

# ENDBERICHT

**Projektnummer oder Projekttitel:** Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

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

## 1 ZIELE UND ERGEBNISSE

- Vergleichen Sie die erreichten Ergebnisse mit den Zielen, die dem Förderungsvertrag zugrunde liegen. Wurden die Ziele erreicht?
- Beschreiben Sie „Highlights“ und aufgetretene Probleme bei der Zielerreichung.

Das übergeordnete Ziel des Projekts ist die Entwicklung und Anwendung neuer analytischer Methoden zur Erfassung von Korrosion in mineralischen Baustoffen unter anderem für die Entwicklung neuer, nachhaltiger Baustoffe.

Für die Messanalytik werden neue optische Sensormaterialien für pH und Chlorid-Messung an Betonproben untersucht. Hierzu wurden mehrere neue Indikatorfarbstoffe für die Sensormaterialien erfolgreich synthetisiert. Die Stabilität der bereits etablierten pH-Sensoren wurde mit der Synthese und Verwendung eines neuen Farbstoffes erheblich gesteigert.

Für die Chloridmessung wurde eine systematische Studie durchgeführt und eine Reihe von neuen Farbstoffmolekülen synthetisiert. Ein Kandidat lieferte dabei vielversprechend Ergebnisse für die weitere Verwendung in einem Chloridsensor mit verbesserten Eigenschaften. Der bereits entwickelte Chloridsensor auf Basis des kommerziellen Lucigeninfarbstoffes wurde auf Bohrmehlproben zur Bestimmung von wasserlöslichem und gesamt Chlorid angewandt. Die Erarbeitung der Probenvorbereitung erwies sich als komplex und zeitaufwendig. Die gemessenen Werte der Bohrmehlproben zeigten eine sehr gute Übereinstimmung im Vergleich mit Referenzmethoden. Damit konnte das Proof-of-Concept der Messung mittels eines optischen Sensors im Labor gezeigt werden.

Die bildgebenden Messmethoden und Sonden für pH, die aus dem Projekt bisher entstanden sind wurden erfolgreich zur Untersuchung der Karbonatisierung von Betonproben im Labor angewendet. Die beschleunigte Karbonatisierung von verschiedenen Zementen (CEM I, II, III) wurde untersucht und mit der PHPHT-Bestimmung verglichen. Die neue Methode ermöglicht eine zusätzliche Charakterisierung der absolut pH-Werte als Profile in den karbonatisierten Bereichen. Des Weiteren wurde die pH-Entwicklung während der Hydratation von klinker-reduzierten Leimen untersucht. Mit Hilfe der optischen Sensoren auf der Probenoberfläche ist es nun möglich die pH Entwicklung von Zement Mischungen mit verschiedenen SCMs (Metakaolin, Flugasche, Silikastaub, Hüttensand, Kalksteinmehl) systematisch zu untersuchen.

Mittels des bildgebenden Verfahrens wurden mehr als 150 Proben aus österreichischen Straßentunneln und Brücken in einer umfassenden Feldstudie untersucht. Generell konnte eine gute Übereinstimmung zwischen der Bestimmung

der Karbonatisierungstiefe mittels PHPHT und der optischen Bildgebungsmethode festgestellt werden. Darüber hinaus ermöglichte die optische Sensortechnologie eine eingehende Bewertung der Reaktion einzelner Materialien mit fortschreitender Karbonatisierung und die korrespondierende Entwicklung des internen pH-Werts. Die Messungen zeigten Schwankungen im absoluten pH-Wert zwischen 9,2 und 11,8, bei der Farbumschlag von PHPHT stattfand. Das bildgebende Verfahren ist in der Genauigkeit der etablierten Methode weit überlegen. Von besonderer Bedeutung für die Praxisanwendungen sind die Ergebnisse der Aufnahme von pH-Profilen in Bohrungen in einem ersten Feldversuch. Hierbei wurde mit Hilfe von Sensorstreifen und Faserhaltern ein Proof-of-Concept gezeigt, das für die Anwendung im Feld geeignet ist.

Die Verwendung der optischen Methode im Feld hat, wie oben beschrieben, daher das Potential bessere Vorhersagen bezüglich der Dauerhaftigkeit eines Objektes zu liefern.

Wie auch im Kurzbericht beantragt, sollen in einem 4. Forschungsjahr, die oben beschriebenen Methoden für Messungen im Feld etabliert werden, um den Karbonisierungsgrad und die Chlorid Belastung gleichzeitig am Objekt bestimmen zu können. Die vollständige und gleichzeitige Charakterisierung von Betonproben hinsichtlich pH und  $\text{Cl}^-$  eröffnet die Möglichkeit, das tatsächliche Risiko für Stahlkorrosion mit einer verbesserten Genauigkeit und verringertem Aufwand als bei den derzeitigen Methoden zu bewerten. Darüber hinaus können die neu entwickelten Methoden dazu beitragen, die Korrelation zwischen pH und  $\text{Cl}^-$  in den verschiedenen Betonproben in Abhängigkeit von der Zusammensetzung, der Mikrostruktur und den Umweltbedingungen zu verstehen und für die Materialentwicklung neue Erkenntnisse liefern.

Folgende neuen Aspekte sollen im 4. Forschungsjahr konkret untersucht werden:

- Charakterisierung der Einflussfaktoren auf Karbonatisierung ( $\text{CO}_2$ , RH, Porosität, Chemismus etc.). Hierzu werden systematische Laborstudien durchgeführt und mit einer vergrößerten Datensatz an Feldproben ergänzt.
- Weiterentwicklung und Charakterisierung optischer pH Feldanalytik. (Oberflächenmessung vs. Bohrmehl)
- Hydratationsstudien mit SCMs.
- Verbesserung der Sensitivität und Intensität des Chlorid-Sensors für den Einsatz in einem Feldmessgerät.
- Entwicklung der Probenvorbereitung für Messanalytik von freiem und gesamt Chlorid für Labor und Feldsetups.
- Kombination der Messung von optischen Chlorid- und pH -Sensoren.

Diese Aspekte führen zu großen Mehrwerten für die gesamte Branche, die nur durch ein 4. Forschungsjahr erreicht und wie folgt zusammengefasst werden können:

- Proof of Concept für Feldanalytik für freies und gebundenes Chlorid
- Korrelation und Kombination von Chlorid und pH Analytik
- Zuverlässige Messanalytik für neue Betonarten (vor allem in Hinblick auf nachhaltigere und  $\text{CO}_2$  optimierte Betone)
- Neues analytisches Tool für Dauerhaftigkeitsbestimmungen und Materialcharakterisierungen (Forschung & Praxis).

Die im Kapitel 2.1 angegebenen prozentualen Fortschritte beziehen sich auf eine verlängerte Projektlaufzeit mit dem zusätzlichen vierten Forschungsjahr.

## 2 ARBEITSPAKETE UND MEILENSTEINE

### 2.1 Übersicht

Geben Sie in den folgenden Tabellen den Projektfortschritt je Arbeitspaket (bezogen auf den Förderzeitraum) und je Meilenstein an und führen Sie stichwortartig an, wo es zu Abweichungen gekommen ist.

Eine ausführlichere Beschreibung ist unter Punkt 2.2 möglich.

Tabelle 1: Fortschritt der Arbeitspakete (AP)

AP	Bezeichnung	Fortschritt	Ergebnisse, Abweichungen, Verzögerungen
1	Projektmanagement	75 %	Die Meetings und die kaufmännische Koordination unter den Projektpartnern wurden durchgeführt und die Berichte erstellt.
2	Wissenschaftliche Leitung	75%	Koordination der Zusammenarbeit, Planung & Steuerung und administrative Abwicklung des Projektes bei den wissenschaftlichen Partnern wurde durchgeführt.  Jour-Fix aller wissenschaftlichen Partner wurde monatlich abgehalten.  Diskussion und Abstimmung der Projektergebnisse des 3. Forschungsjahres mit den Projektpartnern ist erfolgt.

AP	Bezeichnung	Fortschritt	Ergebnisse, Abweichungen, Verzögerungen
3	Sensormaterialien	80%	<p>Erforschung und Synthese neuer, lumineszierender Sensormaterialien:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Synthese und Charakterisierung von pH Indikatorfarbstoffen.</li> <li>• Konzeption, Synthese und Charakterisierung von Indikatorfarbstoffen für Chlorid.</li> <li>• Optimierung des Matrixpolymeres.</li> <li>• Herstellung von Sensormaterialien</li> <li>• Charakterisierung der hergestellten Sensoren.</li> </ul> <p>Verzögerungen durch unerwartet hohen Syntheseaufwand und Komplexität chloridsensitiver Indikatoren und des passenden Matrixpolymers benötigen ein 4. Forschungsjahr.</p> <p>Erhöhter Fokus wurde auf verbesserte Stabilität bei pH Sensoren gelegt.</p>
4	Messmethodik	70%	<p>Analyse zahlreicher Laborproben und solcher aus realen Bauwerken und Imaging für wissenschaftliche Studien mittels etabliertem Imaging Set-Up.</p> <p>Herstellung miniaturisierte Sonden aus Sensorfolien für diverse Studien.</p> <p>Entwicklung und Evaluierung verschiedener Möglichkeiten für pH Feldmessungen.</p> <p>Grundlegende Evaluierung von pH- und Chlorid-Analyse in Bohrmehl.</p> <p>Verzögerungen durch komplexe und aufwendige Probenvorbereitung für Chlorid Messungen benötigen ein 4. Forschungsjahr.</p>

