

Untersuchungen zur langfristigen Karbonatisierung unter unbewitterten Aussenlagerungsbedingungen (Stevenson-Screen)

Projektdauer: 2014-2020/2025

Projektteam: Dr. Fritz Hunkeler und Dr. Stefanie von Greve-Dierfeld, TFB AG, Wildegg

1. Ausgangslage

In den letzten 15 Jahren hat sich der Zement- und Betonmarkt erheblich verändert. Es werden laufend neue Zemente mit einem immer tieferen Klinkergehalt auf den Markt gebracht. Zunehmend kommen auch Recyclingbetone oder neuartige Zusatzstoffe zum Einsatz. Mit diesen Veränderungen ist es schwierig geworden, den Karbonatisierungswiderstand von Betonen zu beurteilen. Aussagekräftige Vergleiche mit Betonen mit dem Zement CEM I sind nicht mehr möglich.

So sind die heute vorhandenen Modellgrundlagen zur Karbonatisierungs- und Korrosionszeit für die Prognose der Nutzungsdauer von Stahlbetonbauten, die ein Risiko von Korrosionsschäden infolge Karbonatisierung des Betons aufweisen, nicht ausreichend. Insbesondere fehlen gesicherte Erkenntnisse zum langfristigen Karbonatisierungsverlauf unter natürlichen Bedingungen (Karbonatisierungsrate, Zeitexponent), zum Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf den Karbonatisierungsverlauf und die Korrosionsgeschwindigkeit wie auch verlässliche Angaben zum CO₂-Gehalt z.B. in Strassentunnels. Diese Themen werden im Rahmen des ASTRA-Projektes AGB 2013/005 bearbeitet.

2. Zielsetzung

Das von der cemsuisse finanzierte Teilprojekt 3 des ASTRA-Projektes AGB 2013/005 befasst sich mit dem langfristigen Karbonatisierungsverlauf unter unbewitterten Aussenlagerungsbedingungen (Stevenson-Screen). Daraus soll u.a. der effektive Zeitexponent b abgeleitet werden können.

3. Vorgehen

Für die Untersuchungen wurden im Sommer 2015 Prismen aus acht verschiedenen Betonen hergestellt (**Tabelle 1**). Diese Prismen werden seither an drei Standorten (Wildegg, Horw und Visp) in speziellen Behältern, den so genannten Stevenson-Screens, gelagert. Die Konstruktion dieser Behälter (**Abb. 1**) ermöglicht eine unbewitterte Lagerung (XC3). In periodischen Abständen wird die Karbonatisierungstiefe an abgespaltenen Scheiben der Prismen bestimmt.

Der CO₂-Gehalt der Luft (inkl. Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Druck,) wird in Wildegg kontinuierlich gemessen. In Horw und Visp wurden diese Messungen über je 1 Jahr durchgeführt.

Tabelle 1 Übersicht über die untersuchten Betone. Maximalkorn: 32 mm.

Beton	Zementart	Zementgehalt, kg/m ³	w/z-Wert
Z1-1	CEM II/B-M (T-LL)	280	0.60
Z1-2	CEM II/B-M (T-LL)	300	0.50
Z1-3	CEM II/B-M (T-LL)	320	0.45
Z2-1	CEM III/B	280	0.60
Z2-2	CEM III/B	300	0.50
Z2-3	CEM III/B	320	0.45
Beton	Zementart	Zementgehalt, kg/m ³	w/z-Wert
Z3-1	CEM I	300	0.55
Z4-1	CEM II/B-LL	300	0.50



Abb. 1:
Stevenson-Screen in Horw mit Messkasten für die unbewitterte Auslagerung von Betonprüfkörpern.

4. Bisherige Erkenntnisse (Zwischenergebnisse)

Die **Abb. 2** (links) zeigt beispielhaft, dass bei wenig dichten Betonen Z1-1 die Karbonatisierung auch über den Zeitraum von 3 Jahren dem \sqrt{t} -Gesetz folgt. Bei den dichteren Betonen Z1-2 und Z1-3 verlangsamt sich die Karbonatisierung erheblich mehr als gemäss dem \sqrt{t} -Gesetz zu erwarten wäre (**Abb. 2**, rechts). Die **Abb. 3** zeigt die Auswertung der Betone Z1-1 und Z1-3 für die drei Auslagerungsorte. Die Karbonatisierungskoeffizienten von Visp liegen deutlich über jenen von Wildegg und Horw. Die Werte für den Zeitexponenten der drei Auslagerungsorte sind unterschiedlich. Visp weist die höchsten, Horw die tiefsten Werte auf.

