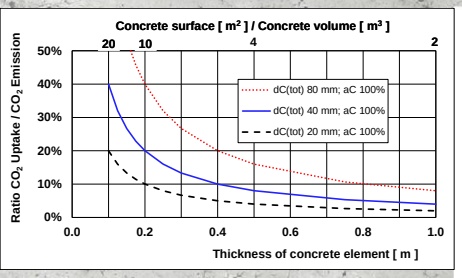


Berechnung der CO_2-Aufnahme während der Nutzungsdauer zementgebundener Baustoffe

Dr. Andreas Leemann
EMPA Dübendorf
Abteilung Beton / Bauchemie

Dr. Fritz Hunkeler
TFB AG Wildegg

Dr. Heiner Widmer
cemsuisse
Leiter Umwelt, Technik & Wissenschaft

März 2018

Berechnung der CO_2-Aufnahme während der Nutzungsdauer zementgebundener Baustoffe

Dr. Andreas Leemann, EMPA Dübendorf. Abteilung Beton / Bauchemie
Dr. Fritz Hunkeler, TFB AG Wildegg
Dr. Heiner Widmer, cemsuisse, Leiter Umwelt, Technik & Wissenschaft

Einführung

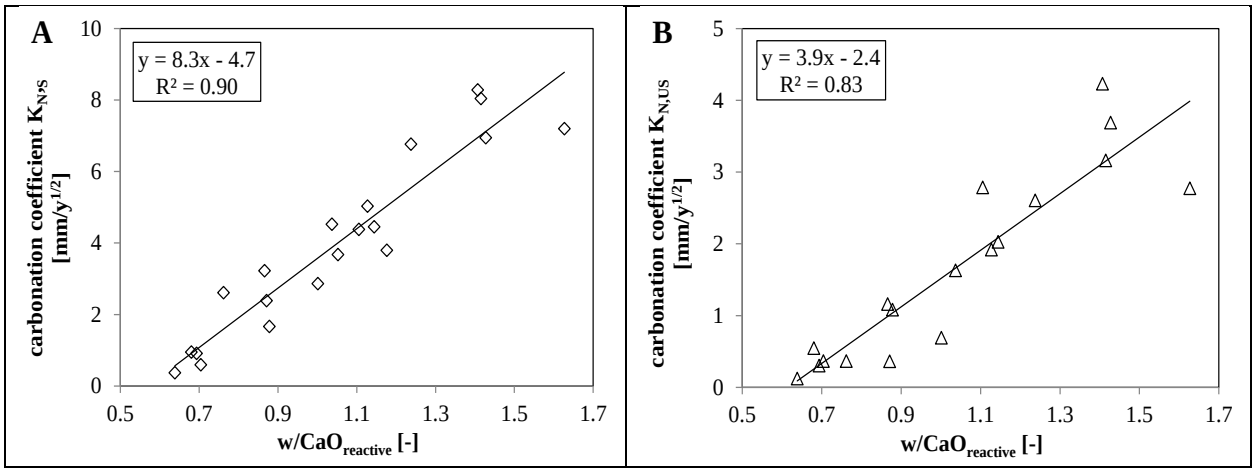
Der Karbonatisierungswiderstand von Mörtel und Beton wird bestimmt durch die CO_2-Bindungskapazität, ausgedrückt als Wasser-zu CaO - Verhältnis (w/CaO). Dieser Parameter kann einfach berechnet werden, wenn die Zusammensetzung des Zementes bekannt ist. Die Berechnung des Karbonatisierungskoeffizienten (K_N) und der Karbonatisierungstiefe (d_c) unter zu Hilfenahme des Verhältnis w/CaO scheint daher eine einfachere und nachvollziehbare Methode zur Berechnung der CO_2-Aufnahme von Mörtel und Beton als eine Herleitung über das Konzept der Festigkeitsklassen.

Der Wasser/CaO-Wert von Mörtel und Beton ist einfach zu berechnen, wenn die Zusammensetzung des Zementes bekannt ist. Daher erscheint es geeigneter, die Rückbindung von CO_2 über den Karbonatisierungskoeffezienten K_N und die Karbonatisierungstiefe d_c zu berechnen, statt über das Modell der Festigkeitsklassen, wie dies im informativen Anhang BB der EN 16757 exemplarisch dargestellt ist.

