereinstimmung (höherer Korrelationskoeffizienten) zeigt sich, wenn nur die Mischungen bestehend aus OPC, Hüttensand und Kalkstein betrachtet werden (Abbildung 4b).

Die hier beschriebene Analyse kann darauf hinweisen, dass die kumulative Porosität (MIP Daten), von einzelnen Komponenten in einer Mischung als Funktion des hydratisierten oder gebundenen Wassers (beschrieben als  $w/b_{hy}$ -Wert) unter Berücksichtigung des volumetrischen Anteils von dem hydraulischen/Puzzolanischen Bindemittel (modifiziert durch den volumetrischen Anteil des inerten Zementersatzstoffes) vorhergesagt werden kann.

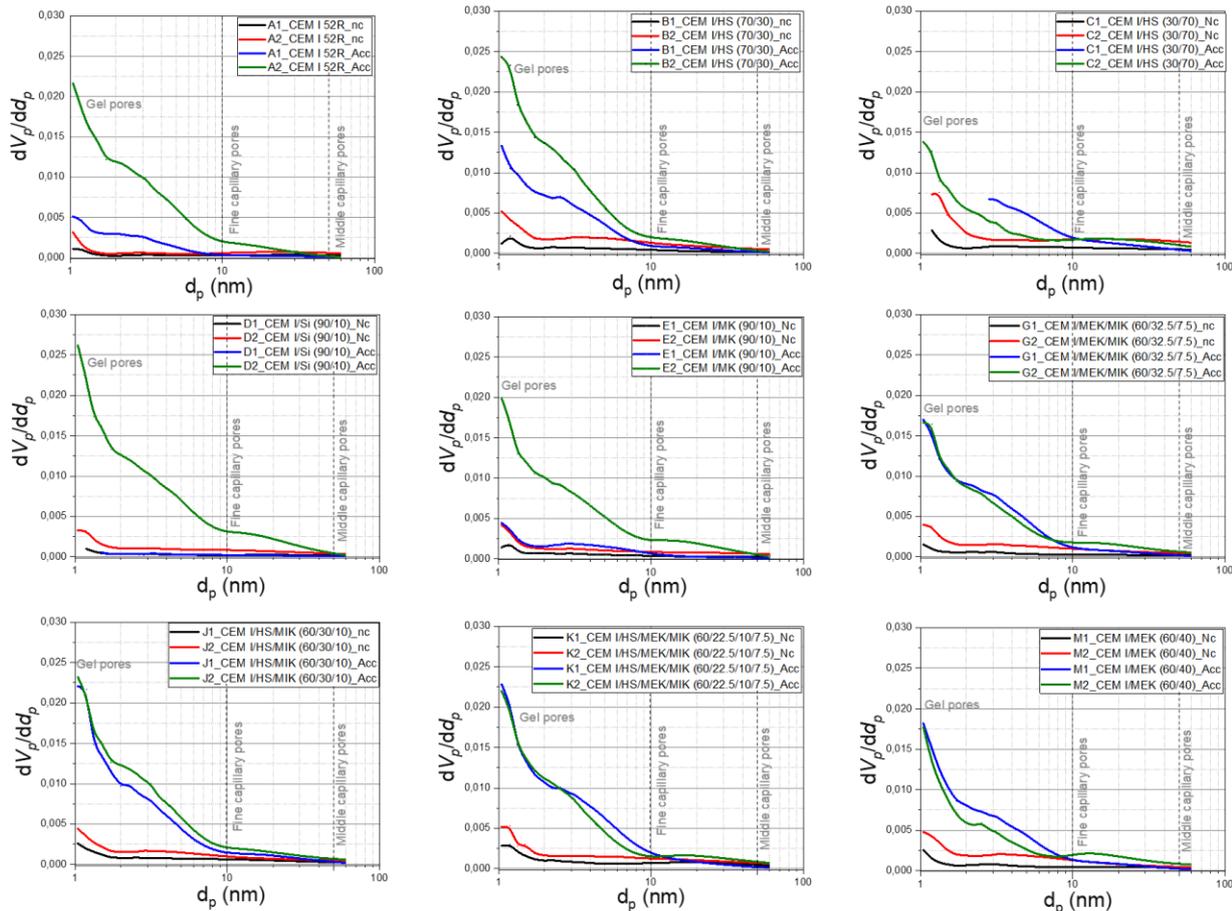
**Niedrigtemperatur-Stickstoffadsorption**

Die Niedertemperatur-Stickstoffadsorptionsexperimente der Bindemittelleimproben wurden bei einer Temperatur des flüssigen Stickstoffes von 77 ° K (-196 ° C) durchgeführt. Die Bindemittelleimproben wurden zuvor vorsichtig zerkleinert (Partikelgröße 1 mm) und ca. 1g Probe für die Analyse verwendet. Die Proben wurden bei 40°C evakuiert (bis zu 10 kPa), um die Feuchtigkeit zu entfernen. Basierend auf den Stickstoffsorptionsdaten wurde das Barrett-Joyner-Halenda (BJH)-Modell verwendet, um die Porengrößenverteilungskurven abzuleiten, während das BET-Modell, zur Berechnung der spezifischen Oberfläche ( $S_p$ ) der untersuchten Materialien verwendet wurde.

Bei nicht karbonatisierten Bindemittelleimmischungen führten sowohl die Substitution von OPC durch SCMs als auch die Erhöhung des Wassergehalts zu einer Erhöhung der  $S_p$ -Werte im Vergleich zur Leimmischung der Referenzprobe (Ausnahme Probe D1 mit Silikastaub, Abbildung 5). Bei den Proben C1, J1 und K1 mit jeweils einem geringen Wassergehalt wurde der höchste Gesamtanstieg von  $S_p$  im Vergleich zur Referenzmischung beobachtet, was auf einen verstärkten Einfluss von GGBFS (Hüttensand) und Kalkstein als inerten Zementersatzstoff auf die Gelporosität hinweist. Bei einem erhöhten Wassergehalt wurden die höchsten  $S_p$ -Werte bei den Proben B2, C2, K2 und M2 beobachtet, was den Einfluss des Hüttensandes und des MEK auf die Porosität (bis zu einem Porendurchmesser von 50 nm) bestätigt. Die niedrigsten  $S_p$ -Werte wurden bei den Proben D und E (beide mit puzzolanischen Zementersatzstoffen) beobachtet, die den höchsten OPC-Gehalt (oder die geringste Substitution von SCM`s) besaßen.



**Abbildung 5: Ergebnisse der spezifischen Oberfläche ( $S_p$ ) von allen untersuchten Leimmischungen vor (nc) und nach der Karbonatisierung (Acc).**



**Abbildung 6: Vergleich zwischen den PSD Kurven von nicht karbonatisierten und karbonatisierten Leimproben, die mittels der Niedrigtemperatur-Stickstoffadsorption Methode mit Bezug zum BJH Model untersucht wurden.**

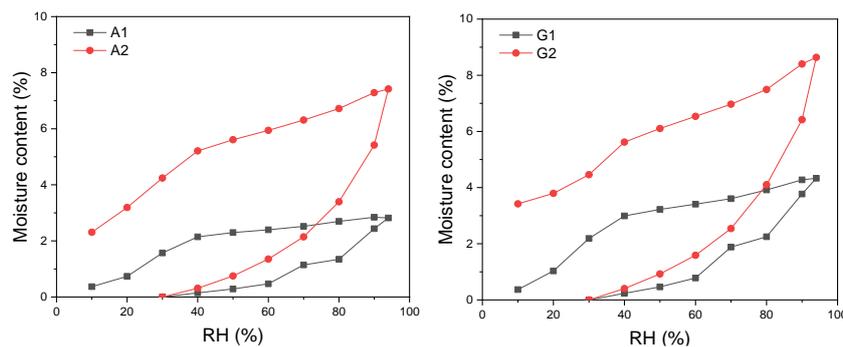
Bei allen karbonatisierten Bindemittelmischungen wurde eine signifikante Veränderung in der Mikrostruktur beobachtet (Abbildung 5 und Abbildung 6). Wie in Abbildung 6 dargestellt, verursachte die Auslagerung der Proben bei einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 2% eine signifikante Zunahme der Gelporosität (mit Porendurchmessern bis zu 10 nm) und eine deutliche Zunahme der feinen Kapillarporen (mit Porendurchmessern über 10 nm bis zu 20-25 nm). Im Vergleich untereinander stimmen die Ergebnisse der Niedrigtemperatur-Stickstoffadsorption mit den Ergebnissen der MIP-Analyse überein. Es zeigte sich, dass bei beiden Untersuchungsmethoden die Karbonatisierung zu einer signifikanten Vergrößerung der Porenstruktur bis zu einem Porenradius von 20/30 nm führt. Bei Leimproben mit Kalkstein und Hüttensand als Zementersatzstoff und mit einem geringen Wassergehalt (w/b-Wert = 0,36-0,45) wurde die größte Verdichtung der Poren beobachtet. Wohingegen bei der Referenzprobe und den Proben mit Silikastaub (D) und Metakaolin (E) die Porenverfeinerung geringer war. Andererseits beeinflusst auch ein höherer Wassergehalt die Proben mit Silikastaub und Metakaolin hin zu einer drastischen Verfeinerung der Porengröße. Dies deutet darauf hin, dass bei diesen Mischungen auch die Karbonatisierung einen entscheidenden Einfluss auf die Modifikation der Porenstruktur hat. Bei Mischungen mit Kalkstein wurden mit steigendem Wassergehalt keine signifikanten Änderungen sowohl der S<sub>p</sub>-Werte als auch der PSD-Kurven (Veränderung der feinen Mikrostruktur) beobachtet, was auf eine geringere Anfälligkeit der Proben mit Kalkstein bezogen auf die unterschiedlichen Wassermengen hinweist.

Wie bei der MIP-Analyse zeigen die Änderungen der Porenstruktur, insbesondere im Bereich der Porenverfügbarkeitsbereiche der Niedrigtemperatur-Stickstoffadsorption (1-50 nm Porendurchmesser), den deutlichen Einfluss von CO<sub>2</sub> auf die Neubildung von Mineralen unter Lösung der Hydratationsprodukte während der Karbonatisierung (Dekalkifizierung von CSH und CASH) der hier untersuchten Bindemittelmischungen.

### Dynamische Wasserdampfsorption (DVS)

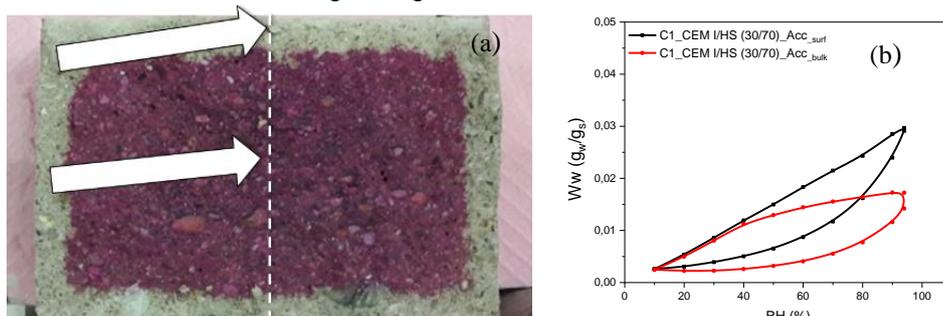
Für die Analyse mittels der dynamischen Wasserdampfsorption (Dynamic Water Vapor Sorption Analyzer, Gerät: GraviSorp 120) wurden ungefähr 2g von der Feststoffprobe auf eine Schale in der Kammer gegeben. Die gewünschte relative Feuchtigkeit in der Kammer stellt sich durch das Mischen von trockener und feuchter Luft ein. Während der Messung wurde die Temperatur konstant bei 20 °C, mit einem Luftstrom von 1 m/s gehalten. Vor dem Start der Messung wurde die Hydratation der Proben gestoppt (Trocknung bei 105 °C für 24h) und anschließend wurden die Probekörper in die DVS-Kammer bei RH=30% überführt. In Schritten von 10% wurde der Feuchtigkeitswert jedes Mal geändert, wenn die Änderung der Probenmasse mit der Zeit geringer als 0,04 Gew.-% im Vergleich zur vorherigen Messung war. Dies geschah solange bis der Zielwert von RH = 94% erreicht wurde. Wenn das Gleichgewicht ungefähr nach 72h erreicht wurde, wurde die Luftfeuchtigkeit schrittweise reduziert um die Desorptionsisotherme zu erhalten. Für die Adsorptionsisotherme wurde danach schrittweise (10%) die relative Luftfeuchtigkeit wieder erhöht, bis RH = 94 % erreicht war. Basierend auf die DVS Desorptionsisotherme wurde das BJH-Modell verwendet, um die PSD-Kurve abzuleiten.

In Abbildung 7 wurde beispielhaft die DVS-Isotherme für die Proben A und G dargestellt sind. Dabei wurde eine deutliche Hysterese zwischen der Adsorptions- und Desorptionsisotherme festgestellt. Diese Art der Hysterese deutet auf einen Porenkollaps bzw. eine starke Veränderung der Mikrostruktur hin [4]–[7]. Mit anderen Worten, dies ist ein klarer Hinweis, dass die Gelporen und CSH Phasen stark verändert wurden und kollabiert sind. Höchstwahrscheinlich ist dies zurückzuführen auf die hohe Trocknung von 105 °C für 24h (stoppen der Hydratation). Das Trocknen der Proben bei 105 °C hat einen starken Einfluss auf die Mineralneubildung bzw. -zersetzung, da sich kristallines Ettringit, Monosulfat und Monocarbonat aufgrund von zu hohen Temperaturen zersetzen und Hemicarbonat neu gebildet wird. Das Trocknen bei 105 °C hat jedoch nur geringe Auswirkungen auf den Gehalt an Portlandit und Calcit [2], [8]–[10].



