

Nachhaltigkeits-Benchmarks für österreichische Betone, ein Baustein auf dem Weg zur CO₂-Neutralität

1. Zielerreichung und Projektstatus	1
2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum	2
2.1. Projektleitung	2
2.2. wissenschaftliche Leitung	2
2.3. Proben und Daten	2
2.4. Betonprüfung	6
2.5. performancebasierte & klimaverträgl. Betontechnologie	14
2.6. Empfehlungen für die Praxis	17
3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten	18
4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit	18

1. Zielerreichung und Projektstatus

Im gegenständlichen zweiten Forschungsjahr der 4 Jahre Gesamtlauzeit wurden alle für das Jahr geplanten Ziele erreicht und die Grundlagen zur erfolgreichen Weiterbearbeitung in Jahr 3-4 geschaffen. D.h., dass (i) eine umfassende Menge an Proben und Daten der Betone, die für das zweite Jahr vorgesehen waren, von den Herstellern und der TU Graz planmäßig bereitgestellt bzw. hergestellt wurden und (ii) umfangreiche Betonprüfungen, die vorgesehen waren, von den fünf beteiligten Prüfinstituten (4 Prüfstellen und TUG-IMBT/TVFA) geprüft und (iii) Auswertungen und vorläufige Schlüsse zu den Nachhaltigkeitsbenchmarks österr. Betone vom wissenschaftlichen Projektpartner TU Graz gezogen wurden. Die Ergebnisse wurden gemäß den geplanten Meilensteinen in einem „Zwischen-meeting“ zur Projekthalbzeit und einem „End-meeting“ am 20.08.2025 den Beteiligten der Branche präsentiert.

Highlights waren:

1. Die gute Zusammenarbeit aller beteiligten Betonwerke und Prüfinstitute mit der TU Graz, sodass planmäßig rd. 500 Proben/Jahr hergestellt und in der vorgesehenen Systematik erfolgreich geprüft wurden.
2. Für das Datenmanagement (Datenerfassung und Datenstrukturierung für die weitere Verarbeitung) wurde ein mehrstufiger, klar strukturierter Prozess entwickelt, der mittels Cloud-basierter, systematischer sowie standardisierter Datenerfassung in Tabellenform (EXCEL) und speziell entwickelter Skripte (Python) die Daten automatisiert zusammenführt und zur Auswertung gezielt vorbereitet.
3. Das Prüfverfahren zum Chloridwiderstand (zur Bestimmung des Chloriddiffusionskoeffizienten D_{nss} und des Oberflächenchloridgehalts C_s nach EN 12390-11) wurde einheitlich spezifiziert und kann valide und innerhalb geringer Streuung von allen 4 beteiligten Prüfinstituten durchgeführt werden. Letzteres wurde mit einem internen Ringversuch nachgewiesen. Darüber hinaus wurden alle vorgesehenen Betonprüfungen zur gesamthaften Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Betone erfolgreich durchgeführt. Dabei wurden insbesondere die Frostprüfungen und die Prüfungen des chemischen Widerstandes evaluiert (Abwitterungsmassen und deren Aussagekraft)
4. Es wurden „Benchmarks“ für die Klassenbildung hinsichtlich Karbonatisierungswiderstand (XC) und GWP-Klassifizierung vorgestellt und zur Diskussion gestellt.
5. Es wurden mehrere Betone mittels performancebasiertem Betonentwurf mit einer deutlichen GWP Reduktion gegenüber Standardbetonen hergestellt und hinsichtlich ihrer gesamthaften Performance bewertet

Sämtliche Dauerhaftigkeitsprüfungen, umfassende Datenanalysen und statistische Auswertungen sowie weitere Schritte in der performancebasierten, klimaverträglichen Betontechnologie sind planmäßig in Arbeit und werden in den Folgejahren weiter verfolgt.

2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum

2.1. Projektleitung

Fertigstellungsgrad: 100%

Im Berichtszeitraum wurden sämtliche Aufgaben der Projektleitung planmäßig umgesetzt. Die Koordination aller am Projekt beteiligten Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft erfolgte strukturiert und zielgerichtet. Ein zentrales Augenmerk lag dabei auf der transparenten und effizienten Zusammenarbeit aller Akteure sowie der laufenden Abstimmung organisatorischer, kaufmännischer und administrativer Aspekte.

Die Projektleitung übernahm die Vertretung des Projekts gegenüber der FFG und sorgte für die fristgerechte und vollständige Einhaltung aller formalen Anforderungen. Zudem wurde die terminliche und kaufmännische Projektkoordination kontinuierlich wahrgenommen. Alle administrativen Fristen, Berichtslegungen und Abrechnungsmodalitäten wurden im vorgesehenen Rahmen erfüllt.

Ein wesentlicher Bestandteil war die Organisation und Durchführung von Projektmeetings, die regelmäßig stattfanden und als zentrale Kommunikationsplattform für alle Projektbeteiligten dienten. Darüber hinaus wurde die Kommunikation zwischen den Partnerinstitutionen koordiniert und in strukturierter Form unterstützt, sowohl im wissenschaftlichen als auch im wirtschaftlichen Bereich.

Das Vertrags- und Kostenmanagement verlief ordnungsgemäß. Verträge wurden geprüft und administrative Abläufe mit allen Partnern abgestimmt, um einen reibungslosen Projektverlauf sicherzustellen.

Im gesamten Berichtszeitraum traten keine Abweichungen von der ursprünglichen Planung auf. Die Arbeitsschritte konnten wie vorgesehen umgesetzt werden, sodass eine Anpassung der Planung nicht erforderlich war.

Der Fertigstellungsgrad dieses Arbeitspakets beträgt 50 % im Bezug zur Gesamtlaufzeit, 100% im Bezug zum Forschungsjahr.

2.2. wissenschaftliche Leitung

Fertigstellungsgrad: 100%

Sämtliche im Arbeitsplan des 2. Forschungsjahres vorgesehenen Arbeiten wurden planmäßig und erfolgreich durchgeführt. Diese umfassten die wissenschaftliche Koordination aller am Projekt beteiligten Partner, Planung und Koordination der wissenschaftlichen Arbeiten (Gesamtauswertung, Termineinhaltung, regelmäßige Treffen), Koordination von Publikationen, Berichten u.ä., Betreuung Studierender und wissenschaftlicher Arbeiten, Kommunikation der wissenschaftlichen Partner und Industriepartner zu fachlichen Fragen sowie den Wissenstransfer, der in workshops & meetings in Fachgruppen erfolgte.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets beträgt 100 % im Berichtszeitraum.

2.3. Proben und Daten

Fertigstellungsgrad: 100%

Proben- & Datenbereitstellung

Im Berichtszeitraum wurden Proben und Daten planmäßig bereitgestellt und ausgewertet wie folgend beschrieben. In workshops zur Probenherstellung vor jeder Phase wurden Festlegungen zur akkordierten Herstellung der Proben gemäß der Matrix der Betonsorten durch die 11 Herstellerwerke und deren Prüfung nach diversen Prüfverfahren vereinbart (siehe Figure 1).

Alle Mischungen: Konsistenz F 52, GK 22mm

	Betonsorte XC1		XC2		Recyclingbeton B1		B2		B3		B5		B7		BS1 A		BS1 C		Ring-Versuch	Performance & CO ₂ minimiert				Σ		
	abgedeckte Expositionsclassen	XC1	XC2	XC1	XC2	XC1	XC2	XC1	XC2	XC1	XC2	XC1	XC2	XC1	XC2	XC1	XC2	XC1		XC2	PCH	ZOL	ZOL2		NOC	WH
	Variable	STM	DNG	STM	DNG	STM	DNG	STM	DNG	STM	DNG	STM	DNG	STM	DNG	STM	DNG	STM	DNG	XC und XD	XC1, E2	XF1, o.g.H. ("E2")	XF2 o.g.H. ("B5", mind. "B5")	mind. XC2 ev. B1	Wiederholung	Stichproben
beschleunigte Karbonatisierung		9	4	9	6	2	1	8	3	9	5	7	6	7	4	8	6	6	6	5	15	6	6	6	15	159
natürliche Karbonatisierung		9	4	5	6			4	3	5	5	4	6	4	4	6	3	3			10	3	3	3	4	94
Chloriddiffusionsrate										9	5	7	6	7	4	8	6	6	6	4	0	3	3			89
Chloriddiffusionsrate - ageing (11,2J)										3	6				4	6	3	3			0	3	3			56
Wassereindringtiefe ÖN								3	3					2	2						8	3	3	3		33
Wassereindringtiefe EN								3	3					2												5
Frostangriff										3	5	3	6	2	4	3	6	2	2			5	3	3		5
chemischer Angriff XAL										7	7	6										5	3	3		31
Festigkeit (Hst.:1d, 2d,28d; TUG: Nd)		9	4	9	6	2	1	8	3	9	5	7	6	7	4	8	6	6	6	5	15	6	6	6	15	159
Frischbeton-Prüfungen Konsistenz, Wassergehalt etc.		vom Hersteller bei jeder Charge zu prüfen																							159	
Temp.-Entwicklung											1	1		1		3	3					3	3	3		18
E-Modul						2	1									3	3					3	3	0		15
Mikrostruktur, Permeabilität, kapillare Wasseraufnahme		5	4	5	6	0	0	4	3	5	5	4	6	4	4	4	6	3	3			10	3	3	4	94
Prüfungen Ausgangsstoffe		5	4	5	6	0	0	4	3	5	5	4	6	4	4	4	6	3	3			10	3	3	4	94

Abbildung 2.3.1: Matrix der Beprobung von Betonsorten nach Prüfverfahren (1 Frischbetonprobe = 1 Mischung = Stichprobe)

Figure 2 zeigt die Betonsortenvarianten, die wie bereits im 1. Jahr beschrieben beprobt wurden und weiterhin beprobt werden.