Diese einfachere Berechnungsmethode der CO_2-Aufnahme während der Lebensdauer von Beton wurde bereits in der Vernehmlassung der prEN 16757 von der Schweizer Spiegelgruppe vorgeschlagen, aus Zeitgründen in der finalen Version der CEN TC 229 WG 5 aber nicht berücksichtigt, unter anderem mit dem Argument, dass nationalen Methoden in den einzelnen Ländern in nationalen Anhängen geregelt werden können.

Die Rolle von CO_2-Konzentration, relativer Feuchtigkeit und CO_2 - Pufferkapazität

Der wissenschaftliche Hintergrund des hier präsentierten Berechnungsansatzes findet sich in Leemann & Nygaard [2014], Leemann et al. [2015] und Leemann & Moro [2017]. Mörtel- und Betonmischungen wurden hierbei jeweils in einem beschleunigten und einem natürlichen Karbonatisierungsverfahren (mit 1% und 4% CO_2 bei 57% relativer Luftfeuchtigkeit) untersucht. Die Karbonatisierungkoeffezienten bei 1% und 4% CO_2 korrelieren linear mit dem Verhältnis $w/CaO_{reactiv}$ [Leemann et al. 2015, Leemann & Moro 2017] unter unbewitterten und bewitterten Bedingungen. Darüber hinaus zeigen die untersuchten Mörtel- und Betonmischungen bei natürliche Karbonatisierung unter natürlichen Bedingungen eine gute Korrelation mit dem verhaltnis w/CaO, siehe Grafik 1 (R2 = 0.90 respektive 0.83) [Leemann & Moro 2017].



Grafik 1: Karbonatisierungskoeffezient $K_{N,S}$ unter unbewitterten (A) und Karbonatisierungskoeffezient $K_{N,US}$ unter bewitterten (B) Bedingungen als Funktion der $w/CaO_{reactive}$. [aus: Leemann & Moro 2017].

Basierend auf der Wechselbeziehung des Karbonatisierungskoeffezienten K_N mit $w/CaO_{reactiv}$ können folgende empirische Gleichungen für unbewitterte (s) und bewitterte (us) Bedingungen angenommen werden (Leemann & Hunkeler, 2016):

$K_{N,S}$ = c·(8.3·w/CaO - 4.7)	c = 1.00	Gleichung 1
$K_{N,US}$ = c·(8.3·w/CaO - 4.7)	c = 0.47	Gleichung 2

Durchschnittstemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Niederschlag am Untersuchungsort lagen bei 11.4°C, 78% respektive bei 1200 l/m². Der Anstieg der linearen Regression hängt im Wesentlichen vom Feuchtigkeitsgrad des Betons ab. Der gewählte Wert c entspricht den durchschnittlichen klimatischen Verhältnisse in der Schweiz und kann für abweichende Feuchtegrade angepasst werden.

Vereinfachte Berechnung der CO_2-Aufnahme von Beton infolge Karbonatisierung

Als Berechnungsbeispiele wurden die in den EPD (cemsuisse, 2016) beschriebenen Schweizer Durchschnittszemente verwendet (CEM I, CEM II/A, CEM II/B, CH-Durchschnitt). Für die Modellrechnung wurden Betonzusammensetzungen typisch für den Hausbau in der Schweizer zu Grunde gelegt. Dieser Betontyp vertritt ca. 35% des in der Schweiz produzierten Betons. Bei Betonzusammensetzungen für bestimmte Anwendungen, können die Input-Parameter (wie der Zementtyp und der W/Z-Wert), die zu anderen Werten des w/CaO – Verhältnisses führen, im Einzelfall entsprechend angepasst werden.

