

ENDBERICHT

FFG Projektnummer	FO999887158	FörderungsnehmerIn	ÖBV-GmbH
Bericht Nr.	1	Berichtszeitraum	01.01.2021- 31.12.2021
Bericht erstellt von	Claudia Baldermann, Ognjen Rudic, Prof. Tritthart und Prof. Krüger, Michael Pauser		

Richtwert für den Umfang: 10-20 Seiten

1. Ziele und Ergebnisse

Im 4. Forschungsjahr wurden die Laboruntersuchungen (AP7 „Chloridtransport und Karbonatisierungsfortschritt“ und AP 8 „Korrosionsgefährdung“) und die an den bestehenden Bauwerken durchzuführenden Untersuchungen abgeschlossen. Die Arbeiten zu AP1 „Projektmanagement“ und AP2 „Wissenschaftliche Projektleitung“ erfolgten laufend und sind nicht Gegenstand dieses Berichtes. Die AP 3-6 („Ausgangsstoffe/Bindemittelrezepturen“; „CO₂-Bindekapazität und Porenlösungsanalyse“, „Mikrostrukturcharakterisierung“ sowie „Festigkeitsentwicklung“ waren schon vor dem 4. Forschungsjahr abgeschlossen, sodass hier nur auf den Stand der Arbeiten der AP 7 bis 11 eingegangen wird.

AP 7 „Chloridtransport und Karbonatisierungsfortschritt“

Die Untersuchungen zum Karbonatisierungsfortschritt von Mörtelproben mit unterschiedlichem w/b-Wert und „natürlichen Karbonatisierungsbedingungen (Lagerung in Luft) sowie beschleunigter Karbonatisierung (2% CO₂) 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 wurden abgeschlossen. Es kam auch hier der positive Einfluss hydraulisch aktiver und puzzolanischer Zementersatzstoffe auf die Karbonatisierung klar zum Ausdruck.

Da das Eindringen von Chloriden in den Beton von vielen Parametern abhängt, wurden differenzierte Betrachtungen zu den einzelnen Einflussparametern vorgenommen. So muss zunächst der chemischen Bindemittelzusammensetzung Aufmerksamkeit geschenkt werden. Hier spielen vor allem das Bindevermögen der Klinkerphasen und Zementersatzstoffe, welches vereinfacht durch den Gehalt an Al₂O₃ und SiO₂ im Bindemittel evaluiert werden kann, der pH-Wert der Porenlösung und der Ca(OH)₂-Gehalt des Bindemittels eine Rolle. Aus betontechnologischer Sicht kommt vor allem dem w/b-Wert, der Kapillarporosität und der Porenradienverteilung eine starke Bedeutung zu. Die Ergebnisse von Chloriddiffusionsversuchen (z.B. gemäß EN 12390-11) zeigen überdies, dass sie für eine Lebensdauermodellierung nur eingeschränkt direkt genutzt werden können, da die ermittelten Werte (D_{nss}) zum Teil sehr hoch sind und eine diffusionsbasierte Lebensdauerbemessung in sehr hohen benötigten Betondeckungen führen würde. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass sich der Chloriddiffusionskoeffizient mit zunehmendem Betonalter in der Regel stark verringert. Für eine Lebensdauermodellierung und eine Performanceabschätzung ist es daher erforderlich, Koeffizienten für den Alterungsprozess, z.B. nach fib model code (2010) [11] oder nach BAW-Merkblatt MDCC [15], zur Bestimmung erforderlicher Betondeckungen zu berücksichtigen. Derartige Bemessungsmodelle lassen sich auch Bestandsbauwerke anwenden, wie es exemplarisch für die Unterführung Himberg durchgeführt wurde.

AP 8 „Korrosionsgefährdung“

Es wurden drei Stahlproben, nicht polierte sowie schwach und stark polierte Stahlproben, in Kontakt 1) mit einer gesättigten Ca(OH)₂-Lösung, 2) mit destilliertem Wasser und 3) mit einer NaCl-Lösung gebracht und das Potential über eine Ag/AgCl-Bezugselektrode kontinuierlich gemessen. Da das gemessene Potential schwankte und kein eindeutiges Signal als Anzeichen für die Ausbildung einer Passivschicht zeigten, wurde eine NaOH-Lösung der Ca(OH)₂-Lösung zur Einstellung eines pH-Werts ähnlich der Porenlösung hinzugegeben. Danach zeigten die Potentialmessungen, dass die Stahlproben eine Passivschicht ausgebildet hatten. Nach einem Jahr wurden die Proben in eine 2% NaCl-Lösung überführt, wo die Passivierung für ein Monat aufrecht erhalten blieb. Danach zeigte sich, dass bei der unbehandelten Stahlprobe Korrosion eingesetzt hatte, wobei es vornehmlich zur Lochfraßkorrosion kam. Hingegen blieb die stark polierte Stahlprobe über den Messzeitraum von einem Monat immer im passivierten Bereich und zeigte keinen Hinweis auf eine beginnende Korrosion. Weiterhin wurden sogenannte „Lollipop-Proben“ mit verschiedenen Mörtelmischungen angefertigt und in einer NaCl-Lösung gelagert. Hierbei wurden einerseits Elektroden zur tiefengestaffelten Ermittlung des Elektrolytwiderstands und andererseits Ag/AgCl-Elektroden in Verbindung mit Bewehrungsstählen in Verbindung mit einer Potentialmessung verwendet. Diese Art der

Versuchsdurchführung konnte innerhalb des Projektzeitraums aufgrund der unvorhergesehen sehr langen benötigten Versuchsdauer noch nicht abschließend ausgewertet und bewertet werden. Die Versuche werden daher nach Projektabschluss seitens des IMBT auf eigene Veranlassung weiter betreut.

AP 9 „Untersuchungen an bestehenden Bauwerken“

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 wurden abgeschlossen. Es zeigte sich u.a. dass die rel. Luftfeuchtigkeit im Beton ab einer bestimmten Tiefe unabhängig von der äußeren Wetterlage konstant bleibt (~ 80%). Witterungsfunktionen für die Lebensdauerbemessung konnten für den beobachteten Zeitraum aus den Messungen abgeleitet werden.

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	100%	01.10.17	30.09.21	01.10.17	31.12.21	Arbeiten im Plan
2	Wissenschaftliche Projektleitung	100%	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 ₂ -Bindekapazität und Porenlösungsanalyse	100%	02.01.18	31.03.20	22.01.18	06.09.18	Labortätigkeiten zum Ca(OH) ₂ -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	100%	01.10.18	31.03.21	01.10.18	31.12.21	Labormessungen abgeschlossen; Auswertungen liegen vor.
7	Chloridtransport und Karbonatisierungsfortschritt	100%	01.10.18	30.06.21	24.07.18	31.12.21	Die Chloridbeaufschlagung und Karbonatisierungsprüfungen sind abgeschlossen; die Auswertung der Ergebnisse liegt vor.
8	Korrosionsgefährdung	100%	02.07.18	30.06.21	02.07.19	31.12.21	Probekörper wurden hergestellt und die Versuche wurden begonnen. Aufgrund der nicht vorab vorhersehbaren Versuchsdauer (wann setzt Korrosion ein?) dauern die Versuche noch an.
9	Untersuchungen an bestehenden Bauwerken	100%	16.02.18	30.09.21	16.02.18	31.12.21	Die Laboruntersuchungen sind abgeschlossen. Die Bauwerksuntersuchungen wurden abgeschlossen.
10	Auswertung und Beurteilung	100%	02.04.18	19.11.21	02.04.18	31.12.21	Auswertungen liegen planmäßig vor.
11	Empfehlungen für die Praxis	100%	31.01.21	31.12.21	01.01.21	31.12.21	Beim letzten Meeting präsentiert. Eine Langfassung wird den Industriepartnern zeitnah zur Verfügung gestellt.

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	4. 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
8	Chlorideindiffusion und Karbonatisierungswiderstand von Mörtelproben	im 2. FJ	31.09.20	31.12.20	Liegt vor
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		Liegt vor
15	Auswertung und Gegenüberstellung der Ergebnisse	31.12.21	31.12.21		Liegt vor. Langfassung mit Kommentaren und Empfehlungen für die Industriepartner erfolgt zeitnah.

2.2 Beschreibung der im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten

2.2.1 Arbeitspaket 3: Ausgangsstoffe und Bindemittelrezepturen

Im Arbeitspaket 3 wurden in einem ersten Schritt die Ausgangsstoffe evaluiert und charakterisiert. Eingesetzt wurden zum einen puzzolanische und latent-hydraulisch wirksame Zementersatzstoffe wie Hüttensand (HÜS), Microsilica (SI - Silikastaub) und Metakaolin (MK) und zum anderen inerte Zementersatzstoffe wie Kalkstein in zwei unterschiedlichen Feinheiten. Der Mikrokalk (MIK) hat ein Verhältnis des mittlerem Korndurchmessers (d_{50} [μm]) zu dem von Zement von $\leq 0,33$ (optimal 0,1) und der Mesokalk (MEK) eine dem Zement vergleichbaren Feinheit. Zudem wurden für die Mörtelherstellung quarzitischer Sand und Fließmittel der Firma BASF verwendet. In Vorversuchen wurden repräsentative Rezepturen entwickelt und die Leimgemische betreffend des Wasseranspruches optimiert. Dabei zeigte sich, dass Bindemittel mit Zusatzstoffen weniger Wasser brauchen, bei einer gleichen Verarbeitbarkeit im Vergleich zur Referenzmischung bestehend aus 100% CEM I 52,5 R im Bindemittel. Aus den genannten Ausgangsstoffen und den Vorversuchen wurden 13 Grundkombinationen für weitere Leim- und Mörtelgemische ausgewählt. In Tabelle 3 wird die Zusammensetzung der Rezepturen, die alphabetische Bezeichnung zu jeder Rezeptur, der w/b-Wert (volle Anrechnung aller Zusatzstoffe), der äquivalente $w/b_{\text{ä}}$ -Wert (Anrechnung der Zusatzstoffe mit k-wert nach derzeit gültiger ÖN B 4710-1) und der w/b_{eff} -Wert (Anrechnung der Zusatzstoffe mit k-wert nach derzeit gültiger ÖN B 4710-1 sowie $k=0,15$ für Kalksteinmehl) zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3: Bindemittelzusammensetzung der Rezepturen für Leim- bzw. Mörtelmischungen für die Versuche des Projektes