1. „S“ - deskriptive Standardbetone aus der Produktion
2. „D & C“ – deskriptive Normgrenzfälle

max. W/Ba (gemäß EP)	erwartete Druckfestigkeitsklasse fc	Bindemittel		
		Standard "S"	DNG "D"	zusätzlich DNG "C"
XC1	0,68	C 16/20	i.d.R. CEM II/B 42,5	
XC2	0,63	C 20/25 **	+10% AHWZ	
B1	0,58	C 25/30 **	CEM III oder CEM II/C *	
B2	0,53	C 25/30 **	Ba ≥ Mindestbindemittelgehalt, W/Ba ≤ max. W/Ba, je nach Hersteller	
B3	0,53	C 25/30 **	CEM I*	
B5	0,48	C 30/37		
B7	0,43	≥ C 30/37	CEM I*	
BS1A		max W/B und Bindemittel gemäß ÖBV RiLi Weiße Wanne		
BS1C				

* mit Ba=Mindestbindemittelgehalt, W/Ba = max. W/Ba
** entspricht indikativer Druckfestigkeit nach ON B4710, Tab. 9 & 10

3. „P“ – Performancebasierte Betone

Abbildung 2.3.2: Betonsortenvarianten

Im Zuge des Projekts werden auch performancebasierte Betone abweichend vom deskriptiven Konzept der Norm sowohl von Herstellern als auch von der TU Graz in Sondermischungen hergestellt und nach demselben Prüfprogramm wie die „S“ und „DNG“ Betone geprüft. Im ersten Forschungsjahr wurden entsprechend des Gesamtprojektplans 3 Phasen der Beprobung durchgeführt wie in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht der hergestellten Betonvarianten in den durchgeführten Phasen des 1. und 2. Forschungsjahres

Phase	Herstellungswoche	Standardbetone (S)	Deskriptive Grenzfälle (D)	Performance Betone (P)	Betone Ringversuch (RV)
1	18.09. - 22.09.2023	XC1_S	XC1_D, XC2_D		XC1_D
2	05.02. - 09.02.2024	XC2_S, B1_S	B1_D, B3_D, B3_C		B3_D
3	10.06. - 14.06.2024	B2_S		B2_P, XC2_P	
4	07.10. - 11.10.2024	B3_S	B5_D, B5_C	B2_P	
5	10.02. - 14.02.2025	B5_S	B2_D, B2_C	B1_P, B2_P	
6	02.06. - 06.06.2025	BS1A, BS1C, B7	B7_D, B7_C	B2_P, B5_P	

In jeder Probenherstellungsphase waren (i) Rückstellproben für alle Ausgangsstoffe zu nehmen, um Grundeigenschaften derselben zu prüfen wie später ausgeführt, (ii) Frischbetonprüfungen aus jeder Mischung direkt vom Hersteller durchzuführen sowie (iii) eine umfangreiche Anzahl an Prüfkörpern für spätere Festbetonprüfungen bei den Prüfstellen (P1-P4) und an der TUG herzustellen und zu prüfen und (iv) die Prüfdaten an die TUG zu übermitteln (wie im 1. FJ bereits beschrieben).

Folgende Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der angewandten Prüfverfahren.

Tabelle 2: Übersicht über die Prüfverfahren, die im Laufe des Projektes NÖB durchgeführt werden mit entsprechender Prüfstellenzuteilung (Stand: Ende 2. FJ)

Prüfverfahren	Kurzbezeichnung	Norm	Testende Prüfstelle
Beschleunigte Karbonatisierung	KB	EN 12390-12	P1, P2, P3, P4, TU Graz
natürliche Karbonatisierung	KN	ÖNORM EN 12390-10	TU Graz
Chloriddiffusionsrate	CL	ÖNORM EN 12390-11 (118d)	P1, P2, P3, TU Graz
Chloriddiffusionsrate - ageing (1J,2J)	CA	ÖNORM EN 12390-11 (1J, 2J)	TU Graz
Wassereindringtiefe ÖN	WUB	ÖNORM B 4710-3	P1, P2, P3, TU Graz
Wassereindringtiefe EN	WUE	EN 12390-8	P1, P2, P4
Frostangriff	XF1_W	ÖNORM B 4710-3	P1, TU Graz
XF1_P	ÖNORM EN 12390-9	TU Graz	
XF2	ÖNORM B 4710-3 / EN 12390-9	P1, P2, P3, P4	
XF3	ÖNORM B 4710-3	P1, P2, P3, TU Graz	
XF4	ÖNORM B 4710-3/ EN 12390-9	P1, P2, P3	

chemischer Angriff XAL XA

ÖNORM B 4710-3 P1, P3

Druckfestigkeit (1d, 2d, 28d, 90d) DF

ÖNORM B 4710-3 Werke N01-N11, 28d
zusätzlich an TU Graz

Zusätzlich zu den in der Tabelle aufgezeigten Prüfungen kommt bei jeder Betonsorte die Frischbetonprüfung, die jedes Herstellerwerk durchführt und mikrostrukturelle Untersuchungen (Kurzbezeichnung „MS“) zum Prüfprogramm hinzu. Die Mikrostrukturanalysen werden je nach Untersuchungsbedarf verwendet. Ab Phase 2 werden zusätzlich zu der natürlichen Karbonatisierung auch Messung zur Sauerstoffpermeabilität mittels des Torrent-Verfahrens durchgeführt.

Die Organisation der Prüfdaten erfolgt in einem mehrstufigen, klar strukturierten Prozess. Die erfassten Messwerte und Prüfparameter werden in standardisierten Excel-Tabellen dokumentiert, die in einer zentralen Nextcloud-Umgebung abgelegt werden. Um eine einheitliche Datenbasis zu schaffen, werden diese Einzeldateien mithilfe speziell entwickelter Python-Skripte automatisiert zusammengeführt und einer Datentyp-Validierung unterzogen. Das Ergebnis ist eine konsolidierte Excel-Datei, der sogenannte Data-Pool, in dem sämtliche Prüfergebnisse zentral gebündelt vorliegen. Aus diesem Data-Pool wurden im nächsten Schritt, ebenfalls überwiegend mit Python-Skripten, weiterführende statistische Auswertungen, Visualisierungen und Berichte erstellt, wobei ergänzend auch Excel für spezifische Analysen genutzt wird. Ursprünglich war eine SQL-Datenbank zur Verwaltung der Daten vorgesehen, diese wurde jedoch zugunsten der Python-basierten Lösung verworfen, da sich diese in der Wartung, Anpassung und Erweiterung als deutlich flexibler und effizienter erwiesen hat. Die untenstehende Figure 3 veranschaulicht diesen Datenfluss von der Erfassung bis zur Analyse.

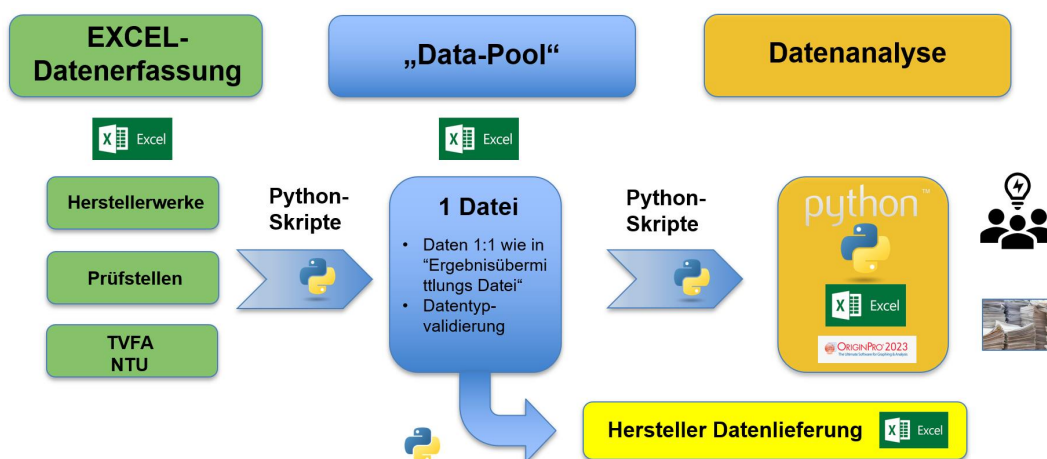


Abbildung 2.3.3: Prozess (Workflow) der Datenerfassung, -Verarbeitung und -Analyse

Statistische Auswertung

Die statistische Analyse der Ergebnisse aus standardisierten Prüfverfahren an Beton ist von zentraler Bedeutung, da sie die Grundlage für die Bewertung von Materialeigenschaften und die Ableitung von klassenbildenden Grenzwerten bildet. Ein wesentliches Problem besteht jedoch in der häufig geringen Probenanzahl, die in der Praxis meist auf drei bis sechs Einzelwerte pro Versuchsreihe begrenzt ist. Diese kleine Stichprobengröße schränkt die Aussagekraft klassischer statistischer Verfahren ein und führt zu erhöhten Unsicherheiten bei der Schätzung von Mittelwerten und Streuungen. Um dennoch belastbare Aussagen treffen zu können, werden geeignete statische Verfahren laufend evaluiert (Resampling-Verfahren wie Bootstrapping, Bayes'sche Methoden etc.).