			CEM I	CEM II/A	CEM II/B	CH-total	Kommentar	Quelle / Berechnung
Karbonatisierungsgrad (abs)	a_c	abs	0.50	0.50	0.50	0.50	a	Thiery et al., 2013
Wasser / Zement-Wert	W/Z	abs	0.60	0.60	0.60	0.60	b	CH-typischer Wert
Zementgehalt	Z	kg/m3	280	280	280	280	b	CH-typischer Wert
Wassergehalt	W	kg/m3	168	168	168	168	b	CH-typischer Wert
Anteil reaktives CaO im Zement	$CaO_{reactive}$	abs	0.61	0.53	0.44	0.53	c	Leemann et al, 2015
Gehalt an reaktivem CaO im Zement	$CaO_{reactive}$	kg/m3	171	147	123	149	c	$CaO_{reactiv}$* Z (berechnet)
Wasser / CaO - Wert	$w/CaO_{reactive}$	abs	0.98	1.14	1.36	1.13	c	W / $CaO_{reactiv}$ (berechnet)
Karbonatisierungskoeffizient unbewittert	$K_{N,S}$	abs	3.464	4.768	6.628	4.661	d	1 * (8.3 * $w/CaO_{reactive}$) - 4.7)
Karbonatisierungsfaktor bewittert	$K_{N,US}$	abs	1.628	2.241	3.115	2.191	d	0.47 * (8.3 * $w/CaO_{reactive}$) - 4.7)
Referenz-Lebensdauer	RSL	y	100	100	100	100	d	gemäss EN 16757
Karbonatisierungstiefe unbewittert (Lebensdauer in Jahre, mit Zeitgesetz	d_c (s)	mm	34.6	47.7	66.3	46.6	d	$K_{N,S}$*Lebensdauer^0.5
Karbonatisierungstiefe ungeschüzt (Lebensdauer in Jahre, mit Zeitgeset	d_c (us)	mm	16.3	22.4	31.2	21.9	d	$K_{N,US}$*Lebensdauer^0.5
Karbonatisierungstiefe gesamt	dc (tot)	mm	50.9	70.1	97.4	68.5	d	d_c (unbewittert) + d_c (bewittert)
Dicke des Betonschicht	x	mm	200	200	200	200	e	bezogen auf 1 m³ Beton
geogene CO_2-Emission Zementherstellung (EPD 2015)	E1	$kgCO_2$/kg cement	0.474	0.413	0.357	0.422	h	EPD cemsuisse, 2015
Anteil CO_2-Rückbindung von der geogenen Emission Herstellung	**U/E**	**abs**	**0.127**	**0.175**	**0.244**	**0.171**	**g**	**d_c * a_c / x**
CO_2-Rückbindung pro m³ Beton	U	kg/m³	16.9	20.3	24.3	20.2	i	C * U/E * E1
Betondichte		t/m³	2.4	2.4	2.4	2.4	i	
kg CO_2- Rückbindung pro t Beton		**$kgCO_2$/t concrete**	**7.0**	**8.4**	**10.1**	**8.4**	**i**	

Tabelle 1: Rechenbeispiel mit dem vorgestellten Berechnungsmodell für die Rückbindungen von CO_2 an Beton während der Nutzungsphase des Gebäudes, bei der Verwendung verschiedener Schweizer Zementsorten (Durchschnittsmischungen gemäss EPD 2015)

Anmerkungen zu den Berechnungsbeispielen, die sich auf Hunkeler & Leeman (2016) beziehen:

a. Der empirische Wert für den Karbonatisierungsgrad (a_c), der sich auf das karbonatisierte CaO in Beton bezieht (1 = vollständig karbonatisiert, 0 = kein CaO karbonatisiert), wurde mit 0.5 angenommen (Thiery et al, 2013)
b. Das Wasser/Zement-Verhältnis (w/c), der Zementgehalt (c) sowie der Wassergehalt entsprechen typischen Werten, wie sie in Schweizer Gebäuden eingesetzt werden.
c. Der Gehalt von $CaO_{reactive}$ in Schweizer Zementsorten wurde von Leeman (2015) bestimmt. Nur während Zementhydratation reagierendes CaO wurde hierbei berücksichtigt.
d. Karbonatisierungsfaktoren unbewittert ($K_{N,S}$) und bewittert ($K_{N,US}$) wurden anhand der Gleichungen 1 und 2 berechnet. Im Modell-Rechenbeispiel wurden bewitterte und unbewitterte Fläche im Verhältnis 1:1 angenommen. Dieses Verhältnis muss entsprechend der Exposition im Einzelfall angepasst werden. Das Ergebnis ist die Summe d_c (tot).
e. In Bezug auf Korrosion ist das Verhältnis zwischen Expositionsklasse, Tiefe der Betondecke und Karbonatisierungswiderstand wichtig. Dies wurde in dieser Publikation nicht weiter ausgearbeitet zwecks Fokus auf CO_2-Aufnahme.
f. Gemäss EN 16757 wurde die Berechnungen anhand einer Nutzungsdauer von 100 Jahren durchgeführt.
g. Die Dicke des Betons wurde mit 200 mm angenommen was ein typischer Wert bei Schweizer Gebäuden ist). Dieser Wert bezieht sich auf 1 m³ Beton. Diese Annahme erlaubt es jene Oberfläche zu berücksichtigen, die dem Karbonatisierungsprozess ausgesetzt ist.