Bez. Labor	Mischungszusammensetzung - Kurzbezeichnung	Zusammensetzung [%]	w/b _{ges} -Wert	w/b _ä -Wert	w/b _{eff} -Wert	w/b _{ges} -Wert	w/b _ä -Wert	w/b _{eff} -Wert
A	Referenzzement: CEM I 52,5 R	100	0,4	0,40	0,42	0,6	0,60	0,60
B	CEM I + Hüttensand (CEM II/B-S)	70 / 30	0,4	0,42	0,42	0,6	0,64	0,64
C	CEM I + Hüttensand	30 / 70	0,4	0,46	0,46	0,6	0,70	0,70
D	CEM I + Silikastaub (CEM II/A-D)	90 / 10	0,4	0,36	0,36	0,6	0,55	0,55
E	CEM I + Metakaolin	90 / 10	0,4	0,36	0,36	0,6	0,55	0,55
F	CEM I + Hüttensand + Silikastaub	50 / 45 / 5	0,4	0,42	0,42	0,6	0,63	0,63
G	CEM I + Mesokalk (MEK) + Mikrokalk (MIK)	60 / 32,5 / 7,5	0,36	0,60	0,54	0,6	1,00	0,91
H	CEM I + MEK + Silikastaub	60 / 32,5 / 7,5	0,45	0,60		0,6	0,80	
I	CEM I + MEK + Metakaolin	60 / 32,5 / 7,5	0,45	0,60		0,6	0,80	
J	CEM I + Hüttensand + MIK	60 / 30 / 10	0,45	0,54	0,52	0,6	0,71	0,70
K	CEM I + Hüttensand + MEK + MIK	60 / 22,5 / 10 / 7,5	0,45	0,58	0,56	0,6	0,77	0,74
L	CEM I + Hüttensand + MEK + MIK + Metakaolin	55 / 22,5 / 10 / 7,5 / 5	0,45	0,62		0,6	0,72	
M	CEM I + MEK	60/40	0,45	0,75	0,68	0,6	1,00	0,91

2.2.2 Arbeitspaket 7: Chloridtransport und Karbonatisierungsfortschritt von Mörteln

Karbonatisierungsfortschritt

Die Untersuchung des porösen Gefüges im 4. Forschungsjahr umfasst die Bewertung der Mischungen gemäß Tabelle 3 vor bzw. nach beschleunigter Karbonatisierung (2 Vol.-% CO₂, bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit). Danach erfolgte die weitere Auswertung der Quecksilberdruckporosimetrie (MIP) der

Mörtelmischungen A, B, G, J, K und M (d.h. CEMI/Hüttensand/Kalkstein-Mörtelmischungen) als Fortsetzung der im Bericht des dritten Jahres vorgestellten Forschung. Die binären Mischungen C, D und E wurden in dieser Neuauflage nicht bewertet. Die Ergebnisse der MIP-Daten in Bezug auf die Gesamtkapillarporosität (d.h. Porenradien von 5 nm bis 5 μ m) in Abhängigkeit vom w/b_{eff} -Verhältnis sind in Abbildung 1 dargestellt. Zusätzlich wurden die Druckfestigkeitswerte nach 28 Tagen Aushärtung mit dem w/b_{eff} -Verhältnis korreliert und ebenfalls in Abbildung 1 dargestellt.

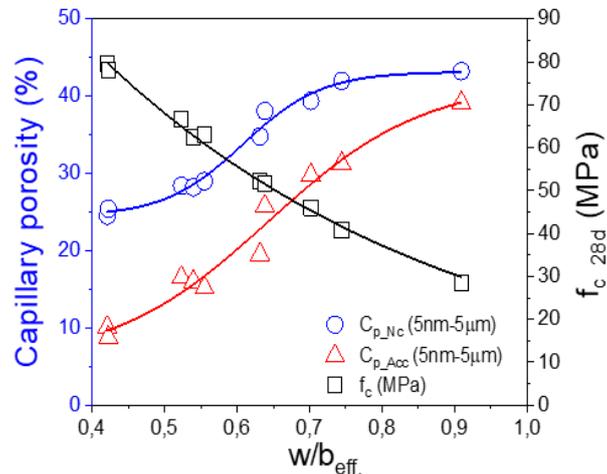


Abbildung 1: Korrelation von Porosität (Porenradien 5nm - 5 μ m) von CEMI/Hüttensand/Kalksteinmehl-Leimmischungen vor (blau) und nach Karbonatisierung (rot) sowie 28d-Mörteldruckfestigkeiten mit dem w/b_{eff} -Wert.

Zusatzstoffe werden hierbei nach dem k-Wert-Ansatz nach derzeitig gültiger ÖN B 4710-1 berücksichtigt. Obwohl Kalksteinmehl nahezu nicht reaktiv ist, kann es aufgrund seiner eigenschaftsverbessernden Wirkungen beim Bindemittelgehalt angerechnet werden. Ein Vorschlag für den gegebenen Ansatz in Bezug auf den Einfluss von Kalksteinmehl wird von Herget et al. [16] vorgestellt, der einen k-Wert für Kalkstein $k_L = 0,15$ vorschlägt. Dieser Wert wurde auch für die weiteren Auswertungen im Projekt verwendet und auch bestätigt.

Gemäß Abbildung 1 verläuft die Korrelation zwischen Porosität und w/b_{eff} nichtlinear und ähnelt sehr der sigmoidalen Boltzmann-Gleichung, die einen hohen Korrelationskoeffizienten von 0,95 und mehr aufweist. Die unbedeutende Veränderung der Porosität (Porenradien 5nm - 5 μ m) oberhalb eines bestimmten w/b -Verhältnisses, die auf die Erhöhung des Kalksteingehalts von 17,5 auf 40 Gew.-% (im Falle der K2- und G2-Mischungen, Tabelle 3) zurückzuführen ist, geht mit einer weiteren Abnahme der Druckfestigkeitswerte einher. Dies deutet darauf hin, dass die Kapillarporosität nicht der dominierende Faktor ist, der die Druckfestigkeitsabnahme nach bestimmten w/b_{eff} -Werten beeinflusst, sondern vielmehr der Klinkerverdünnungseffekt maßgeblich wird.

Chloridtransport

Für die Untersuchungen zur Chlorideindringung wurden Mörtelprismen (10 x 10 x 40 cm) gefertigt, die zunächst mit Kunststoffolien abgedeckt einen Tag gelagert wurden. Dann sind sie entformt und 7, 28 bzw. 90 Tage lang im Klimaraum (65% r. F.; 20°C) weiter gelagert worden. Ein Teil der Proben erhärtete dabei an Luft, ein anderer Teil zur Vermeidung von Feuchtigkeitsverlusten verpackt. Die genaue Methodik ist dem Jahresbericht des 2. Forschungsjahres zu entnehmen. Anschließend wurden die Proben in einer 3%-igen NaCl-Lösung bis zum jeweiligen Prüftermin gelagert. Zu den 3 Prüfterminen, nach 90 Tagen (gemäß EN 12390-11 [1]) sowie nach 6 und 9 Monaten wurde Bohrmehl mittels dem „Profile Grinder“ der Firma Germann Instruments von je 2 Würfeln aus 7 Tiefenstufen entnommen. Der Chloridgehalt wurde dann durch eine potentiometrische Analyse für jede Tiefenstufe ermittelt.

Im Endbericht des 3. Forschungsjahres wurde genauer auf die reinen Tiefenprofile zur Chlorideindringung eingegangen. In Abbildung 2 sind diese zusammenfassend, anhand der maximal erreichten Eindringtiefe von allen untersuchten Proben dargestellt. Dabei wurde speziell der Fokus gelegt auf den Einfluss der Art der Nachbehandlung (verpackt und Luftgelagert), den Einfluss der Zusatzstoffe bei verpackter Vorlagerung von 28 Tagen, den Einfluss einer längeren Lagerung in 3% NaCl-Lösung von 6 und 9 Monaten und den Einfluss des w/b -Wertes auf die Profile der Chlorideindringung.

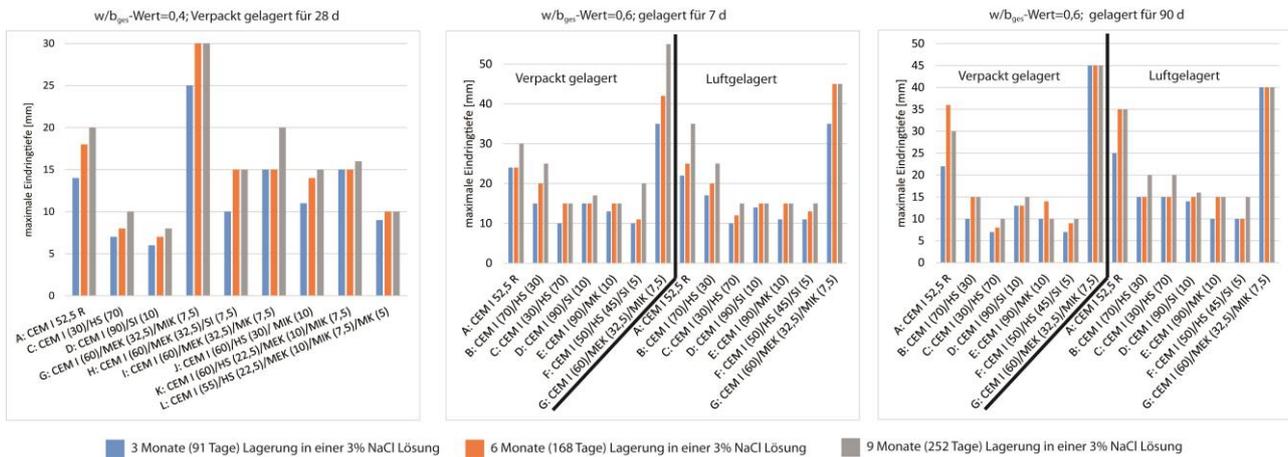


Abbildung 2: Ergebnisse zu der maximalen Eindringtiefe von Chloriden (≙ Cl⁻ Konzentration gleich dem Eigenchloridgehalt der Probe) von allen Proben die 3 (blaue Balken), 6 (orange Balken) oder 9 Monate (graue Balken) Kontakt mit einer 3%-igen NaCl-Lösung hatten.

In diesem Endbericht wurde der Untersuchungsschwerpunkt auf die Einflussparameter hinsichtlich der Diffusion von Chloriden in Mörtelproben, und welche Prozesse in Zusammenhang mit der Diffusion zu erkennen sind, gelegt. Dabei werden Kennwerte evaluiert, die in zukünftigen Rezepturen für Betone unter Chloridexposition beachtet werden sollten. Auf die Modellierung zu Prognosen von bis zu 50 Jahren wird in einem weiterführenden Leitfaden näher eingegangen, der den Industriepartner separat zur Verfügung gestellt wird.