AP	Bezeichnung	Fortschritt	Ergebnisse, Abweichungen, Verzögerungen
5	Prozessverständnis u. Labortests	75%	<p>Erfolgreiche Anwendung der neuen Messmethodik, sowie Vergleich mit herkömmlicher Messanalytik (beschleunigte Testverfahren) für pH und Chlorid in Laborexperimenten.</p> <p>Folgende (Korrosions)prozesse wurden im Detail behandelt:</p> <p>Karbonatisierung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluierung von Alternativen zu PHPHT</li> <li>• Korrelation zw. pH Verteilung und Korrosionsgrad</li> <li>• Einfluss physiochemischer Materialparameter und Expositionsbedingungen auf den Karbonatisierungsprozess</li> <li>• Einfluss SCMs auf den internen pH und Karbonatisierungsgrad</li> <li>• Grundlegende Karbonatisierung von AAMs/GPs</li> </ul> <p>Die gewonnenen Erkenntnisse liefern nun die Möglichkeit verbesserte Vorhersagemodelle für die betriebliche Lebensdauer von Bauwerken anwenden zu können.</p> <p>Hinsichtlich Chlorid-Angriff konnten auf Grund der oben beschriebenen Schwierigkeiten noch keine grundlegenden neuen Erkenntnisse gefunden werden. Diese können dann mit der neuentwickelten Messmethodik in einem 4.FJ erzeugt werden.</p>

AP	Bezeichnung	Fortschritt	Ergebnisse, Abweichungen, Verzögerungen
6	Applikation u. Feldversuche	75%	Analyse und Charakterisierung von Probekörpern aus bestehenden Bauwerken, sowie Korrelation mit Labormessungen wurde für pH erfolgreich umgesetzt.  pH Messungen im Gelände an Bauwerken von Projektpartnern mit Hilfe von der in AP4 entwickelten „Feld-Messanalytik“.
7	Empfehlungen für die Praxis	75%	Ergebnisse und Zusammenfassungen der gewonnenen Erkenntnisse wurden den Partnern zur Verfügung gestellt.  Zahlreiche Veröffentlichungen in Fachjournalen und auf Kongressen.  Wissenschaftliche Arbeiten im Rahmen der Dissertationen von Marlene Sakoparnig und Leo Sterz sind noch in Ausarbeitung. Voraussichtlicher Abschluss beider im 4. FJ.

Tabelle 2: Meilensteine (MS, falls definiert)

MS	Bezeichnung	bisheriger Termin	Ergebnisse, Abweichungen, Verzögerungen
1.3	Fortschrittsbericht Jahr 3	09/2023	Abgeschlossen, keine
2.3	Fortschrittsbericht Jahr 3	09/2023	Abgeschlossen, keine
3.5	Herstellung Chlorid sensitiver Materialien	03/2023	Erfolgreiche Kombination von Farbstoffchemie und Matrixpolymer zur Herstellung Chlorid sensitiver Materialien.  Verzögerungen durch unerwartet hohen Synthesaufwand und Komplexität. Neuer Termin 09/2024
3.6	Verbesserte pH Sensoren	03/2023	pH-Sensoren mit verbesserter Stabilität synthetisiert. Abgeschlossen

MS	Bezeichnung	bisheriger Termin	Ergebnisse, Abweichungen, Verzögerungen
4.3	Vergleich von pH Feldmesssystemen	09/2023	Vergleich der beiden entwickelten Methoden für die Feldanwendung.
4.4	Bestimmung von Chlorid und pH in Bohrmehlproben	09/2023	Erfolgreiche Bestimmung von Chlorid und pH in Bohrmehlproben. Verzögerungen durch aufwändige Probenvorbereitung für Cl. Vergleich pH Messung von Pulverproben vs. Oberfläche 09/2024.
5.2	Einfluss von Karbonatisierung auf kritischen Chloridgehalt	09/2023	Aufgrund von Verzögerung bei der Entwicklung der Chlorid Analytik sind hier noch keine Ergebnisse vorhanden. Weiters wurde zusammen mit Projektpartnern beschlossen diesen Punkt wegen des Umfangs und seiner Bedeutung in einem gesonderten Projekt zu bearbeiten.
5.5	Einfluss von Materialparameter auf Karbonatisierungsgrad	09/2023	Hier wurden wesentliche Erkenntnisse erzeugt wie z.B. die z.T. Fehlbestimmung durch die Referenzmethode PHPHT. Abgeschlossen
5.6	Einbau relevanter Parameter in Modellierungen	09/2023	Die präzise pH Bestimmung erlaubt es eine Vielzahl von z.B. thermodynamischen Modellierung zu verbessern. Abgeschlossen
5.7	Laborsetup für CO <sub>2</sub> Behandlung von Baustoffen inkl. erster Messreihen	09/2023	Verfahren zur CO <sub>2</sub> Behandlung wurde erfolgreich installiert und Proben mit der Imaging Methode vermessen. Abgeschlossen
6.4	Feldmessungen zur Ermittlung des Karbonatisierungsgrades	09/2023	Erfolgreicher Test der entwickelten Systeme an 2 Objekten und Vergleich mit PHPHT und pH Imaging. Abgeschlossen

MS	Bezeichnung	bisheriger Termin	Ergebnisse, Abweichungen, Verzögerungen
6.5	Kombinierte Feldmesskampagne zur Zustandsbewertung eines Testobjektes	09/2023	Laufend. Gemeinsam mit unseren Partnern wird derzeit daran gearbeitet. 09/2024
7.1	Zusammenfassende Aufbereitung der Erkenntnisse für die Praxis	09/2023	Abschließende Zusammenfassung liegt aufgrund der geplanten Projektverlängerung noch nicht vor und soll am Ende des 4.FJ erfolgen. 09/2024;  Zwischenergebnisse werden sämtlichen Partnern regelmäßig kommuniziert.
7.2	Bericht an die für betroffene Regelwerke zuständigen Arbeitsgruppen in Österreich	09/2023	Der abschließende Bericht liegt aufgrund der geplanten Projektverlängerung noch nicht vor und soll am Ende des 4.FJ erfolgen. 09/2024

## 2.2 Beschreibung der durchgeführten Arbeiten

- Beschreiben Sie die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten aller beteiligten Partner, strukturiert nach den Arbeitspaketen.
- Konnten die Arbeitsschritte und -pakete gemäß Plan erarbeitet werden? Wo gab es wesentliche Abweichungen?

### AP1: Projektmanagement

Im gegenständlichen Projektzeitraum wurden die Treffen aller Projektpartner, die Zwischensitzungen, die Kurzberichte für die ÖBV-Vorstandssitzungen und entsprechende Präsentationen erstellt. Weiters wurde die kaufmännische Koordination des Projektkonsortiums kontinuierlich betreut und abgewickelt.

### AP2: Wissenschaftliche Leitung

Das Projekt wurde intern, wissenschaftlich, inhaltlich und terminlich koordiniert. Die institutsübergreifende Zusammenarbeit wurde etabliert, die Planung und Steuerung sowie administrative Abwicklung des Projektes bei den wissenschaftlichen Partnern wurde umgesetzt.

### AP3: Sensormaterialien

#### Synthese eines neuen pH Farbstoffes

Während den durchgeführten Arbeiten, wurden wiederholt festgestellt, dass die Langzeitstabilität des pH Farbstoffes mit pKs 10,3 nicht zufriedenstellend ist. Über den

Verlauf eines Messtages mit dem Imaging Systems wurde dabei eine Drift der Kalibration von 10-15% festgestellt. Um dennoch eine hohe Genauigkeit der gemessenen pH Verteilungen zu garantieren wurde eine Routine etabliert, bei der die Sensorfolie sowohl am Beginn der Messung wie auch am Ende des Messtages kalibriert wird. Anschließend erfolgte eine lineare Interpolation der Kalibrationsparameter (Top, Bottom, V50 und Slope) zwischen Start und Ende. Dadurch konnte für jede Messung eine zeitlich abhängige, eigne Kalibrationsfunktion errechnet werden.

In einem weiteren Schritt wurde ein neuer pH Indikator mit einem pKs-Wert von 10,5 entwickelt und synthetisiert um diesen instabilen Indikator zu ersetzen. Die chemische Strukturformel dieses Farbstoffes sowie die Verbesserung der Stabilität ist in Abbildung 1 dargestellt.

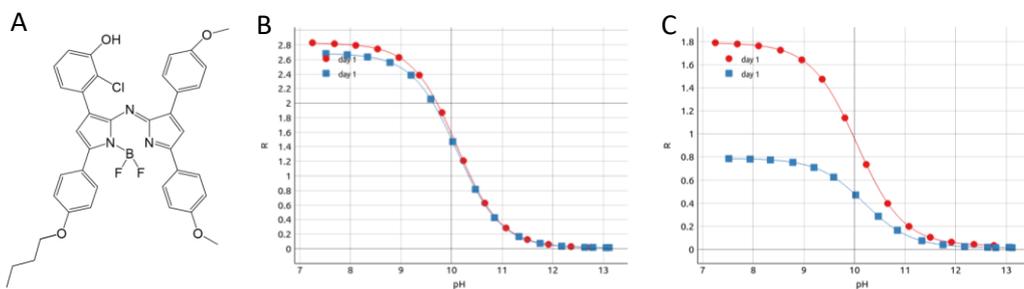
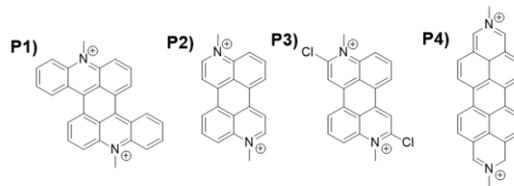


Abb.1: A) Chemische Strukturformel des neu synthetisierten Farbstoffes mit pKa 10,5. B) Stabilitätstest des neuen Farbstoffes über 24h. C) Stabilitätstest des Farbstoffes mit pKa 10,3 über 24h.

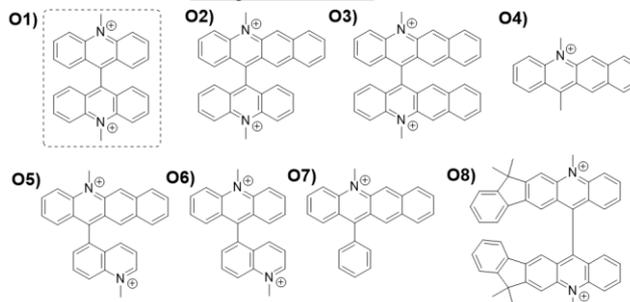
### Weiterentwicklung und Systematik langwelliger chloridsensitiver Farbstoffe

Im Laufe der Forschungstätigkeit wurden weitere chloridsensitive Farbstoffe entwickelt und das allgemeine Wissen über Beschränkungen und Möglichkeiten von potentiellen Verbesserungen tiefer ergründet.