Die Frage nach der zugrunde liegenden Verteilung ist ebenfalls entscheidend für die Wahl der Auswertungsmethoden. Während Druckfestigkeiten von Betonproben häufig einer an-nähernden Normalverteilung folgen, zeigen andere Kenngrößen, etwa Karbonatisierungsraten oder Parameter zur Dauerhaftigkeit, oft eine deutliche Schiefe. Hier erweisen sich Weibull- oder Extremwertverteilungen als geeigneter. Da diese Annahmen jedoch nicht verallgemeinert werden können, werden geeignete

Good-ness-of-fit-Tests durchgeführt (z. B. Shapiro-Wilk oder Anderson-Darling), um die Verteilungsannahme zu überprüfen. Die Wahl zwischen parametrischen und nicht-parametrischen Tests hängt folglich stark von der Datenlage ab. Parametrische Verfahren wie der t-Test liefern bei Vorliegen einer Normalverteilung und ausreichender Stichprobengröße zuverlässige Ergebnisse. In den häufig anzutreffenden Fällen kleiner Probenzahlen und unbekannter oder schiefer Verteilungen sind jedoch nicht-parametrische Verfahren wie der Mann-Whitney-U-Test oder der Kruskal-Wallis-Test vorzuziehen, da sie robuster gegenüber Verletzungen von Verteilungsannahmen sind. Für besonders kleine Stichproben bietet sich zudem der Einsatz Bayes'scher Ansätze an, die auch mit wenigen Daten sinnvolle Wahrscheinlichkeitsaussagen ermöglichen.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Einbindung externer Vergleichsdatensätze. Liegen Daten unter vergleichbaren Bedingungen vor, können diese sinnvoll in die Grundgesamtheit integriert werden, um die Stichprobengröße zu erhöhen und die statistische Aussagekraft zu verbessern (wie Literaturdaten oder Daten der werkseigenen Produktionskontrolle WPK). Weichen die Rahmenbedingungen jedoch deutlich ab, sollte eine direkte Zusammenführung vermieden werden. In diesen Fällen eignen sich die Vergleichsdaten insbesondere zur Validierung von Grenzwerten oder zur Plausibilitätsprüfung der eigenen Ergebnisse.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine differenzierte Wahl der statistischen Methoden erforderlich ist, um trotz kleiner Stichproben und diverser statistischer Verteilungen robuste Aussagen über die Materialeigenschaften von Beton zu ermöglichen. Der kombinierte Einsatz von Resampling-Verfahren, Verteilungstests sowie der bewussten Abwägung zwischen parametrischen und nicht-parametrischen Verfahren stellt dabei einen zentralen Baustein der Auswertung dar.

Sämtliche im Arbeitsplan des 2. Forschungsjahres vorgesehenen Arbeiten wurden planmäßig und erfolgreich durchgeführt. Die Meilensteine Ringversuch XD, Probenherstellung der Phasen P4-P6 sowie Prüfungen und Auswertungen wurden durchgeführt.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets beträgt 100 % im Berichtszeitraum und rund 65% in Bezug auf das Gesamtprojekt.

2.4. Betonprüfung

Fertigstellungsgrad: 100%

Im Berichtszeitraum wurden die geplanten Arbeiten planmäßig durchgeführt wie nachfolgend beschrieben (Fertigstellung 100%, bezogen auf das Gesamtprojekt rd. 50%).

Validierung der Probenherstellung anhand der Frischbeton- und Druckfestigkeitsprüfungen

Die Ergebnisse der Konsistenzprüfung verschiedener Betone werden anhand der Ausbreitmaße aufgezeigt (Figure 4 und Figure 5). Die Werte bewegen sich eng um den Zielwert von 52 cm. Die geringe Streuung verdeutlicht eine hohe Reproduzierbarkeit sowie eine zuverlässige und gleichbleibende Betonqualität über alle untersuchten Betonsorten hinweg.

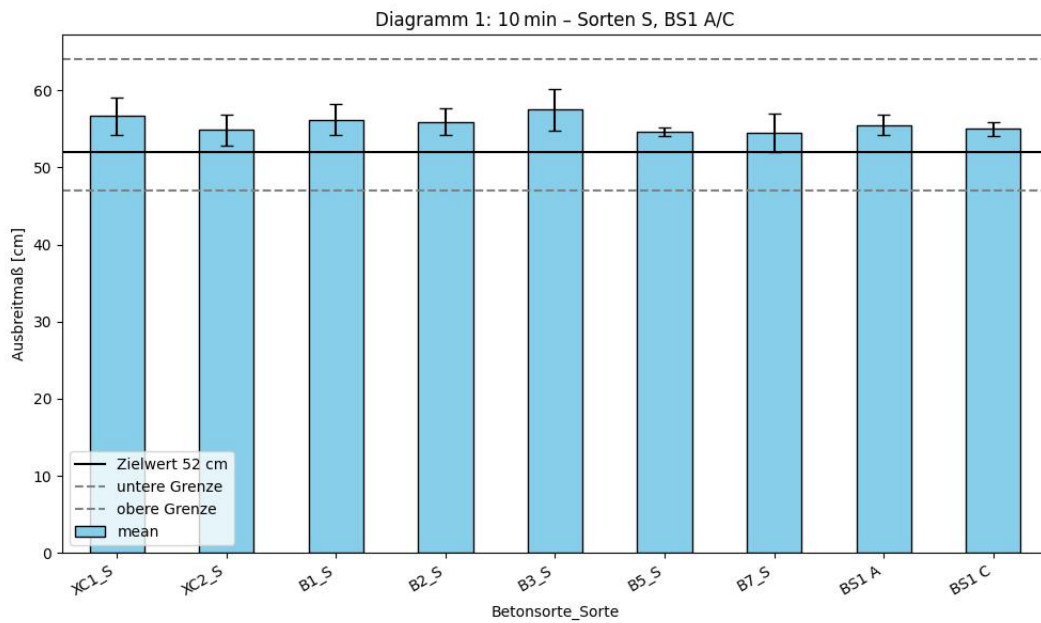


Abbildung 2.4.1: Ausbreitmaß mit Standardabweichung der S-Betone 10 Minuten nach Wasserzugabe

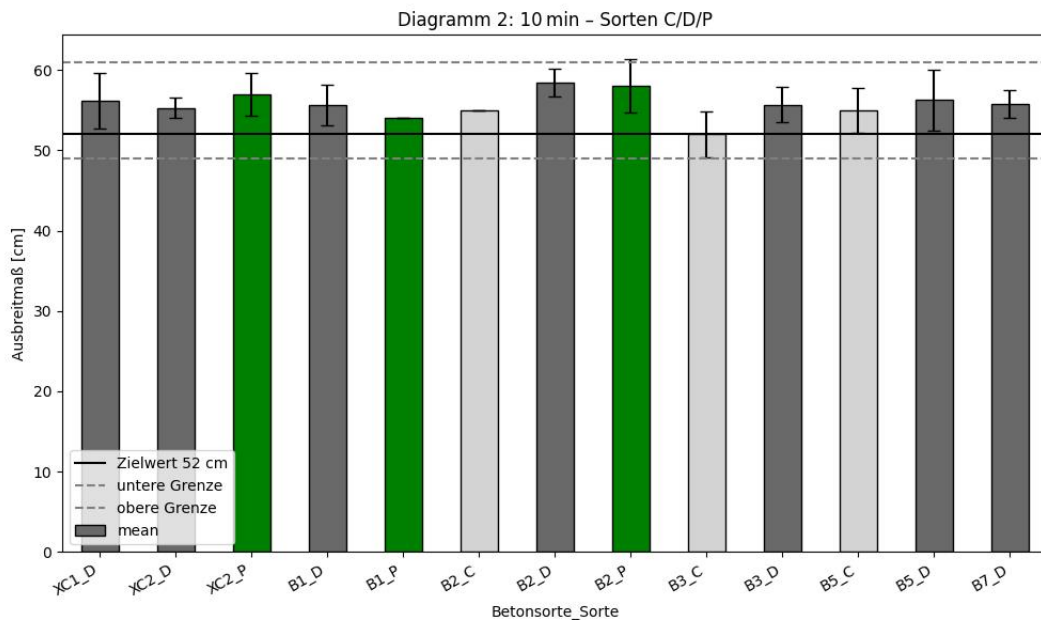


Abbildung 2.4.2: Ausbreitmaß mit Standardabweichung der P- und D bzw. C-Betone 10 Minuten nach Wasserzugabe

Die Figure 6 zeigt die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung nach 28 Tagen für verschiedene Betonvarianten. Die Standardbetone erreichen in nahezu allen Expositionsklassen höhere Druckfestigkeiten als die zugehörigen deskriptiven Grenzfallmischungen. Dies deutet darauf hin, dass die im Werk hergestellten Standardbetone eine höhere Leistungsfähigkeit aufweisen als die normseitig zulässigen

Minimalanforderungen. Außerdem treten in einer Betonsortenvariante fallweise verschiedene Festigkeitsklassen auf, die zwischen C 16/20 und C 30/37 liegen können.

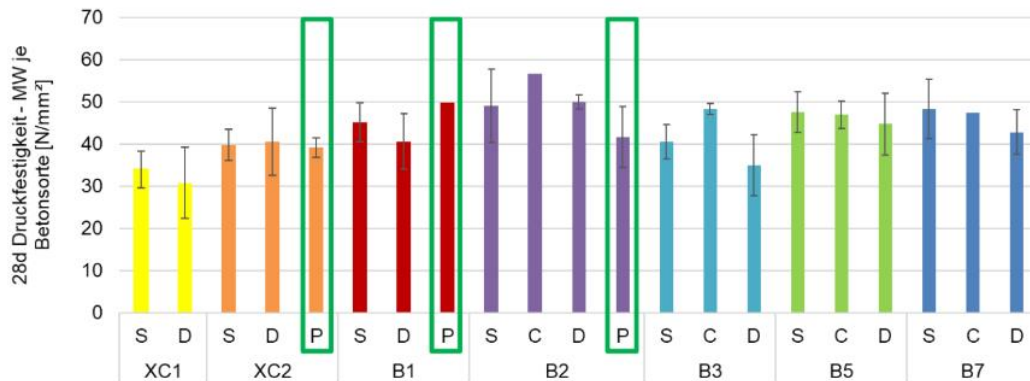


Abbildung 2.4.3: S = deskriptiver Standard, D = deskriptiver Grenzfall, C = deskriptiver Grenzfall mit CEM I im Bindemittel, P = Performance Beton