Die Ermittlung des Chloriddiffusionskoeffizienten D_{nss} und der Oberflächenchloridkonzentration C_s gemäß Gleichung (1) wurde mittels einem Kurvenfitting nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate gemäß der EN 12390-11 [1] vorgenommen.

$$C(x, t) = C_i + (C_s - C_i) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{nss} \cdot t}} \right) \right] \tag{1}$$

- $C(x, t)$ = Chloridkonzentration [M%] in einer bestimmten Tiefe (x) zu der dazugehörigen Zeit (t – Dauer der Lagerung in der entsprechenden Lösung)
- C_s = Chloridkonzentration an der Oberfläche [M%]
- C_i = initiale Chloridkonzentration [M%]
- erf = Standard Error Funktion
- D_{nss} = nicht stationärer Diffusionskoeffizient [m^2/s]

Auf Basis der Einteilung nach [2] wurden die Bereiche in Abbildung 3 markiert, in dessen der Diffusionskoeffizient angibt, ob der Beton einen hohen Widerstand ($<1 \times 10^{-12}$; grüner Bereich), einen normalen/ guten Widerstand ($1 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-12}$; weißer Bereich) oder einen schlechten Widerstand ($>1 \times 10^{-11}$; roter Bereich) gegenüber der Chlorideindringung hat. In Abbildung 3 wird im Teilabschnitt (A) und (B – Detailausschnitt von A) auf der X-Achse der Diffusionskoeffizient (D_{nss}) von allen Luftgelagerten Proben ($w/b_{ges}=0,6$) gezeigt und im Vergleich dazu auf der Y-Achse die D_{nss} der verpackt gelagerten Proben ($w/b_{ges}=0,6$). Teilbild (C) in Abbildung 3 zeigt die errechneten D_{nss} von den verpackt gelagerten Proben mit einem $w/b_{ges}=0,4$. Die Referenzprobe mit 100% CEM I im Bindemittel ist w/b abhängig, da der D_{nss} mit einem geringen $w/b_{ges} = 0,4$ im normalen Bereich liegt, die Proben mit einem höheren $w/b_{ges} = 0,6$ jedoch im roten Bereich, unabhängig von der Art und Dauer der Vorlagerung. Dies ist auf die unterschiedliche Dichtigkeiten der Proben zurückzuführen, da die Probe mit einem geringeren w/b_{ges} auch eine geringere Porosität besitzen. Den höchsten Widerstand gegenüber der Chlorideindringung zeigen die Proben C (30% CEM I und 70% HÜS) und die Probe L (CEM + HÜS + MEK + MIK + MK). Danach folgen die Proben D (90% CEM I + 10% SI) und F (50% CEM I + 45% HÜS + 5% SI), die sich nahe der Grenze zwischen dem sehr guten und normalen Bereich finden, laut [2]. Alle anderen Proben (Substitution durch Metakaolin, 30% HÜS oder in verschiedenen Kombinationen mit MEK und MIK) liegen in einem normalen Bereich und zeigen einen normalen D_{nss} , der nahe am grünen Bereich liegt auf. Die Wirkung von inerten Kalkstein als ein Packungsdichte erhöhender Zusatzstoff zeigte sich vor allem in der Kombination von feineren Kalkstein (MIK) mit hydraulischen Hüttensand bzw. dem puzzolanischen Silikastaub, da hier die Proben H (% CEM I + % SI) und J (% CEM I + % HÜS + % MIK) eine sehr gute Performance zeigen.

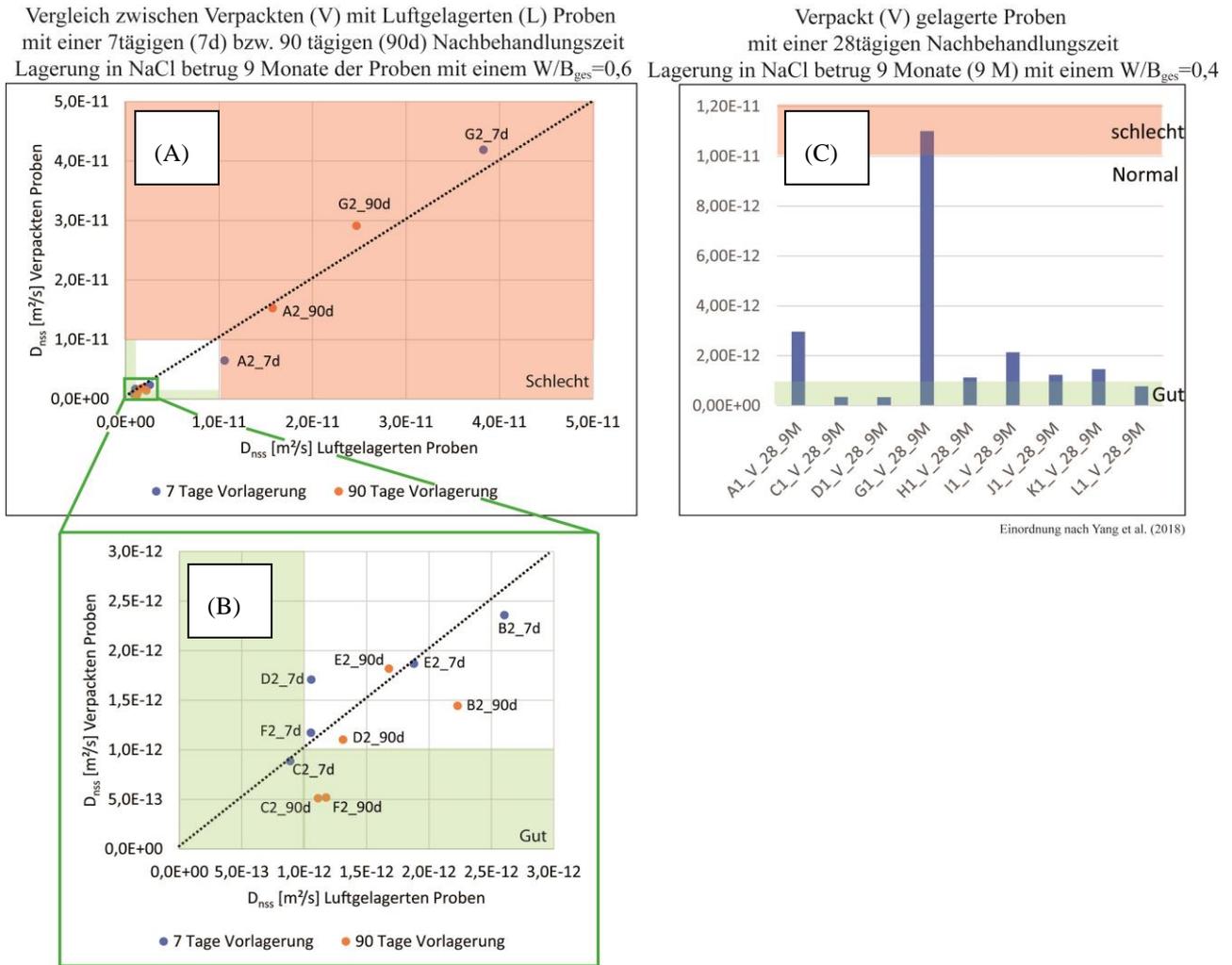


Abbildung 3: (A) und (B – Detailausschnitt von A) zeigen auf der X-Achse den Diffusionskoeffizienten (D_{nss}) von allen Luftgelagerten Proben ($w/b_{ges}=0,6$) an, im Vergleich zur Y Achse die alle D_{nss} der verpackt gelagerten Proben ($w/b_{ges}=0,6$) zeigt. (C) zeigt die errechneten D_{nss} von den verpackt gelagerten Proben mit einem $w/b_{ges}=0,4$. Einteilung erfolgte laut [2]. Dauer der Vorlagerung bzw. Alter der Proben bei Start der Lagerung in NaCl sind mit 7, 28 oder 90 Tagen (d) bei der jeweiligen Probe in der Abbildung vermerkt.

Werden nur die Ergebnisse zu den verpackten Proben (Abbildung 3 A und B) betrachtet, hat eine längere Nachbehandlung (verpackt) eine zum Teil starke Reduktion des D_{nss} zur Folge (=Verschiebung der D_{nss} Werte von 7d zu 90d auf der Y-Achse nach unten) und damit gleichzeitig einen höheren Widerstand gegenüber der Chlorideindringung. Bei Proben die unterschiedlich lang luftgelagert wurden bevor diese in Kontakt mit einer chloridhaltigen Lösung kamen ist das Ergebnis nicht ganz so eindeutig. Bei den Proben B, E und G zeigt sich eine Reduktion des D_{nss} mit längerer Vorlagerung, sowohl bei den verpackt als auch bei den Luftgelagerten Proben. Bei den Proben A, C, D und F hingegen wird der D_{nss} mit einer längeren Nachbehandlungszeit von 90 Tagen schlechter, was auf die schlechtere Nachbehandlung und damit unvollständige Hydratation des Bindemittels oder Bildung von Mikrorissen (u.a. durch Schwinden) zurückzuführen ist.

Des Weiteren konnte bei den Profilen zur Chlorideindringung beobachtet werden, dass am meisten Chlorid von den Proben mit 90% CEM I und 10% Metakaolin im Bindemittel aufgenommen wurden. Dies ist auf den hohen Al_2O_3 -Gehalt im Metakaolin (44,7% Al_2O_3) zurückzuführen, welches eine starke chemische Bindung (Abbildung 6) des Chlorids unter Bildung von chloridhaltigen AFm-Phasen (Friedel'sches Salz und Kuzel's Salz) fördert [3], [4]. 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 der Tiefe auffällig, da dies 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 $Ca(OH)_2$ -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. Als Fazit kann zu diesen Ergebnissen (Abbildung 4) und auch aus der Literaturrecherche [14] entnommen werden, dass die Druckfestigkeit für Prognosen zum Verlauf des D_{nss} nicht verwendet werden kann. Weiter zeigt die Abbildung 4 deutlich, dass die technologischen Rezepturparameter, wie w/b- oder der w/b_a-Wert bei der Eindringung von Chloriden nur eine moderate Korrelation mit dem D_{nss} haben.

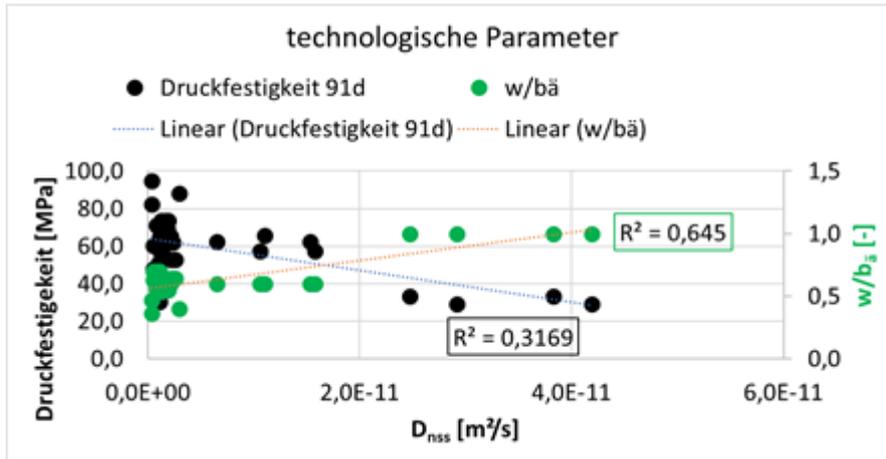


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen technologischen Parametern und dem ermittelten Chloriddiffusionskoeffizienten.