Die **Abb. 4** zeigt die Abhängigkeit des Karbonatisierungskoeffizienten (normiert auf den Normwert, links) und den Zeitexponenten b (rechts) von der relativen Luftfeuchtigkeit. Die gute Übereinstimmung der Karbonatisierungskoeffizienten in Wildegg ist wohl auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Berechnung des Korrekturfaktors auf den Ergebnissen der Auslagerung in Wildegg basiert. Die hohe prozentuale Abweichung vom Normwert in Visp ist auf die tiefere relative Luftfeuchtigkeit zurückzuführen. Um auf eine einfache Art eine bessere Übereinstimmung zu erhalten, müsste der Korrekturfaktor c von 1.36 auf ca. 1.70 (1.36×1.25) angehoben werden. Bedingungen wie in Visp (Wallis) sind auch im Tessin sowie in einigen wenigen anderen Gegenden der Schweiz zu erwarten.

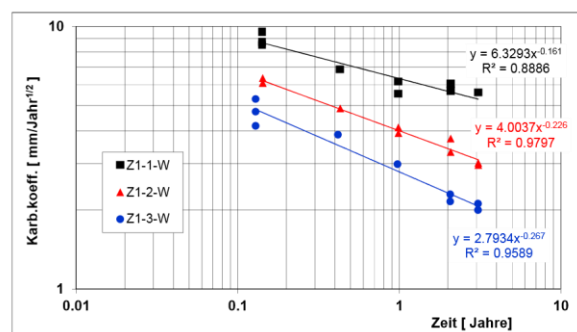
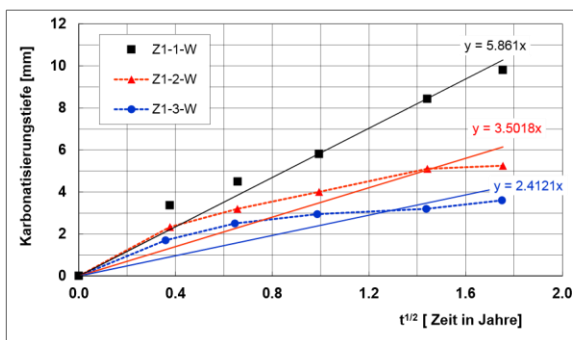


Abb. 2: Karbonatisierungsverlauf beim Beton Z1 im Stevenson-Screen in Wildegg mit Verbindungslinien zwischen den Einzelpunkten und Regressionsgeraden bei den Betonen Z1- 2W und Z1-3W (oben) und Auswertung mit einem zeitabhängigen Karbonatisierungskoeffizient beim Beton Z1 (unten).

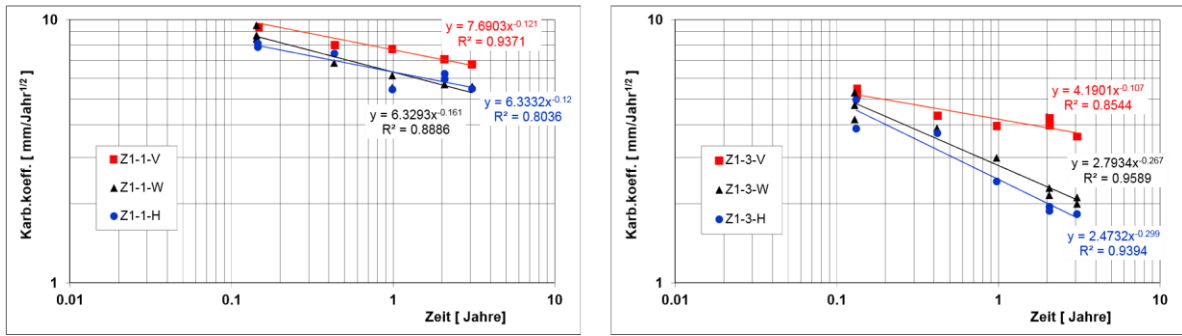


Abb. 3: Vergleich des zeitlichen Verlaufs des Karbonatisierungskoeffizienten für die Betone 1-1 und 1-3 in Wildegg, Horw und Visp.