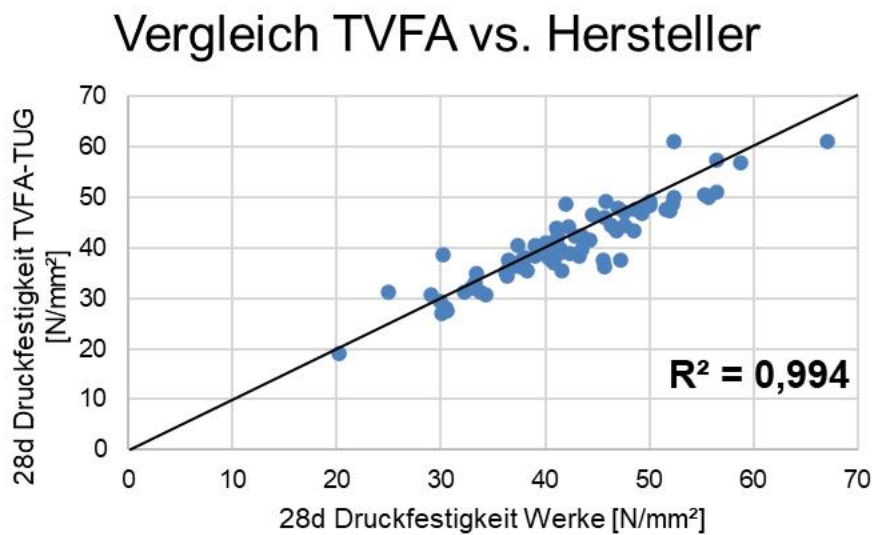


Abbildung 2.4.4: Vergleich der 28d Druckfestigkeiten geprüft von der TVFA/TU Graz und von den Herstellern

Zur Überprüfung bzw. Validierung der Prüfergebnisse wurde ein Vergleich zwischen den an der TU Graz ermittelten 28d Druckfestigkeiten und den Herstellerangaben durchgeführt, der eine sehr hohe Übereinstimmung zeigt ($R^2 = 0,99$, Figure 7). Ein Bland-Altman-Plot, ein etabliertes Verfahren zur Beurteilung der Übereinstimmung zweier Messmethoden, zeigte, dass keine relevante systematische Abweichung vorliegt.

Beschleunigte Karbonatisierung (EN 12390-12)

Die in der Figure 8 dargestellten Ergebnisse zeigen die mittleren Karbonatisierungsgeschwindigkeiten für alle untersuchten Kombinationen zusammengefasst nach Betonsorten (3% CO₂, 20°C, 57% r.F.). Die teilweise großen Standardabweichungen verdeutlichen, dass innerhalb einer Sorte eine erhebliche Streuung auftreten kann, was auf große Unterschiede zwischen deskriptiven Standardbetonen und Grenzfällen zurückzuführen ist wie die vorläufigen Detailergebnisse zeigen (hier nicht dargestellt).

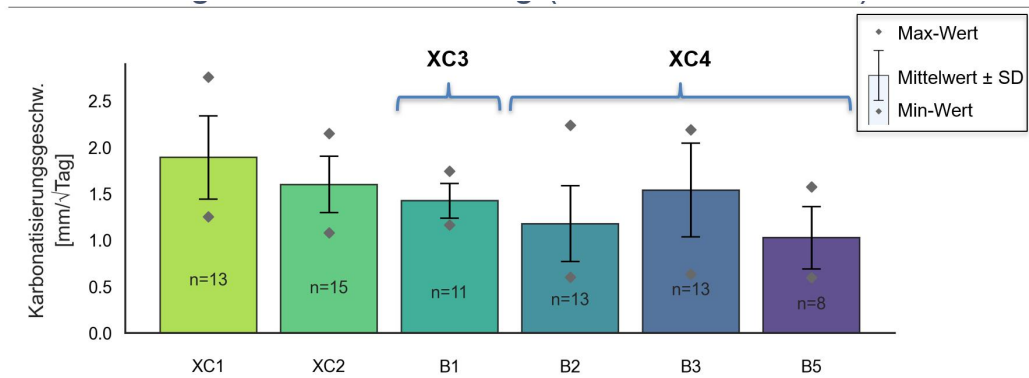


Abbildung 2.4.5: Mittlere beschleunigte Karbonatisierungsgeschwindigkeit nach EN 12390-12 (n=Anzahl der Proben)

Natürliche Karbonatisierung (EN 12390-10)

Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit wird auch nach EN 12390-10 unter atmosphärischen Bedingungen für 3 Jahre geprüft. Figure 9 zeigt, dass die tatsächlich gemessene CO₂-Konzentration (im Mittel etwa 500 ppm) den in Normen angenommenen Wert der atmosphärischen CO₂-Konzentration von 400 ppm übersteigt. In Abbildung 8 wird der Zusammenhang zwischen den Karbonatisierungsgeschwindigkeiten, ermittelt aus den 2 Prüfverfahren nach EN 12390-12 und EN 12390-10 dargestellt.

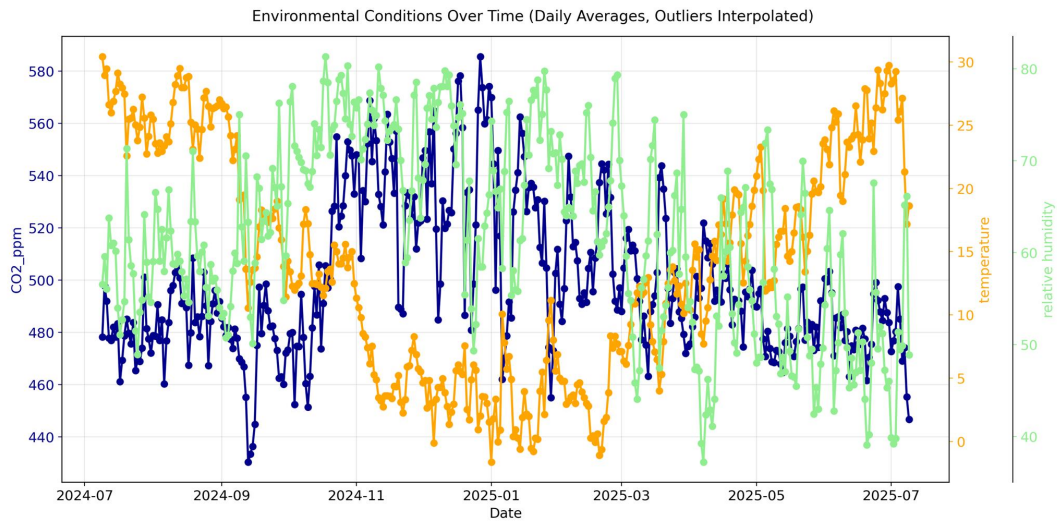


Abbildung 2.4.6: Messdatenreihe am Standort Außenlagerung für die Prüfung nach EN 12390-10..

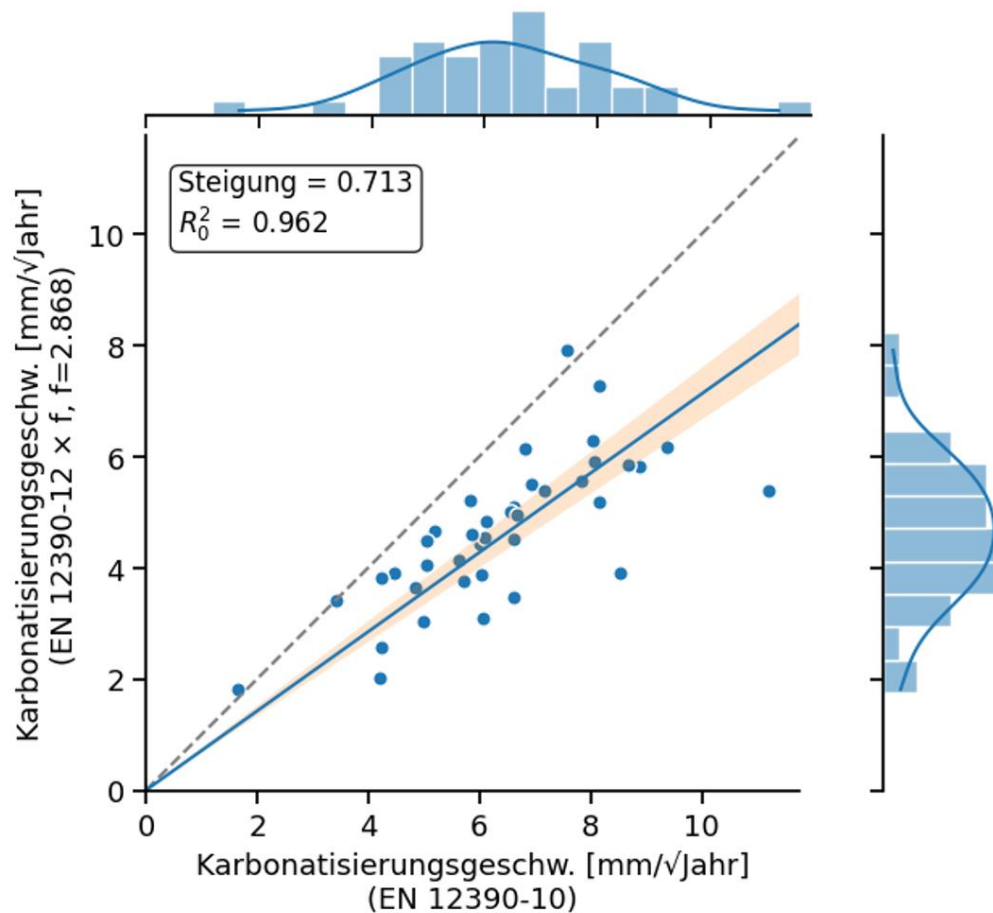


Abbildung 2.4.7: Korrelation von natürlicher und beschleunigter Karbonatisierung

Das Korrelieren der Karbonatisierungsgeschwindigkeiten erfordert eine Umrechnung von beschleunigten auf natürliche Bedingungen über den Faktor f , Figure 10 mit $[f = a \cdot b \cdot c$ mit $(a = \sqrt{365/1} \approx 19,1$, $b =$ Umrechnung der CO_2 -Konzentration von 3 % beschleunigt auf atmosphärische Bedingungen, $b = \sqrt{(0,04/3)} \approx 0,11$, entspricht 400 ppm, $c =$ betonspezifischer Skalierungsfaktor (z.B. CO_2 -Sättigung, Bindemittel)]. Die Punktwolke in der Abbildung 8 zeigt die einzelnen Betonmischungen. Die Regressionslinie durch den Ursprung besitzt eine Steigung von 0,71, was bedeutet, dass die Werte aus EN 12390-12 im Mittel rund 30 % kleiner sind als die Werte aus EN 12390-10. Das Bestimmtheitsmaß $R_0^2 = 0,96$ belegt eine enge lineare Korrelation zwischen den beiden Verfahren und zeigt, dass die beschleunigten Ergebnisse – nach Anwendung des Faktors f – gut geeignet sind, das Verhalten unter natürlichen Bedingungen vorherzusagen. Die systematische Abweichung von der 45°-Linie weist auf Einflüsse hin, die durch den Faktor f nicht vollständig abgebildet werden, wie die reale CO_2 -Konzentration (~500 ppm), Feuchtebedingungen und materialspezifische Eigenschaften, was zukünftig zu untersuchen ist.