Allgemein zeigen die Ergebnisse, dass die Proben mit sowohl hydraulischen, inerten als auch puzzolanischen Zusatzstoffen eine „dichtere“ Struktur aufbauen, indem sie der Chlorideindringung einen höheren Widerstand entgegensetzen als die Referenzprobe bestehend aus 100% CEM I 52,5 R im Bindemittel. 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 und Abbildung 5A – Verschiebung nach links hin zu kleineren Poren). Dies wurde u.a. von [14] verwendet, indem die Autoren die „kritische Porengröße“ („critical pore size“) aus der Porenverteilungskurve ausgewählt (Abbildung 5 (A)) haben und mit dem D_{nss} korreliert hatten. Bei den Autoren [14] hat dies eher zu einer moderaten bis schlechten Korrelation geführt. Angewandt auf die Proben aus diesem Projekt zeigt die Abbildung 5 (B) dass dies ebenfalls auf die Proben mit einem geringen w/b_{ges} -Wert von 0,4 zutrifft. Hingegen besteht bei Proben mit einem höheren w/b_{ges} -Wert von 0,6 ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Chloriddiffusionskoeffizienten (D_{nss}) und der „kritischen Porengröße“. Dies zeigt, dass gerade bei Proben mit einem höheren w/b_{ges} -Wert die „kritische Porengröße“ im Bereich der kapillaren Poren möglichst geringgehalten werden sollte, z.B. durch den Einsatz von Hüttensand. Hüttensand zeigt laut Abbildung 5 (A) die feinsten Poren, was auf die hydraulische Reaktion zurückzuführen ist.

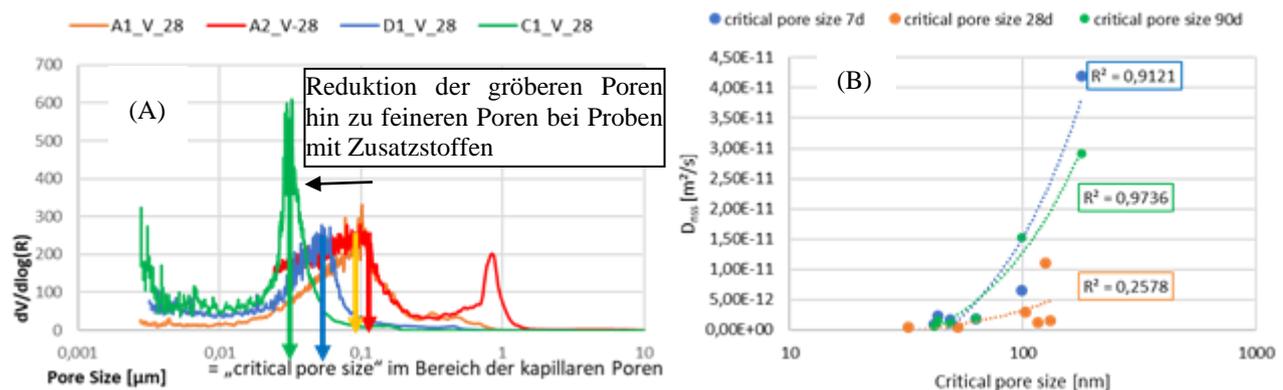


Abbildung 5: (A) Porenradienverteilung zur Bestimmung der „kritischen Porengröße“ im Bereich der kapillaren Poren. Diese wurden dann in Abbildung (B) gegen den D_{nss} aufgetragen um einen Zusammenhang zwischen den Porenradienverteilung und dem Diffusionsverhalten von Chlorid zu erkennen.

Aus Abbildung 5 (B) geht hervor, dass der Diffusionskoeffizient eine gewisse Abhängigkeit von der „kritischen Porengröße“ im Bereich der kapillaren Poren zeigt. Neben dem Vorhandensein von geeigneten Poren muss für eine genauere Betrachtung zum Einfluss auf die Chloriddiffusion auch die Bindungskapazität mit berücksichtigt [14] werden. Die Chloridbindungskapazität ist einer der weiteren Hauptfaktoren, die beim Eindringen von Chlorid in Beton bedacht werden muss. Dazu kann das Verhältnis von wasserlöslichen Chloriden (C_i) den gebundenen Chloriden (C_b) von jeder Probe gegenübergestellt und unter Anwendung einer Isothermengleichung berechnet werden. Aufgrund einer Chloridkonzentration von 3% bei den Diffusionsversuchen wird laut [9] die Verwendung der Freundlich-Isotherme empfohlen, die auch für diese Versuche am geeignetsten war:

$$C_{b, \text{Freundlich}} = \alpha C_f^\beta \tag{2}$$

Dabei beschreiben α und β Konstanten für die Bindungsfähigkeit, die durch Interpolation ermittelt werden.

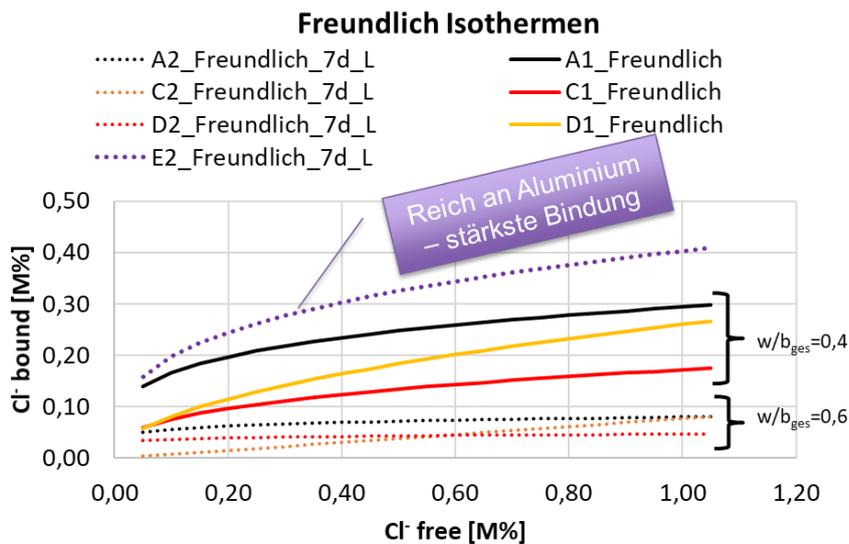


Abbildung 6: Isotherme ausgewählter Proben nach der Freundlich-Isothermengleichung.

Aus Abbildung 6 ist erkennbar, dass durch den hohen Gehalt an Al₂O₃ im Metakaolin die Probe mit 90% CEM I und 10% Metakaolin die stärkste Bindungskapazität entsteht, was in Einklang zur Literatur [14] steht. Bei einem geringen w/b_{ges}-Wert von 0,4 wird im Vergleich zu einem w/b_{ges}-Wert von 0,6 mehr Chlorid gebunden bei gleicher Mischungszusammensetzung. Betrachtet man dazu die kritische Porengröße aus Abbildung 5 (B), wo gezeigt wurde, dass die kritische Porengröße auf die Diffusion von Chloriden bei w/b_{ges}-Werten von 0,4 kaum einen Einfluss hat, so ist zu erkennen, dass bei einem geringen w/b_{ges}-Wert die chemische und physikalische Bindung von Chlorid wichtiger ist als die Porenradienverteilung. Hingegen ist bei höheren w/b_{ges}-Werten von 0,6 die Bindungskapazität untergeordnet, da hier die Porenradienverteilung relevanter ist. Zudem ist aus Abbildung 6 erkennbar, dass bei Mehr-Komponentensystemen Proben mit Silicastaub eine höhere Bindungskapazität haben, als Proben z.B. mit Hüttensand. Dies ist auf den hohen Anteil an SiO₂ im Silicastaub zurückzuführen. Bei der Chloridbindung kann sich physikalisch das Chlorid an der Oberfläche von C-S-H Phasen mit einem hohen Anteil an SiO₂ anlagern, was die Bindungskapazität von Chlorid ebenfalls erhöht.

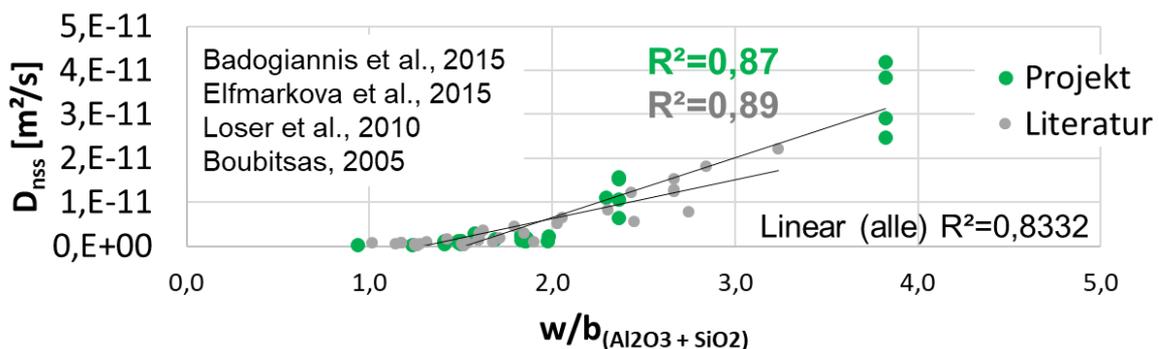


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen dem D_{nss} und dem $w/b_{(Al_2O_3 + SiO_2)}$ aus Projekt- und Literaturdaten [5], [6], [7], [8].

Aus der Kombination dieser Erkenntnisse (Relevanz der Bindungskapazität, w/b-Wert und Kapillarporosität) wurde ein chemisch dominierter $w/b_{(Al_2O_3+SiO_2)}$ -Wert aus den Rezepturkennwerten gebildet, wobei der Anteil im Bindemittel sich alleine nur auf den Anteil vom Al_2O_3 plus SiO_2 zusammensetzt. Bei dieser Kombination der bindungsfähigen Phasen im Bindemittel und dem Wassergehalt einer Mischung zeigt sich ein hoher Zusammenhang zum Diffusionskoeffizienten von der Chlorideindringung mit einem $R^2 > 0,90$, sowohl bei den Projektdaten (grüne Punkte in Abbildung 7) als auch bei Daten aus der Literatur (graue Punkte).

Zusammen mit der Porosität lässt sich dementsprechend ableiten, dass um einen besonders hohen Widerstand gegenüber der Eindringung von Chloriden zu erreichen, die notwendige kritische Porengröße im Bereich der kapillaren Poren gering gehalten werden muss (z.B. durch geeignete Füllerstoffe - Hüttensand) und gleichzeitig eine möglichst hohe Bindekapazität (u.a. durch einen hohen Anteil an Al_2O_3) erreicht werden sollte [13], [14].