#### Planare Strukturen



#### Orthogonale Strukturen

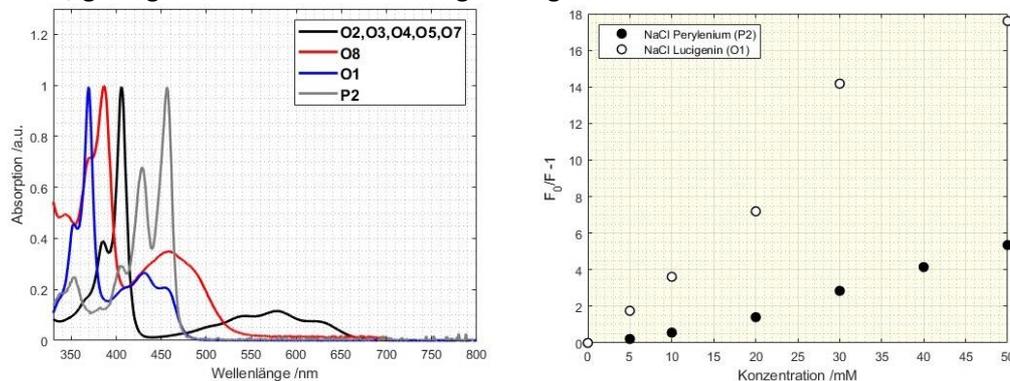


Grafik 2: Strukturen neuartiger und bekannter (P4, O1) Strukturen

Der allgemein bekannteste chloridsensitive Farbstoff ist *N-N'*-Dimethyl-9,9'-Bis(acridinium) (O1). Neben guten optischen Eigenschaften besitzt dieser Farbstoff

eine hohe Sensitivität gegenüber geringen Änderungen von Chloridkonzentrationen. Der Nachteil dieser Struktur ist, dass die Struktur keinen sehr weiten aromatischen Kern hat, sodass die Anregung und Emission bei sehr geringen Wellenlängen erfolgt. Dies hat negative Folgen auf physikalische Effekte und beeinträchtigt potentiell die chemische Stabilität des Farbstoffes. Aus diesem Grund wurden chemisch ähnliche Strukturen wie **O1** hergestellt, wobei planare und orthogonale Farbstoffe hergestellt wurden.

Für die Farbstoffe führten sehr unterschiedliche Syntheserouten zu den Zielprodukten und die Verschiebung zu höheren Wellenlängen erfolgte so wie es vorherzusehen war; in den orthogonalen Strukturen haben sich Anregungs- und Emissionsmaximum um 20 nm (**O8**) beziehungsweise 40 nm (**O2-O5** und **O7**) erhöht. Die planaren Strukturen zeigten tendenziell starke Absorption in höheren Wellenlängen, jedoch tendierten sie dazu, geringere Stokes-Verschiebung zu zeigen.



Grafik 3: links) Absorptionsspektren genannter Farbstoffe in Wasser, rechts) Chloridsensitivität von **O1** und **P2**, korrigiert nach Ionenstärke

Die genannten Farbstoffe zeigten weit unterschiedliche Chloridsensitivitäten. Struktur **P4**, **O4**, **O7** und **O8** zeigten faktisch keine Chloridsensitivität und die Sensitivität von **P1**, **O2**, **O3** und **O5** ist vermindert relativ zu **O1**. Obwohl diese Farbstoffe für spezielle Anwendungen sinnvoll sein können, bedingt die Betonanalytik stärker sensitive Farbstoffe. Farbstoff **O6** zeigt brauchbare Chloridsensitivität aber keine spektralen Verbesserungen. **P2** zeigt brauchbare Chloridsensitivität, spektrale Verbesserungen und sehr hohe Quantenausbeute. Farbstoff **P3** wurde spektral noch nicht untersucht. Die positiven Eigenschaften von **P2** zeigen, dass dieser Farbstoff Potential besitzt für die Betonanalytik. Die Labilität von **O1** gegenüber Hydroxid-Ionen macht ein Einstellen des pH-Wertes auf unter 7 notwendig. Dies ist auf die Einfachbindung in der Struktur zurückzuführen, sodass zu erwarten ist, dass **P2** deutlich geeigneter ist für Messungen in Lösungen mit hohem pH-Wert.

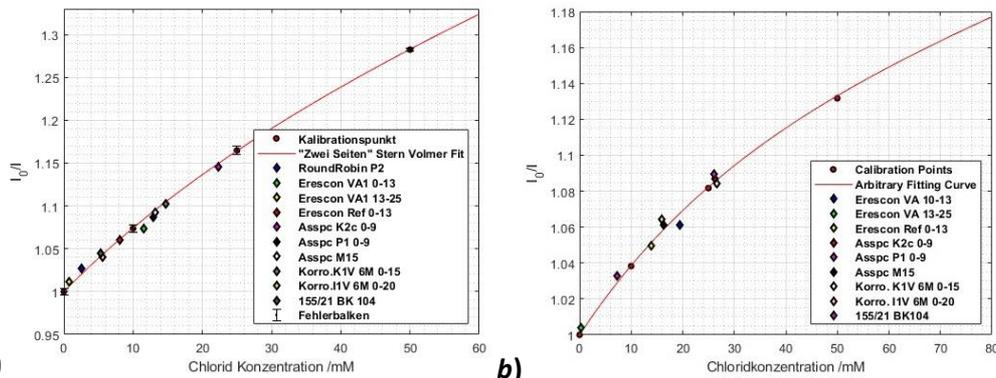
Ein wichtiges Ergebnis ist, dass die Chloridsensitivität in einem relativ erweiterten aromatischen System automatisch geringer ist. Ein Grund dafür kann sein, dass sich weniger positive Ladungsdichte an dem Ammonium-Stickstoff befindet. Dies zeigt, dass lediglich planarisierte Farbstoffe eine realistische Verbesserung von **O1** für die erwähnte Fragestellung ergeben können.

#### AP4: Messmethodik

#### Messung von Gesamtchlorid und wasserlöslichem Chlorid mit neuartiger Sensorfolie

Chloridanalytik in Betonstoffen erfolgt zumeist durch Ionenchromatografie oder Titrationsmessungen. Beide Methoden zeigen große Hürden bezüglich der Adaption für Feldanwendungen. Um künftig geplante Feldanwendungen zu untersuchen, wurde der optische Chloridsensor genutzt, um Betonstoffe mit bekannter Chloridkonzentration zu untersuchen. Dabei variiert das Prozedere, je nachdem ob wasserlösliches Chlorid oder Gesamtchlorid gemessen wird.

Zur Messung des wasserlöslichen Chlorids wurden 2,5 g Betonpulver auf 10,0 g demineralisiertes Wasser verrührt und verarbeitet, sodass eine Lösung gewonnen wird, deren pH-Wert unter 7,0 liegt und deren elektrische Leitfähigkeit bei 10,0 mS/cm<sup>2</sup>. Für die Bestimmung von Gesamt-Chlorid wurde 50% Essigsäure genutzt. Die Lösungen wurden auf einen pH-Wert um 1,9 titriert und auf elektrische Leitfähigkeiten von 5,1 mS/cm<sup>2</sup> gebracht. Ein Vorteil gegenüber etablierten Analysemethoden ist, dass keine Temperaturbehandlung der Lösung erforderlich ist. Die Kalibration wurde auf einem Lock-In Verstärker aufgenommen, indem Kalibrationslösungen bekannter Chloridkonzentrationen vermessen wurden. Nach dem Vermessen der Realprobenlösungen wurden die Ergebnisse in Stern-Volmer Einheiten, also  $I_0/I$ , umgerechnet und gegen die Konzentration laut Referenzmethode aufgetragen. Die Grafiken zeigen den gemessenen Wert auf der y-Achse und den Referenzwert auf der x-Achse, sodass eine höhere Entfernung eines Datenpunktes zur Kalibrationsgerade ebenso eine höhere Abweichung zu den Referenzwerten bedeutet.



**a)**  $\lambda_{exc}=422nm$ , BG12 Anregungsfilter, OG580 Emissionsfilter,  $f_{mod}=45$  kHz, **a)** Messung wasserlösliches Chlorid, Ionenchromatografie als Referenzmethode, **b)** Messung Gesamtchlorid in 50% Essigsäure, Titration als Referenzmethode

Aus den berechneten Stern-Volmer Werten wurden die Chloridkonzentrationen grafisch bestimmt und umgerechnet in den Massenanteil, [% Chlorid], am eingesetzten Betonstoff.