XD - Korrosion ausgelöst durch Chloride (Norm und Langzeitlagerung)

Untersuchungen hinsichtlich der Korrosion ausgelöst durch Chloride wurde gemäß EN 12390-11 (einseitig gerichtete Diffusion) durchgeführt (Prüfdauer 90 Tage, zusätzlich Alterungseffekt nach 1 und 2 Jahren Auslagerung in einer 3% igen NaCl-Lösung), siehe Figure 11. Werte größer als $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ sind rot markiert, da sie als stark durchlässig für Chloridionen und damit ungünstig für die Dauerhaftigkeit gelten (Al Fuhaid 2023). Werte von $1 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ lassen sich als normal bis mäßig günstig einordnen, Werte $< 1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ als besonders dauerhaft.

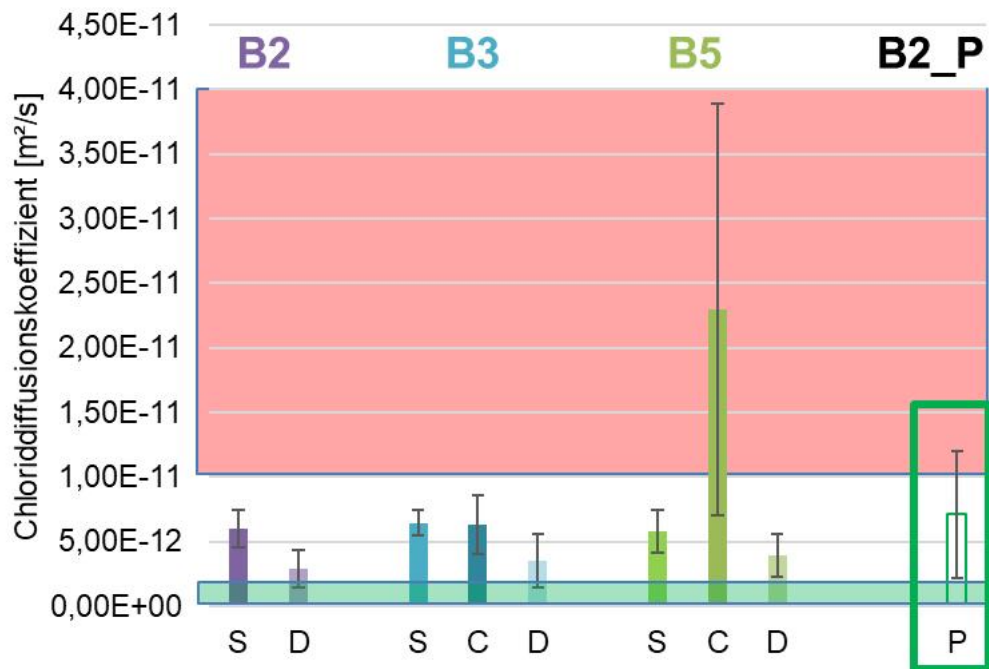


Abbildung 2.4.8: Ergebnisse der Bestimmung des Chloridwiderstandes der Betone

Auffällig sind die deskriptiven Grenzfälle C Betone mit CEM I, die eine deutlich größere Streuung der Werte aufweisen und im ungünstigen Bereich liegen. Die Performance-Betone liegen im normalen Bereich.

Aufbauend auf den Ergebnissen des FFG-Projektes „Untersuchungen zum Korrosionsschutz der Stahlbewehrung von zusatzstoffoptimierten Betonen“ (Projektnummer FO864288) wird der Zusammenhang zwischen dem Chloriddiffusionskoeffizienten und Rezepturparametern im laufenden Projekt überprüft. Figure 12 zeigt die enge Beziehung zwischen dem Diffusionskoeffizienten und dem Parameter $W/B(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2)$, bemerkenswerterweise unabhängig von der Art der verwendeten Gesteinskörnung. Die Bindemittelzusammensetzung (Anteile an Al_2O_3 und SiO_2) ist also von zentraler Bedeutung.

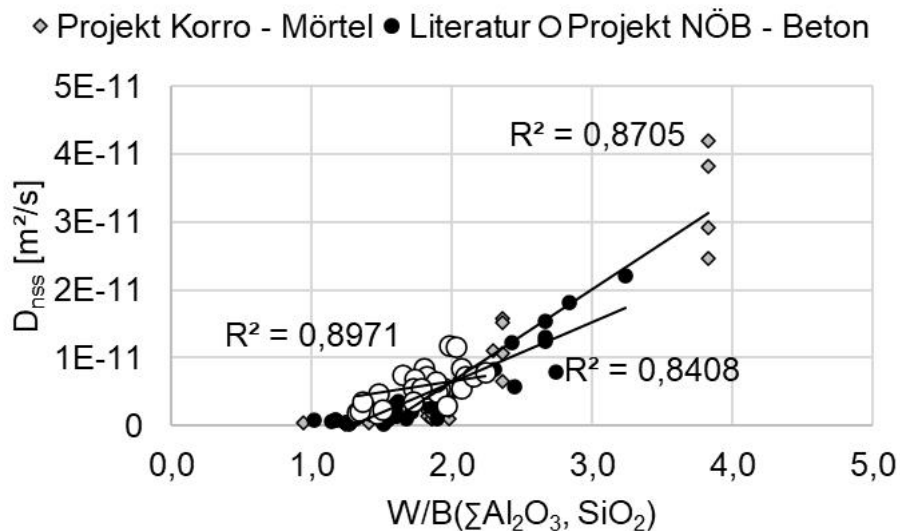


Abbildung 2.4.9: Gegenüberstellung von Ergebnissen aus Projekten Korrosionsschutz, NÖB und weiterer Literatur

Die noch andauernde Lagerung der Proben bis 3 Jahre in Chloridlösung dient dazu, Alterungseffekte (Chlorid-„Ageing“) zu berücksichtigen. Durch längere Expositionszeiten kann die Abnahme des effektiven Diffusionskoeffizienten infolge fortschreitender Hydratation und Sekundärreaktionen erfasst werden. Damit lassen sich realistischere Prognosen über die Restnutzungsdauer von Betonen unter Chloridbelastung erstellen.

XD – Ringversuch

Der durchgeführte Ringversuch zur Anwendung der EN 12390-11:2020 zeigte, dass alle mitarbeitenden Prüfstellen die Prüfung einheitlich und kompetent durchführen (Abbildung 11 und). Zudem liefern die Ergebnisse wertvolle Daten, um die Versuchsstreuungen zu kennen und mit ihnen die gesamten Ergebnisse in weiterer Folge statistisch gut auswerten und einordnen zu können.

Teilnehmer	Cs [M%]	z-Score [-]	Teilnehmer	Dnss [m²/s]	z-Score [-]
2	0,49	0,71	2	4,64E-12	-0,53
4	0,51	0,95	4	5,75E-12	0,20
1	0,41	-0,63	1	6,63E-12	0,78
3	0,38	-1,03	3	4,76E-12	-0,45
Mittelwert [M%]	0,45		Mittelwert [m²/s]	5,45E-12	
Stabw.s [M%]	0,07		Stabw.s [m²/s]	1,51E-12	
Variationskoeffizient [%]	14,8		Variationskoeffizient [%]	27,7	

Abbildung 2.4.10

Figure : Übersicht über Prüf- und Ringversuchsergebnisse für für Cs und D_{nss}

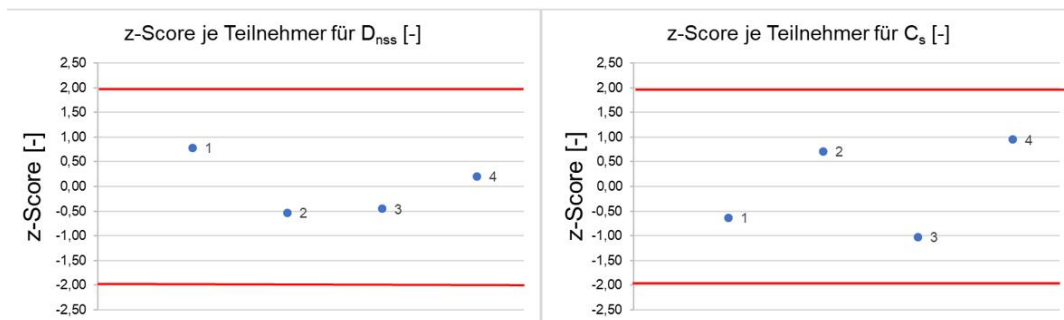


Abbildung 2.4.11: Z-Score je Teilnehmer für Dnss (links) und für Cs (rechts), kritischer Wert |z-score| = 2,0 eingehalten

Frosttauprüfung: Streuung der Prüfergebnisse XF aufgrund Variabilität der Nullbetone

Im Rahmen einer Teilstudie wurde untersucht, inwieweit die Variabilität der Nullbetone die Ergebnisse der Frost-Tau-Prüfungen nach den Expositionsclassen XF1, XF2 und XF3 beeinflusst. Da die Grenzwerte in Österreich jeweils relativ zum Nullbeton definiert sind (z. B. „Nullbeton + 200 g/m²“ im Plattenprüfverfahren XF2), hat die Streuung der Referenzproben unmittelbare Auswirkungen auf die Beurteilung der Dauerhaftigkeit. Hierfür wurde durch die Prüfstellen (T1, T2, T3), jeweils der „hauseigene“ Nullbeton hergestellt wie in der jeweiligen Norm definiert.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der drei Verfahren ist in Figure 15 ersichtlich. Im Würfelprüfverfahren XF1 sowie im Plattenprüfverfahren XF2, die beide auf der Ermittlung von Massenverlusten beruhen, weisen die Nullbetone eine hohe Variabilität auf. Demgegenüber liefert das XF3-Balkenprüfverfahren, das auf der Schalllaufzeitmessung basiert, vergleichsweise konstante Werte.