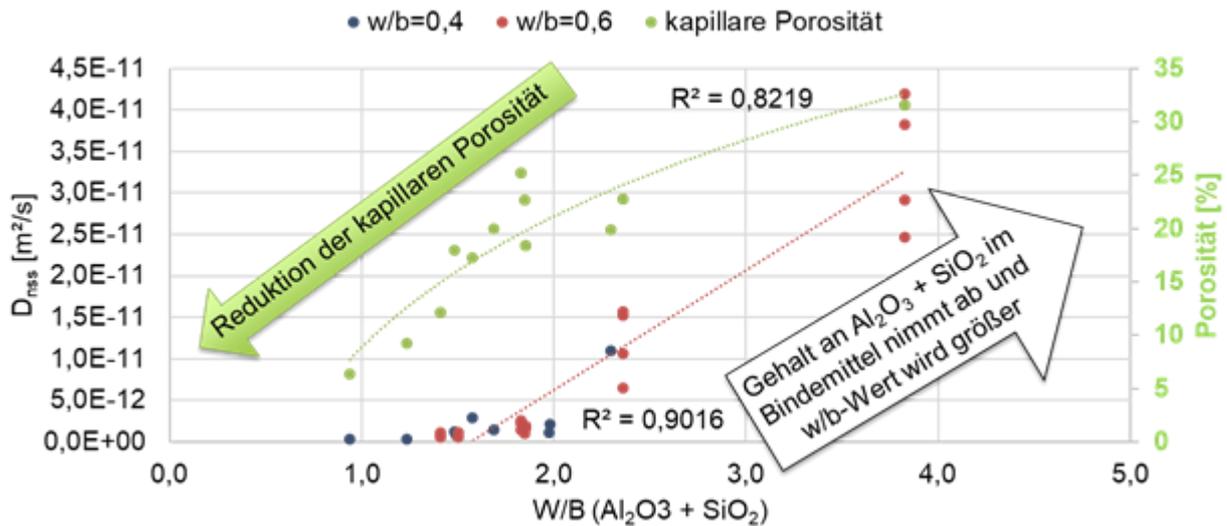


Abbildung 8: Zusammenhang zwischen dem D_{nss} und der chemischen Zusammensetzung des Bindemittels und der kapillaren Porosität

Nach der EN12390-11 [1] wird der D_{nss} aus dem Gesamtchloridgehalt (Cl_{ges}) berechnet. Exemplarisch wurde dies in der Abbildung 9 für einige Proben mittels der blauen Balken dargestellt. Dies zeigt gerade bei der Referenzprobe sehr hohe Chloriddiffusionskoeffizienten, was eine direkte und zuverlässige Interpretation der Ergebnisse in Hinblick auf eine Lebensdauerprognose erschwert. Da laut Literatur [9] nur die frei beweglichen Chloridionen (Cl_{frei}) in der Porenlösung Korrosion an der Bewehrung auslösen, wurde in einer zweiten Berechnungsreihe, der D_{nss} nur auf Basis des Cl_{frei} berechnet (Abbildung 9 - orange Balken). Dabei zeigt sich, dass bei allen Proben der D_{nss} , wenn auch im geringen Maße, reduziert wurde, jedoch zeigte sich der größte Einfluss auf die Proben mit Zement als alleiniges hydraulisch reaktives Material im Bindemittel. Der Einteilung nach [2], die auch in der Abbildung 3 erfolgte, wären somit die D_{nss} berechnet aus Cl_{frei} sogar von Probe G nicht mehr im schlechten, sondern im normalen Bereich, was sich auch positiv auf eine Prognose von erforderlichen Betondeckungen auswirken würde.

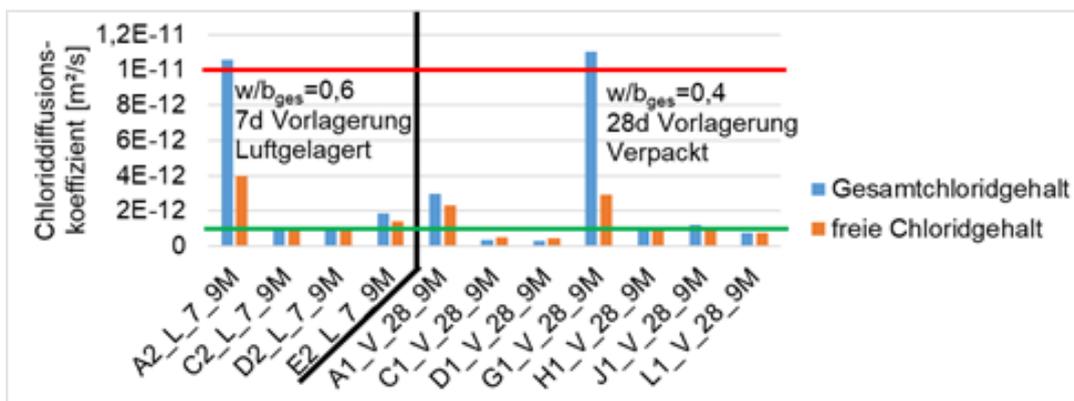


Abbildung 9: Chloriddiffusionskoeffizient berechnet aus den Gesamtchloridgehalt nach EN12390-11 [1] (blauen Balken) und berechnet aus den freien Chloridgehalt (orangenen Balken)

Zusammenfassung zur Eindringung von Chloriden in Mörtelproben:

Zusammenfassend kann postuliert werden, dass das Eindringen von Chloriden nicht von einem Parameter allein beeinflusst wird, sondern von mehreren relevanten Faktoren. Als erstes ist hier der chemische Zusammenhang zu nennen, der folgende Teilaspekte beinhaltet:

- 1) das Bindevermögen der Klinkerphasen und Zementersatzstoffe, welches vereinfacht durch den Al_2O_3 und SiO_2 im Bindemittel als $w/b_{(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2)}$ -Wert evaluiert werden kann und möglichst gering gehalten werden sollte,
- 2) den pH-Wert der Porenlösung und
- 3) den $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalt des Bindemittels.

Aus betontechnologischer Sicht sollten folgende Teilaspekt beachtet werden:

- 1) die kapillare Porosität und dessen Porenverteilung (= kritische Porengröße im kapillaren Bereich) sollte möglichst gering gehalten werden, da so auch die Diffusionsprozesse reduziert werden.
- 2) der w/b_{ges} -Wert sollte möglichst gering gehalten werden, da es hierbei auch zu einer hohen Bindungsfähigkeit von Chloriden kommt; bei einem hohen w/b_{ges} -Wert $> 0,6$ scheint zusätzlich zu der Bindungsfähigkeit auch die Porenverteilung hin zu einen höheren Anteil an feineren Poren entscheidend zu sein.
- 3) Art (verpackt) und Dauer der Nachbehandlung müssen so gewählt werden, dass eine optimale Hydratation gewährleistet werden kann.

Keine Zusammenhänge und damit auch nicht geeignet für Prognosen zur Eindringung von Chloriden sind folgende Faktoren:

- 1) Gesamtporosität
- 2) Druckfestigkeit.

Alle diese Faktoren werden zum Teil stark verändert, wenn Zementersatzstoffe im Bindemittel vorhanden sind. Um dementsprechend einen besonders hohen Widerstand gegenüber der Eindringung von Chloriden zu erreichen, muss die notwendige kritische Porengröße im Bereich der kapillaren Poren gering gehalten werden (z.B. durch geeignete Füllstoffe) und gleichzeitig eine möglichst hohe Bindekapazität (u.a. durch einen hohen Anteil an Al_2O_3) erreicht werden [13], [14]. Als geeigneter Füllstoff aus den Projektdaten, sowie aus der Literatur zeigt sich, dass die Verwendung von Hüttsand (auch zusammen in Zwei-Komponenten-Systemen mit Puzzolanen oder feineren Kalkstein) sehr gut geeignet ist. Wie hoch genau der Einfluss ist und in welchen Anteilen zukünftig Rezepturen gestaltet werden sollten, damit ein Mischbindemittel einen höchst möglichen Widerstand gegenüber der Chlorideindringung besitzt, müsste in genau dafür abgestimmten Versuchen noch evaluiert werden, war aber nicht Teil dieses Forschungsprojektes.

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 Stoffen (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. Untersuchungen zur Ausbildung der Passivschicht wurden direkt an drei Stahlproben durchgeführt, indem diese in Kontakt mit 1) einer gesättigten $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung, 2) destilliertem Wasser und 3) einer NaCl -Lösung gebracht wurden.

Versuche an nicht passivierten Proben

Bei den Stahlproben handelt es sich um 1) nicht polierte, 2) schwach- und 3) stark polierten Stahlproben, von denen je Reinheitsgrad zwei Proben (11 cm lang) in eine gesättigte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung gelegt wurden, um sie zu passivieren. Die Veränderung des Stahlpotentials wurde gegen a) eine Ag/AgCl -Elektrode („Wietek-Elektrode“) und b) eine Kalomel-Bezugselektrode gemessen.

Die Proben wurden zuerst in eine gesättigte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung gelagert und das Potential der Proben gemessen. Die Ergebnisse sind aus Abbildung 10 (Ergebnisse der Ag/AgCl Elektrode - „Wietek-Elektrode“) und Abbildung 11 (Ergebnisse der Kalomel-Elektrode“) ersichtlich. Wie sich zeigte, war das Potential bei einigen Proben von Anfang an relativ schwach bei anderen stark negativ, aber nach 15 Tagen lagen alle in

vergleichbarer Höhe. Bei der Lagerung in ges. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung zeigte das Potential innerhalb von etwa 4 Monaten starke Schwankungen. Aus diesem Grund ist dann $\text{Na}(\text{OH})$ -Lösung zu der $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung zugegeben worden (pH-Wert der Lagerlösung >13) und so Verhältnisse hergestellt, die annähernd der Porenlösung von Beton entsprechen. Es hat überrascht, dass das Potential anfangs stark abgefallen ist, sich aber rasch wieder zu positiveren Werten veränderte, die deutlich über denen lagen, die während der Lagerung in der $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung gemessen wurden. Die Ursachen für den Abfall sind nicht bekannt (es könnte sich um Diffusionsvorgänge handeln oder der kurzfristigen Adsorption bestimmter Ionen). Von dort weg blieben die Werte bei einigermaßen konstanten Werten. Der Versuch wurde nach 1 Jahr beendet. Dass die Werte der beiden Proben mit gleichem Reinheitsgrad verschieden waren, macht deutlich, dass die Oberflächenbeschaffenheit zu Beginn nicht ganz gleich war (Unterschiede in der beim Abkühlen entstehenden Oxidschicht, etc.).