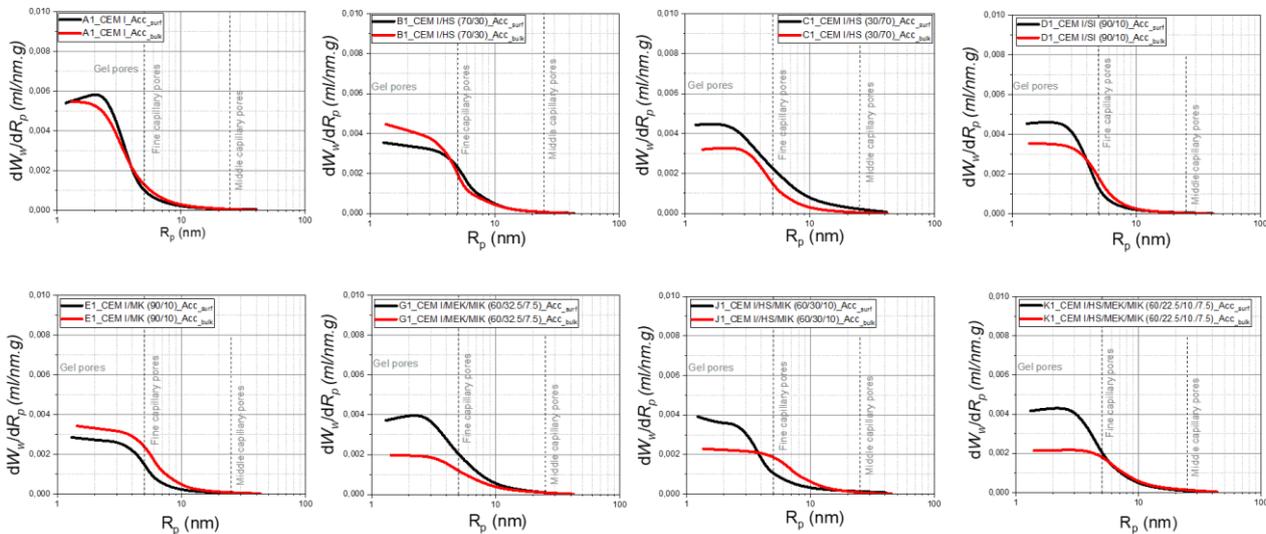
**Abbildung 7: Beispiel für dynamische Wassersorptionsisothermen**

Weiterhin wurden Mörtelproben, die ebenfalls im Arbeitspaket 7 (Karbonatisierungsfortschritt) untersucht wurden, mit einem geringen Wassergehalt ( $w/b = 0,36-0,45$ ) auf die gleiche Weise wie die hier im Kapitel beschriebenen Bindemittelproben untersucht. Der gesamte Probekörper einer Mischungsrezeptur wurde der beschleunigten Karbonatisierung ( $CO_2$  Konzentration = 2%) ausgesetzt und anschließend wurde eine Probe vom karbonatisierten Rand und eine andere Probe von der nicht karbonatisierten Mitte des Probekörpers entnommen (Abbildung 8a). In diesem Versuchsprogramm wurde der Einfluss der Trocknung von 105 °C für 24 h untersucht, indem die oben erwähnten Ergebnisse mit einer zweiten Versuchsreihe verglichen wurden, in der keine Trocknung zum Hydratationsstopp verwendet wurde. Die erhaltenen PSD-Ergebnisse basierend auf den DVS-Isothermen sind in Abbildung 9 dargestellt.



**Abbildung 8: Beispiel für die Probennahme an Mörtelproben für die Untersuchungen mittels DVS (a) und Beispiel der Adsorption-/Desorptionsisothermen (b).**

Basierend auf den Ergebnissen der Niedrigtemperatur-Stickstoffadsorption von nicht karbonatisierten und karbonatisierten Mörtelproben (Abbildung 8b) wurden im Vergleich zu den reinen Bindemittelproben (Abbildung 9) keine starke Änderungen in den PSD-Kurvenverlauf beobachtet, was bestätigt, dass die Art der angewendeten Unterbrechung der Hydratation einen großen Einfluss auf die Porenstruktur hat.



**Abbildung 9: Beispiel der PSD Kurven, die anhand der DVS Isotherme an allen Bindemittelmischungen bestimmt wurden.**

Aus Abbildung 9 ist zu erkennen, dass alle karbonatisierten Mörtelproben mit Kalksteinfüllern eine starke Veränderung der PSD-Kurven aufzeigen, was auf eine Vergrößerung der Gelporosität der karbonatisierten Flächen und möglicherweise auch auf ein Auslaugen von  $Ca^{2+}$  aus den Hydratationsprodukten hinweist. Bei Mörtelproben ohne Substitution von Kalkstein wurde im Allgemeinen eine geringere PSD-Änderung beobachtet, wobei die Porosität der  $CO_2$ -exponierten Fläche sogar abnahm, wie bei den Mörtelproben mit MK (E1) und GGBFS (B1) ersichtlich ist. Bei der Probe des Referenzmörtels (A1) kam es kaum zu einer Änderung der PSD-Kurve, was auf eine Verdichtung der Gelporosität im karbonatisierten Bereich hindeutet. Bei einem höheren Anteil (70%) an Hüttensand im Bindemittel (Mischung C1) trat im Vergleich zur B1-Mischung (30% Hüttensand) eine deutliche PSD-Modifikation auf, da bei der karbonatisierten Fläche eine höhere Gelporosität und eine feinere Kapillarporosität beobachtet wurde.

Bei der zukünftigen Analyse der Porenstruktur wird zum Stoppen der Hydratation ein Lösungsmittelaustausch durch Isopropanol gemäß [6] verwendet (hpts. für Arbeiten im Arbeitspaket 8).

## 2.2.2 Arbeitspaket 7: Chloridtransport und Karbonatisierungsfortschritt von Mörteln

### Karbonatisierungsfortschritt

Mörtelproben wurden für die Untersuchung zur Luftpermeabilität und der Karbonatisierungstiefe vorbereitet. Das Bindemittelvolumen wurde für alle Mörtelproben (43,5 Vol.-%) unabhängig vom Wassergehalt konstant gehalten. Für die restlichen 56,5 Vol.-% wurde Quarzsand mit einer maximalen Aggregatgröße von 4 mm verwendet. Alle Mörtelproben sind 24h in den Formen erhärtet und wurden anschließend in einer Plastikfolie verpackt und bis zum 28. Tag bei 20-23 °C gelagert. Danach wurde die Kunststoffverpackung entfernt, mit anschließender Konditionierung der Mörtelproben im Klimaraum bei 20 °C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit. Dies bedeutet, dass am 42. Tag nach Herstellung die Auslagerung der Proben im i) Klimaraum bei 20 °C und 65% mit einer relativen Luftfeuchtigkeit (Referenzprismen) bei 0,03 bis 0,04%  $CO_2$  (natürliche Karbonatisierung - nc) und ii) in der Karbonatisierungskammer bei 20 °C, 65% relativer Luftfeuchtigkeit und 2%  $CO_2$  (beschleunigte Karbonatisierung – Acc) begann. Die Prüfung der Karbonatisierungstiefe und Luftpermeabilität wurde nach 0, 28, 70, 140 Tagen durchgeführt.

### Untersuchungen zur Luftpermeabilität

Die Ergebnisse der Luftpermeabilität für alle untersuchten Mörtelproben wurden im Verhältnis zur Luftpermeabilität der Referenzmörtelprobe A gesetzt und in Abbildung 10 dargestellt. In Abbildung 11 wurden die Ergebnisse (Auslagerung unter natürlicher und beschleunigter Karbonatisierung) der Luftpermeabilitätskoeffizienten (kT) -Werten dargestellt, indem die errechneten kT-Werte, nach 140 Tagen

Auslagerung auf die errechneten  $kT$ -Werte vom Tag 0 bezogen wurden. Dabei zeigt Abbildung 11a alle Proben mit  $w/b$ -Werten zwischen 0,36-0,45 und Abbildung 11b alle Proben mit einem höheren  $w/b$ -Wert von 0,6.

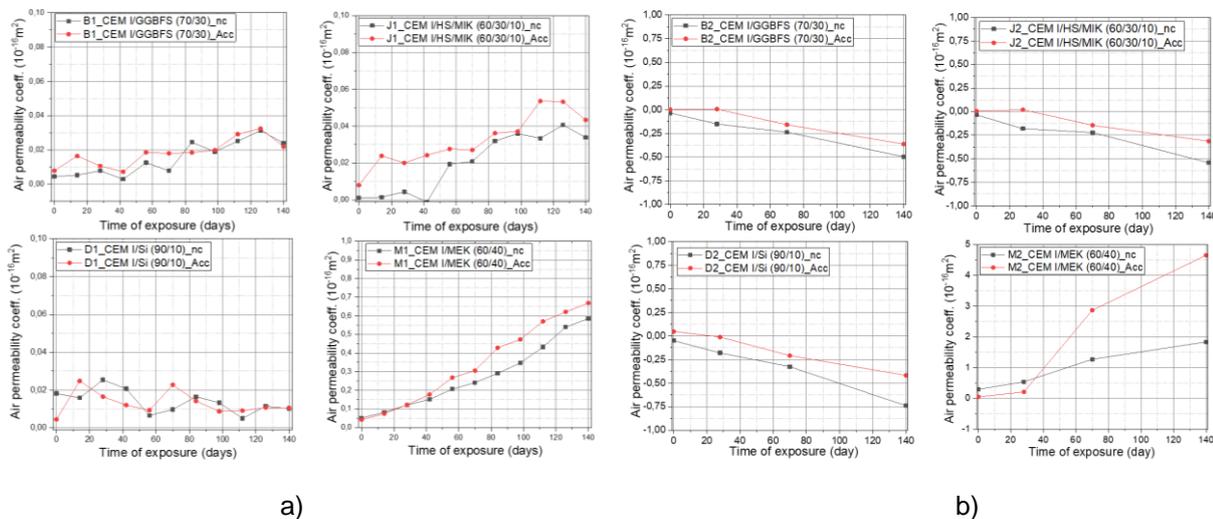


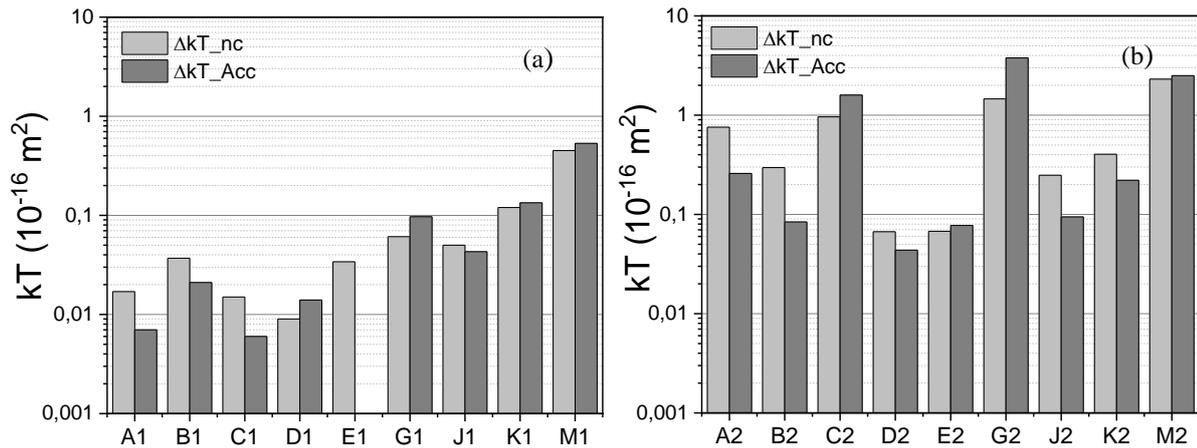
Abbildung 10: Beispiel des relativen Luftpermeabilitätskoeffizienten ( $kT$ ) von Mörtelprismen mit Zementersatzstoffen im Bindemitteln und a) einem geringen Wassergehalt ( $w/b = 0,36-0,45$ ) und b) einem hohen Wassergehalt ( $w/b = 0,6$ ).

Im Vergleich zur Referenzmörtelprobe (A1) erhöhte sich bei allen Mörtelproben mit substituierten SCMs im Bindemittel und einem geringerem Wassergehalt (Tabelle 3), wie in Abbildung 10a dargestellt, die Luftpermeabilität. Die höchste Luftpermeabilität hatten die Proben mit alleinig MIK und MEK als Zementersatzstoff im Bindemittel. Hingegen hatten die Proben mit HÜS, SI und MK (C1, D1 und E1 in Abbildung 10a) mit der Zeit den geringsten Anstieg der Luftpermeabilität. Während gezeigt wurde, dass die Mörtelproben mit inerten Füller (auch in Kombination mit anderen Zementersatzstoffen; Proben G1, J1, K1 und M1) einen höheren Einfluss auf die Luftdurchlässigkeit (höhere  $kT$ -Werte) haben, gibt es keinen sichtbaren Einfluss von hydraulischen/puzzolanischen Zementersatzstoffen auf Änderungen in der Luftpermeabilität. Dies scheint auch für unterschiedliche  $CO_2$ -Konzentrationen über die Zeit zu gelten (B1, C1, D1 und E1, Abbildung 11a).

Unter Berücksichtigung des geringen Anstieges der  $kT$ -Werte über die Zeit und unter unterschiedlichen  $CO_2$ -Konzentrationen (Abbildung 11 und 12) kann davon ausgegangen werden, dass für die Mörtelproben M1, G1 und K1 mit einem geringeren Wassergehalt (Tabelle 1) der Korrosionswiderstand, verursacht durch Lufttransport, im Vergleich zu anderen Proben höher sein sollte. Dies ist auch in Übereinstimmung mit der Klassifizierung gemäß der Schweizer Norm SIA 262 - 1: 2013 [11].