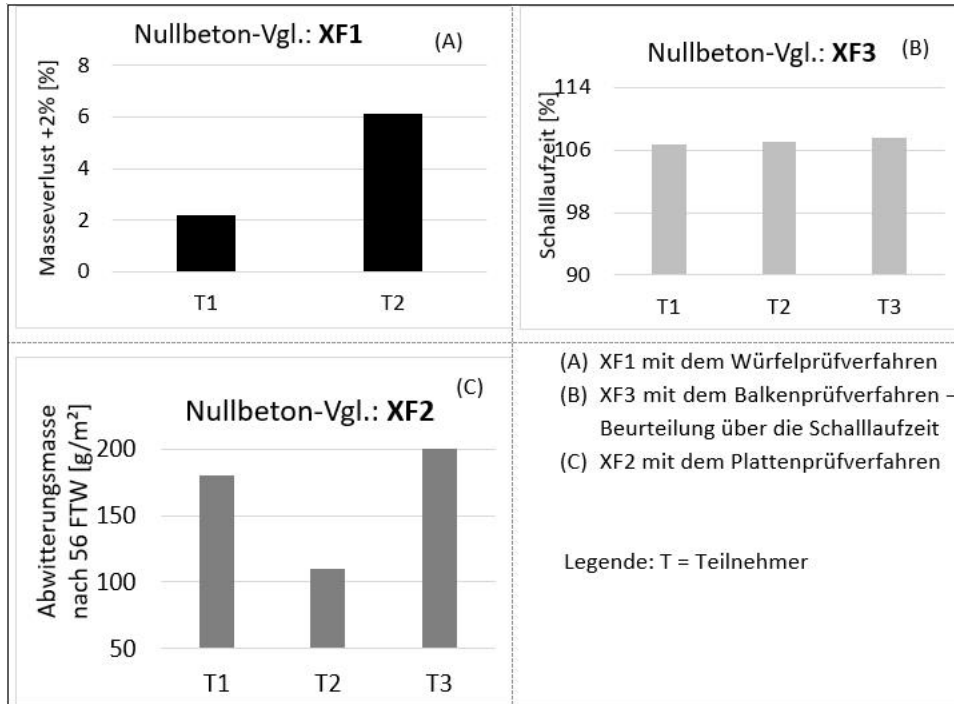


Abbildung 2.4.12: Vergleich der Nullbetone, die durch 2 bzw. 3 Teilnehmer im Projekt hergestellt und geprüft wurden

Im weiteren Projektverlauf (3. FJ) soll der Einfluss der Nullbetonvariabilität systematisch evaluiert werden.

XAL - lösender Angriff durch Essigsäure

Das Prüfverfahren zur Beurteilung des Widerstands gegen lösenden Angriff XA1L gem. der ÖNORM B 4710-3 wurde in punkto Handhabbarkeit und Streuung evaluiert. Die Prüfbetone müssen einen geringeren Massenverlust aufweisen als der Referenzbeton + 10%.

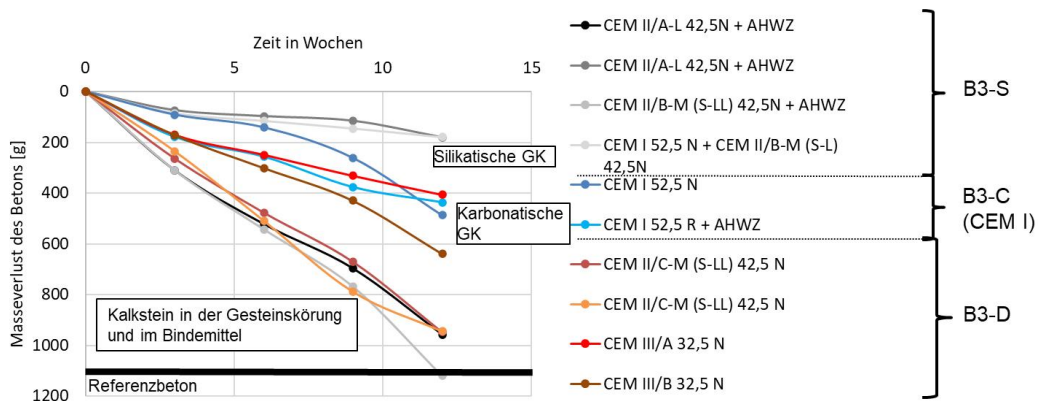


Abbildung 2.4.13: Ergebnisse des Massenverlust je Mix durch den lösenden Angriff der B3 Betone (S=Standard, C=deskriptiver Grenzfallbeton mit CEM I und D=deskriptiver Grenzfall. Die schwarze Linie markiert die Grenze durch einen Referenzbeton.

Figure 16 stellt die Massenverluste über einen Zeitraum von 15 Wochen dar. Neben der Wahl des Bindemittels (CEM I, CEM II, CEM III) hat vor allem die Art der verwendeten Gesteinskörnung (silikatisch vs. karbonatisch) einen entscheidenden Einfluss. Rezepturen mit silikatischer Gesteinskörnung zeigen die geringsten Massenverluste (Kurven: mittel und hellgrau, sowie dunkelblau). Die Betonsorten mit karbonatischen Gesteinskörnungen hingegen (z. B. Kalkstein, Dolomit) weisen deutlich höhere

Massenverluste auf (Kurven: rot, hellblau und dunkelbraun). Der stärkste Massenverlust ist bei den Proben zu verzeichnen, die karbonatische Gesteinskörnung und einen höheren karbonatischen Anteil im Bindemittel in Form von Kalkstein besitzen (in Abbildung 13 die unteren vier Kurven, wobei Rezeptur B3-S mit CEM II/B-M (S-LL) 42,5N und AHWZ als nicht bestanden einzustufen ist). Es wird klar: Nicht nur die Auswahl des Bindemittels, sondern Anteil und Art der Gesteinskörnung bestimmen maßgeblich die Dauerhaftigkeit der Betone gegenüber chemischem Angriff XA1L.

2.5. performancebasierte & klimaverträgl. Betontechnologie

Fertigstellungsgrad: 100%

Im Berichtszeitraum wurden die geplanten tasks planmäßig durchgeführt wie nachfolgend beschrieben.

Intern. Regelungen & Nachweise

In diesem task wurden laufend Ergänzungen zum bereits im ersten Jahr recherchierten Stand gemacht, insbesondere was die Entwicklung der europäischen Regelungen betrifft, siehe Abbildung 12 in Kapitel 2.6 (EN 1992-1-1, EN 206, CEN/TR on ERC-Concrete – working draft).

Ausgangsstoffe

Jedes Herstellerwerk sendet Rückstellproben der verwendeten Ausgangsstoffe an die TU Graz, zudem kommen Stoffe, die für die Entwicklung von Performance Betonen verwendet werden (Zusatzstoffe Typ I und II sowie alternative Gesteinskörnungen). Die feinen Ausgangsstoffe werden hinsichtlich ihrer spezifischen Oberfläche als Blaine-Wert analysiert und chemisch mittels Röntgenfluoreszenz (XRF) sowie mineralogisch mittels Röntgendiffraktometrie (XRD). Gesteinskörnungen werden hinsichtlich Dichte, Wasseraufnahme und Sieblinie geprüft.

Performance-basierter Mischungsentwurf

5 Hersteller bzw. die TU Graz selbst entwickelten 7 bzw. 5 „Perfomance-Betone“ („P-Betone“). P-Betone sollen eine mind. gleichwertige Performance zu deskriptiven Betonen nach ÖN B 4710-1 aufweisen, ohne die Vorgaben an Mindestbindemittelgehalt und max. W/B-Wert einhalten zu müssen. Diese Vorgaben der Zusammensetzung werden durch Nachweise am Festbeton, insbesondere Dauerhaftigkeitsnachweise, ersetzt. Die folgende Figure 17 gibt einen Überblick und zeigt, welche Eigenschaften erzielt werden konnten.