**Tabelle 1:** Mit Sensor und mittels Referenz berechnete Chloridanteile in exemplarischen Betonproben

Probe	Wasserlöslich [% Chlorid] Sensor	Wasserlöslich [% Chlorid] Referenz <sup>a)</sup>	Gesamt [% Chlorid] Sensor	Gesamt [% Chlorid] Referenz <sup>b)</sup>
Erescon VA1 0-13	0.16	0.14	0.28	0.25
Erescon VA1 13-25	0.01	0.02	0.03	0.01

Resecon Ref 0-13	0.11	0.11	0.20	0.19
Asspc K2c 0-9	0.32	0.31	0.37	0.38
Asspc P1 0-9	0.17	0.18	0.37	0.39
Korro. K1V 6M 0-15	0.21	0.20	0.38	0.37
Korro. I1V 6M 0-20	0.08	0.07	0.23	0.25
155/21 BK 104	0.07	0.08	0.10	0.11

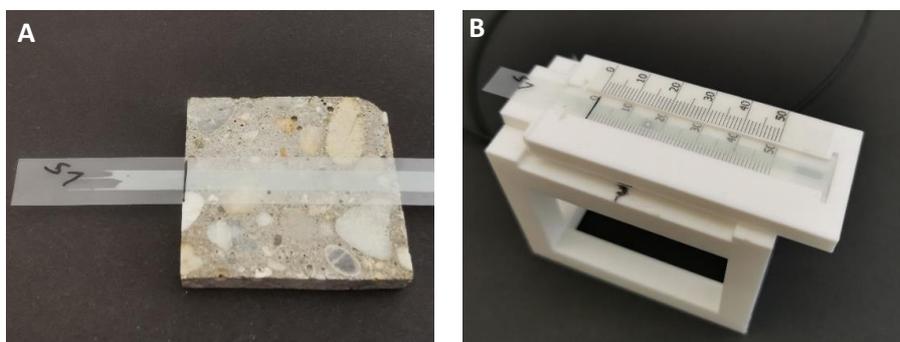
*a) Ionenchromatografie, b) Titration*

Zusammenfassend wurde ein Messsystem entwickelt, mit dem optisch Gesamtchlorid und wasserlösliches Chlorid in diversen Betonarten untersucht werden kann. Die Ergebnisse sind akkurat genug, um weitere Vereinfachung der Probenvorbereitung in Betracht zu ziehen, sowie die Miniaturisierung des Aufbaus und Feldanwendungen.

**Messsysteme für pH Profile**

Für die Messung von pH-Profilen im Feld wurden zwei verschiedene Messsysteme entwickelt und getestet. Im Gegensatz zu den pH-Folien die bisher verwendet wurden, wird bei diesem Ansatz nur ein Farbstoff (neuer Farbstoff mit pKa 10,5) in der Sensorfolie immobilisiert. Dies führt zu robusteren Sensoren mit geringerem Kalibrationsaufwand. Nachteilig wirkt sich dabei nur der eingeschränkte Sensitivitätsbereich von pH 9-12 aus.

Es wurden zwei Ansätze untersucht: Das erste Konzept orientiert sich sehr nahe am erfolgreiche Imaging Set-Up. Dazu wird ein Streifen Sensorfolie (Abbildung 5A) befeuchtet und auf die Betonoberfläche/in das Bohrloch eingebracht. Nach dem Ansprechen (60 Sekunden) wird die Folie vorsichtig auf den Schlitten der Ausleseeinheit (Abbildung 5B) transferiert und im Anschluss mittels miniaturisiertem Phasenfluorimeter ausgelesen. Dabei kann der Schlitten manuell oder mittels Schrittmotor bewegt werden. Zur Evaluierung dieses Messkonzeptes werden die so aufgenommenen Daten im Labor mit Imaging Daten derselben Folie verglichen. (Abbildung 6)



*Abb.5: A) Verwendeter Sensorstreifen auf Betonoberfläche. B) Sensorstreifen auf Schlitten der Ausleseeinheit*

A

B

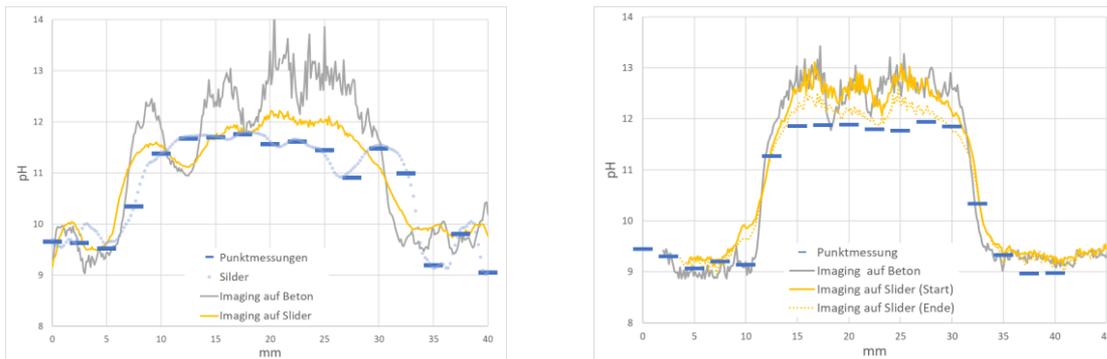


Abb.6: A) Vergleich von Messungen mittels Schlitten und Ausleseeinheit (blau) und Imaging (grau = Folie auf Beton, gelb = Folie nach Transfer auf Schlitten) B) Evaluierung der Signalstabilität nach Transfer der Sensorfolie auf den Schlitten (gelb).

Die Labormessungen zeigen, dass Karbonatisierung mit beiden Methoden einwandfrei bestimmt werden kann. Es ist jedoch auffällig, dass die Messung mittels Imaging höhere Absolutwerte ergibt als die Messung via Phasenfluorimetrie. Gleichzeitig muss aber auch festgehalten werden, dass sämtliche Messwerte über pH 12 eigentlich außerhalb des sensitiven Bereiches sind und nur Trends widerspiegeln. Folgende Aussagen können aus diesen Messungen jedoch trotzdem getroffen werden. 1) Der Transfer der Folie von der Betonoberfläche auf den Schlitten beeinflusst die Messung nur geringfügig, wenn diese schnell genug erfolgt. (leichte Abnahme der Absolutwerte im hohen pH Bereich). 2) Die Messwerte verändern sich kaum, sobald die Sensorfolie auf dem Schlitten liegt (Abbildung 6B), was ein relativ langes Messfenster ermöglicht (ca.5 Minuten). 3) Beide Messmethoden zeigen ein ähnliches Ergebnis.

Um genauere Messwerte im hohen pH Bereich zu erzielen und die Unsicherheit des Folientransfers zu vermeiden wurde eine weitere Messmethodik entwickelt (Abbildung 7). Dabei wird die nasse Sensorfolie mittels Halter in das Loch eingeführt und angepresst. Nach dem Ansprechen (ca. 1 min) erfolgt das Auslesen mittels einem in einer Nut geführten Faserhalter (Abbildung 7B). Die jeweilige Messtiefe kann manuell eingestellt und an der Skalierung abgelesen werden.

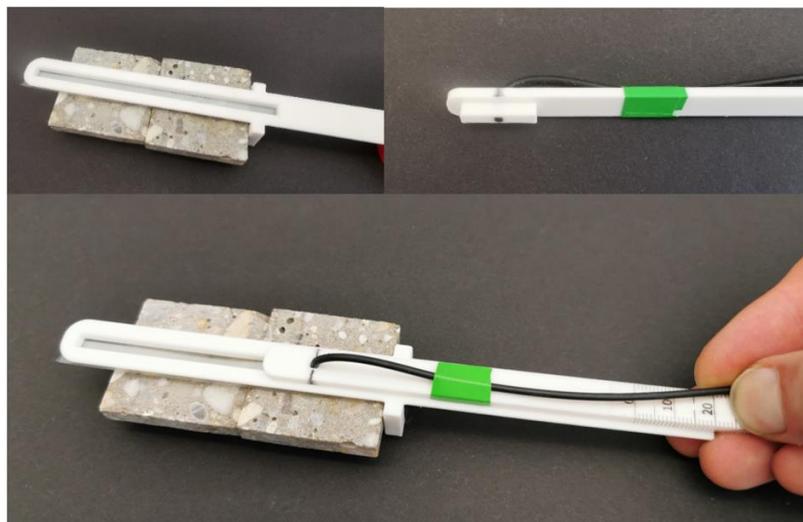


Abb. 7: A) Halter mit aufgeklebter Sensorfolie. B) Faserhalter mit Noppe zur Führung. C) Faserhalter in der Nut des Folienhalters. Auslesetiefe 20mm.

#### AP5: Prozessverständnis u. Labortests

Die Karbonatisierung von Stahlbeton führt zu niedrigeren pH-Werten, die die Stahlkorrosion begünstigen. Daher ist die Bestimmung der Karbonatisierungstiefe ein wichtiges Präventionsinstrument. Um unterschiedliche Betonrezepturen zu vergleichen wird meist ein beschleunigtes Karbonatisierungsverfahren angewendet und die Karbonatisierungstiefen mit Phenolphthalein (PHPHT) gemessen. Jedoch ist bekannt, dass der Prozess durch Einflüsse wie CO<sub>2</sub> Gehalt, Luftfeuchtigkeit, w/b, und Bindemittelzusammensetzung beeinflusst wird. Darüber hinaus sind die Einflüsse der physikalischen und chemischen Materialparameter und der Expositionsbedingungen auf den Phenolphthalein-Übergangspunkt noch nicht im Detail untersucht worden. Insbesondere für den Einfluss von Zementzusatzstoffen gibt es nur wenig Erfahrungswerte.

#### Einflüsse auf den Prozess der beschleunigten Karbonatisierung

Im Rahmen einer laufenden Masterarbeit wurden drei verschiedene Zemente (CEM I, CEM II, CEM III) mit jeweils zwei unterschiedlichen Wasser-Bindemittel-Verhältnissen (0,43; 0,5) gemischt und nach der FIB-Norm vorgelagert. Die Proben wurden dann in einer CO<sub>2</sub>-Klimakammer bei drei verschiedenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (2%, 18%, 100%) und drei verschiedenen relativen Luftfeuchtigkeiten (45%, 65%, 85%) beschleunigt karbonatisiert. Die Karbonatisierungstiefen der Prismen wurden zeitaufgelöst mittels PHPHT-Indikator und dem optischen pH Bildgebungsverfahren bestimmt. Zusätzlich wurden an ausgewählten Proben die Mineralphasen mittels XRD und TG analysiert um die wichtigsten Einflussparameter auf den PHPHT-Umschlagspunkt zu ermitteln.