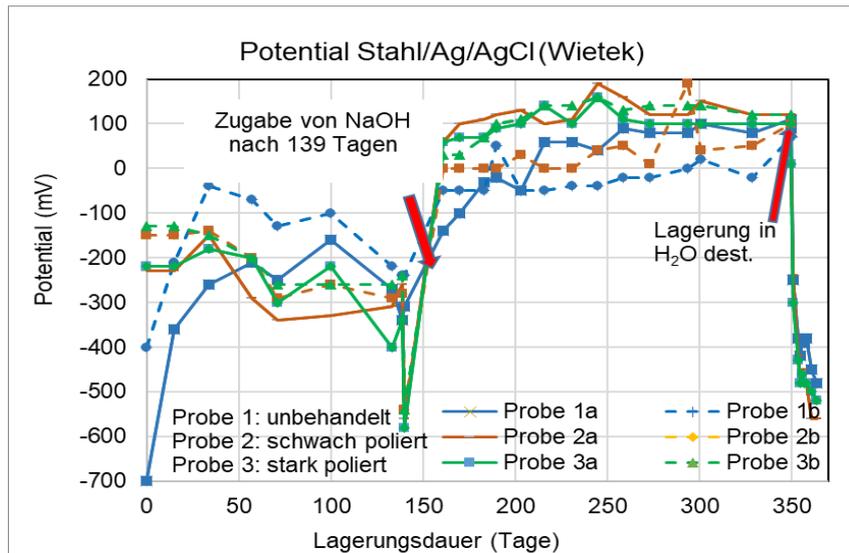


Abbildung 10: Potentialverlauf gegen Ag/AgCl-Bezugselektrode während der gesamten Messdauer

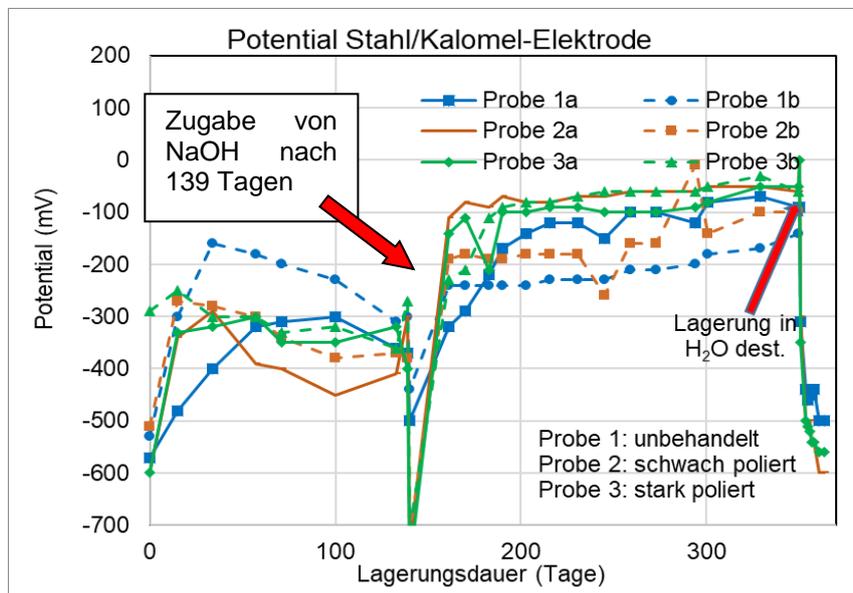


Abbildung 11: Potentialverlauf gegen Kalomel-Bezugselektrode während der gesamten Messdauer

Versuche an passivierten Proben

Nach Beendigung der Passivierungsphase (1 Jahr) wurde untersucht, wie sich das Potential bei Weiterlagerung a) in dest. Wasser und b) der vorherigen Lagerlösung nach NaCl -Zusatz verändert. Zunächst sollte aber festgestellt werden, ob sich in der Lösung befindlicher Sauerstoff auf das Potential auswirkt. Dazu ist je eine der passivierten Proben mit gleicher Oberflächenvorbehandlung in Sauerstoff-freies dest. Wasser überführt worden.

Es bestand aus einem 2-Liter Glas, in dem sich die in einem Kunststoffstempel fixierten Proben standen,

von denen die Kontaktleitungen nach außen verliefen. Die Bezugelektroden steckten in passenden Öffnungen des Gefäßdeckels und tauchten in die Lösung ein. Weiter waren zwei Absperr-Ventile vorhanden durch die der Stickstoff zu bzw. die verdrängte Luft abgeführt werden konnte. Sämtliche für die Kabelverbindungen, etc. von innen nach außen führenden, und in die Gefäßkappe gebohrten Öffnungen wurden mittels Silikonpaste verschlossen. Am Zufuhrventil war ein Schlauch befestigt, der an die in Labor vorhandene Stickstoffleitung angeschlossen wurde und bis zum Gefäßboden reichte, sodass der Stickstoff durch die Lösung perlte und so vorhandener Sauerstoff ausgetrieben wurde. Danach wurde der Stickstoffstrom abgedreht und die Ventile geschlossen, sodass keine Luft mehr in das Gefäß eindringen können sollte. Die Potentialmessung wurde sofort begonnen. Die ersten Werte lagen bei etwas positiveren Werten als bei der Lagerung in der alkalischen Lagerlösung.

Das Potential hat rasch und ständig abgenommen. Vor der Überführung in das Glasgefäß wurden die Stahlstäbe kurz mit Wasser abgespült um die anhaftende Lagerlösung zu entfernen. Die Messwerte der „Nullmessung“ lagen bei etwas positiveren Werten als zuvor. Schon innerhalb der ersten 4 Stunden hat sich das Potential zu deutlich negativen Werten verschoben, die nach 1 Tag bereits so negativ waren, dass die Korrosion begonnen haben musste. Es hat sich auch an zumindest einem Stahlstab bereits Rost gebildet, was zeigt, dass das Messgefäß leider nicht dicht war und offensichtlich Luft Zutritt hatte. Dies ist auch in den nachstehenden Bildern in Abbildung 12 dokumentiert. Da die Versuchsanordnung leider nicht wunschgemäß funktioniert hat, wurde dieser Versuch nach 13 Tagen beendet.

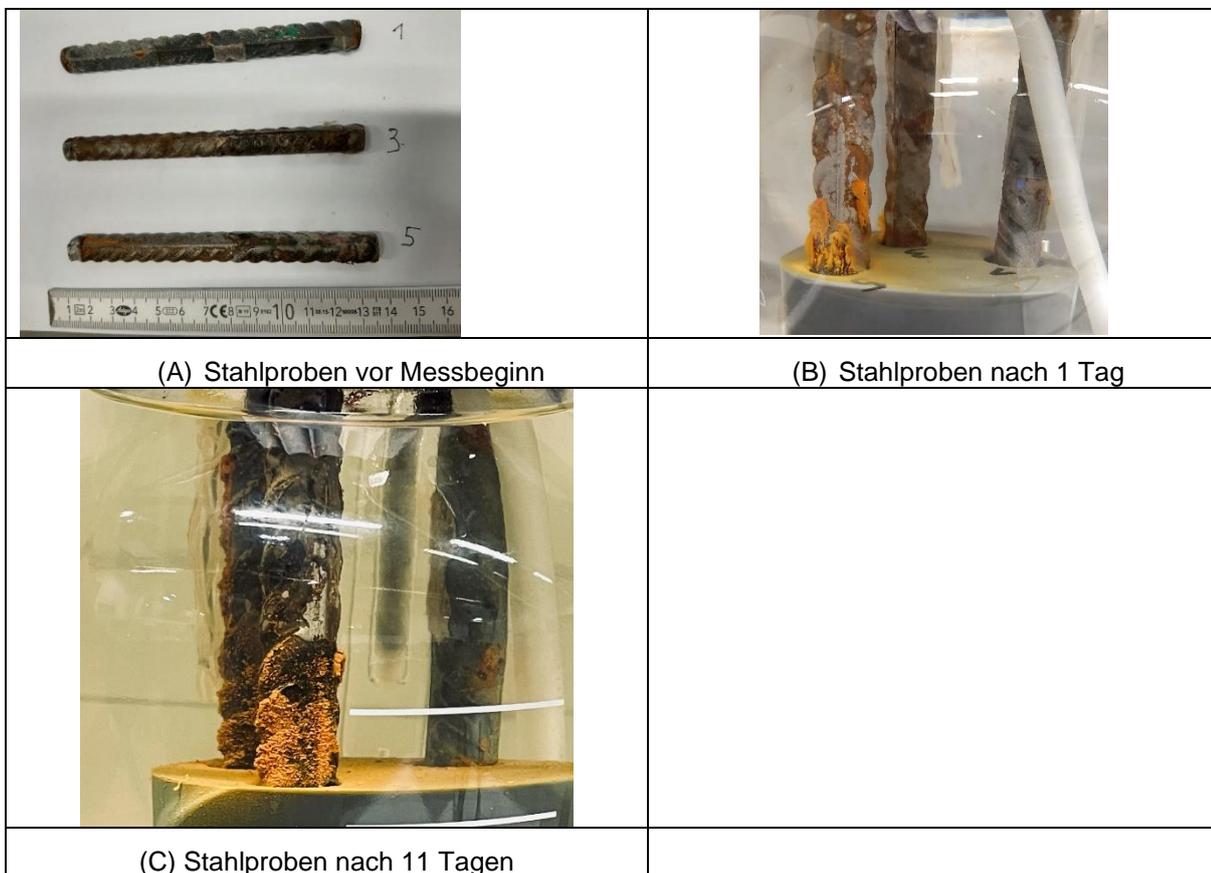


Abbildung 12: Versuchsaufbau zur Potentialmessung in Chloridlösung und Stahlproben nach verschiedenen Versuchsdauern

In der Folge sind die Parallelproben hinsichtlich Potentialveränderungen bei Lagerung in der Lagerlösung untersucht worden, der vor Einfüllung in das Glasgefäß 2% Chlorid (als NaCl) zugesetzt wurde. Der Schlauch, durch den der Stickstoff zugeführt wurde, ist herausgezogen worden, sodass die Öffnung im Gefäßdeckel frei blieb und Luft völlig ungehindert Zutritt hatte. Die Ergebnisse sind in Abbildung 13 und Abbildung 14 zusammengefasst. Wie ersichtlich blieb das Potential zunächst einigermaßen konstant und sank nach knapp 1 Monat von ca. -100 mV um ca. 300 mV auf ca. -400 mV ab, was typisch ist für einsetzende Korrosion. Auch die rote Kurve ist abgesunken aber nicht so stark und die grüne überhaupt nicht, was bedeutet, dass dort der Stahl noch passiv blieb. Wieso die blaue Kurve später wieder zu positiveren Werten anstieg kann nicht genau gesagt werden, der Anstieg deutet aber auf eine Repassivierung hin. Immerhin spiegelt das Ergebnis die bekannte launenhafte Natur der Chloridkorrosion

wieder, wobei nie der gesamte Stahl von Korrosion erfasst wird sondern nur lokale Zonen (Lochfraß), die nach und nach größer werden, und nie gesagt werden kann wie lange es - nachdem die Chloridfront den Stahl erreicht hat - noch dauert bis tatsächlich Korrosion einsetzt.