Bei Proben mit  $w/b$ -Werten von 0,6 wurden deutlich höhere Luftpermeabilitätskoeffizienten gemessen (Abbildung 11b) als bei denselben Proben mit einem geringeren  $w/b$ -Wert, was auf einen deutlichen Einfluss des höheren Wassergehalts hinweist. Konträr zu den bereits genannten Ergebnissen verringert sich der  $kT$ -Wert bei Proben mit hydraulischen Zementersatzstoffen im Bindemittel und einem hohen  $w/b$ -Wert (Abbildung 11b). Die Proben mit ausschließlich Kalksteinfüllern zeigen eine deutlich höhere Luftpermeabilität im Vergleich zu der Referenzprobe. Auch mit einem hohen  $w/b$ -Wert erhöhen inerte Kalksteine (MIK, MEK) die Luftpermeabilität stärker als Proben mit Si, MK und HÜS. Im Falle der beschleunigten Karbonatisierung scheinen inerte Kalksteinfüller (Proben G2 und M2) als alleiniger Zementersatzstoff einen stärkeren Einfluss auf die Luftpermeabilität (deutlich erhöhte  $kT$ -Werte) zu haben, als Kalkstein und HÜS zusammen in einem Bindemittel (Proben J2 und K2), wo die Luftdurchlässigkeit reduziert wurde (Abbildung 11).

Unter Berücksichtigung des Anstiegs der  $kT$ -Werte über die Zeit bei unterschiedlichen  $CO_2$ -Konzentrationen (Abbildung 10 und Abbildung 11) zeigen die Proben C2, G2 und M2 (hoher  $w/b$ -Wert = 0,6) einen geringen Widerstand gegen Korrosion ( $\hat{=}$  Korrosionsfördernde Stoffe werden per Lufttransport in die Proben eintragen) als andere Mörtelproben, gemäß der Klassifizierung nach der Schweizer Norm SIA 262 - 1: 2013 [11]. Zusammenfassend ist zu erwähnen, dass der Korrosionswiderstand bei Mörteln mit einem höheren Wassergehalt (hohe  $kT$ -Werte), gemäß der Klassifizierung nach der Schweizer Norm SIA 262 - 1: 2013 [11], wesentlich geringer ist als bei Mörteln mit geringerem Wassergehalt.

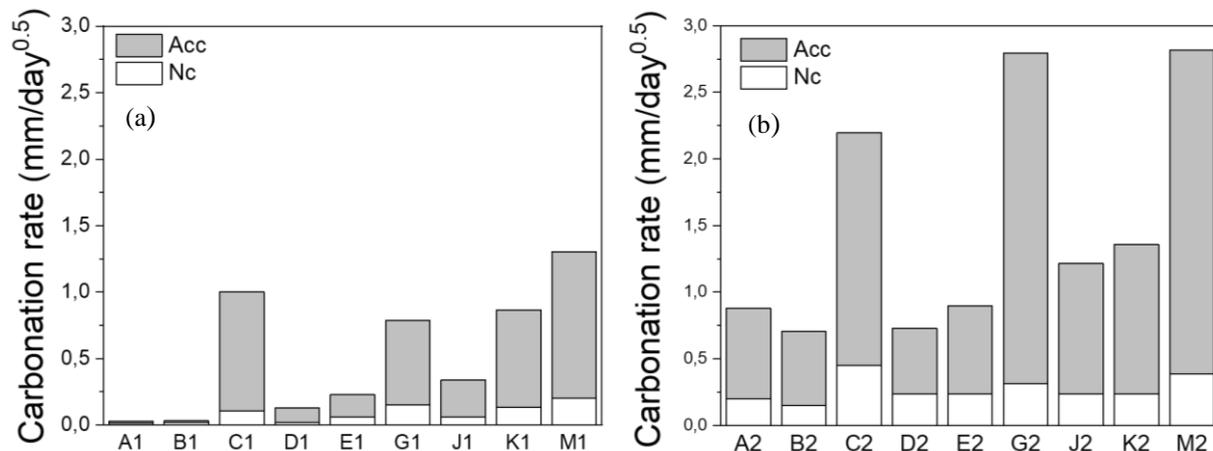


**Abbildung 11:** kT Werte der Mörtelproben nach Auslagerung unter natürlichen und beschleunigten Karbonatisierungsbedingungen (Ergebnisse nach 140 Tagen wurden auf die kT Ergebnisse am Tag 0 bezogen); a) geringer Wassergehalt ( $w/b = 0,36-0,45$ ; Kurzbezeichnung hinter den jeweiligen Buchstaben ist die 1) und b) hoher Wassergehalt ( $w/b = 0,6$ ; Kurzbezeichnung hinter den jeweiligen Buchstaben ist die 2).

**Untersuchungen zur Karbonatisierung - Karbonatisierungstiefe**

Die Ergebnisse der Karbonatisierungsraten von den Mörtelproben mit  $w/b$ -Werten von 0,36 - 0,45 und einem höherem  $w/b$ -Wert von 0,6 sind in Abbildung 12a und b dargestellt. Bei Proben mit einem geringen Wassergehalt wurde die geringste Karbonatisierungstiefe ( $\cong$  höchste Beständigkeit gegen Karbonatisierung) bei den Proben A1 und B1 gemessen, gefolgt von D1, E1 und J1. Die höchste Karbonatisierungstiefe ( $\cong$  niedrigster Widerstand gegen Karbonatisierung) wurde bei G1, K1, C1 und M1 gemessen (Abbildung 12a). Bei allen Mörtelproben mit einem  $w/b = 0,6$  wurden größere Eindringtiefen von  $\text{CO}_2$  im Vergleich zu Proben mit einem geringen Wassergehalt bestimmt, was auf den starken Einfluss der Menge von Wasser in den Proben, auf den Widerstand gegen die Karbonatisierung hinweist. Bei den Proben mit einem hohen  $w/b$  von 0,6 hat die Probe B2 den höchsten Widerstand gegen Karbonatisierung, gefolgt von A2, D2, E2, J2 und K2. Die größte Eindringtiefe von  $\text{CO}_2$  wurde bei den Mörtelproben G2, C2 und M2 gemessen (Abbildung 12b).

Die Ergebnisse der Karbonatisierungstiefen sind in Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den MIP-, DVS- und BET-Untersuchungen (geringere, offene Porosität, veränderte Porengrößenverteilung usw.). Die Ergebnisse zeigten eine geringere kumulative Porosität und Luftpermeabilität der Proben A, B, D, E und J, was den hohen Widerstand der Proben gegenüber der Karbonatisierung erklärt. Zusätzlich könnte der geringe verfügbare  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalt bei Proben mit hydraulischen und puzzolanischen Zementersatzstoffen und die geringe Porosität (Probe B) die Karbonatisierungstiefe beeinflussen.



**Abbildung 12:** Karbonatisierungsrate der untersuchten Mörtelprismen mit a) geringen Wassergehalt ( $w/b = 0,36-0,45$ ) und b) höheren Wassergehalt ( $w/b = 0,6$ )

Im Detail hat MK als Zementersatzstoff einen geringeren Widerstand gegenüber der Eindringung von  $\text{CO}_2$ , als Si. Dies ist wahrscheinlich auf den höheren Verbrauch an Portlandit durch MK zurückzuführen und die damit einhergehende stärkere Ausbildung von C-S-H-Phasen und einer höheren Gesamtporosität. Im Falle

von Si wurde mehr SiO<sub>2</sub> in die C-S-H-Matrix eingebaut, was zu einer besseren Mikrostruktur Verfeinerung (eher als Verdichtung) führte. Allgemein erhöhte die Substitution von Klinker durch Kalkstein im Bindemittel die Karbonatisierungstiefe, was vermutlich vorwiegend auf den reduzierten Klinkergehalt (Proben G und M) zurückzuführen ist. Bei diesen Proben war nach dem Erhärten weniger Ca(OH)<sub>2</sub> vorhanden und zusätzlich war die Porosität deutlich höher als bei anderen Mörtelproben. Die Stärke des Einflusses der inerten Kalksteine hing von der Feinheit ab, was sich beim Vergleich von J und K zu G und M zeigt. Hier haben die Proben mit dem feineren Kalkstein (MIK) eine niedrigere Karbonatisierungstiefe und kT-Wert als Proben mit dem größeren Kalkstein. Die Kombination von HÜS und MIK (Probe J) führte zu einem besseren Widerstand gegen Karbonatisierung (relativ geringe Karbonatisierungstiefe). Im Fall der Probe C scheint der Anteil von HÜS für den niedrigen Widerstand gegenüber der Karbonatisierung verantwortlich zu sein. Dies ist höchstwahrscheinlich auf den niedrigen Ca(OH)<sub>2</sub>-Gehalt und den hohen Gehalt an Hydratationsprodukten (CSH) zurückzuführen, die deutlich reaktiver in Verbindung mit CO<sub>2</sub> sind.

Die Korrelation zwischen der Karbonatisierungsrate (natürliche Nc und beschleunigte Acc Karbonatisierung) und dem w/b<sub>hy</sub> der Proben mit OPC-, HÜS- und Kalksteinfüllern ist in Abbildung 13 dargestellt.

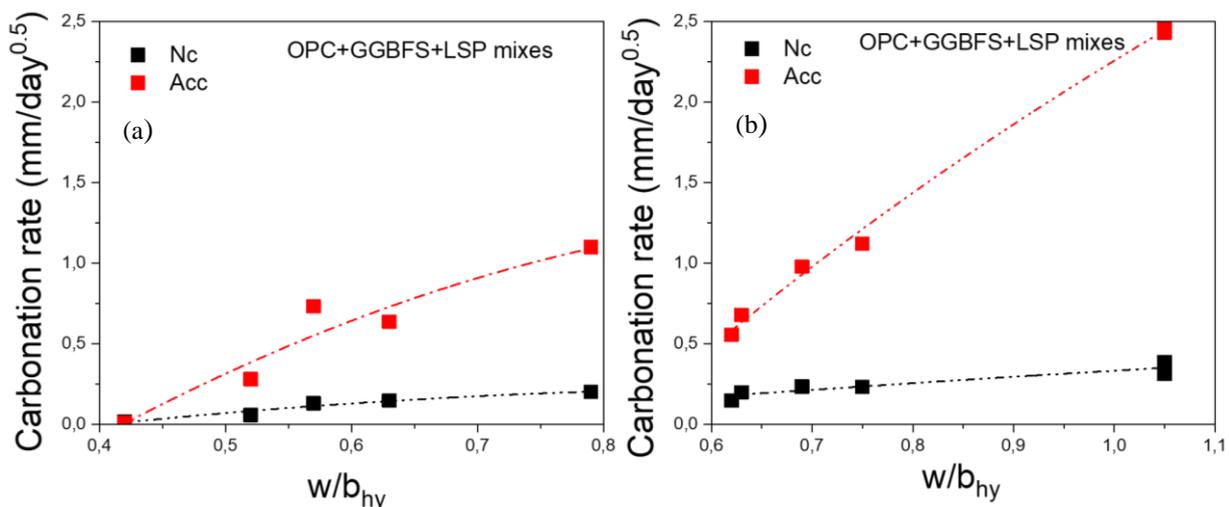


Abbildung 13: Zusammenhang zw. der Karbonatisierungsrate und w/b<sub>hy</sub> mit a) einem geringen Wassergehalt (w/b = 0,36-0,45) und b) einen hohen Wassergehalt (w/b = 0,6)

Mit Ausnahme der Probe C lassen sich für alle Mörtelproben, bestehend aus OPC, HÜS (GGBFS) und Kalkstein (LSP), sehr gute Korrelationen finden (Abbildung 13). Dies deutet darauf hin, dass der w/b<sub>hy</sub>-Wert als Rezepturparameter einen großen Einfluss auf den Widerstand gegenüber der Karbonatisierung hat und ferner die Vorhersage des Widerstands gegenüber dem Eindringverhalten und Mineralneubildungspotential von CO<sub>2</sub> in Mörtelproben ermöglichen könnte.

### Karbonatisierungstiefe nach 50 Jahren

Die Abschätzung der Lebensdauer (Karbonatisierungstiefe nach 50 Jahren) der hier untersuchten Mörtelproben wurde auf Grundlage der Ergebnisse der beschleunigten und natürlichen Karbonatisierung durchgeführt. Während es für gewöhnliche OPC-Betone eine Vielzahl an Vorhersagemodellen zur Karbonatisierungstiefe [12]–[15] gibt, fehlen jedoch noch Modelle für die praktische Vorhersage von zusatzstoffoptimierten Bindemitteln.

Die folgende Gleichung 2 wurde verwendet, um die Karbonatisierungstiefe nach 50 Jahren für die untersuchten Betonproben zu berechnen. Hierzu wurden die gemessene Karbonatisierungstiefen nach einer bestimmten Zeit bei einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 0,04 Vol.-% und 2 Vol.-% verwendet.

$$X_{C,NAT}(t) = X_{C,ACC} \sqrt{\frac{CO_{2,NAT}}{CO_{2,ACC}}} \cdot \left(\frac{t}{t_{ACC}}\right)^n \tag{2}$$

Die Karbonatisierungstiefe unter natürlichen Bedingungen (zu den Messzeitpunkten) kann auch anhand der gemessenen Karbonatisierungstiefen aus den beschleunigten Untersuchungen berechnet werden

(Gleichung 3). Der Wert des Exponenten  $n$  betrug 0,5. Die Gleichung 2 ist eine andere Möglichkeit, die Lebensdauer von Zusatzstoffoptimierten Bindemitteln abzuschätzen. Mit dieser kann auch beurteilt werden, ob durch die Erhöhung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration während der Versuche es zu unerwünschten Nebeneffekten gekommen ist (Über- oder Unterschätzung des Lebensdauer des Betons) [16].

$$x_c = \sqrt{\frac{2 \cdot D_c \cdot c_s \cdot t}{a_c}} = \sqrt{\frac{2 \cdot c_s \cdot t}{R_{\text{carb}}}} = \sqrt{\frac{1}{R_{\text{carb}}}} \sqrt{2 c_s t} \quad (3)$$

$x_c$ : Karbonatisierungstiefe (m)

$D_c$ : Diffusionskoeffizient von  $\text{CO}_2$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$c_s$ :  $\text{CO}_2$ -Konzentration an der Probenoberfläche ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$a_c$ : Gehalt von karbonatisierungsfähigem Material pro Volumeneinheit ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$t$ : Zeit (s)

$R_{\text{carb}}$ : ( $a_c/D_c$ ) der Karbonatisierungswiderstand [ $(\text{kg}/\text{m}^3)/(\text{m}^2/\text{s})$ ]

Die in Abbildung 14 dargestellten Karbonatisierungstiefen nach 50 Jahren, berechnet aus Gleichungen 2 und 3, zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der geschätzten Lebensdauer bei beschleunigten Karbonatisierungsbedingungen. Hingegen sehen die Ergebnisse für die Abschätzung der Lebensdauer anders aus, wenn in der Gleichung 3 die Ergebnisse aus den Versuchen der natürlichen Karbonatisierung verwendet wurden (Abbildung 14, blaue Balken). Dieser Unterschied zeigt, dass die verwendete  $\text{CO}_2$ -Konzentration einen signifikanten Einfluss auf den Prozess der Karbonatisierung hat, unabhängig von der Art des Betons [16]. Die Verwendung einer höheren  $\text{CO}_2$ -Konzentration (2%) scheint, unabhängig von der Art des Betons, zu einer spürbaren Verlangsamung der Karbonatisierung zu führen. Dafür kann es mehrere Gründe geben, i) z.B. scheint es, dass die innere Feuchtigkeit von Beton unter einer höheren  $\text{CO}_2$ -Konzentration (2%) höher wurde als bei der Untersuchung mit einer natürlichen Karbonatisierung, was dazu führt, dass die während der Karbonatisierung gebildete Wassermenge höher war. Eine höhere Wassermenge hat auch einen Einfluss auf die Geschwindigkeit der  $\text{CO}_2$ -Diffusion (Karbonatisierung wird verlangsamt [17], [18]). ii) Bei einer höheren  $\text{CO}_2$ -Konzentration kann die innere Luftfeuchtigkeit ein höheres Niveau als die äußere Luftfeuchtigkeit erreichen, was die voranschreitende Karbonatisierung weiter verändern kann. iii) Bei höherer  $\text{CO}_2$ -Konzentration kann zusätzlich auch eine Schicht bestehend aus  $\text{Ca}(\text{CO}_3)$  auf dem Portlandit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) entstehen, was den Portlandit erheblich vor weiterer Karbonatisierung schützt [19].