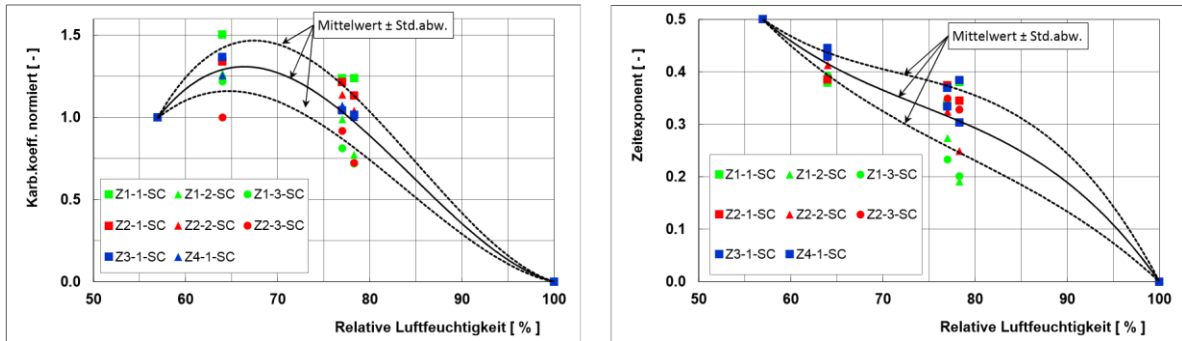


Abb. 4: Abhängigkeit des normierten Karbonatisierungskoeffizienten (links) und des Zeitexponenten (rechts) bei der Auslagerung in den Stevenson-Screens in Wildegg, Horw und Visp von der relativen Luftfeuchtigkeit. Referenz: Karbonatisierungskoeffizient aus der Normprüfung (vt-Gesetz).

Zwei Betonsorten wurden mit drei verschiedenen w/z-Werten hergestellt. Dies ermöglicht den Einfluss des w/z-Wertes auf die Karbonatisierung zu betrachten. Aus **Abb. 5** mit den Ergebnissen der Normprüfungen und der Auslagerung im Stevenson-Screen geht hervor, dass die Abhängigkeit des Karbonatisierungskoeffizienten der Betone Z1 und Z2 vom w/z-Wert für alle Auslagerungsorte ähnlich ist. Die Trendlinien für Wildegg und Horw liegen sehr nahe beieinander, währenddem jene für Visp höher liegen. Dies ist auch aus **Abb. 5** (unten) ersichtlich, wobei die Werte für den Beton Z4 (CEM II/B-LL) mit dem tieferen w/z-Wert deutlich höher sind als jene für den Beton Z3 (CEM I). Auffallend ist die geringere Steigung der Geraden für die Normprüfung. Dies bedeutet, dass die Normprüfung bei weniger dichten Betonen evtl. zu niedrige Werte ergibt. Zurückgeführt werden könnte dies auf eine für solche Betone zu hohe Beschleunigung bzw. auf einen zu wenig genauen Korrekturfaktor c.

Die Abhängigkeit des Zeitexponenten von der relativen Luftfeuchtigkeit wird deutlich von der Zementart beeinflusst (**Abb. 5**). Dies ist i.W. auf das unterschiedliche Sorptionsverhalten der Betone zurückzuführen.

Aus den Ergebnissen kann gefolgert werden, dass mit abnehmendem w/z-Wert und zunehmender relativen Luftfeuchtigkeit nicht nur der Karbonatisierungskoeffizient, sondern auch der Zeitexponent b abnimmt. Langfristig wirkt sich dies sehr erheblich auf den Karbonatisierungsverlauf aus. Mit dem mit der Normprüfung gemäss SIA 262/1 ermittelten Karbonatisierungskoeffizienten und einem Zeitexponenten $b = 0.50$ kann der zeitliche Verlauf der Karbonatisierung in Visp gut nachgerechnet werden. Dies gilt zumindest für die Auslagerung in den ersten drei Jahren. Die Nachrechnung der Karbonatisierung mit den Laborwerten versagt aber in Wildegg und Horw, d.h. für das schweizerische Mittelland. Der Grund dafür ist der tiefere b-Wert.