Als Beispiel werden hier die Ergebnisse für die Messungen bei 18% CO<sub>2</sub> Gehalt und w/b 0.5 präsentiert (siehe Tabelle ). Die Ergebnisse der Phenolphthaleinbestimmung zeigten, dass bei allen 3 Luftfeuchtigkeiten CEM I die niedrigsten und CEM III die höchsten Karbonatisierungsraten nach 14 Tagen aufwiesen. Höhere Luftfeuchtigkeit führte tendenziell zu niedrigeren Karbonatisierungsraten. Bei CEM II zeigte sich unabhängig von der Luftfeuchtigkeit eine ähnliche Karbonatisierungsrate. Die beschriebenen Ergebnisse korrelieren sehr gut mit den optisch gewonnenen pH Verteilungsbildern. Wie schon in vergangenen Berichten beschrieben ermöglicht die optische Methode die zusätzliche Charakterisierung der Absolut pH-Werte in den karbonatisierten Bereichen. Dabei ist ersichtlich das mit abnehmenden Klinker Gehalt (CEM I>CEMII>CEMIII) wesentlich niedrigere pH-Werte bei allen Feuchtegraden gemessen wurden. Die durchgeführten mineralogischen und chemischen Analysen unterstützen diese Feststellung. Proben mit höheren pH-Werten weisen höhere Gehälter von Portlandit und niedrigere Anteile an Ca Karbonaten auf.

Tabelle 2: Karbonatisierungsraten der Mörtelproben mit w/b 0.5 ausgelagert bei 18% CO<sub>2</sub>.

	Karbonatisierungsrate (mm/vd)
--	-------------------------------

	35% RH	65% RH	85% RH
CEMI	1,1	0,3	0,4
CEMII	1,6	1,6	1,2
CEMIII	2,4	3,6	1,4

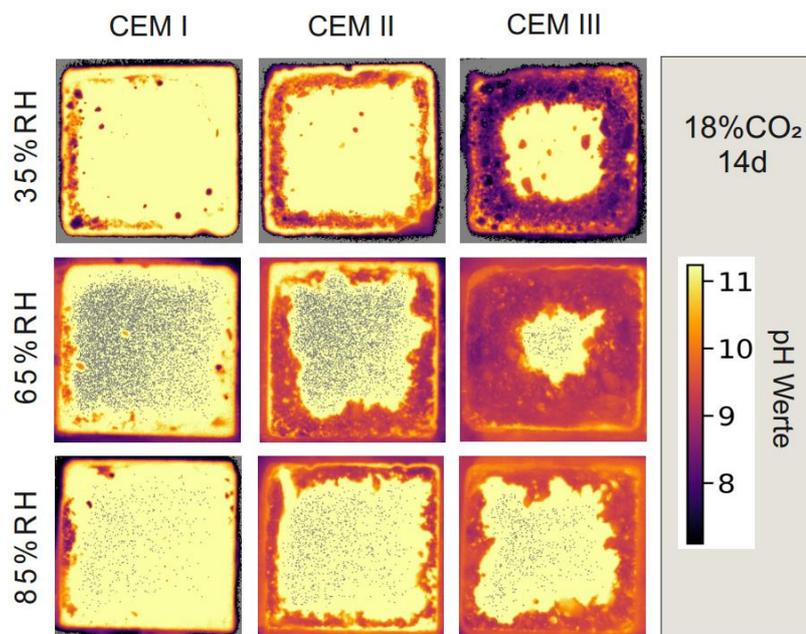


Abbildung 8: High resolution optical pH-imaging Bilder von 18% CO<sub>2</sub> Konzentration, nach 14 Tagen

### Einflüsse auf den Prozess der natürlicher Karbonatisierung

Im Rahmen eines Round Robin Tests wurde untersucht inwieweit sich der Karbonatisierungsprozess unter natürlichen (nicht beschleunigten) Bedingungen bei variierenden Umweltbedingungen verändert. Dafür wurden unterschiedliche Mörtelmischungen (CEM I, CEM II, CEM III, w/b = 0.5) für 3 Jahre entweder im Freien geschützt vor Niederschlag (sheltered outdoor) oder Innen bei konstanter Luftfeuchte und Temperatur (indoor) an mehreren Standorten (TU Graz, U Ghent, KU Leuven) ausgelagert. Die Proben wurden alle mittels der optischen Bildgebungsmethode nach den 3 Jahren Auslagerung untersucht (Abbildung 1, **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die pH-Profile wurden dabei in 3 Zonen eingeteilt (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)

Die Ergebnisse zeigten in den Proben mit CEM I und CEM II einen höherer pH-Wert in der Leimschicht (Zone 1). Der pH-Wert im karbonatisierten Bereich (Zone 2) variiert zwischen den Bindemitteln stark. Wobei CEM I durchschnittlich den höchsten pH-Wert >10 aufweist. Bei CEM II lagen die pH-Werte zwischen 8,8 und 9,5 bei CEM III zwischen 8,5 und 9,0. Im Bereich 3 der laut den auch durchgeführten Phenolphthaleintests als unkarbonatisiert eingeteilt werden würde liegt der pH-Wert über der Nachweisgrenze der Folie (>12,0).

Zwischen den Auslagerungsformen gibt es nur bei CEM I einen systematischen Unterschied: bei den 2 Innen (indoor) gelagerte Proben zeigt sich in Zone 2 eine stärkere inhomogene pH-Wert Verteilung (siehe Abbildung 1). Dies zeigt sich auch in den Profilen wobei hier eine größere Fluktuation zu sehen ist.

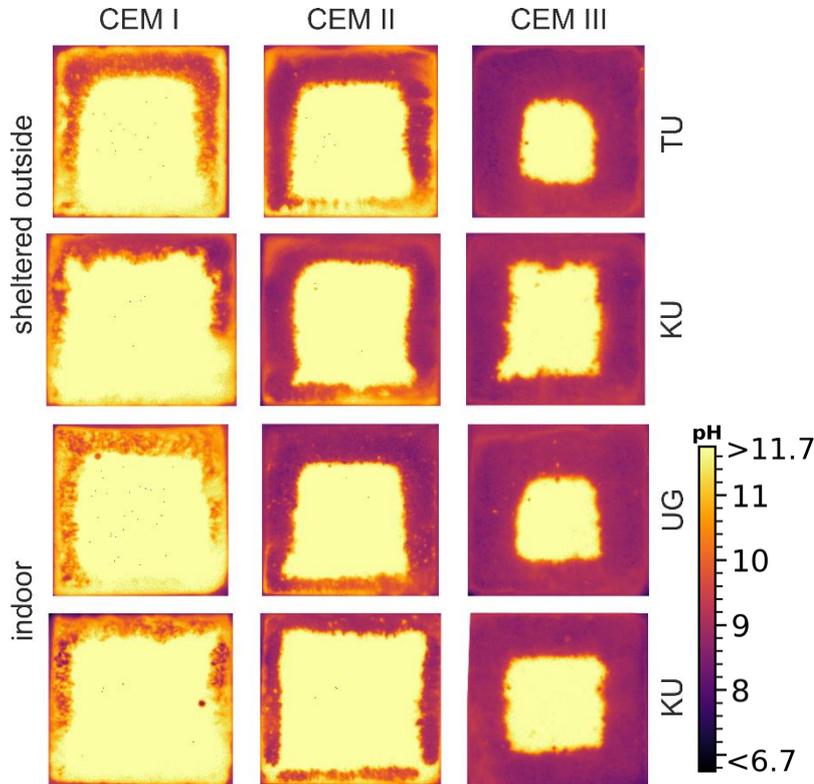


Abbildung 1: optische pH Verteilung der einzelnen Proben

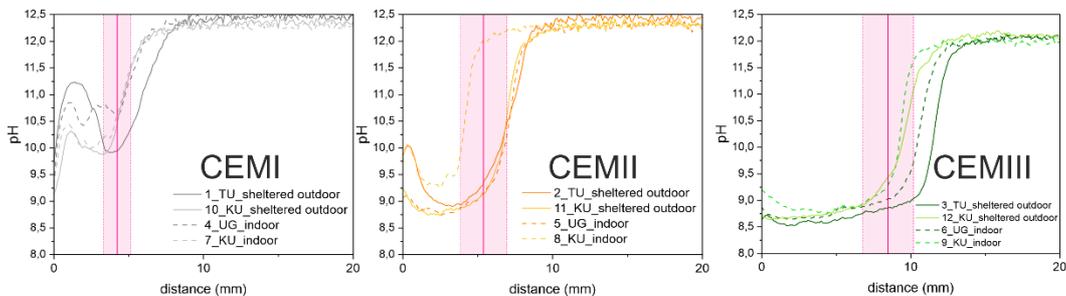


Abbildung 9: pH Profile der 3 Mischungen. Die verschiedenen pH Stufen werden in Zonen 1,2,3 eingeteilt. In Violett ist noch zusätzlich die mittels PHPHT bestimmte mittlere Karbonatisierungstiefe und Standardabweichung aufgetragen

### pH-Entwicklung während der Hydratation von klinker-reduzierten Leimen

Bindemittel mit geringen Klinkergehalt und einer Substitution mittels SCMs (supplementary cementitious materials) werden aufgrund des hohen CO<sub>2</sub> Einsparungspotentials immer mehr verwendet. Der Klinkerersatz führt dabei dazu, dass sich teils andere Mineralphasen bilden und damit auch verbunden ein anderer pH-Wert in der Porenlösung einstellt. Da für die Passivierung des Stahles der hohe pH-Wert im Beton den wichtigsten Parameter darstellt, muss eine mögliche pH-Wert Reduktion durch die Substitution überwacht werden. Bisher gab es nur die

Möglichkeit die Entwicklung der Mineralphasen zu messen und über das aufwendige auspressen der Porenlösung den pH-Wert zu bestimmen. Mit Hilfe der optischen pH Sensoren ist es aber nun möglich die pH Entwicklung von Zement Mischungen mit verschiedenen SCMs (Metakaolin, Flugasche, Silikastaub, Hüttensand, Kalksteinmehl) systematisch zu untersuchen. Als Referenz wurde eine 100% CEM I Mischung und Mischungen mit Quarz (inertes Material) hergestellt und untersucht. Alle 29 Mischungen sind in Tabelle aufgelistet.