Im Allgemeinen ergeben aus den Ergebnissen Unterschiede zur Abschätzung der Lebensdauer. Insbesondere da die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur natürlichen Karbonatisierung höhere Karbonatisierungstiefen erwarten lassen als bei der beschleunigten Karbonatisierung (Abbildung 14). Dieses Problem tritt eher in Bezug auf die Lebensdauerabschätzung gemäß den Umweltklassen XC3 (mittelfeucht) und XC4 (zyklisch nass und trocken) auf, wie in Abbildung 14 dargestellt.

Die maximal zulässigen Karbonatisierungstiefen gemäß XC3 betragen 25 mm (durchgezogene graue Linie) und für XC4 30 mm (durchgezogene schwarze Linie in Abbildung 14). Die Mörtelproben mit einem geringeren Wassergehalt können somit als dauerhafte Rezepturen charakterisiert werden, die eine Lebensdauer von 50 Jahren (unabhängig vom Vorhersagemodell und der verwendeten  $\text{CO}_2$ -Konzentration, 0,04% und 2%  $\text{CO}_2$ ) haben. Als dauerhafteste Rezepturen können die Proben A1, B1, D1 und E1 genannt werden, gefolgt von J1, G1 und K1. Den niedrigsten Widerstand gegenüber  $\text{CO}_2$  (höchste geschätzte Karbonatisierungstiefe) hat die Probe M1. Im Allgemeinen konnten alle Mörtelproben mit einem geringeren Wassergehalt bei beiden Umweltklassen XC3 und XC4 als beständige Proben für eine vorhergesagte Lebensdauer von bis zu 50 Jahren ausgemacht werden. Dies bedeutet, dass die genannten Mörtelproben bei ausreichender Überdeckung die Bewehrungsstäbe länger als 50 Jahre schützen können.

Bei Mörtelmischungen mit einem höheren Wassergehalt wurden höhere Karbonatisierungstiefen berechnet (Abbildung 14b), basierend auf den höheren Karbonatisierungsraten (Abbildung 12). In Einklang mit den Ergebnissen der Karbonatisierungstiefen (beschleunigte Karbonatisierung) konnten die Proben C2, G2 und M2 als nicht ausreichend dauerhaft charakterisiert werden, da ihre geschätzte Karbonatisierungstiefe höher ist als es von den Umweltklassen XC3 und XC4 zugelassen wird. Die dauerhafteste Probe ist B2, gefolgt von A2, D2 und E2. Mit zunehmendem Kalksteingehalt nimmt die geschätzte Karbonatisierungstiefe zu (J2 und K2), liegt jedoch immer noch innerhalb der Grenzen von XC3 und XC4. Wurden für die Gleichung 3 die Ergebnisse der natürlichen Karbonatisierung (blaue Balken Abbildung 14) für die Abschätzung der Lebensdauer verwendet, wurde die errechnete Karbonatisierungstiefe deutlich höher. Wie oben bereits erklärt deutet diese Diskrepanz darauf hin, dass die verwendete  $\text{CO}_2$ -Konzentration den Prozess der

Karbonatisierung, unabhängig von der Art des Betons, erheblich beeinflusst und mit Vorsicht angewendet werden sollte [20].

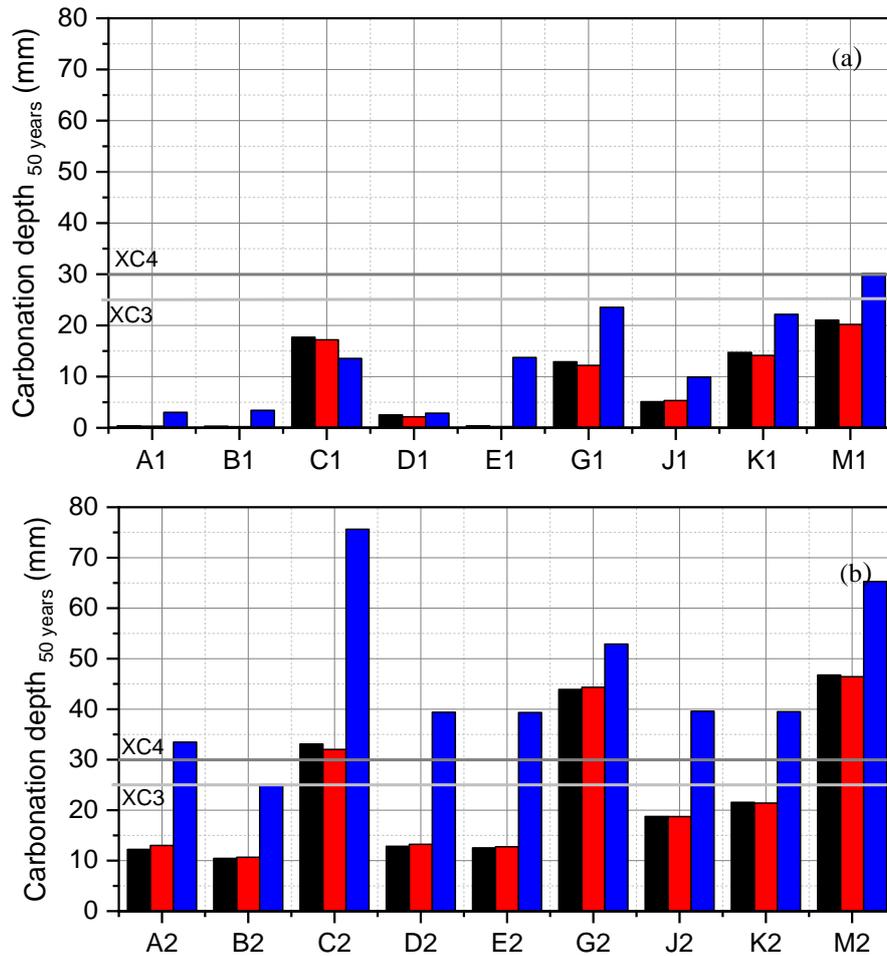


Abbildung 14: Errechnete Karbonisierungstiefe für alle Mörtelproben nach Gleichung 2 (schwarze Balken) und Gleichung 3 (blaue Balken): natürliche Karbonisierung; rote Balken: beschleunigte Karbonisierung) nach 50 Jahren und für a) einem geringen Wassergehalt ( $w/b = 0,36-0,45$ ) und b) einen hohen Wassergehalt ( $w/b = 0,6$ )

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die  $CO_2$ -Diffusion von Beton durch die Verwendung von einem geringen  $w/b$  von 0,36 bis 0,45 signifikant abnimmt, da die Porosität reduziert wird und somit die  $CO_2$ -Moleküle möglicherweise nicht mehr leicht das Bindemittelgefüge durchdringen kann. Dies ist auch relativ unabhängig von höheren Zementersatzverhältnissen und der Verwendung von unterschiedlichen Mengen an SCMs (Schlacke und Kalksteine). Als vielversprechendste könnte man die Probe J betrachten, bei der Zementklinker zu 40% mit Schlacke (30%) und feinen Kalkstein (10%) ersetzt wurde. Es müssen jedoch weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um diese Tendenz zu bestätigen. Insbesondere zielt dies auf den Ansatz zur Optimierung der Partikelpackungsdichte (Reduzierung des Wassergehaltes) solcher Gemische, bestehend aus 3 Komponenten (Modifizierung der Porositätseigenschaften), ab um am Ende die Dauerhaftigkeitseigenschaften in Bezug auf den Widerstand gegenüber der Karbonatisierung zu verbessern.

### Chloridtransport

Die Untersuchungen wurden im praktischen Teil mit Ausnahme einiger Wiederholungsprüfungen abgeschlossen. In Tabelle 4 ist das Versuchsprogramm für die direkte Beaufschlagung mit einer 3%igen Natriumchlorid (NaCl-Lösung) aufgezeigt. Untersuchung hinsichtlich des verändertes  $W/B_G$ -Wertes, der Art der Erhärtungsbedingung und die Zeit der Erhärtung an allen 12 Proben für eine Beaufschlagung von 90 Tagen ( $\approx 3$  Monate), 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. Durch die farbliche Markierung in der Tabelle 4 ist ersichtlich, dass ein Großteil des Untersuchungsprogramms im Labor abgeschlossen ist und nur noch einzelne Wiederholungsmessungen vom Chloridgehalt der farblich markierten Proben veranlasst wurden. Bei den Proben mit einer 90-tägigen Luftlagerung als Vorbehandlung und mit einem  $W/B_G$ -Wert von 0,6 werden die meisten Wiederholungsmessungen durchgeführt. Aufgrund

der unsicheren Datenlage werden diese Proben im Folgenden nicht genauer betrachtet.

**Tabelle 4: Arbeitsprogramm für den Angriff von Chloriden (Farbcodierung: orange = einzelne Wiederholungsmessungen des Chloridgehaltes die noch durchgeführt werden; rot = komplette Wiederholungsmessungen des Chloridgehaltes der Proben bzw. Neubetonage.**

| W/B <sub>G</sub> -Wert   | Kurzbez. Probe                             | Art der Erhärungsbedingung | Zeit der Erhärtung |
|--|--|----------------------------|--------------------|
| W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,4 bzw. angepasst bei den optimierten Mischung | A1, C1, D1, G1, H1, I1, J1, K1, L1         | Verpackt gelagert          | 28d                |
| W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,6 Bzw. angepasst                              | A2, B2, C2, D2, E2, <b>F2</b> , G2         | Verpackt gelagert          | 7d                 |
| W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,6 Bzw. angepasst                              | <b>A2</b> , B2, C2, D2, E2, F2, G2         | Verpackt gelagert          | 90d                |
| W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,6 Bzw. angepasst                              | A2, B2, C2, D2, E2, <b>F2</b> , G2         | Luft gelagert              | 7d                 |
| W/B <sub>G</sub> -Wert = 0,6 Bzw. angepasst                              | <b>A2, B2, C2, D2</b> , E2, <b>F2</b> , G2 | Luft gelagert              | 90d                |