Die nächsten Messungen folgen 2020 und 2025.

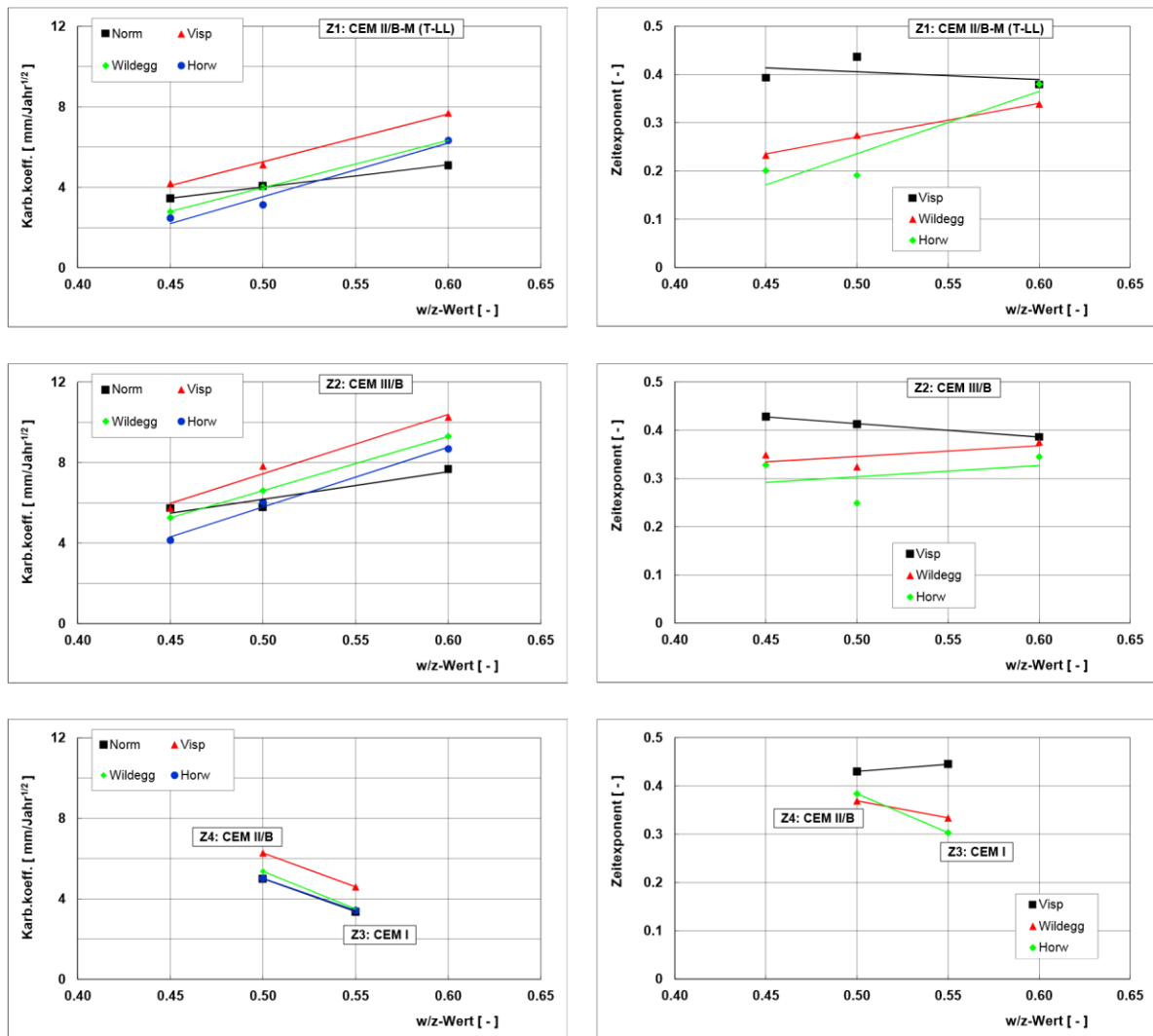


Abb. 5 Karbonatisierungskoeffizient (links) und Zeitexponent (rechts) aus der Normprüfung (vtGesetz, $b = 0.50$) und der Auslagerungen in Wildegg, Horw und Visp (Auswertung mit einem zeitabhängigen Karbonatisierungskoeffizienten) in Abhängigkeit vom w/z-Wert.