Hersteller	Mix	Verarbeitb arkeit 10 min	Verarbeitb arkeit >60 min	Festigkeit	XW – WUB [mm]	XC – Kacc [mm/ \sqrt{t}]	GWP – ÖBV CO2 Klassen
N01	20240610-XC2-P	✓	✓	C25/30 ✓	22	1.7	GW _R 5
N03	20240610-XC2-P	✓	✓	C25/30 ✓	26	1.6	GW _R 4
N06	20240611-XC2-P	✓	✓	C25/30 ✓	9	1.8	GW _R 5
N08	20240708-B2-P	✓	✓	C25/30 ✓	20	1.4	GW _R 3
NTU	20240612-B2-P	✓	✗ (F45 ✓)	C25/30 ✓	16	0.7	GW _R 5
N01	20241008-B2-P	✓	✓	C25/30 ✓	17	-	GW _R 4
NTU	20241007-B2-P	✓	✓	C25/30 ✓	18	1.6	GW _R 6
NTU	20241009-B2-P	✓	✓	C25/30 ^{~(56d)} ✓	27	2.2	GW _R 7*
N03	20250212-B2-P	✓	✓	C30/37 ✓	19	1.5	GW _R 4
N05		✓	✓	C25/30 ✓	-	-	-
NTU	20250602-B5-P	✓	✓	C25/30 ✓	-	-	GW _R 6
NTU	20250604-B2-P	✓	✓	C20/25 ✓	-	-	GW _R 6

* Zugabe von technischem Kohlenstoff
(GWP mit -2500 kg CO₂-äq/t angerechnet)

Abbildung 2.5.1: Performance der P-Betone und deren Einordnung in CO2-Klassen nach ÖBV Merkblatt 03/2025

Die entwickelten Performancebetonvarianten weisen eine entsprechend gute Verarbeitbarkeit (Konsistenzklasse F52 mit 1 Ausnahme), erreichen mind. die Festigkeit der äquivalenten Standardbetone

und zeigen in den beschleunigten Dauerhaftigkeitsprüfungen bisher zufriedenstellende Ergebnisse (siehe auch Kapitel 2.4 Betonprüfung), allerdings sind noch nicht alle Prüfungen abgeschlossen und müssen im 3. Forschungsjahr beurteilt werden. In Bezug auf das GWP ist eine deutliche Reduktion im Vgl. zur Referenz nach ÖBV-Merkblatt für CO₂-Klassen zu erkennen.

CO₂eq-Klassifizierung

In Figure 18 ist die Einordnung der im Projekt NÖB hergestellten P-Betone und aller weiteren Betonsortenvarianten im Verhältnis zu den Referenzbetonen des ÖBV-Merkblatts für CO₂-Klassen und zu laut ÖN B 4710-1 möglichen GWP's (GWP Spannweite) von theoretischen Rezepten nach deskriptiver ÖNORM B 4710-1 („Extreme“: CEM I versus CEM III, max. W/B) dargestellt, welche in einer Masterarbeit an der TU Graz ermittelt wurden [Sandra Glatz, 2024].

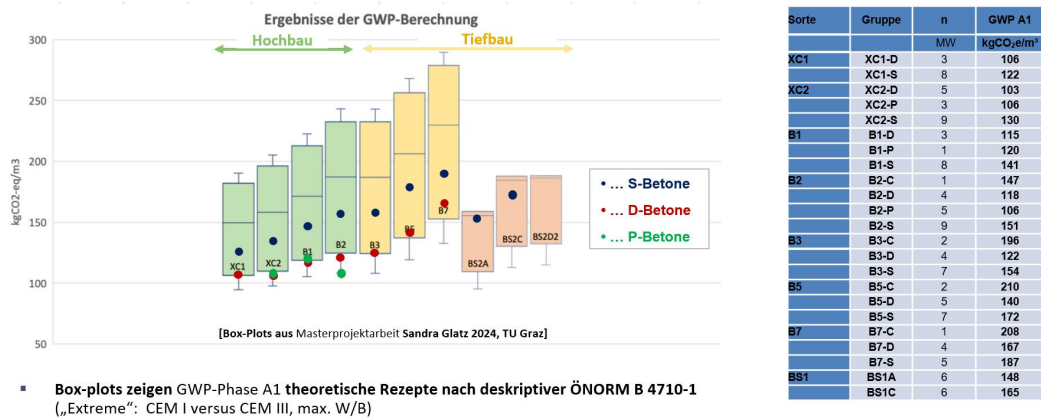


Abbildung 2.5.2: Einordnung der im Projekt NÖB hergestellten Betone im Vgl. der Spannweite aller potenziellen (theoretischen) Zusammensetzungen nach ÖNORM B 4710-3, berechnet für die Lebenszyklusphase A1 mittels GVTB-Betonrechner sowie Liste der Mittelwerte des GWP der Betonsortenvarianten

Es zeigt sich (i) eine riesige GWP-Spanne der normgemäßen Rezepte und (ii), dass sowohl D-Betone (deskriptive Normgrenzfälle mit CEM II/C und CEM III) sowie P-Betone im untersten Bereich aller Werte liegen (Unterkante der Box = 25. Perzentil bzw. 25 % der Werte liegen darunter), während Standardbetone in der Box unterhalb des Medians liegen (Untere Boxhälfte = zweites Viertel der Daten bzw. 25–50 %).

In Figure 19 wird die Korrelation der erhobenen GWP Daten (berechnet mit dem GWP Rechner des GVTB für die Lebenszyklusphase A1) und der mittleren Druckfestigkeit im alter von 28d dargestellt – es besteht keine signifikante Korrelation!

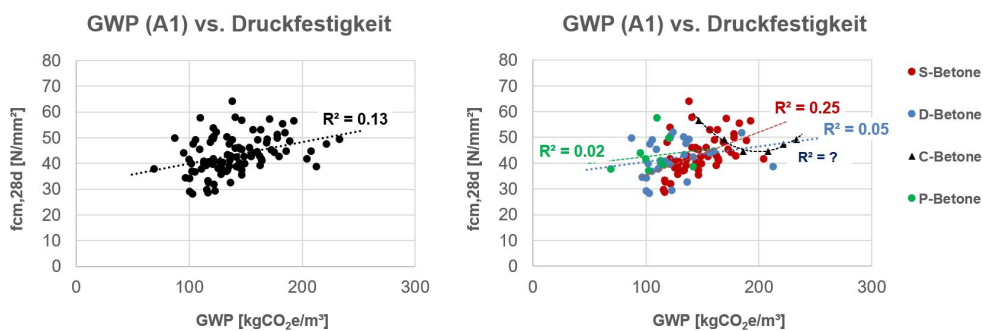


Abbildung 2.5.3: Korrelation von GWP und Druckfestigkeit

Das bedeutet, eine von den Druckfestigkeiten unabhängige Definition von eigenständigen GWP Klassen wäre vorteilhaft für die Leistungsbeschreibung von Betonsorten, wie von Juhart et al. 2023 im Betonkalender bereits vorgeschlagen. Leider verwendet das ÖBV-Merkblatt für CO₂-Klassen 03/2025 eine Klassifizierung, die von der Einordnung in Druckfestigkeitsklassen abhängt.

Performance-basierte Lebensdauerbemessung

Deklarierte Materialkennwerte der Dauerhaftigkeitseigenschaften sind für eine Performance-basierte Bemessung auf Basis von Lebensdauerprognosemodellen erforderlich (z.B. nach Model Code for service life design, Gehlen et al., BAW Merkblatt Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken 2019). Zudem braucht man solche Kennwerte, um die Betonüberdeckung (c_{min,dur}) der Bewehrung aus den in Regelwerken abgebildeten Formeln und Nomogrammen auf vereinfachte Weise zu bestimmen bei bestimmter Exposition und Nutzungsdauer (50 bzw. 100 Jahre gemäß (EN 1992-1-1:2015 bzw. Entwurf EN 1992-1-1: 2021). Solche Kennwerte sind insbesondere die Karbonatisierungsgeschwindigkeit unter standardisierten natürlichen Bedingungen Kn bzw. deren Einordnung in XRC Klassen in [mm/√a] gemäß Figure 20 und Figure 21, der Chloriddiffusionswiderstand unter standardisierten Bedingungen D_{nss} sowie der Alterungsfaktor („ageing factor“), der bei letzterem eine Rolle spielt (vgl. Figure 22).

Materialkennwerte für Lebensdauerbemessung (ERC)

XRC [mm/√Jahre]
= deklarierter Materialkennwert
„exposure resistance“

→ **Prognose Karbonatisierungstiefe**

Table 4.1 — XRC Class characteristic value 90% fractile

XRC class	Characteristic value 90% fractile ^a mm/√year
XRC 0,5	0,6
XRC 1	1,2
XRC 2	2,4
XRC 3	3,6
XRC 4	4,8
XRC 5	6,0
XRC 6	7,2
XRC 7	8,4
XRC 9	10,8
XRC 12	14,4

24 February 2025 Working Draft - CEN/TR on ERC-Concrete

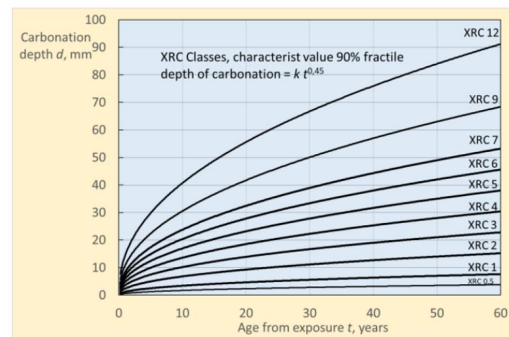


Abbildung 2.5.4: potenzielle Materialkennwerte für die Lebensdauerbemessung (Karbonatisierungswiderstand)

Mindestbetondeckung laut
gültiger ÖNORM EN 1992-1: 2015

→ **Mindestbetondeckung** laut working draft
CEN/TR on ERC Concrete, 24.02.2025

Tabelle 4.4N — Mindestbetondeckung, $c_{min,dur}$, Anforderungen im Rahmen der Dauerhaftigkeit von Betonstahl nach EN 10080

Anforderungsklasse	Dauerhaftigkeitsanforderung für $c_{min,dur}$ (mm)						
	Expositionsklasse nach Tabelle 4.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

50 Jahre
100 Jahre

Table 6.3 (NDP) — Minimum concrete cover $c_{min,dur}$ for carbon reinforcing steel — Carbonation

ERC	Exposure class (carbonation)							
	XC1		XC2		XC3		XC4	
	50	100	50	100	50	100	50	100
XRC 0,5	10	10	10	10	10	10	10	10
XRC 1	10	10	10	10	10	15	10	15
XRC 2	10	15	10	15	15	25	15	25
XRC 3	10	15	15	20	20	30	20	30
XRC 4	10	20	15	25	25	35	25	40
XRC 5	15	25	20	30	25	45	30	45
XRC 6	15	25	25	35	35	55	40	55
XRC 7	15	30	25	40	40	60	45	60