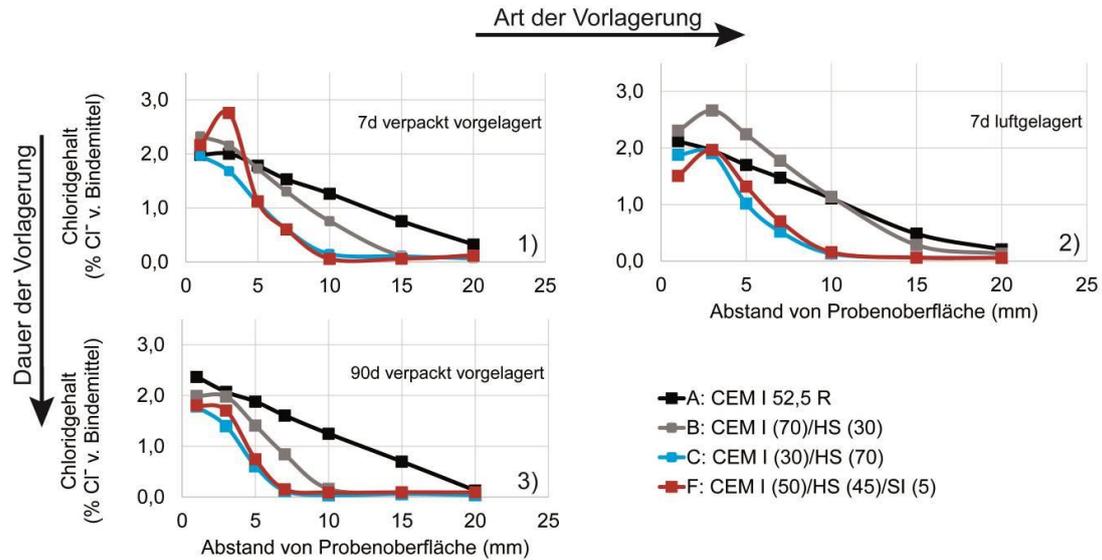
Die Untersuchungen wurden anhand von Mörtelproben durchgeführt, die hergestellt wurden indem zunächst Prismen (10 x 10 x 40 cm) gefertigt, mit Kunststofffolien abgedeckt und bis zum nächsten Tag gelagert wurden. Dann sind sie entformt und 7, 28 bzw. 90 Tage lang im Klimaraum (65% r. F.; 20°C) an Luft bzw. verpackt weitergelagert worden. Nach dem Ende dieser Vorlagerung wurden Abschnitte im Abstand von 10 cm abgetrennt. Die so erhaltenen Würfel mit 10 cm Kantenlänge wurden anschließend unter Vakuum mit Wasser gesättigt und in der Folge alle 6 Flächen mit einem chloridfreien Epoxidharz beschichtet. Da das wegen der feuchten Proben nicht vollständig gelang, sind sie am nächsten Tag nochmals beschichtet worden. Als Prüffläche wurde die der abgezogenen Oberfläche gegenüberliegende Fläche gewählt, von der vor Prüfbeginn das Epoxidharz abgeschliffen wurde. In der Folge sind die Proben in die NaCl-Lösung eingetaucht worden (Prüffläche nach unten) wobei pro Lagergefäß in die Prüflösung 6 Proben derselben Rezeptur und Vorlagerungsart auf Dreieckleisten gestellt (gemäß EN 12.390-11 „Bestimmung des Chloridwiderstandes von Beton - Einseitig gerichtete Diffusion“; mindestens 12,5 ml je cm<sup>2</sup> der zu beaufschlagenden Oberfläche). Jedes Gefäß enthielt also alle Proben derselben Rezeptur und Vorbehandlung, die für die 3 Prüftermine (90 Tagen ([21] EN 12390-11), 6 und 9 Monaten Chloridkontakt) benötigt wurden, wobei pro Prüftermin Bohrmehl von je 2 Würfeln aus 7 Tiefenstufen in 1 mm Abstufungen entnommen wurde (s. Jahresbericht des 2. Forschungsjahres). Dazu wurden die Würfel in die Vorrichtung des „Profile Grinder“ der Firma Germann Instruments eingespannt und eine Fläche von ca. 42 cm<sup>2</sup> in genau einstellbaren Tiefenabstufungen von 1 mm mittels diamantbesetzter Schleifscheibe abgeschliffen. Der Chloridgehalt wurde dann durch Analyse jeder Bohrmehlprobe als Mittelwert der Einzelprüfungen ermittelt. 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 betragen.

#### Einfluss der Zusatzstoffe, der Art (verpackt vs. Luft gelagert) und Dauer (7 vs. 90 Tage) der Nachbehandlung

Die Ergebnisse, die an den 7 Tage verpackt vorgelagerten Proben ermittelt wurden, sind in Abbildung 15 (Ergebnisse der Mörtelproben mit latent hydraulischen Zusatzstoffen) und Abbildung 16 (Mörtelproben mit puzzolanischen Zusatzstoffen) gezeigt. Zunächst sei angemerkt, dass die Werte der äußersten Zone nicht repräsentativ sind, weil sich herausgestellt hat, dass a) die Verpackung nicht ganz CO<sub>2</sub>-dicht war [22] und b) während der Lagerung CO<sub>2</sub> trotz des lose aufliegenden Deckels in die Lagerlösung gelangen konnte, sodass die Randzone teilweise karbonatisiert wurde (dadurch wird auch schon gebundenes Chlorid wieder freigesetzt) [23]. Besonders ist der Effekt der Karbonatisierung bei den Bindemitteln mit Zusatzstoffen und an Luft erhärteten Proben aufgetreten (siehe Abbildung 15 und Abbildung 16, jeweils Diagramm 2).

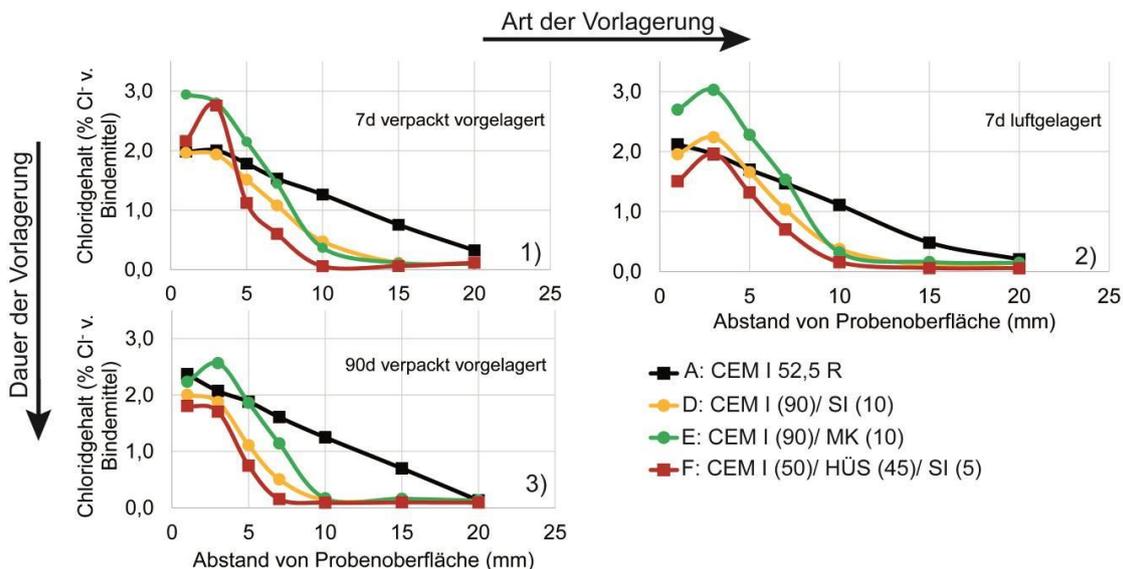
Das unterschiedliche Chloridbindevermögen der Bindemittel mit latent hydraulischen Zusatzstoffen kommt aus Abbildung 15 gut zum Ausdruck. Wie ersichtlich hat der CEM II/B-S (graue Linie) in den äußeren Zonen mehr Chlorid aufgenommen als der CEM I und auch mehr als der CEM III/B-S (blaue Linie). Die Probe mit CEM I und 45% Hüttensand und 5% Silikastaub zeigt unabhängig von der Art und Dauer der Vorlagerung eine ähnliche Chloridaufnahme wie die Probe mit 70% Hüttensand. Die Art der Lagerung hatte einen starken

Einfluss bei der Probe mit 30% Hüttensand. Hier zeigt sich, dass ein deutlicher Vorteil in einer feuchten Nachbehandlung der Probekörper besteht. Es ist auffällig, dass die Probe mit 70% Hüttensand keine signifikante Verbesserung bei einer vor Austrocknung geschützten Vorlagerung gegenüber einer Luftlagerung hat.



**Abbildung 15: Chloridgehalt der Mörtelproben (3 Monate Lagerung in 3% NaCl) mit latent hydraulischen Zusatzstoffen, W/B<sub>c</sub>-Wert=0,6 um den Einfluss der Art und Dauer der Vorlagerung zu zeigen.**

Es hat auch überrascht, dass der Kurvenabfall vom CEM III/B-S auch bei den an Luft vorgelagerten Proben deutlich steiler ist als beim CEM II/B-S. Es wurde vielmehr erwartet, dass sich die Austrocknung wegen des hohen Gehaltes dieses Bindemittels an Hüttensand auf die Ausbildungsdauer einer dichten Porenstruktur stärker auswirkt, weil Hüttensand im Vergleich zu Portlandzementklinker langsamer reagiert und die Reaktion des Hüttensandes erst bei Temperaturen  $\geq 40^{\circ}\text{C}$  schneller abläuft.



**Abbildung 16: Chloridgehalt der Mörtelproben (3 Monate Lagerung in 3% NaCl) mit puzzolanischen Zusatzstoffen, W/B<sub>c</sub>-Wert=0,6**

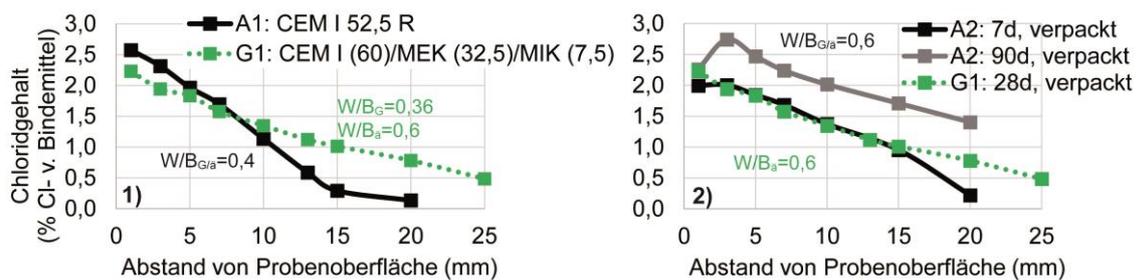
Aus Abbildung 16 kommt der Einfluss der Art und Dauer der Vorlagerung gut zum Ausdruck. Am meisten Chlorid ist von den Proben mit dem Bindemittel 90% CEM I und 10% Metakaolin aufgenommen worden. Dies ist auf den hohen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Gehalt im Metakaolin (44,7%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) zurückzuführen, welches eine starke chemische Bindung des Chlorides unter Bildung von chloridhaltigen AFm Phasen (Friedel'sches Salz und Kuzel's Salz) fördert [24], [25]. Bei den Proben mit 90% CEM I und 10% Silikastaub als Bindemittel ist die gegenüber den verpackten Proben deutlich stärkere Chloridaufnahme der luftgelagerten Proben auch in 2-3 mm Tiefe auffällig, insbesondere deshalb, weil das bei den Proben mit dem Bindemittel 90% CEM I und 10%

Metakaolin nicht der Fall war und angenommen wurde, dass bei beiden Bindemitteln vergleichbare Ergebnisse erzielt werden müssten. Dies besonders deshalb, weil der  $\text{Ca(OH)}_2$ -Verbrauch (s. AP 4) bei beiden Bindemitteln etwa gleich hoch und auch die Festigkeiten (s. AP 5) vergleichbar waren (mit leicht höheren Druckfestigkeiten beim CEM I/MK (90%/10%)) und daher angenommen wurde, dass die Dichtigkeit der Bindemittelmatrix und die Chloridaufnahme vergleichbar sein würde. Hinzu kommt, dass bei den Proben mit Metakaolin die chemische und physikalische Bindung von Chlorid einen deutlich stärkeren Einfluss hat als bei den Proben mit Silikastaub.

Eine längere Nachbehandlungszeit in verpackter Form führte bei allen Proben (Abbildung 15 und Abbildung 16), außer bei der Referenzmörtelmischung, zu einer geringeren maximalen Eindringtiefe (bei B, D und E von 15 auf 10 mm und bei C und F von 10 auf 7 mm) im Vergleich zu einer kurzen Nachbehandlung von 7 Tagen. Die Randzone zeigt ebenfalls eine geringere Aufnahme an Chlorid und bildet somit eine dichtere Struktur durch eine längere Hydratationszeit aus. Einzige Ausnahme ist hier die Probe mit Silikastaub, wo der Gehalt an Chlorid in der Randzone durch eine längere Nachbehandlungszeit keine Änderung zeigt. Offenbar reicht eine Hydratationszeit von 7 Tagen aus damit Silikastaub seinen positiven Packungseffekt zeigen kann. Interessanterweise scheint die Art und Dauer der Nachbehandlung kaum einen Einfluss auf die Referenzprobe zu haben.

### Einfluss der Zusatzstoffe bei verpackter Vorlagerung von 28 Tagen

In einem anderen Prüfprogramm wurden die Proben mit einem  $W/B_G$ -Wert von 0,36-0,45 für 28 Tage verpackt gelagert. Dies repräsentiert eine Nachbehandlungszeit ähnlich der Norm. Hauptsächlich wurde in diesem Prüfprogramm auf die Proben mit einer konstanten Verarbeitbarkeit (Ausnahme Probe C und D mit konstantem  $W/B_G$ -Wert) fokussiert. Zusätzlich wurden hier Kalksteinmehle (hydraulisch inaktiv) unterschiedlicher Feinheit als Zementersatzstoffe verwendet. Zum einem Mesokalk, der eine ähnliche Mahlfineinheit ( $d_{50}=5,02\mu\text{m}$ ) wie der Zement hat und zum anderen Mikrokalk, der deutlich feiner ( $d_{50}=1,20\mu\text{m}$ ) gemahlen wurde.