5. Erkenntnisse

Aus den Untersuchungen ergaben sich folgende wesentliche Erkenntnisse:

- Der Karbonatisierungskoeffizient nimmt bei den im Rahmen des ASTRA-Projektes durchgeführten Laborversuchen mit zunehmender rel. Luftfeuchtigkeit stark ab. Dies konnte auch bei der unbewitterten Aussenlagerung (Expositionsklasse XC3) der Betone in den Stevenson-Screens in Wildegg, Horw und Visp beobachtet werden. Die gewählten Auslagerungsorte können als repräsentativ für das eher feuchte Mittellandklima und das eher trockene Klima im Wallis, Tessin und Engadin betrachtet werden. Im trockenen Wallis karbonatisieren die Betone wesentlich schneller als im schweizerischen Mittelland.
- Der zeitliche Verlauf der Karbonatisierung kann bei höheren Luftfeuchtigkeiten nicht mehr mit dem vt-Gesetz beschrieben werden. Mit zunehmender relativer Luftfeuchtigkeit wird der Zeitexponent b kleiner. Dies gilt auch für Betone mit einem höheren Karbonatisierungswiderstand.
- Die Abweichung vom vt-Gesetz kann mit einem zeitabhängigen Karbonatisierungskoeffizienten beschrieben und der Wert nach 1 Jahr als Kennwert für einen bestimmten Beton verwendet werden. Der bisherige Zeitexponent b von 0.40 kann für das Mittelland belassen werden. Für das trockene Klima im Wallis (und im Tessin) müsste er auf 0.45 erhöht werden.
- Die in der Laborprüfung ermittelten Karbonatisierungskoeffizienten stimmen gut mit den Werten nach der 3-jährigen Auslagerung in Wildegg und Horw überein. Die entsprechenden Werte für Visp werden deutlich unterschätzt. Für die deutlich höhere Karbonatisierungsgeschwindigkeit im Wallis gibt es mehrere Ursachen. Die Grenzwerte für die trockeneren Landesteile müssen überprüft werden.

- e) Die Nachrechnung mit dem Gehlen- bzw. Duracrete-Modell, wie es vermutlich in den revidierten Eurocode einfließen wird, zeigt, dass dieses für trockene Verhältnisse besser geeignet ist als für die Verhältnisse wie sie im Schweizerischen Mittelland häufig sind. Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit für feuchte Verhältnisse wird stark überschätzt und führt zu unnötig hohen Anforderungen.
- f) Das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Vorgehen für Laboruntersuchungen ist gut geeignet, um den Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit bei verschiedenen Betonen zu untersuchen. Innerhalb von weniger als einem Jahr lassen sich Langzeitprognosen machen.

6. Bedeutung für die Praxis

Die Ergebnisse dieses Projektes haben zu einem verbesserten Verständnis der Karbonatisierung von Betonen geführt. Sie ermöglichen, dass die Modellierung der Karbonatisierung einen wesentlichen Schritt vorwärts gebracht wird. Dabei könnte die Abhängigkeit des Zeitexponenten b von der relativen Luftfeuchtigkeit direkt in das Modell einfließen. Somit wäre es dann überflüssig, die Schlagregenwahrscheinlichkeit, wie sie im heute beim weit verbreiteten Duracrete-Modell enthalten ist, zu berücksichtigen.

Die Erkenntnisse erlauben zudem, die Zusammensetzung von Zementen und Betonen auf eine zuverlässige und rasche Art zu optimieren. Innerhalb von weniger als einem Jahr können Ergebnisse produziert werden, mit denen eine zuverlässige Langzeitprognose erstellt werden kann.