24 February 2025 Working Draft - CEN/TR on ERC-Concrete

Die oft angewandten Werte für XC3 und XC4 für 50 bzw. 100 Jahre Nutzungsdauer wurden farblich markiert

Abbildung 2.5.5: Mindestbetondeckungen und Zusammenhang zu Expositionsklassen nach aktueller und potenziell zukünftiger Regelung

XD - Bsp.: Bestimmung der Restnutzungsdauer durch Nomogramme

Am Beispiel von Proben mit $w/b_{ges}=0,6$ aus dem Projekt Korrosionsschutz nach BAW Merkblatt

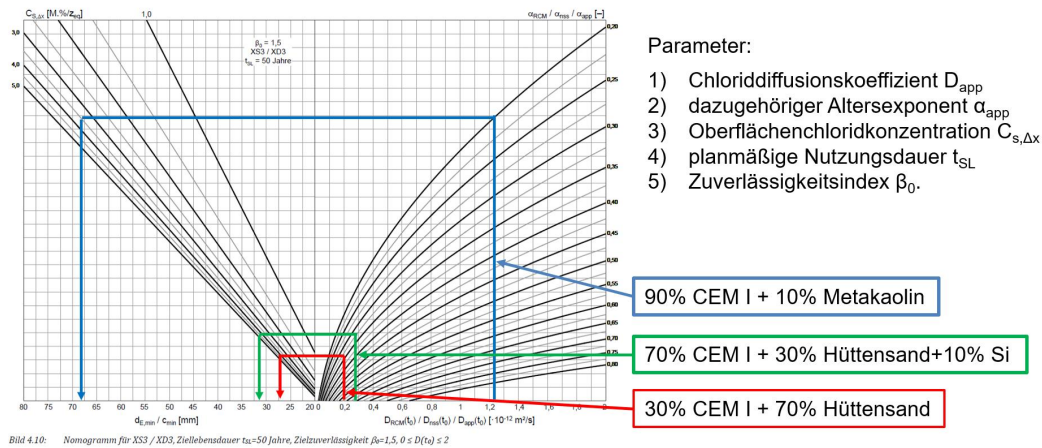


Abbildung 2.5.6: Prinzipielle Vorgangsweise zur Bestimmung der Restnutzungsdauer auf Basis ermittelter Chloridwiderstandskennwerte durch Nomogramme

Vorläufige Zwischenergebnisse zur Bestimmung der genannten Kennwerte wurden ermittelt (siehe Kapitel 2.6 Empfehlungen für die Praxis).

Neue „low CO₂“ bzw. „0“-Betone

Im Rahmen der Entwicklung performancebasierter Betone wurde auch versucht, Rezepturen mit nahezu Null CO₂-Emissionsäquivalenten („net-0“ embodied emissions) zu entwickeln und deren gesamthafte Performance zu evaluieren. Minimal konnte bisher die CO₂-Reduktionsklasse GWR7 gemäß ÖBV Merkblatt für CO₂-Klassen erreicht werden, d.h. -70% CO₂ Reduktion gegenüber dem Referenzwert, siehe auch Tabelle 4.

2.6. Empfehlungen für die Praxis

Fertigstellungsgrad: 100%

Das Arbeitspaket wurde planmäßig bearbeitet. Die Erarbeitung statistisch abgesicherter, klassenbildender Kennwerte für bestimmte Dauerhaftigkeitseigenschaften ist das Gesamtziel des Projektes und wird erst nach der vierjährigen Projektlaufzeit vollständig abgeschlossen werden können. Besonderer Fokus liegt dabei auf den Expositionsklassen für Karbonatisierung (XC) und Chlorideindringung (XD).

Nach den ersten zwei Projektjahren können deshalb noch keine abschließenden Empfehlungen für die Praxis abgegeben werden, sondern es wurde ein vorläufiger Zwischenstand gemäß Figure 23 (Karbonatisierung) aufgezeigt und in der Branche diskutiert (im meeting der Projektpartner am 20.08.2025).

Natürliche-stand*. Karbonatisierung → Klassenbildung?

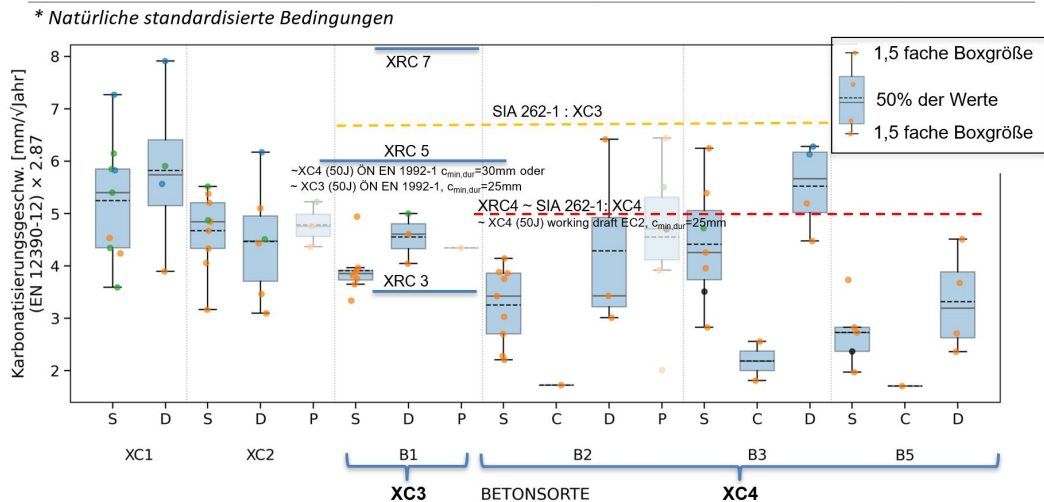


Abbildung 2.6.1: Diskussionsgrundlage für die Ermittlung von Materialkennwerten des Karbonatisierungswiderstandes (=Karbonatisierungsgeschwindigkeit umgerechnet auf natürliche standardisierte Bedingungen) und deren Einordnung in (i) potenzielle zukünftige exposure resistance classes (XRC nach working draft 24/02/2025 des CEN/TR on ERC-concrete) oder (ii) Grenzwerte der Schweizer Norm (SIA 262-1) sowie (iii) Exposi

Methodische Ansätze für die Bestimmung der Restlebensdauer bei Chloridbeanspruchung sind im fib Model Code for Service Life Design (2010) und in der Norm EN 12390-11 beschrieben, wobei im Projekt laufend die die Bestimmung des Chloriddiffuionskoeffizienten D_{nss} und seines Alterungsexponenten und die Übertragung auf Praxisbedingungen untersucht wird.

Das Arbeitspaket wurde im Berichtszeitraum zu 100% abgeschlossen, in der Gesamtlaufzeit zu 25%.

3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten

Es kam zu keinen wesentlichen Änderungen der Kosten.

4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit

Die Nachhaltigkeitseffekte sind im zweiten Forschungsjahr von geplanten 4 Jahren schwer abzuschätzen bzw. nicht endgültig anzugeben. Das Projekt wird von Teilnehmern und dem erweiterten Kreis der Beteiligten in der Branche sehr engagiert betrieben, was u.a. sich dadurch zeigt, dass einige Performancebetone mit dem Ziel der CO₂-Reduktktion eingebracht wurden und offenbar großes Interesse an der Transformation zur nachhaltigen Herstellung CO₂-reduzierter Betone besteht.

Das Projekt trägt darüber jedenfalls dazu bei, die Dekarbonisierung im Betonbau voranzureiben und Klima- und Energieziele Österreichs und der EU zu erreichen. Zudem wird die bewährte Dauerhaftigkeit der Betonbauweise auch für neue Betone sichergestellt

Quellen

- Aza16** A probabilistic assessment of the influence of age factor on the service life of concretes with limestone cement/GGBS binders, 2016, Azadeh Attari, Ciaran: Construction and Building Materials, 488-494, 13
- Bun19** BAWMerckblatt: Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC), 2019, : Karlsruhe, 12
- Chr24** Dauerhaftigkeit von Beton - Konzepte heute und morgen insbesondere am Beispiel der Carbonatisierung; Teil 2, 2024, Christoph Müller, Sebastian: beton, 304-311, 11

Dan23	Daniel Ribeiro, Nilson: Proposal for classification of concrete quality based on accelerated carbonation tests, Case Studies in Construction Materials, 2023, 8
EN118	EN 12390-10:2018 Prüfung von Festbeton: Teil 10: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes von Beton bei atmosphärischer Konzentration von Kohlendioxid, 2018, Austrian Standards International, 10
ÖNO21	ÖNORM EN 206:2021 - Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, 2021, Austrian Standards International, 6
ÖNO23	Beton — Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität, 01.01.2023, Wien, : ÖN B 4710-3:2023, 1
prE23	prEN 1992-1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1 1: Allgemeine Regeln und Regeln für Hochbauten, Brücken und Ingenieurbauwerke, 2023, Austrian Standards International, 9
prE231	prEN 206-100 Exposure resistance classes Draft 15, 2023, European Committee for Standardization, 4
Prü20	EN 12390-12 Prüfung von Festbeton Teil 12: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes von Beton — Beschleunigtes Karbonatisierungsverfahren, 2020, Austrian Standards International, 14
SIA13	SIA 262/1 Betonbau – Ergänzende Festlegungen, 2013, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), 3
SIA16	SIA 262/1 Betonbau – Ergänzende Festlegungen Korrigend C1, 2016, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), 5
SNE13	SN EN 206:2013, 2013, 2
Ste21	Grundlagen für den Gleichwertigkeitsnachweis von Konzeptbeton; Teil 2, 2021, 334-339, Stefan Krispel, Gerald: beton, 7