h. Das Verhältnis von CO_2-Aufnahme zur ursprünglichen geogenen Emission (U/E) wird mithilfe der Karbonatisierungstiefe (d_c(tot)), dem Grad der Karbonatisierung (a_c) sowie der Dicke der Betonschicht (x) berechnet. Für die dargestellten Beispiele liegt der berechnete Wert bei 12.7% bis 24.4% für Schweizer Standard-Zementsorten (siehe dazu auch Grafik 2).
i. Die geogene CO_2-Emission (kgCO_2/kg cement), wurde in den EPD für Schweizer Zemente gemäss SN EN 15804 veröffentlicht (www.cemsuisse.ch).
j. Die gesamthafte CO_2-Rückbindung an Beton in der Nutzungsphase wird in kgCO_2/m^3 oder kgCO_2/t angegeben.

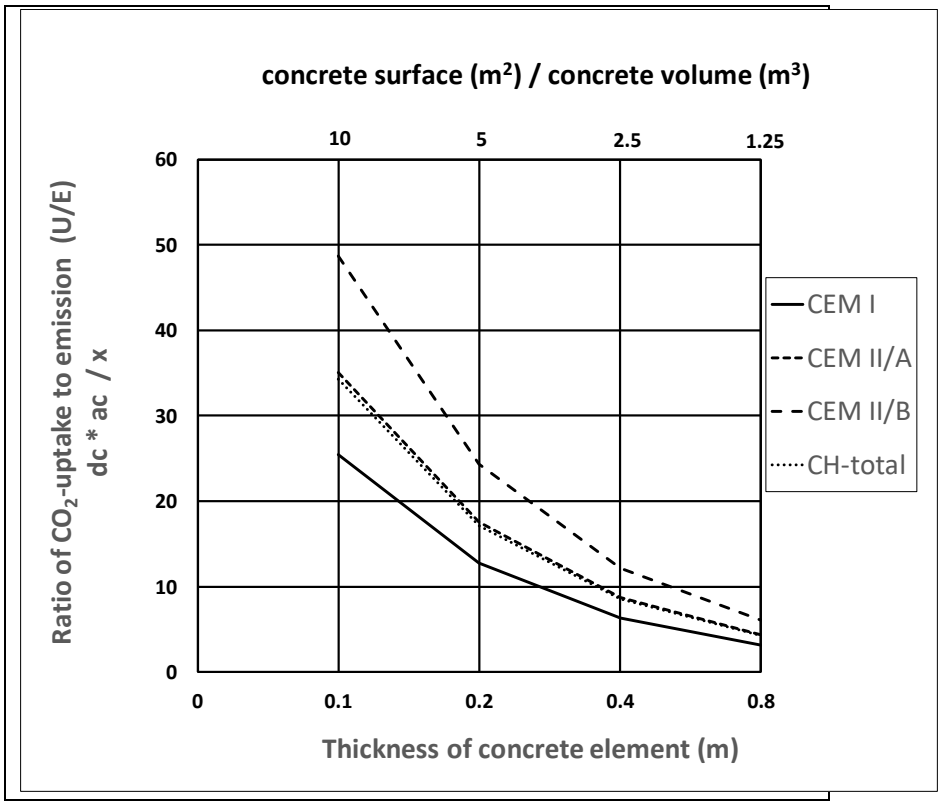
Verhältnis von CO_2-Aufnahme / CO_2-Emission abhängig von der Dicke des Betonelements