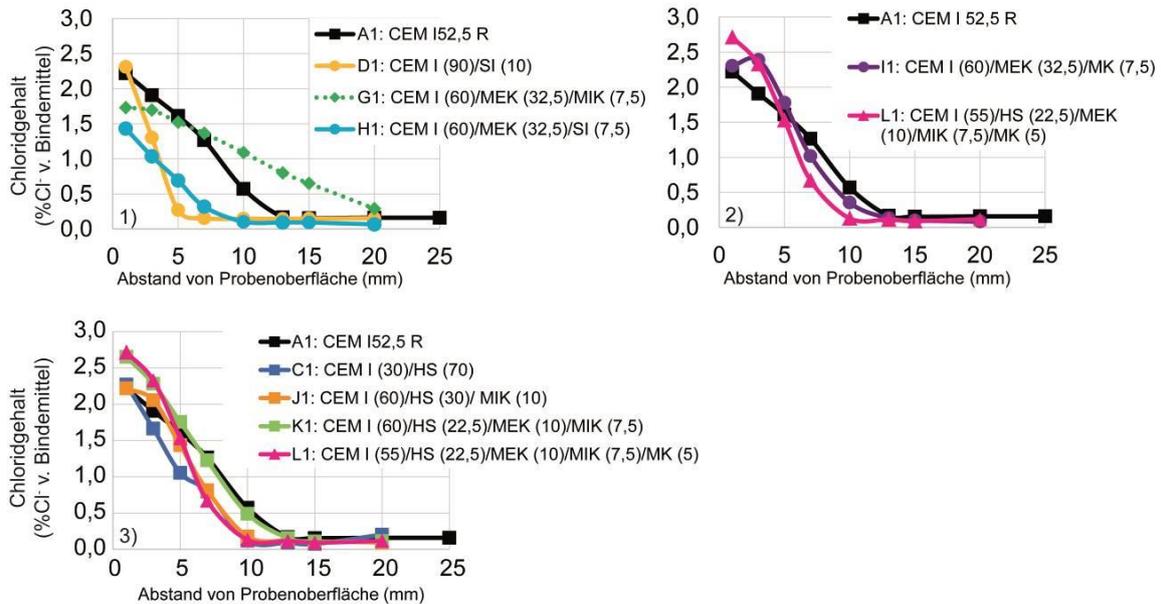
**Abbildung 17: Vergleich der Kurvenverläufe von der Referenzprobe A (schwarz und grau) und Probe G mit reduziertem Klinkergehalt (grün). 1) Probe A und G mit gesamten  $W/B_G$ -Wert (Lagerung verpackt) und 2) Proben mit entsprechenden äquivalenten  $W/B_a$ -Wert.**

Gut ersichtlich ist, dass die Kurven aller Proben mit hydraulisch aktiven Zementersatzstoffen in Abbildung 18 deutlich steiler abfallen als die des CEM I (Probe A) bzw. des CEM I mit inerten Kalkstein (Probe G). Auch zeigt die Probe G mit reduziertem Klinkergehalt (grüne Kurve) im Vergleich zur Referenz (schwarze Kurve) mit dem gleichen  $W/B_G$ -Wert von 0,4 einen flacheren Kurvenverlauf (höhere Cl-Eindringung; Abbildung 17, Diagramm 1). Betrachtet man aber den äquivalenten  $W/B$ -Wert hat die Probe G einen  $W/B_a$ -Wert von 0,6 (Diagramm 2 in Abbildung 17) und wird diese mit der entsprechenden Referenzprobe A2 ( $W/B_a$ -Wert = 0,6) verglichen ist erkennbar, dass die Probe mit 40% Kalkstein eine gleichwertige Cl-Eindringung hat wie die Referenzprobe (7 Tage verpackt gelagert). Im Vergleich zur Referenzprobe, die verpackt für 90 Tage nachbehandelt wurde (gleicher  $W/B_a$ -Wert von 0,6), zeigt die Probe eine deutlich geringere Cl-Eindringung. Da die Probe G aus hydraulisch inerten Zementersatzstoffen besteht, zeigt diese Probe auch den gleichen Grad an Steilheit wie die Referenzprobe.

Der Einfluss von Silikastaub auf die Mikrostruktur der Mörtelproben (Diagramm 1 in Abbildung 18) zeigt sich in einer deutlich geringen Cl-Eindringung bei der Probe mit 10% Silikastaub und 90% CEM I 52,5 R als Bindemittel. Im Vergleich zur Referenzprobe hat die Kurve der Probe mit Silikastaub den steilsten Abfall, obwohl der Chloridgehalt in der Randzone beider Proben gleich hoch war. Durch die Zugabe von MEK zum CEM I und SI (Probe H in Diagramm 1 - Abbildung 18) wurde der Chloridgehalt der Randzone stark beeinflusst und zeigt deutlich geringere Werte.

Der auf die Chlorideindringung nachteilige Effekt (stärkere Cl-Eindringung) von Metakaolin (stärkere Chloridbindung durch den hohen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Anteil; Abbildung 18, Diagramm 3) im Vergleich zu Silikastaub als Zementersatzstoff zeigt sich auch bei den Proben mit Metakaolin einschließlich Kalkstein (Probe I) und

Hüttensand (Probe L) im Bindemittel. Besonders in der Randzone bis ~5mm Tiefe der Proben I und L ist der Chloridgehalt höher im Vergleich zur Referenzprobe. In die Tiefe ist aber weniger Chlorid eingedrungen.



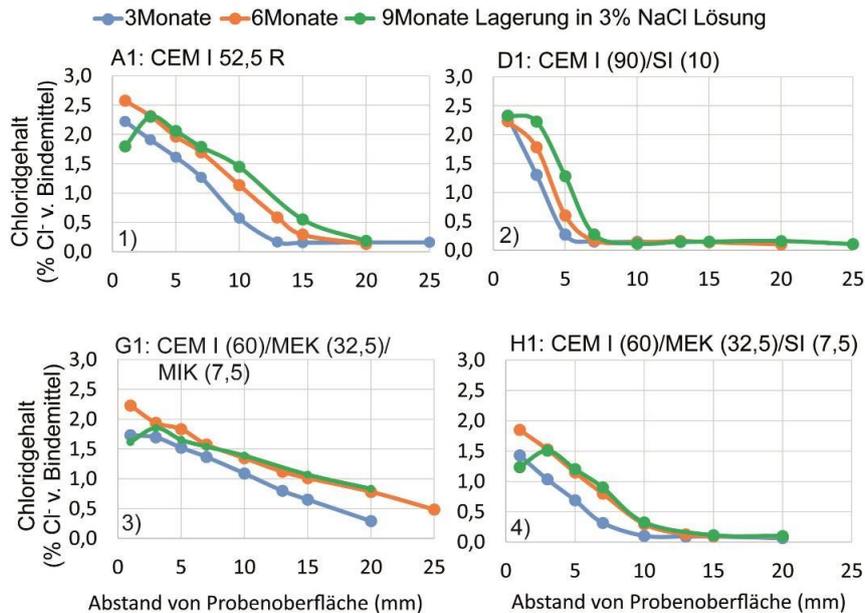
**Abbildung 18: Ergebnisse der Proben mit verpackter Vorlagerung über 28 Tage (mit Ausnahme der Proben C und D hatten die Proben eine gleiche Verarbeitbarkeit und zusätzlich zu HÜS, Silikastaub und Metakaolin auch inertes Kalksteinmehl als Zementersatzstoff)**

In Diagramm 3 der Abbildung 18 sind die Proben mit konstanter Verarbeitbarkeit und hydraulischen sowie inertem Zusatzstoffen zusammengefasst. Ab einer Tiefe von 5 mm sind alle Proben mit inertem und hydraulischen aktiven Zusatzstoffen besser oder gleichwertig zur Referenzprobe A. Das Diagramm 4 der Abbildung 18 zeigt die Kurven der Proben A1, C1, J1, K1, und L1. Den stärksten Widerstand gegen die Chlorideindringung hatte die Probe C mit 70% Hüttensand. Eine ähnlich niedrige Chlorid Aufnahme, besonders in der Tiefe, hat auch die Probe J mit Hüttensand und dem Mikrokalk. Aber der höhere Gehalt an Chlorid scheint besonders in der Randzone bei dieser Probe durch den Gehalt an Mikrokalk beeinflusst zu sein. Die Proben K und L haben in der Randzone eine ähnlich hohe Chloridaufnahme wie die Referenzprobe. Konträr zu den bisherigen Ergebnissen (Abbildung 16 und Abbildung 18 Diagramm 2) setzte die Probe L mit HÜS/MEK/MIK und Metakaolin der Chlorideindringung einen höheren Widerstand entgegen als die Probe K mit HÜS/MEK/MIK aber ohne Metakaolin.

Die Ergebnisse zeigen, dass Proben mit sowohl hydraulischen als auch puzzolanischen Zusatzstoffen der Chlorideindringung einen höheren Widerstand entgegensetzen als die Referenzprobe bestehend aus 100% CEM I 52,5 R als Bindemittel. Hier ist zudem zu bedenken, dass das Chlorid zunächst in die äußersten Zonen relativ leicht eindringen konnte während das Gefüge der tieferen Zonen durch die Nacherhärtung immer dichter wurde und das Chlorid deshalb immer schwerer in größere Tiefen diffundieren konnte. Wie ersichtlich, fallen alle Kurven (Ausnahme Probe G) in Abbildung 18 steiler ab als die Kurve der Referenzprobe was nur durch eine, von den hydraulisch aktiven und puzzolanischen Zementersatzstoffen bewirkten, dichteren Porenstruktur erklärbar ist.

### Einfluss einer verlängerten Lagerung in NaCl-Lösung

In Abbildung 19 wird beispielhaft der Einfluss einer längeren Lagerungsdauer der Probekörper in der 3%igen NaCl-Lösung auf die Chlorideindringung gezeigt. Dabei wurden die Proben für 3, 6 und 9 Monate in der Lösung gelagert und jeweils danach auf ihren Chloridgehalt hin untersucht. Bei einem Großteil der Proben wurde mit längerer Auslagerungsdauer der Probekörper in der NaCl-Lösung jeweils ein Anstieg des Chloridgehaltes mit einer längeren Lagerungszeit verzeichnet. Dies bedeutet, dass die Proben noch nicht an Chlorid gesättigt sind und es immer noch zu einer weiteren Aufnahme/Bindung von Chlorid kommt. Hingegen scheint es bei wenigen Proben wie zum Beispiel Probe G und H, dass trotz längerer Auslagerung nicht mehr Chlorid in die Probekörper eindringt, als es bereits nach 6 Monaten der Fall war. Mögliche Erklärung dafür könnte sein, dass bereits nach 6 Monaten die Proben an freien und gebundenen Chlorid ausreichend hoch gesättigt waren.



**Abbildung 19: Einfluss der Lagerungsdauer über 3, 6 und 9 Monate in der 3% NaCl-Lösung auf die Chlorideindringung wird beispielhaft an vier Proben gezeigt.**

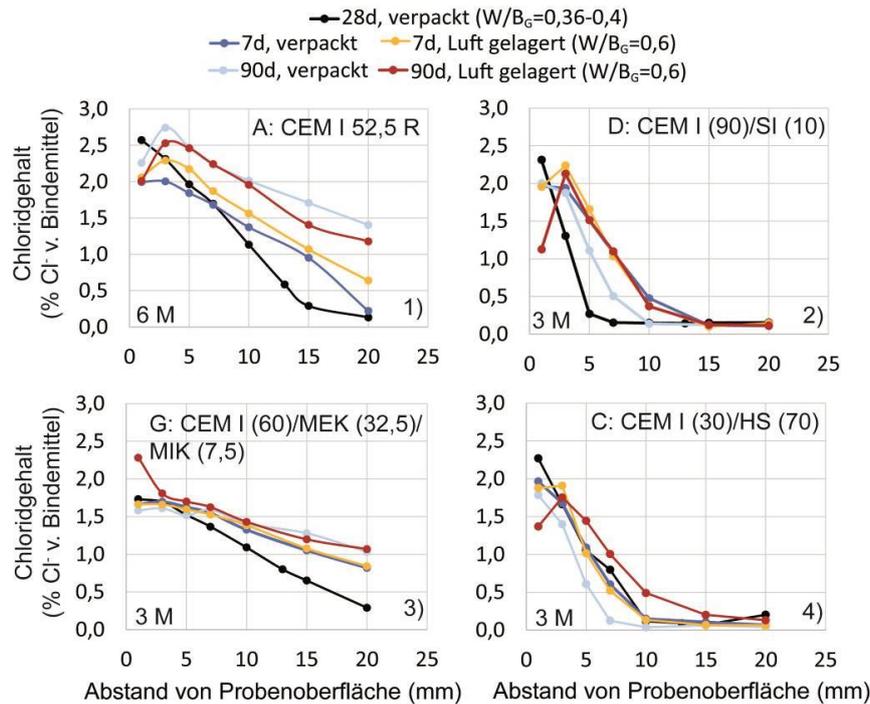
Einfluss des W/B-Wertes

An den folgenden vier Proben 1) A Referenzmischung; 2) C Probe mit 70% HÜS; 3) D Probe mit 10% SI und 4) G Probe mit 32,5% MEK und 7,5% MIK wurde ein komplettes Prüfprogramm mit den unterschiedlichen Nachbehandlungszeiten von 7, 28 und 90 Tagen und den unterschiedlichen Nachbehandlungsarten (verpackt und an Luft erhärtet) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 20 dargestellt.

Aus der Abbildung 20 ist ersichtlich, dass insbesondere bei den Proben C, D und G die in den äußeren Zonen aufgenommene Menge an Cl<sup>-</sup>-Ionen nicht sehr unterschiedlich ist, dass aber das Chlorid in der Tiefe unterschiedlich stark eingedrungen ist. Dabei fällt die 90-tägige Lagerung an Luft (rote Kurven) heraus, da hier die Karbonatisierung einen zu großen Einfluss hatte. Besonders in der Tiefe hat bei den Proben A, D und G mit inerten und puzzolanischen Zementersatzstoffen ein geringerer W/B<sub>G</sub>-Wert zwischen 0,36-0,4 (jeweils schwarze Kurve in Abbildung 20; Diagramm1-3) das Gefüge so verdichtet, dass es zu einer sehr geringen Aufnahme von Chlorid kam. Hingegen ist der Einfluss von einem geringeren W/B<sub>G</sub>-Wert bei der Probe mit einem hydraulischen Zusatzstoff untergeordnet und weicht einer optimalen Nachbehandlungsart (verpackt gelagert) und einer verlängerten Hydratationszeit (90 Tage Nachbehandlung; hellblaue Kurve im Diagramm 4 in Abbildung 20). Das gerade bei hydraulischen Zusatzstoffen der Nachbehandlungsart und –zeit eine entscheidende Rolle zukommt wird dadurch verdeutlicht, dass die insgesamt höchste Aufnahme von Chlorid in der Probe C (Diagramm 4 in Abbildung 20) mit einer 90-tägigen Nachbehandlung an Luft erreicht wurde. Dies ist zum Einem auf die austrocknungsbedingte, schlechtere Hydratation und zum Anderem auf den Effekt der Karbonatisierung zurückzuführen.

Ebenfalls benötigt auch die Probe mit Silikastaub (Diagramm 2 in Abbildung 20) bei höheren W/B<sub>G</sub>-Werten eine längere und optimalere Nachbehandlung (hellblaue Linie) für einen besseren Widerstand gegen die Eindringung von Chlorid. Bei einer Vorlagerungszeit von 7 Tagen ist die Nachbehandlungsart nicht entscheidend, denn unabhängig von einer verpackten oder an Luft gelagerten Erhärtung kommt der verdichtende Einfluss des Gefüges durch Silikastaub zum Ausdruck, sodass eine gleiche Menge an Chlorid eindringen konnte. Ähnliche Mengen an Chlorid wurden ebenfalls bei einer 90-tägigen Nachbehandlung an Luft aufgenommen. Wahrscheinlich ist auch hier die Karbonatisierung und austrocknungsbedingte, schlechtere Hydratation von Nachteil.