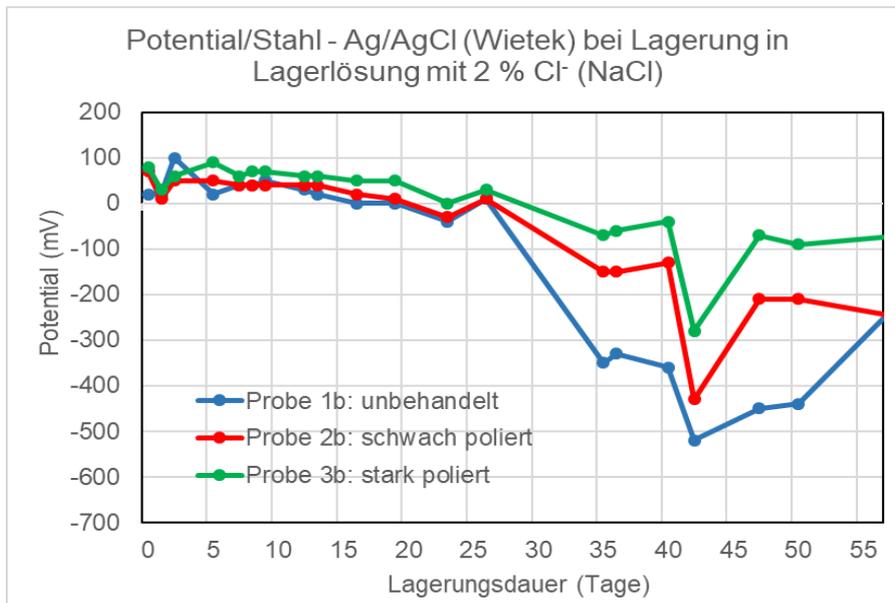


Abbildung 13: Potentialverlauf gegen Ag/AgCl-Bezugselektrode während der gesamten Messdauer.

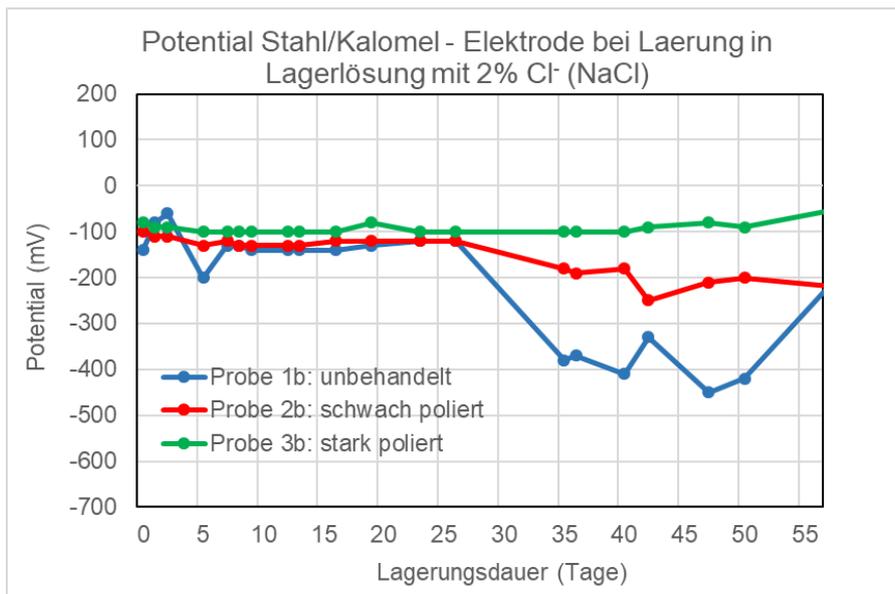


Abbildung 14: Potentialverlauf gegen Ag/AgCl-Bezugselektrode während der gesamten Messdauer

Korrosionsuntersuchungen an Stahlproben in Mörteln

Um einen Eindruck zu bekommen, inwieweit die in diesem Projekt verwendeten Bindemittelrezepturen den elektrischen Widerstand (\cong Leitfähigkeit, Messung mittel Impedanzspektroskopie) in Mörtelproben beeinflussen bzw. einen Einfluss auf den Grad der Korrosionsgeschwindigkeit (mittels einer Ag/AgCl-Elektrode zur Potentialmessung) haben, wurden für die Untersuchungen zur Korrosionsgefährdung 5 Mörtelproben ausgewählt (Tabelle 4). Zusätzlich wurde untersucht welchen Einfluss die Beschaffenheit der Bewehrungsstäbe auf die Korrosion haben, indem i) ein polierter und ii) unpolierter Stab verwendet wird.

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%-CO₂ in der Karbonatisierungskammer bei RH = 57%, T = 20 ° C überführt. Durch periodische Messung des Potentials und der Impedanz von teilweise isolierten

Bewehrungsstäben wird die Zeit bis zum Verlust des Korrosionsschutzes gemessen. Da zum Projektende noch keine Korrosion festgestellt wurde, entfällt derzeit eine Versuchsauswertung und die Darstellung der Versuche. Die Versuche werden aber fortlaufend weiter betreut und zu einem späteren Zeitpunkt ausgewertet.

Tabelle 4: Proben für die Korrosionsuntersuchungen, ausgelagert in Chlorid und einer CO₂-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	

2.2.4 Arbeitspaket 9: Untersuchungen an bestehenden Bauwerken

Im Projektzeitraum wurde bei drei Bauwerken (1. Krafthaus Häusling des Kraftwerks Zillergründl und, 2. Grundablass der Sperre Schlegeis und 3. Unterführung Himberg - „Weisse Wanne“) Bohrkerne entnommen und auf Druckfestigkeit, die Zusammensetzung der Porenlösung, die Karbonatisierungstiefe und der Gehalt an Chlorid sowie Ca(OH)₂ untersucht. Die Installation der Systeme für permanentes Monitoring (Messung von Temperatur, rel. Luftfeuchte, mittlere Windgeschwindigkeit, Regen und innerhalb des Betons tiefengestaffelt die elektrische Impedanz zur Abschätzung von Feuchtezuständen) wurde ebenfalls an den Bauwerken Zillergründl und Schlegeis durchgeführt. Es zeigte sich u.a., dass die rel. Luftfeuchtigkeit im Beton ab einer bestimmten Tiefe unabhängig von der äußeren Wetterlage konstant bleibt (~ 80%).

Die Ergebnisse für das Krafthaus Häusling und den Grundablass der Sperre Schlegeis können dem Endbericht für das 2te Forschungsjahr entnommen werden. Die Ergebnisse zur Unterführung Himberg befinden sich im Endbericht zum 3ten Forschungsjahr.

Da es sich bei Himberg um eine Unterführung handelt, zeigten die Bohrkerne als einzig entnommene Bohrkernproben einen erhöhten Chloridgehalt. Laut dem deutschen BAW Merkblatt (MDCC), 2019 [15] können mittels Nomogrammen, die auf den Ergebnissen vollprobabilistischer Berechnungen mit validierten Vorhersagemodellen basieren, angewendet werden um die Restnutzungsdauer eines Bauwerkes zu ermitteln [15]. Hierfür wird der zeit- und tiefenabhängige Chlorideindringverlauf von Beginn der Beaufschlagung mit Chlorid bis zur Depassivierung des Betonstahls anhand der Gleichung (3) ermittelt:

$$C(x,t) = C_0 + (C_{s,\Delta x} - C_0) \cdot \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t) \cdot t}} \right) \right] \quad (3)$$

Dabei ist:

$C(x,t)$ Chloridgehalt von Beton [M%/Z_{eq}]

x Tiefe [m]

t Betonalter [s]

C_0 initiale Chloridgehalt (=Grundchloridgehalt) [M%/z]

$C_{s,\Delta x}$ Chloridgehalt in einer Tiefe von Δx [M%/ Z_{eq}]

Δx Tiefenbereich, in dem ggf. das Chlorideindringverhalten durch intermittierende Chlorideinwirkung vom Fick'schen Diffusionsverhalten abweicht [mm]

$D_{app}(t)$ Scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient des Betons [mm²/Jahr] oder [m²/s] zum Zeitpunkt t

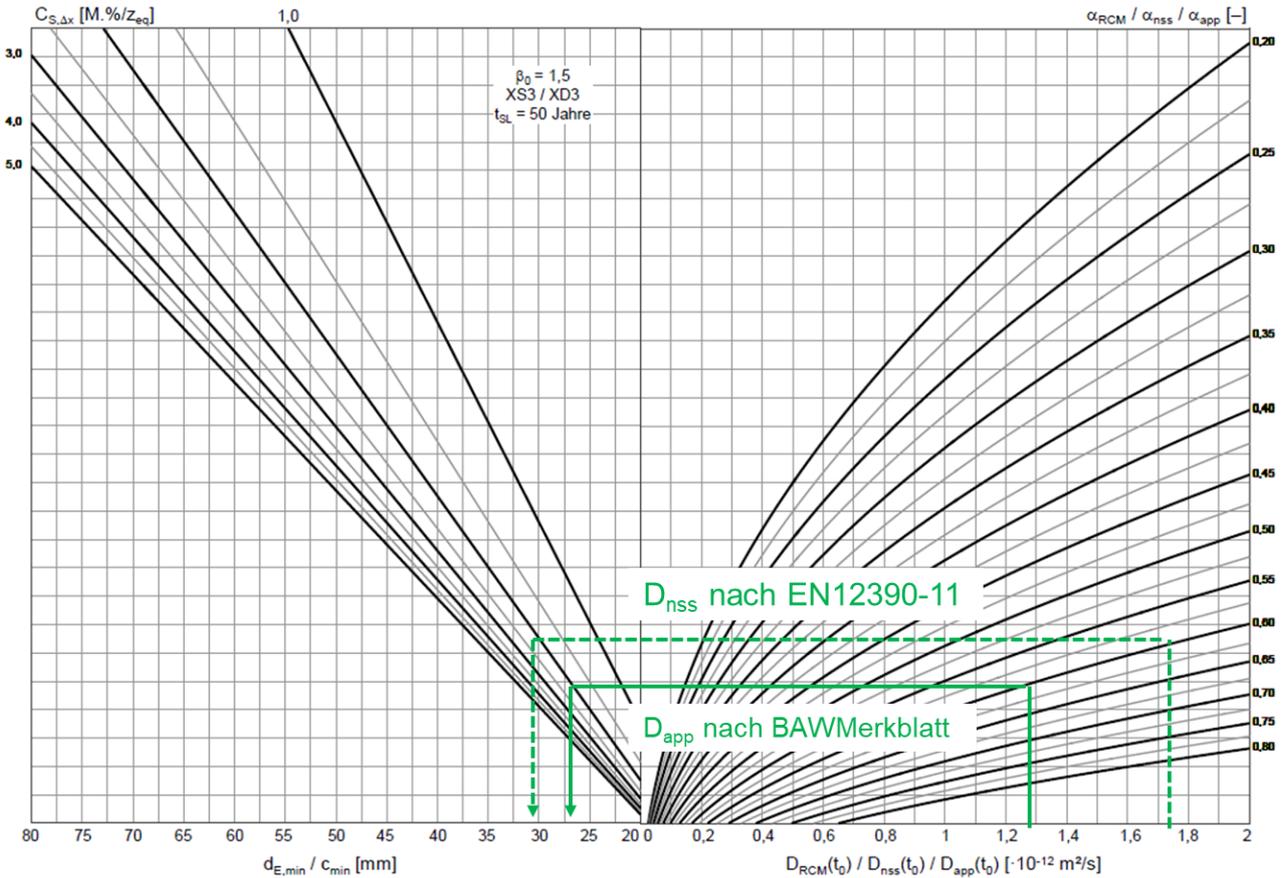
Für die Nomogramme werden folgende 3 Kennwerte benötigt: der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient $D_{app}(t_0)$, der Altersexponent α_{app} und der Oberflächenchloridgehalt $C_{s,\Delta x}$ in der Tiefe Δx . Der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient zum Zeitpunkt der Inspektion $D_{app}(t_{insp})$ sowie der Oberflächenchloridgehalt $C_{s,\Delta x,insp}$ bzw. der Chloridgehalt in der Tiefe Δx werden durch eine Regressionsanalyse unter Verwendung von Gleichung (3). Dieser $D_{app}(t_{insp})$ zum Zeitpunkt der Inspektion wird benötigt um in weiterer Folge mittels eines sogenannten Altersexponenten auf einen fiktiven Ursprungsdiffusionskoeffizienten im Alter von 28 Tagen ($d_{app}(t_0=28d)$) mittels der Gleichung (4) zurückzurechnen. Mit diesem und dem Altersexponenten α_{app} kann dann in das Nomogramm aus dem [15] gegangen werden um Prognosen für die Lebensdauer bzw. Restnutzungsdauer herleiten zu können [15].