*Tabelle 3: Mischungsbeschreibung. Alle Mischungen wurden mit einem w/b Wert von 0.45 gemischt. Der optimale Fließmittelgehalt wurde in Vorversuchen durch Einstellen eines gleichbleibende Ausbreitmaßes bestimmt.*

Nr	SCM	SCM (%)	Fließmittel (wt.-% relativ zum Bindemittel)	Ausgepresste Porenlösung
CEM 100		0		
SL 10	Hüttensand	10		
SL 20		20		
SL 30		30		
SL 50		50		x
SL 70		70		
SL 90		90	0.05	
SF 10	Silika- staub	10		
SF 20		20		x
SF 30		30	0.17	
SF 50		50	0.30	
FA 10	Flug- asche	10		
FA 20		20		x
FA 30		30		
FA 50		50	0.17	
M 10	Meta- kaolin	10	0.27	
M 20		20	0.54	x
M 30		30	0.82	
M 50		50	1.36	
L 10	Kalkstei- nmehl	10	0.14	
L 20		20	0.28	x
L 30		30	0.40	
L 50		50	0.69	
Q 10	Quarz	10		
Q 20		20		x
Q 30		30		
Q 50		50		
Q 70		70		
Q 90		90	0.04	

Das Messprogramm enthält die Bestimmung des pH-Wertes nach 2d, 14d, 28d 56d und 90d an der Probenoberfläche mittels der optischen pH Sensoren sowie die Analyse der Porenlösung nach 2d, 28d und 90d ausgewählter Mischungen. Zusätzlich werden zu allen Messzeitpunkten immer auch Proben entnommen um die Mineralzusammensetzung mittels XRD und TG zu bestimmen.

Für die Messung an der Probenoberfläche wurde eine Sensorfolie (1\*1 cm) in Kombination mit einem Sensor der 4 POF 1/2,2 mm Fasern enthält verwendet (siehe Abbildung ). Der pKa-Wert des Sensormaterials liegt bei ~11,9. Die Messungen wurden mittels Dual Lifetime Referencing im Frequenzbereich (f-DLR) durchgeführt, wobei eine Messfrequenz von 3000 Hz, eine LED-Intensität von 40-60 %, eine 400-

fache Verstärkung und 10 ms Messzeit eingestellt war. Eine Kalibrierung wurde am Anfang und Ende jeden Messtages durchgeführt.

Für die pH-Messung der Proben wird die Folie zunächst mit einer 150 mM KCl-Lösung befeuchtet, bevor sie auf die Probe gelegt wird. Der Phasenwinkel  $\phi$  wird 5 Minuten lang gemessen. Das Signal wird nach 2 und 5 Minuten abgelesen.

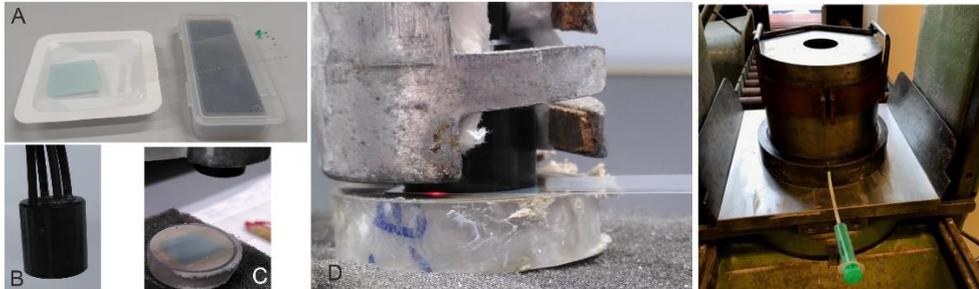


Abbildung 10: (A) Sensorfolie beim Befeuchten in 150mM KCl; (B) Sensor mit 4 POF 1/2.2 Fasern; (C) Probe mit Folie; (D) Messung einer Probe

Die ersten Ergebnisse der laufenden Untersuchungen zeigen alle pH-Werte in dem Bereich von 12,4 bis über 13,3. Bei diesem Wert liegt die obere Nachweisgrenze der Folie. Nach 14 Tagen liegen alle Werte im Messbereich (Abbildung ). Es können unterschiedliche Trends zwischen den einzelnen SCMs und den unterschiedlichen Substitutionsgraden festgestellt werden. Der Verdünnungseffekt aufgrund der Zementsubstituierung wirkt sich auch die pH-Werte bei allen Mischungen mit Ausnahmen von Flugasche aus. Der pH-Wert der Flugaschemischung blieb stabil und unabhängig vom Substituierungsgrad.

Bei den Mischungen mit Hüttensand und Silikastaub sank der pH-Wert zwischen 2 und 14 Tagen bei den größeren Substitutionen, bei den niedrigeren Substitutionen blieb der pH-Wert stabil. Bei Metakaolinmischungen ist die Abnahme bei allen Substitutionen sichtbar.

Nach 14 Tagen wiesen die Mischungen mit Kalksteinmehl und Quarz einen ähnlichen Wert wie die Zementmischung auf, obwohl die 2 Tage Werte höher waren und oberhalb der Nachweis grenze lagen.

Der Vergleich mit dem gemessenen pH-Wert der ausgepresst Porenlösung (Elektrode und Titration Messung) nach 2 Tagen zeigt größtenteils eine gute Übereinstimmung mit den optisch bestimmten Werten.

Die Ergebnisse zeigen, dass die optischen pH Messung eine vielversprechende Methode für die Nachverfolgung der Hydratationsprozesse und dem Einfluss der SCMs Reaktion darstellt.

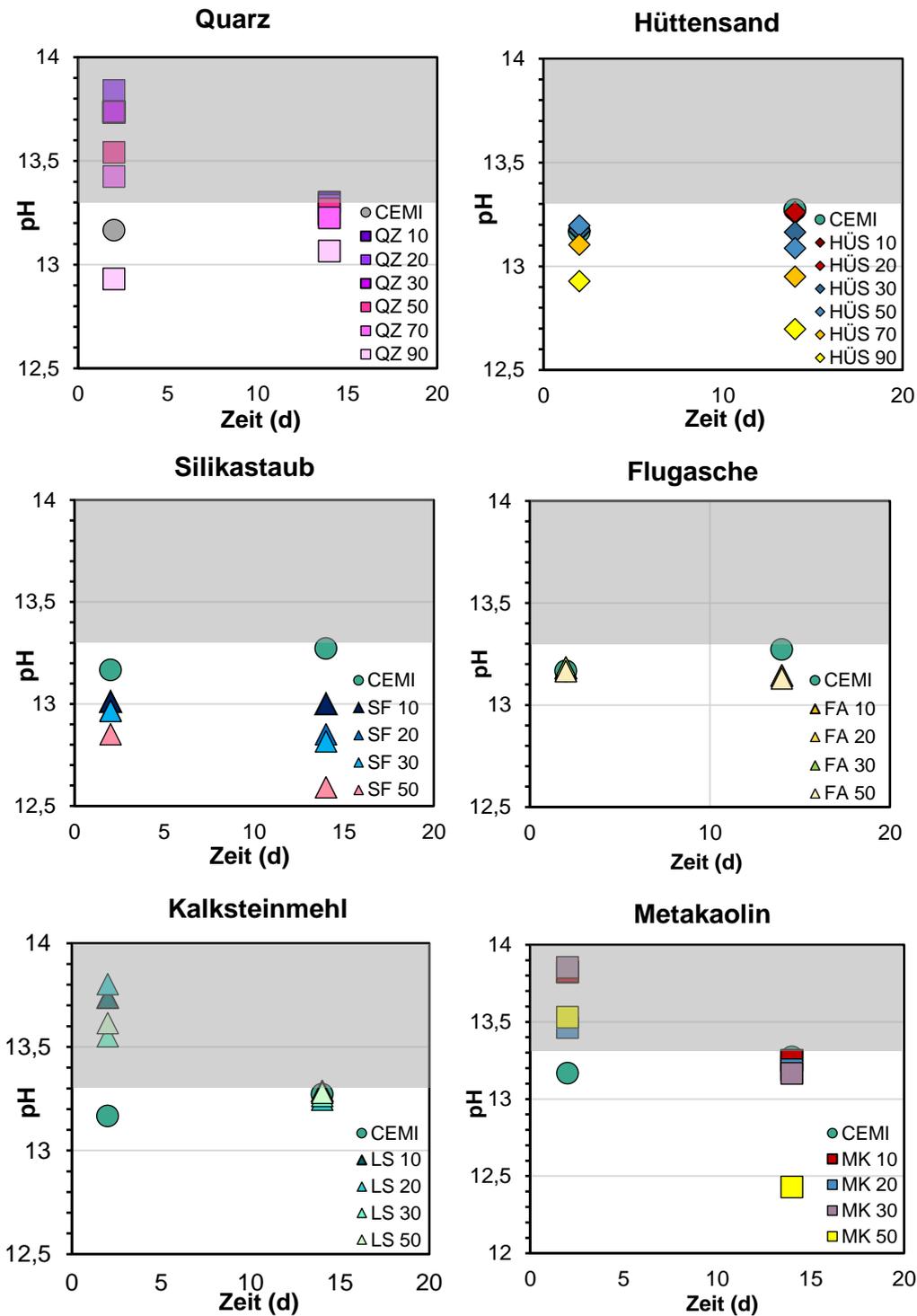


Abbildung 11: pH-Werte nach 2 und 14 Tagen aller Mischungen gemessen mit der optischen pH Sensorik. In grau ist der Bereich außerhalb der Nachweisgrenze markiert.