Bei den Proben A (Referenzprobe) und G (32,5% MEK und 7,5% MIK) mit Zement als alleinigen hydraulischen Anteil im Bindemittel (Diagramm 1 und 2 in Abbildung 20) zeigt sich ebenfalls der positive Einfluss (geringste Aufnahme an Cl<sup>-</sup>) des geringeren W/B<sub>G</sub>-Wertes. Bei höheren W/B<sub>G</sub>-Werten konnte das Chlorid so tief eindringen (u. a. höherer Porenanteil), dass es nicht möglich war eine maximale Eindringtiefe von Chlorid zu ermitteln. Ebenfalls ist erkennbar, dass unabhängig von der Zeit, die Art der Nachbehandlung bei beiden Proben untergeordnet ist. Dies kommt vor allem bei der Probe G mit reduzierten Klinkergehalt (Diagramm 3 in Abbildung 20) gut zum Ausdruck. Überraschenderweise hat die längste Hydratationszeit (unabhängig von der Art der Nachbehandlung) von 90 Tagen die höchste Aufnahme an Chlorid ergeben.



**Abbildung 20: Chloridgehalt in unterschiedlichen Tiefen von Proben mit unterschiedlichem W/B-Wert und Vorlagerung**

Zusammenfassung der Untersuchungen zur Eindringung von Chloridionen

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Bindemittel mit hydraulisch aktiven und puzzolanischen Zementersatzstoffen eine dichtere Struktur aufbauen und der Chlorideindringung einen deutlich höheren Widerstand entgegensetzen als der CEM I. Der Grund dafür, dass durch diese Stoffe das Gefüge dichter wird, steht in Zusammenhang mit einer veränderten Porenverteilung hin zu Poren mit im Mittel kleinerem Durchmesser und einer insgesamt veränderten Mikrostruktur (s. AP 6). Metakaolin zeigte im Vergleich zu Silikastaub hingegen trotz ähnlicher Druckfestigkeiten und einem ähnlichen hohen Restanteil an  $Ca(OH)_2$  einen geringeren Widerstand gegen die Eindringung von Chloridionen. Dies ist auf den hohen Anteil an  $Al_2O_3$  zurückzuführen, der eine stärkere Bindung von Chlorid ermöglicht. Die Wirkung von inerten Kalkstein als die Packungsdichte erhöhender Zusatzstoff zeigte sich vor allem in der Kombination von feineren Kalkstein (MIK) mit hydraulischen Hüttensand. Anhand der ersten Ergebnisse hatte hingegen die Verwendung von größerem Kalkstein (MEK) zu einer höheren Aufnahme von Chlorid geführt.

Die Art der Lagerung hatte einen starken Einfluss auf die Probe mit 30% Hüttensand. Hier zeigt sich, dass ein deutlicher Vorteil in einer feuchten Nachbehandlung der Probekörper besteht. Es hat hingegen überrascht, dass der CEM III/B-S auch bei den an Luft vorgelagerten Proben dem Eindringen von Chloridionen einen höheren Widerstand entgegensetzt hat als der CEM II/B-S. Hingegen scheint die Art der Nachbehandlung einen geringen Einfluss auf die Referenzprobe und Proben mit puzzolanischen Zementersatzstoffen in der Tiefe zu haben. Am Rand wurden die Proben hingegen durch den Effekt der Karbonatisierung stärker beeinflusst.

Eine längere Nachbehandlungszeit von bis zu 90 Tagen hat bei allen Proben zu einer deutlichen Reduktion der maximalen Chlorideindringtiefe geführt, wohingegen die Randzone nur gering beeinflusst wurde.

Bei einem Großteil der Proben wurde mit längerer Auslagerungsdauer der Probekörper in der NaCl Lösung jeweils ein Anstieg des Chloridgehaltes mit einer längeren Lagerungszeit verzeichnet. Hingegen scheint es bei wenigen Proben wie zum Beispiel den Proben G und H so, dass trotz längerer Auslagerung nicht mehr Chlorid in die Probekörper eindringt, als es bereits nach 6 Monaten der Fall war.

Besonders in der Tiefe kam bei den Proben mit inerten und puzzolanischen Zementersatzstoffen der positive Einfluss eines geringeren  $W/B_G$ -Wert gut zum Ausdruck indem es zu einer geringen Aufnahme von Chlorid kam. Hingegen ist der Einfluss von einem geringeren  $W/B_G$ -Wert bei der Probe mit hydraulischen Zusatzstoff untergeordnet, die Nachbehandlungsart (verpackt gelagert) und eine verlängerte Hydratationszeit (90 Tage Nachbehandlung) überwiegt.

Das unterschiedliche Bindevermögen steht neben dem geringeren Klinkergehalt der Mischbindemittel in

Zusammenhang mit der veränderten chemischen Gesamtsituation (u. a. wegen des Umstandes, dass hydraulisch aktive Stoffe den Anteil an C-S-H-Phase erhöhen, den pH-Wert der Porenlösung vermindern, etc.). Hinzu kommt noch die unter den Proben unterschiedliche Mikrostruktur der Bindemittelmatrix (Gesamtporosität, Porenstruktur, Porenverteilung) und damit unterschiedliche Diffusionsgeschwindigkeit des Chlorids, sodass eine genaue Zuordnung der Ursache(n) unterschiedlicher Ergebnisse zum jetzigen Zeitpunkt schwer möglich ist. Daher sind die Berechnung des Chloriddiffusionskoeffizienten, die Korrelationen mit mineralogischen, chemischen und physikalischen Parametern und deren Interpretationen und Auswirkungen auf die Praxis Gegenstand des vierten Forschungsjahres.

### 2.2.3 Arbeitspaket 8: Korrosionsgefährdung

Im Stahlbeton ist es entscheidend die Bewehrungskorrosion innerhalb des Betons zu verhindern, da es im schlechtesten Fall bis zum Tragfähigkeitsverlust der Konstruktionen kommen könnte. Indem i) eine ausreichende Überdeckung gewählt wird und ii) die Bindemittelmatrix des Betons/ Mörtels bestmöglich gewählt wurde, um ein Eindringen von korrosionsfördernden Stoffe (u.a. Chlorid) zu verhindern, kann die Lebensdauer einer Konstruktion verlängert werden. Durch die hohe Alkalinität der Porenlösung im Beton bildet sich um die Bewehrung im Stahlbeton eine Passivschicht aus, die die Bewehrung vor Korrosion schützt. Dieser passive Korrosionsschutz kann jedoch durch die Karbonatisierung (pH-Wert wird reduziert) und Eindringen von freien Chloriden (Korrosion an der Bewehrung) verloren gehen.

Um einen Eindruck zu bekommen, inwieweit die in diesem Projekt verwendeten Bindemittelrezepturen den elektrischen Widerstand ( $\cong$  Leitfähigkeit, Messung mittel Impedanzspektroskopie, Abbildung 21a) in Mörtelproben beeinflussen bzw. einen Einfluss auf den Grad der Korrosionsgeschwindigkeit (mittels einer AgCl-Elektrode zur Potentialmessung, Abbildung 21a) haben, wurden für die Untersuchungen zur Korrosionsgefährdung 5 Mörtelproben ausgewählt (Tabelle 5). Zusätzlich wird untersucht welchen Einfluss die Beschaffenheit der Bewehrungsstäbe auf die Korrosion haben, indem i) ein polierter und ii) unpolierter Stab verwendet wird (Abbildung 21c).

**Tabelle 5: Proben für die Korrosionsuntersuchungen, ausgelagert in Chlorid und einer CO<sub>2</sub>-Umgebung mit Elektroden**

| Kurzbez. Probe | Zusammensetzung                          | w/b = 0,4 | w/b = 0,6 |
|----------------|--|-----------|-----------|
| A              | CEM I (100)                              | A1        | A2        |
| B              | CEM I + HÜS (70/30)                      | B1        | B1        |
| C              | CEM I + HÜS (30/70)                      | C1        | C2        |
| J              | CEM I + HÜS + MIK (60/30/10)             | J1        |           |
| K              | CEM I + HÜS + MEK + MIK (60/22,5/10/7,5) | K1        |           |

Für die Untersuchungen wurden mit Sensorik ausgestattete zylindrische Proben hergestellt und für 24h abgedeckt in den Formen zum Erhärten belassen. Nach 24h wurden die Probekörper aus der Form entnommen und für weitere 27 Tage bei RH = 99%, T = 20 ° C gelagert. Am 28 Tag wurden die Probekörper in 3% NaCl Lösung ausgelagert und bei 3%-CO<sub>2</sub> in der Karbonatisierungskammer bei RH = 57%, T = 20 °C überführt (Abbildung 22). Durch periodische Messung des Potentials und der Impedanz von teilweise isolierten Bewehrungsstäben wird die Zeit bis zum Verlust des Korrosionsschutzes gemessen.

Die Potentialmessung mittels AgCl-Elektroden erfolgte bei den Proben mit polierten und nicht polierten Stahl und Lagerung in der 3%igen NaCl-Lösung das erste Mal nach 28 Tagen und kontinuierlich weiter nach dem Eintauchen in der NaCl-Lösung. Die weiteren Proben, die zunächst bei 3% CO<sub>2</sub> karbonatisiert werden, werden erst bei vollständiger Karbonatisierung (Messung erfolgt anschließend unter Wasser) im 4. Forschungsjahr gemessen werden.

Bei der Messung der Impedanz erfolgte die erste Messung unmittelbar nach dem Entformen des Frischbetons und wurde während der Aushärtezeit von 28 Tagen fortgesetzt. Bei Proben, die einer NaCl-Lösung ausgesetzt sind, wurde die Messung nach der Aushärtezeit (vor dem Auslagern in NaCl-Lösung) von 28 Tagen begonnen und kontinuierlich fortgesetzt. Die Proben in der Karbonatisierungskammer werden diskontinuierlich (einmal im Monat für einige Stunden) gemessen bis eine vollständige Karbonatisierung erreicht ist. Nach vollständiger Karbonatisierung werden die Proben in Wasser getaucht und die Impedanz wird kontinuierlich gemessen.

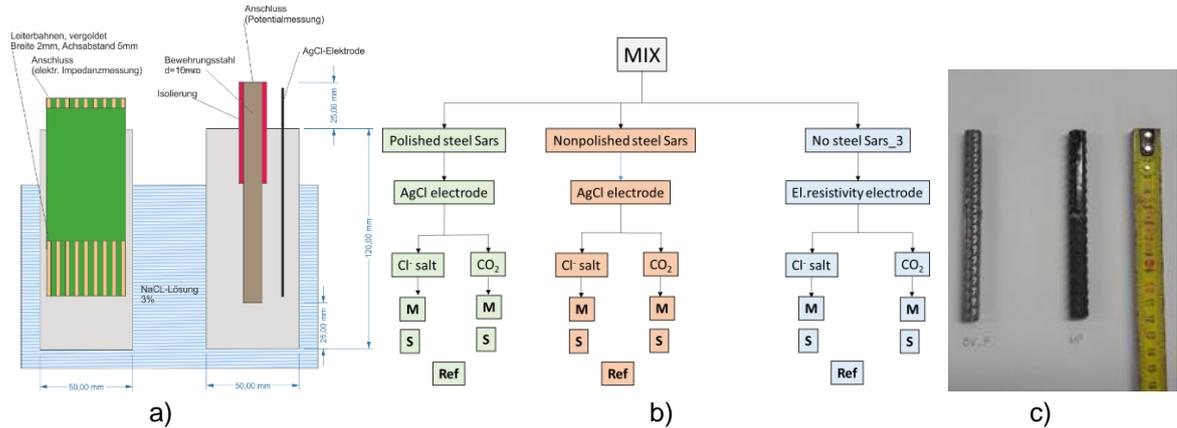


Abbildung 21: a) Experimentaufbau mittels Elektroden für die Mörtelproben, b) Versuchsdurchführung: M = zu messende Proben, S = Zemente mit Zusatzstoffoptimierten Bindemittel (Austauschprobe) und Ref. = Referenzprobe ohne Elektroden, c) Bewehrungsstäbe (poliert - links, nicht poliert - rechts)



Abbildung 22: Lagerung der Proben in 3% NaCl (links) und in der Karbonatisierungskammer bei RH = 57%, T = 20°C und 3% CO<sub>2</sub> (rechts)

Darüber hinaus werden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt (siehe Abbildung 23), um zu bewerten welchen Einfluss die Einwirkung der beiden korrosiven Umgebungsmilieus auf die chemischen / mineralogischen Eigenschaften und auf die poröse Mikrostruktur haben.

Die Herstellung der Probekörper mit w/b = 0,4 erfolgte im September und Oktober, während die restlichen Mörtelproben Ende Dezember hergestellt werden. Die Ergebnisse und Auswertungen werden im nächsten Bericht im 4. Forschungsjahr vorgestellt.