$$D_{app}(t_0) = \frac{1}{k_e} \cdot D_{app}(t_{insp}) \cdot \left(\frac{t_0}{t_{insp}}\right)^{-\alpha_{app}} \tag{4}$$

Mit:

k_e Faktor zur Berücksichtigung der Differenz zwischen der Lufttemperatur bei den Laborprüfungen (= 20 °C) und der mittleren Jahrestemperatur der umgebenden Luft (= 10 °C angenommen für Deutschland) des Bauwerks (hier 0,56) [-]

α_{app} Altersexponent -> da nur eine Bauwerksuntersuchung zu einem Zeitpunkt stattfand wird vereinfachend ein bindemittelabhängiger Wert für den Altersexponenten α_{app} nach [15] angesetzt



(1) nach EN12390-11 [1] etwas mehr mit 31mm. Somit wäre beide Mindestbetondeckungen innerhalb der Grenze von XD3 [10] mit 40mm.

2.2.5 Arbeitspaket 10: Auswertung und Beurteilung

Die im 4. Forschungsjahr durchgeführten Arbeiten, die vorliegenden Messergebnisse und die daraus abgeleiteten Aussagen wurden für die Arbeitspakete 3 - 9 erstellt und in Kapitel 2.2. präsentiert. Alle Arbeitspakete können als abgeschlossen angesehen werden.

2.2.6 Arbeitspaket 11: Empfehlungen für die Praxis

Die entsprechenden Empfehlungen für die Praxis aus den Projektdaten sind in den jeweiligen Arbeitspaketen 3 bis 10 gegeben. Aspekte, die im Zusammenhang mit einer Lebensdauerbemessung berücksichtigt werden sollten, sind aufgrund des größeren Umfangs und der kritischen Diskussion im Leitfaden zusammengefasst. Zusammenfassend können folgende positive Faktoren für einen hohen Widerstand gegen CO₂ und Cl⁻ genannt werden:

- Verpackte bzw. Feuchte Nachbehandlung
- Möglichst geringer w/b_{ges} -Wert von 0,36-0,45
- Geringe Porosität
- $V_w / (k_{cl} V_{cl} + k_{GGBFS} V_{GGBFS} + k_{Si} V_{Si} + k_{MK} V_{MK})$ als Designparameter für die Exposition XC
- $V_w / V_{B(AI_2O_3 + SiO_2)}$ als Designparameter für die Exposition XD

Nachfolgend werden für die Expositionsklasse XC und XD jeweils Verbesserungsvorschläge bzw. die vielversprechendsten Rezepturen zusammengefasst.

Verbesserungsvorschläge für die Expositionsklasse XC

- Mit Hüttensand -> Probe B (70% CEM I + 30% Hüttensand)
- Mit Puzzolanen -> Probe D (90% CEM I + 10% Silikastaub) und E (90% CEM I + 10% Metakaolin)
- Kombination mit Kalkstein -> Probe J (60% CEM I + 30% Hüttensand + 10% Mikrokalk)

Verbesserungsvorschläge für die Expositionsklasse XD

- Mit Hüttensand -> Probe B (70% CEM I + 30% Hüttensand) oder besser C (30% CEM I + 70% Hüttensand)
- Mit Puzzolanen -> Probe D (90% CEM I + 10% Silikastaub) und H (60% CEM I + 32,5% Mesokalk + 7,5% Silikastaub)
- Kombination mit Kalkstein -> Probe J (60% CEM I + 30% Hüttensand + 10% Mikrokalk) oder L (55% CEM I + 22,5% Hüttensand + 10% Mesokalk + 7,5% Mikrokalk + 5% Metakaolin)

Vielversprechendste Rezepturen für Expositionsklasse XC/XD aus den Projektdaten

- Probe B (70% CEM I + 30% Hüttensand)
- Probe D (90% CEM I + 10% Silikastaub)
- Probe J (60% CEM I + 30% Hüttensand + 10% Mikrokalk)

Literaturverzeichnis:

- [1] ÖNORM EN 12390-11 Prüfung von Festbeton – Teil 11: Bestimmung des Chloridwiderstandes von beton – Einseitig gerichtete Diffusion. 2015.
- [2] K. Yang, S. Nanukuttan, W.J. McCarter, A. Long, M. Basheer, Challenges and opportunities for assessing transport properties of high-performance concrete, Rev. ALCONPAT. 8 (2018) 246–263. doi:10.21041/ra.v8i3.301.
- [3] A. Ipavec, T. Vuk, R. Gabrovšek, V. Kaučič, Chloride binding into hydrated blended cements: The influence of limestone and alkalinity, Cem. Concr. Res. 48 (2013) 74–85. doi:10.1016/j.cemconres.2013.02.010.
- [4] M.D.A. Thomas, R.D. Hooton, A. Scott, H. Zibara, The effect of supplementary cementitious materials on chloride binding in hardened cement paste, Cem. Concr. Res. 42 (2012) 1–7. doi:10.1016/j.cemconres.2011.01.001.
- [5] E. Badogiannis, E. Aggeli, V.G. Papadakis, S. Tsvilis, Evaluation of chloride-penetration resistance of metakaolin concrete by means of a diffusion – Binding model and of the k-value concept, Cem. and Conc. Comp. 63 (2015) 1-7, doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.07.012.
- [6] V. Elfmarkova, P. Spiesz, J.H. Brouwers, Determination of the chloride diffusion coefficient in blended cement mortars, Cem. Concr. Res. 78, Part B (2015) 190–199, doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.06.014.
- [7] R. Loser, B. Lothenbach, A. Leemann, M. Tuchschnid, Chloride resistance of concrete and its binding capacity - Comparison between experimental results and thermodynamic modeling, Cem. and Conc. Comp. 32 (2010) 34-42.
- [8] Boubitsas, D. (2005), "Replacement of cement by limestone filler or ground granulated blast furnace slag: the effect on strength and chloride diffusion in cement mortars. Laboratory and field studies", Licentiate Thesis, Report TVBM-3125, Lund.
- [9] Q. Yuan, C. Shi, G. De Schutter, K. Audenaert, D. Deng, Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment - A review, Constr. Build. Mater. 23 (2009) 1–13. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.02.004.
- [10] A. Standards, ÖNORM B 4710-1: „Beton: „Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität; Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton“, 2018.
- [11] J. Walraven, Model Code 2010 - final draft - Volume 2: Model Code. International Federation for Structural Concrete (fib), 2012.
- [12] C. Andrade, M.A. Climent, G. de Vera, Procedure for calculating the chloride diffusion coefficient and surface concentration from a profile having a maximum beyond the concrete surface, Mater. Struct.

Constr. 48 (2015) 863–869. doi:10.1617/s11527-015-0543-4.

- [13] R. Luo, Y. Cai C. Wang, X. Huang, Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete, CEM. Concr. Res. (2003)
- [14] S. Sui, F. Georget, H. Maraghechi, W. Sun, K. Scrivener, Towards a generic approach to durability: Factors affecting chloride transport in binary and ternary cementitious materials, CEM. Concr. Res. (2019)
- [15] BAW Merkblatt: Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC), 2019.
- [16] Herget, C.; Müller, A.; Proske, T.; Rezvani, M.; Graubner, C.-A. (2021) Kalksteinmehl als Betonzusatzstoff - Vorschlag für die Anrechenbarkeit auf den Zementgehalt und Potenzial zur CO₂-Reduktion im Betonbau. Beton- und Stahlbetonbau
- [17]

Projektteam und Kooperationen

- Projektmanagement: Dipl.-Ing. Michael Pauser (ÖBV), Jürgen Silberknoll (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 erfolgte erst im 4. Forschungsjahr. Das Programm und die Ergebnisse wurden den Partnern a) beim Halbjahrestreffen vom 23.06.2021 und der digitalen Präsentation zum Ende des 3. Forschungsjahres am 07.12.2021 vorgestellt und diskutiert.

Veröffentlichungen:

- C. Baldermann, A. Baldermann, O. Furat, M. Krüger, M. Nachtnebel, 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.
- Rudic O., Juhart J., Tritthart J., Krüger M.: Influence of Specific SCM on Microstructure and Early Strength of Sustainable Cement Blends, M.C.F. Cunha V., Rezazadeh M., Gowda C. (eds) Proceedings of the 3rd RILEM Spring Convention and Conference (RSCC 2020). RSCC 2020. RILEM Bookseries, vol 35. Springer, Cham.
- Furat, O., Baldermann, A., Baldermann, C., Dietzel, M. & Schmidt: „Quantitative assessment of microstructural changes of hydrated cement blends due to leaching and carbonation, based on statistical analysis of image data“, Construction and Building Materials, 302, 124370, 2021.

Tagungsbeiträge:

- Baldermann, Claudia; Tritthart, Josef; Juhart, Joachim, Krüger, Markus: Untersuchungen zum reduzierten Ca(OH)₂-Gehalts in zusatzstoffoptimierten Bindemitteln; 4. Grazer Betonkolloquium 2018: Poster, Paper und Auszeichnung: 1ter Platz bei „Best Paper Award“
- O. Rudic, J. Juhart, J. Tritthart, M. Krüger: Influence of specific SCM on microstructure and early strength of sustainable cement blends, 3rd RILEM Spring Convention, 10-14 March 2020, Guimarães, Portugal
- O. Rudic, J. Juhart, J. Tritthart, J. Neumeyer, M. Krüger: Effect of Binder Composition on Carbonation Resistance of Sustainable Concrete Formulations, CoMS_2020/21: Construction Materials for a Sustainable Future, 2nd International Conference April 20 to 21, 2021, Slovenia

Weitere Veröffentlichungen befinden sich derzeit in Vorbereitung.

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.
Die Projektergebnisse sind zu veröffentlichen. Die Veröffentlichungsschrift ist dem Endbericht beizulegen. => Sämtliche Berichte sind auf der Website der ÖBV (www.bautechnik.pro) frei zum Download erhältlich. Veröffentlichungsschriften wurden im e-call hochgeladen.

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

keine