## Untersuchungen Österreichischer Betoninfrastruktur mittels optischer Analytik

Die in dieser Studie vorgestellten Proben (> 150 Stück) wurden aus verschiedenen österreichischen Straßentunneln und Brücken entnommen und sind Teil einer umfassenden Feldstudie, die an mehreren Betoninfrastrukturanlagen durchgeführt wurde. Vor Ort wurden Bohrkern mit einem Durchmesser von 50 mm entnommen und die Karbonatisierungstiefen durch standardmäßiges PHPHT-Sprühen ermittelt. Im Labor wurden die Bohrkern mit einer Diamantsäge entlang der Längsseite geschnitten. Eine Hälfte wurde für zusätzliche PHPHT-Messungen verwendet, die andere für die optische pH-Bildgebung. Dies ermöglichte einen direkten Vergleich des PHPHT-Sprühens und der optischen Bildgebungsmethode an denselben Betonproben.

Generell konnte eine gute Übereinstimmung zwischen der Bestimmung der Karbonatisierungstiefe mittels PHPHT und der optischen Bildgebungsmethode festgestellt werden. Darüber hinaus ermöglichte die optische Sensortechnologie eine eingehende Bewertung der Reaktion einzelner Materialien mit fortschreitender Karbonatisierung und die korrespondierende Entwicklung des internen pH-Werts. Innerhalb der karbonatisierten Bereiche wurden starke Schwankungen des pH-Werts zwischen Proben mit ähnlicher Karbonatisierungstiefe beobachtet. Die beschriebenen Schwankungen betreffen Unterschiede im absoluten pH-Wert, sowie bezüglich der Homogenität der pH-Verteilung in den karbonatisierten Bereichen. Abbildung zeigt drei Beispiele von typischen pH-Verteilungsbildern zusammen mit den zugehörigen pH-Profilen, sowie den mittels PHPHT gemessenen Karbonatisierungstiefen (hellvioletter Bereich, der die gemessene Tiefe  $\pm$  Standardabweichung darstellt).

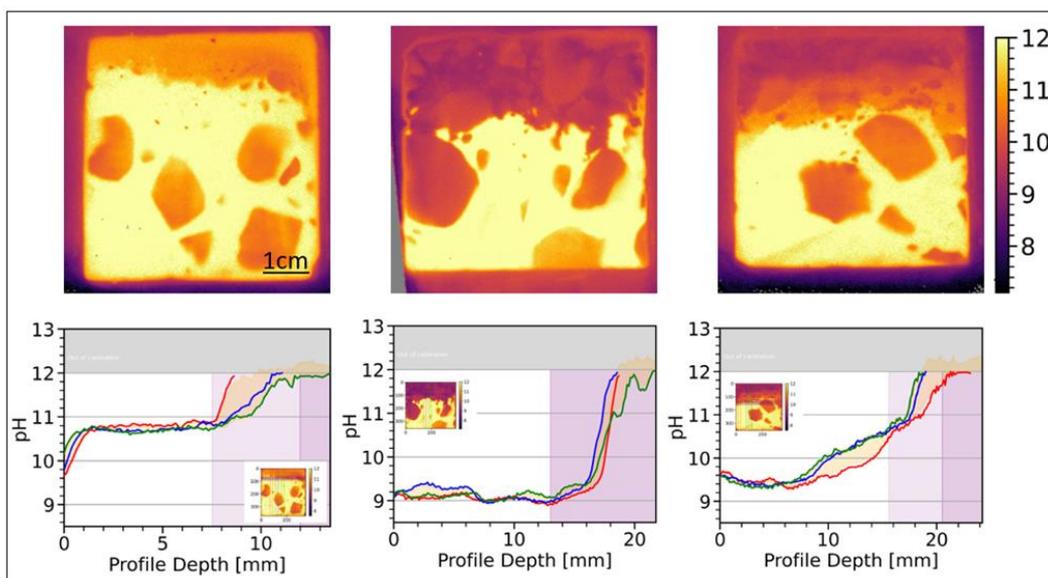


Abbildung 12: Beispiele für pH-Verteilungen in verschiedenen Betonproben, zusammen mit entsprechenden pH-Profilen und der mit PHPHT gemessenen Karbonatisierungstiefe (hellviolett, zeigt die gemessene Tiefe  $\pm$  Standardabweichung)

Der absolute pH-Wert der Karbonatisierungszonen der verschiedenen Proben weist starke Schwankungen zwischen pH 9 und 11 auf. Diese Veränderungen hängen höchstwahrscheinlich mit Unterschieden in der mineralogischen Zusammensetzung und der porösen Mikrostruktur und den damit verbundenen veränderten physikalisch-chemischen Reaktionen des Materials während der Karbonatisierung

zusammen. Relevante Prozessparameter dabei sind die CO<sub>2</sub>-Diffusionskinetik, die Lösung und Entkalkung von Ca-haltigen Hydraten (CH und C-S-H) und die Bildung von Ca-Karbonaten.

Darüber hinaus konnten zwei Haupttrends in Bezug auf die pH-Entwicklung mit der Tiefe beobachtet werden. Eine Gruppe von Proben ist durch eine stabile pH-Verteilung auf einem bestimmten Niveau in der gesamten karbonisierten Zone gekennzeichnet (Abbildung , links und Mitte). Innerhalb dieser Gruppe ist der Übergang zum nicht karbonisierten Inneren durch einen sehr steilen Anstieg des pH-Wertes auf über 12 gekennzeichnet. In der zweiten Gruppe von Proben ist die karbonisierte Zone in zwei Unterzonen unterteilt (Abbildung , rechts): Die erste, nahe der Oberfläche der Probe, zeigt eine plateauartige pH-Verteilung, auf die eine innere Zone mit kontinuierlichem pH-Anstieg folgt. In dieser Probengruppe ist der Übergang zum intakten Gefüge durch eine graduelle Steigung des pH-Anstiegs gekennzeichnet, die jedoch nicht so steil ist wie in der ersten Gruppe.

Weiters zeigten die Messungen große Unterschiede im absoluten pH-Wert, bei dem der Farbumschlag von PHPHT stattfand. Unter Berücksichtigung der gemessenen Tiefe einschließlich der Standardabweichung von PHPHT können absolute pH-Werte zwischen 9,2 und 11,8 am Umschlagspunkt in verschiedenen Betonproben angegeben werden. Beispiele sind in Abbildung dargestellt und können auch aus Abbildung extrapoliert werden.

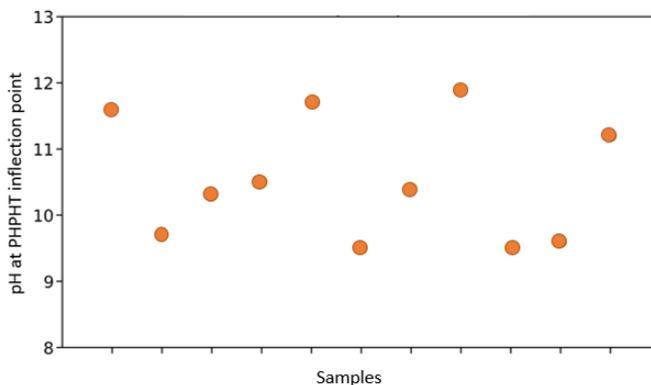


Abbildung 13: Beispiele für die großen Variationen von gemessenen pH-Werte beim PHPHT Umschlagspunkten in verschiedenen Feldproben.

#### AP6: Applikation und Feldversuche

Die in AP4 entwickelten Messmethoden zur Aufnahme von pH Profilen wurden im Feld getestet. Nach einem Vorversuch am Gelände der TU Graz, wurde damit eine Begrenzungsmauer der ÖBB am Bahnsteig Handelskai in Wien untersucht. Dabei wurden Bohrkern entnommen mit deren Hilfe vor Ort die Karbonisierungstiefe via PHPHT-Färbung ermittelt wurde (Abbildung 14A). Weiters wurde mit denselben Bohrkernen der pH Verlauf via Imaging (Abbildung 14B) visualisiert. Die Messungen der pH Profile mit den zwei entwickelten Messkonzepten ist in Abbildung 14C für die Probestelle 2R exemplarisch dargestellt.

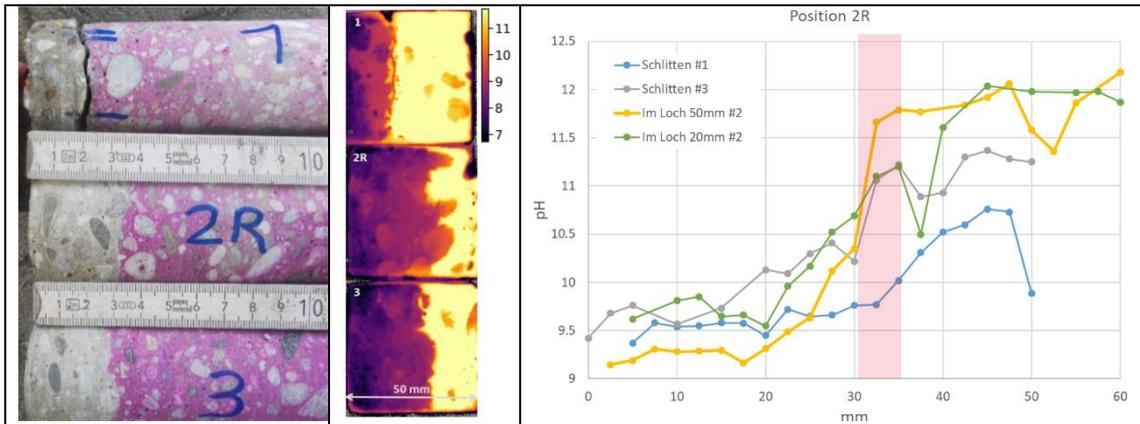


Abb. 14: A) Karbonatisierungstiefe der drei Probestellen mittels PHPHT-Färbung. B) pH Imaging der Bohrkörner. C) pH Profile an der Probestelle 2R ermittelt mit den beiden Messmethoden. Die rote Hinterlegung stellt den mittels PHPHT ermittelten Umschlagsbereich dar.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es mit beiden Methoden möglich war die Karbonatisierungsfrent zu erkennen. Wobei sich auch im Feld bestätigt hat, dass das System mit Schlitten und Ausleseeinheit ein Problem hat, die hohen pH-Werte wieder zu geben (Einfluss von CO<sub>2</sub> während des Transfers). Das größte Problem beider Methoden stellen jedoch große Aggregate im Bereich der Karbonatisierungsfrent dar, da diese das Ergebnis stark verzerren können. Dieses Problem sollte jedoch über Mehrfachmessungen und den Einsatz von Statistik gelöst werden können.