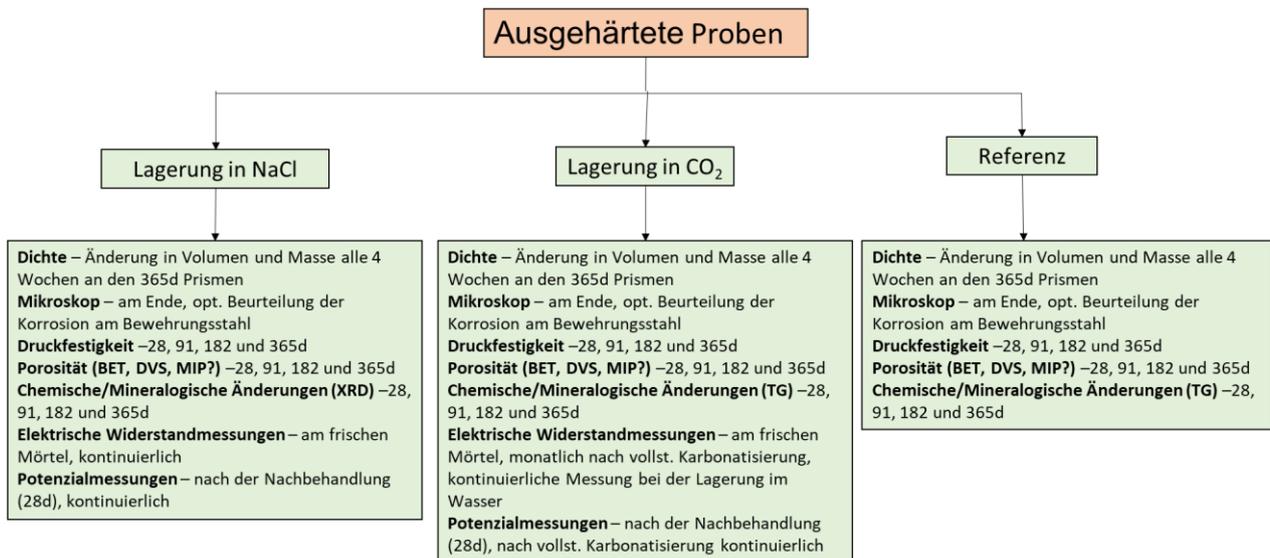


Abbildung 23: Prüfprogramm für die Abschätzung des Risiko der Stahlkorrosion ausgelöst durch Chloride und der Karbonatisierung.

**2.2.4 Arbeitspaket 9: Untersuchungen an bestehenden Bauwerken**

Im Berichtszeitraum sind an den im 2. Forschungsjahr aus der Unterführung Himberg in Niederösterreich entnommenen Bohrkernen untersucht worden (siehe Tabelle 6). Bohrkern 1 stammte aus etwa 0,5 m Höhe und die Bohrkern 2 und 3 aus dem bodennahen Bereich. Die Karbonatisierungstiefe wurde im Zuge der Entnahme an allen Bohrkernen und die Druckfestigkeit des Betons anhand des Bohrkerns 1 bestimmt. Im Berichtszeitraum erfolgten die Untersuchungen der Porenlösung und des Chloridgehaltes der Feststoffe in unterschiedlichen Betontiefen. Dazu sind Scheiben abgetrennt worden, die zuerst durch Unterwasserlagerung mit Wasser gefüllt und dann durch Einpressen von Wasser wassergesättigt worden. Es war beabsichtigt 1 cm dicke Scheiben abzutrennen, was aber wegen vorhandener Betonstahle (nur der Bohrkern 1 enthielt keinen Betonstahl weshalb dieser für die Bestimmung der Druckfestigkeit benutzt wurde) nicht immer gelang, sodass die Abschnitte unterschiedlich dick waren. Das Einpressen erfolgte in einem Drucktopf durch Aufbauen eines Wasserdrucks von 100 bar, der für zumindest 4 Stunden aufrecht gehalten wurde. Danach wurden die Scheiben in Kunststoffsäcken verpackt 3 Monate lang bei Raumtemperatur gelagert und schließlich die Porenlösung ausgepresst. Die 3 Monate Wartezeit waren nötig um sicher zu sein, dass sich ein chemisches Gleichgewicht zwischen Feststoffen und der Porenlösung eingestellt hat. Leider gelang das Auspressen trotz einer Drucksteigerung auf ca. 6000 bar nicht bei allen Scheiben. Eine weitere Drucksteigerung war aus Sicherheitsgründen nicht zu verantworten. Der Grund dafür dürfte in der Inhomogenität des Betons liegen, weil in Scheiben mit von der Rezeptur nach oben abweichenden Zuschlagsgehalt weniger Bindemittel und damit weniger Porenlösung enthalten ist. Zudem muss die Oberfläche der Zuschlagskörner, die bei so hohen Drücken brechen, benetzt werden, wodurch die auspressbare Menge der Porenlösung noch weiter reduziert wird. Der Chloridgehalt der Feststoffe wurde nach dem Auspressen bestimmt.

**Tabelle 6: Ergebnisse der Untersuchungen an den Bohrkernen von der Unterführung Himberg**

|                                |  |                       |                      |                       |                          |
|--------------------------------|--|-----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|
| Druckfestigkeit von Bohrkern 1 | 59,47 N/mm <sup>2</sup>                          |                       |                      |                       |                          |
| Entnahmetiefe [cm]             | Bohrkern 2 (Karbonatisierungstiefe 1 - 2 cm)     |                       |                      |                       | Cl-Gehalt (M% v. Zement) |
|                                | Mol OH <sup>-</sup> /L                           | mg OH <sup>-</sup> /L | pH-Wert              | mg Cl <sup>-</sup> /L |                          |
| 0 - 1                          | --   | --                    | ~8,5 <sup>*</sup> )  | 29.795                | ~2                       |
| 1,5 - 2,5                      | 0,001  | 17                    | 11,0                 | 18.360                | ~1,5                     |
| 3 - 5                          | 0,060  | 1.020                 | 12,78                | 6.765                 | ~0,8 - ~0,9              |
| 5,5 - 6,5                      | 0,069  | 1.173                 | 12,84                | 1.380                 | ~0,4 - ~0,5              |
|                                | Bohrkern 3 (Karbonatisierungstiefe 1,3 - 1,6 cm) |                       |                      |                       |                          |
| 0 - 1                          | --   | --                    | ~8,5 <sup>**</sup> ) | --                    | ~1,5                     |
| 1,5 - 2,5                      | 0,0065   | 110,5                 | 11,81                | 11.780                | ~1,0 - ~1,2              |
| 3,0 - 5,7                      | 0,0425   | 722,5                 | 12,63                | 11.480                | ~1,0 - ~1,2              |
| 6,2 - 7,2                      | -- <sup>**</sup> )                               | --                    | --                   | --                    | --                       |
| 7,7 - 9,4                      | 0,082  | 1.394                 | 12,91                | 105                   | <0,2                     |

<sup>\*</sup>) Erfahrungswert bei karbonatisiertem Beton

<sup>\*\*</sup>) keine Porenlösung auspressbar

Die Untersuchungen an den zwei bestehenden Bauwerken Kraftwerk Häusling und Staudamm Schlegeis im Zillertal mittels permanenten Monitoring von Bauteiltemperaturen und -feuchtigkeiten sowie Umwelteinwirkungen dauern an. Ursprünglich war geplant die Messungen nach einem Jahr Laufzeit zu stoppen und die Monitoringsysteme wieder abzubauen. Der Abbau wurde Coronabedingt jedoch auf unbestimmte Zeit verschoben. Da beide System noch einwandfrei arbeiten ergibt sich die Möglichkeit, einen längeren Zeitraum auszuwerten. Der Abbau der Systeme und die Auswertung erfolgt im 4. Forschungsjahr.

**2.2.5 Arbeitspaket 10: Auswertung und Beurteilung**

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

## 2.2.6 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 dritten Forschungsjahr planmäßig auch keine differenzierten Ergebnisse vor.

### Literaturverzeichnis:

- [1] E. W. Washburn, "Note on a Method of Determining the Distribution of Pore Sizes in a Porous Material," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 7, no. 4, pp. 115–116, Apr. 1921.
- [2] K. Scrivener, R. Snellings, and B. Lothenbach, Eds., *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. CRC Press, 2018.
- [3] K. Namouniara, P. Turcry, and A. Aït-Mokhtar, "Measurement of CO<sub>2</sub> effective diffusion coefficient of cementitious materials," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 10, pp. 1183–1196, Nov. 2016.
- [4] R. M. Espinosa and L. Franke, "Influence of the age and drying process on pore structure and sorption isotherms of hardened cement paste," *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 10, pp. 1969–1984, Oct. 2006.
- [5] J. J. Thomas, A. J. Allen, and H. M. Jennings, "Structural Changes to the Calcium-Silicate-Hydrate Gel Phase of Hydrated Cement with Age, Drying, and Resaturation," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 91, no. 10, pp. 3362–3369, Oct. 2008.
- [6] R. Snellings *et al.*, "Report of TC 238-SCM: hydration stoppage methods for phase assemblage studies of blended cements—results of a round robin test," *Mater. Struct.*, vol. 51, no. 4, p. 111, Aug. 2018.
- [7] M. Saeidpour and L. Wadsö, "Moisture equilibrium of cement based materials containing slag or silica fume and exposed to repeated sorption cycles," *Cem. Concr. Res.*, vol. 69, pp. 88–95, Mar. 2015.
- [8] M. Zajac, J. Skibsted, J. Skocek, P. Durdzinski, F. Bullerjahn, and M. Ben Haha, "Phase assemblage and microstructure of cement paste subjected to enforced, wet carbonation," *Cem. Concr. Res.*, vol. 130, p. 105990, Apr. 2020.
- [9] I. Galan, H. Beltagui, M. García-Maté, F. P. Glasser, and M. S. Imbabi, "Impact of drying on pore structures in ettringite-rich cements," *Cem. Concr. Res.*, vol. 84, pp. 85–94, Jun. 2016.
- [10] I. Maruyama, Y. Nishioka, G. Igarashi, and K. Matsui, "Microstructural and bulk property changes in hardened cement paste during the first drying process," *Cem. Concr. Res.*, vol. 58, pp. 20–34, Apr. 2014.
- [11] "SIA262/1:2013, Betonbau - Ergänzende Festlegungen (SN 505262/1:2013)," pp. 1–52.
- [12] J. Walraven, *Model Code 2010 - final draft - Volume 2: Model Code*. International Federation for Structural Concrete (fib), 2012.
- [13] K. Tuutti, "Corrosion of steel in concrete," 1982.
- [14] D. Li *et al.*, "Evaluating the effect of external and internal factors on carbonation of existing concrete building structures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 167, pp. 73–81, Apr. 2018.
- [15] S. O. Ekolu, "Model for practical prediction of natural carbonation in reinforced concrete: Part 1- formulation," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 86, pp. 40–56, Feb. 2018.
- [16] J. Visser, "Accelerated carbonation testing of mortar with supplementary cementing materials: limitation of the acceleration due to drying," *Heron*, vol. 57, pp. 231–246, 2012.
- [17] A. V. Saetta, B. A. Schrefler, and R. V. Vitaliani, "The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials," *Cem. Concr. Res.*, vol. 23, no. 4, pp. 761–772, Jul. 1993.
- [18] J. H. M. Visser, "Influence of the carbon dioxide concentration on the resistance to carbonation of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 67, pp. 8–13, Sep. 2014.
- [19] I. Galan, F. P. Glasser, D. Baza, and C. Andrade, "Assessment of the protective effect of carbonation on portlandite crystals," *Cem. Concr. Res.*, vol. 74, pp. 68–77, Aug. 2015.
- [20] P. Van den Heede, M. De Schepper, and N. De Belie, "Accelerated and natural carbonation of

concrete with high volumes of fly ash: chemical, mineralogical and microstructural effects," *R. Soc. Open Sci.*, vol. 6, no. 1, p. 181665, Jan. 2019.

- [21] A. Standards, *ÖNORM EN 12390-11 Prüfung von Festbeton – Teil 11: Bestimmung des Chloridwiderstandes von beton – Einseitig gerichtete Diffusion*. 2015.
- [22] C. Baldermann *et al.*, "Mineralogical and microstructural response of hydrated cement blends to leaching," *Constr. Build. Mater.*, vol. 229, p. 116902, Dec. 2019.
- [23] H. Chu *et al.*, "Effect of stray current on stability of bound chlorides in chloride and sulfate coexistence environment," *Constr. Build. Mater.*, vol. 194, pp. 247–256, Jan. 2019.
- [24] H. Zibara, R. D. Hooton, M. D. A. Thomas, and K. Stanish, "Influence of the C/S and C/A ratios of hydration products on the chloride ion binding capacity of lime-SF and lime-MK mixtures," *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 3, pp. 422–426, 2008.
- [25] M. Gbozee, K. Zheng, F. He, and X. Zeng, "The influence of aluminum from metakaolin on chemical binding of chloride ions in hydrated cement pastes," *Appl. Clay Sci.*, vol. 158, pp. 186–194, Jun. 2018.

## 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., Ognijen Rudic, M.Sc. (IMBT)
  - Laboranten: Rudolf Panik; 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)
  - Technische Universität Darmstadt  
Institut für Werkstoffe im Bauwesen  
WiB-Mikrolabor  
L5|01 057  
Franziska-Braun-Straße 7  
64287 Darmstadt  
Ansprechpartner: Dr. Chem. Ing. Neven Ukrainczyk

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

## 3. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung

In den ersten drei Projektjahren wurden vorwiegend systematische Grundlagenuntersuchungen (auf experimenteller Basis) durchgeführt Die differenzierte wissenschaftliche Auswertung und Bewertung erfolgt erst im 4. Forschungsjahr. Das Programm und die Ergebnisse wurden den Partnern a) beim Halbjahrestreffen vom 10.03.2020 und der digitalen Präsentation zum Ende des 3. Forschungsjahres am 03.12.2020 vorgestellt und diskutiert.

#### 4. Grazer Betonkolloquium 2018:

- Baldermann, Claudia; Tritthart, Josef; Juhart, Joachim, Krüger, Markus: Einfluss des reduzierten  $\text{Ca(OH)}_2$ -Gehalts in zusatzstoffoptimierten Bindemitteln auf das Korrosionspotential
- C. Baldermann, A. Baldermann, O. Furat, M. Krüger, M. Nachtnabel, H. Schroettner, 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.

Weitere Veröffentlichungen befinden sich derzeit in Vorbereitung. Zudem ist geplant studentische Abschlussarbeiten zu vergeben.

### **4. Erläuterungen zu Kosten & Finanzierung**

Keinen Abweichungen vom Kostenplan laut Beantragung.

### **5. Projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen**

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

### **6. 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

Coronabedingt kam es im 3. Forschungsjahr zu Verzögerungen weshalb am 10. 09. 2020 um eine kostenneutrale Verlängerung um 3 Monate angesucht wurde. Das Ansuchen wurde mit Schreiben der FFG vom 28.09.20 bewilligt.