Das Verhältnis von CO_2-Aufnahme und CO_2-Emission (U/E) kann gemäss Gleichung 3 berechnet werden:

$$\frac{U}{E} = \frac{CO_2\ Aufnahme}{CO_2\ Emission} = \frac{d_C(tot) \cdot a_C}{x} \qquad \text{(Gleichung 3)}$$

Das Verhältnis CO2-Aufnahme / geogene Emission (U/E) nimmt mit zunehmender Dicke des Betons - und damit abnehmender Oberfläche - ab (Grafik 2) ab. Je höher die gesamte Karbonatisierungstiefe d_C(tot)- und der Karbonatisierungsgrad a_C-Wert sind, desto höher ist auch das Verhältnis U/E. Das Verhältnis U/E wurde anhand vier Schweizer Zementsorten berechnet (Tabelle 1, nach Gleichung 3). Ein Wert von 0.5 für a_C wurde nach Thiery et al. (2013) eingesetzt. Die Berechnung von d_C(tot) wird sowohl in Tabelle 1 als auch im Text erläutert.

Eine Betonstärke unter 20 cm ist selten zu finden in der Schweiz.



Grafik 2: Verhältnis von CO_2-Aufnahme / CO_2-Emission als Funktion der Dicke des Betonelements

Zusammenfassung

Anhand von Rechenbespielen wird gezeigt, wie die CO_2-Aufnahme von Beton in der Nutzungsphase eines Bauwerks mithilfe des Karbonatisierungskoeffizienten K_N und der Karbonatisierungstiefe d_c durch Anwendung des w/CaO. berechnet werden kann. Die vorgestellte Berechnung basiert auf für Schweizer Hausbau typischerweise eingesetzte Betone. Die zwei Schlüsselparameter Zementtyp und W/Z-Wert, welche den Karbonatisierungsprozess im Wesentlichen bestimmen, können einfach angepasst werden, um andere Betonmischungen abzudecken (z.B. für Brücken- oder Tunnelbau). Da die klimatischen Bedingungen variieren, müssen Karbonatisierungskoeffizienten K_N und die Betonzusammensetzung (wichtig für w/CaO) ebenfalls entsprechend angepasst werden. Dasselbe gilt für die Nutzungsdauer, wenn sie kürzer geplant ist.

Für die in Tabelle 1 dargestellten Rechenbeispiele ergibt sich, dass 12.7% bis 24.4% des CO_2, welches aus den geogenen Emissionen für die Jahr 2015 produzierten Zemente stammt, unter den betrachteten Bedingungen wieder an den Beton zurückbindet. Im Falle des CH-Durchschnittszementes (EPD 2015) liegt der berechnete Wert bei 17.1 % oder 8.4 kgCO_2/t Beton.

Literatur:

cemsuisse (2016): EPD for four types of Swiss cements.
http://www.cemsuisse.ch/cemsuisse/ueberuns/publikationen/epd/index.html?lang=de

Leemann A & Nygaard, P (2014) Zusammenhang zwischen Karbonatisierungswiderstand, CO_2-Pufferkapazität und Diffusivität von Mischzementen, cemsuisse-Projekt 201207, Bern (in German).

Leemann A, Nygaard P, Kaufmann J, Loser R (2015) Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete. Cement and Concrete Composites 62:33-43.

Leemann A & Moro F (2017) Carbonation of concrete: the role of CO_2 concentration, relative humidity and CO2 buffer capacity. Materials and Structures 50:30.

Leemann & Hunkeler (2016): Carbonation of concrete: assessing the CO_2-uptake.
http://www.cemsuisse.ch/cemsuisse/forschung/forschungsberichte/berichte_2016/index.html?lang=de

Thiery M, Dangla P, Belin P, Habert G, Roussel N (2013) Carbonation kinetics of a bed of recycled concrete aggregates: A laboratory study on model materials. Cement and Concrete Research 46:50-65.