### 3 PROJEKTTEAM UND KOOPERATION

- Gab es wesentliche Veränderungen im Projektteam (interne Schlüsselmitarbeiter\*innen und Drittleister)?
- Bei Konsortialprojekten und Forschungsk Kooperationen: Beschreiben Sie die Zusammenarbeit im Konsortium.

Das Projektteam entspricht dem des Antrags mit den Wissenschaftlerinnen der beteiligten Institute. Im zweiten Projektjahr hat Dr. Andreas Steininger das Projekt verlassen. Marlene Sakoparnig und zwei Masterstudenten (Iris Zögl & Patick Steiner) arbeiten am Projekt mit und unterstützen die Arbeitspakete 4-6.

Das Konsortium entspricht ebenso dem des Antrages und es hat sich, mit ausnahmen der Holding Graz AG, dafür entschieden ein viertes Projektjahr zu unterstützen da ein wesentlicher Mehrwert für die gesamte Branch und darüber hinaus erkannt wurde.

## 4 WIRTSCHAFTLICHE UND WISSENSCHAFTLICHE VERWERTUNG

- Beschreiben Sie die bisherigen Verwertungs- bzw. Weiterverbreitungsaktivitäten. Ist eine Verwertung möglich?
- Listen Sie Publikationen, Dissertationen, Diplomarbeiten sowie etwaige Patentmeldungen, die aus dem Projekt entstanden sind, auf.
- Welche weiterführenden F&E-Aktivitäten sind geplant?
- Wie werden die im Projekt geschaffenen Prototypen weiterverwendet?

### Verwertungs- und Weiterverbreitungsstrategien

Die Ergebnisse aus den Sensormaterialien und Messmethodik Arbeitspaketen (AP3 und AP4) konnten im Rahmen eines internationalen Ringversuchs zur Untersuchung der Karbonatisierung von Betonproben angewendet werden und mit herkömmlichen Methoden verglichen werden (AP5). Mehrere Publikationen sind bereits mit dieser Methode entstanden oder in Vorbereitung. Die Ergebnisse wurden einschlägigen Fachgremien, wie z.B. beim Rilem TC-CCC-281 Workshop in Ghent, Belgien, im Juni 2022, vorgestellt und stoßen auf großes Interesse bei internationalen Forschenden. U.a. wurde das wissenschaftliche Konsortium für einen weiteren Vortrag und die Teilnahme bei der internationalen Fachtagung Eurostruct 2023 (Wien September 2023; Symposium: "Corrosion and durability monitoring of bridges and structures") eingeladen. Die Forschungspartner haben außerdem bereits einige Anfragen von internationalen Partnern (Wissenschaft, Industrie) bekommen, Proben mit dieser neuen Technik zu untersuchen.

Die Ergebnisse des AP6 – Applikation und Feldversuche (Bohrlöcher und Sonden) wurden mit den beteiligten Projektpartnern der Industrie intensiv diskutiert und wurden als sehr vielversprechend bewertet.

Die Projektpartner Palfinger Structural Inspection GmbH, PyroScience AT GmbH, ADP Rinner werden die Ergebnisse aus AP3 (Sensormaterialien) im FFG-Projekt „Sensors4StrucInspe - Sensor Development for Built Infrastructure Inspection“ verwerten und weiterentwickeln.

### Publikationen

Sakoparnig M., Grengg C., Mueller B., Juhart J., Mittermayr F., Galan I., (2023) Accelerated carbonation tests of clinker reduced mortar samples – *in Arbeit*

Sakoparnig M., Galan I., Müller B., Zoegl I., Juhart J., Mittermayr F., Autischer M., Grengg C., (2023) New insights into the carbonation process of mortars and concretes, Synercrete 2023, RILEM Bookseries 44, pp 1122-1132, 2023

### Konferenzen

Grengg C., Müller B., Mittermayr F., Galan I., Sakoparnig M., Sterz K.L., Juhart J. and Mayr T. Optical sensors for the durability assessment of cement-based infrastructure, Eurostruct 2023, 2nd Conference of the European Association on Quality Control and Structures

Galan I., Grengg C., Zögl I., Sakoparnig M., Mittermayr F., Juhart J., Müller B., Sterz K.L. and Mayr T., (2023) Luminescent-based method for monitoring pH and chloride ingress in cementitious systems, 16th International Congress on the Chemistry of Cement 2023

#### Abschlussarbeiten

Steiner P., In-situ pH analyses during early hydration of cementitious materials using optical sensors, Masterarbeit, TU Graz 2023

Klimczyk I., Influence of physical, chemical and environmental parameters on the carbonation of cementitious materials and the pH development, Masterarbeit, TU Graz, in Arbeit

#### Verwertungs- und Weiterverbreitungsstrategien

Die Ergebnisse aus den Sensormaterialien und Messmethodik Arbeitspaketen (AP3 und AP4) konnten im Rahmen eines internationalen Ringversuchs zur Untersuchung der Karbonatisierung von Betonproben angewendet werden und mit herkömmlichen Methoden verglichen werden (AP5). Mehrere Publikationen sind bereits mit dieser Methode entstanden oder in Vorbereitung. Die Ergebnisse wurden einschlägigen Fachgremien vorgestellt, u.a. bei der Brückentagung des ÖBV und stoßen auf großes Interesse bei internationalen Forschenden. U.a. wurde das wissenschaftliche Konsortium für einen weiteren Vortrag und die Teilnahme bei der internationalen Fachtagung Eurostruct 2023 (Wien September 2023; Symposium: "Corrosion and durability monitoring of bridges and structures") eingeladen. Die Forschungspartner haben außerdem bereits einige Anfragen von internationalen Partnern (Wissenschaft, Industrie) bekommen, Proben mit dieser neuen Technik zu untersuchen.

Die Ergebnisse des AP6 – Applikation und Feldversuche (Bohrlöcher und Sonden) wurden mit den beteiligten Projektpartnern der Industrie intensiv diskutiert und wurden als sehr vielversprechend bewertet.

Die Projektpartner Palfinger Structural Inspection GmbH, PyroScience AT GmbH, ADP Rinner werden die Ergebnisse aus AP3 (Sensormaterialien) im FFG-Projekt „Sensors4StrucInspection - Sensor Development for Built Infrastructure Inspection“ verwerten und weiterentwickeln.

#### Publikationen

Sakoparnig M., Grengg C., Mueller B., Juhart J., Mittermayr F., Galan I., (2023) Accelerated carbonation tests of clinker reduced mortar samples – *in Arbeit*

Sakoparnig M., Galan I., Müller B., Zoegl I., Juhart J., Mittermayr F., Autischer M., Grengg C., (2023) New insights into the carbonation process of mortars and concretes, Synercrete 2023, RILEM Bookseries 44, pp 1122-1132, 2023

Sterz. L., Müller B., Sakoparnig M., Galan I., Mittermayr F., Grengg C., Mayr T., Optical Sensor for the determination of chloride in powdered concrete samples, - Arbeit

#### Konferenzen

Grengg C., Müller B., Mittermayr F., Galan I., Sakoparnig M., Sterz K.L., Juhart J. and Mayr T. Optical sensors for the durability assessment of cement-based infrastructure, Eurostruct 2023, 2nd Conference of the European Association on Quality Control and Structures

Galan I., Grengg C., Zögl I., Sakoparnig M., Mittermayr F., Juhart J., Müller B., Sterz K.L. and Mayr T., (2023) Luminescent-based method for monitoring pH and chloride ingress in cementitious systems, 16th International Congress on the Chemistry of Cement 2023

Müller B., Grengg C., Optische Sensorik zur Zustandserhebung von Betoninfrastruktur, (2023), Brückentagung

Abschlussarbeiten Steiner P., In-situ pH analyses during early hydration of cementitious materials using optical sensors, Masterarbeit, TU Graz 2023

Klimczyk I., Influence of physical, chemical and environmental parameters on the carbonation of cementitious materials and the pH development, Masterarbeit, TU Graz, in Arbeit

## 5 ERLÄUTERUNG ZU KOSTEN UND FINANZIERUNG

Beschreiben und begründen Sie wesentliche aufgetretene Abweichungen vom Kostenplan.

Es sind keine relevanten Abweichungen zu nennen. InKind-Leistungen über die getroffenen Zusagen wurden dem Projekt von den Partnern zur Verfügung gestellt.

## 6 PROJEKTSPEZIFISCHE SONDERBEDINGUNGEN UND AUFLAGEN

Falls im Förderungsvertrag projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen vereinbart wurden, gehen Sie bitte konkret auf die Erfüllung der noch offenen Sonderbedingungen und Auflagen ein.

Schriftliche Nachweise können im eCall hochgeladen werden.

Besondere Förderungsbedingungen:

Die Projektergebnisse sind zu veröffentlichen. Die Veröffentlichungsschrift ist dem Endbericht beizulegen.

Alle Ergebnisse werden zusätzlich unter [www.bautechnik.pro](http://www.bautechnik.pro) veröffentlicht.

## 7 MELDUNGSPFLICHTIGE EREIGNISSE

Gibt es besondere Ereignisse rund um das geförderte Projekt, die der FFG mitzuteilen sind? Beispielsweise

- Änderungen der rechtlichen und wirtschaftlichen Einflussmöglichkeiten bei den Fördernehmer\*innen,
- Insolvenzverfahren,
- Ereignisse, die die Durchführung der geförderten Leistung verzögern oder unmöglich machen,
- Weitere Förderungen für die im Projekt abgerechneten Kosten (Mehrfachförderung).

keine