

Dr. Andreas Leemann



- Seit 1995: Leiter Gruppe Betontechnologie, Empa, Dübendorf
- Ausbildung: Studium und Geologie Doktorat, ETH Zürich
- Mitglied verschiedener nationaler und internationaler Gremien

Forschungsschwerpunkte: Dauerhaftigkeit von Beton und Recyclingbeton

Beton als natürliche CO₂-Senke

Dr. Andreas Leemann, Leiter Gruppe Betontechnologie, Empa, Dübendorf



Beton als natürliche CO₂-Senke

Inhalt

- § Ausgangslage
- § Teil 1: CO₂-Absorption im Bauwerk
- § Teil 2: CO₂-Absorption im Recyclingprozess
- § Zusammenfassung

Beton als natürliche CO₂-Senke

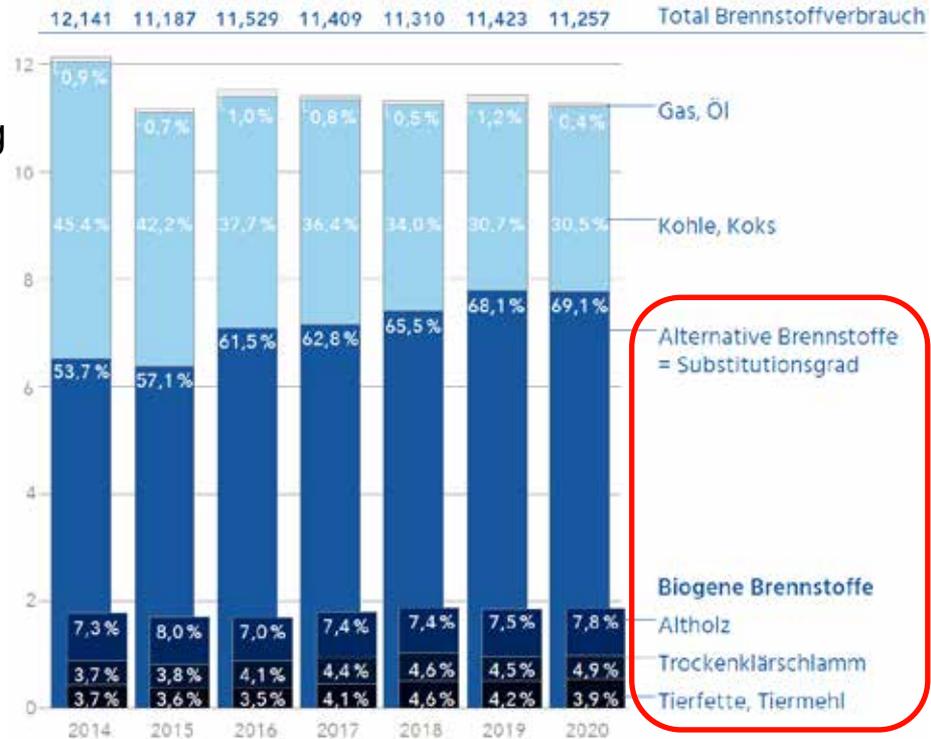
Ausgangslage: Wieviel CO₂ wird bei der Zementherstellung emittiert?

§ Grundsätzlich

- ∅ **844 kg CO₂** pro Tonne Klinker (510 kg geogen (IPCC), 334 kg Brennstoffen)

§ Situation Schweiz

- ∅ Brennstoffe

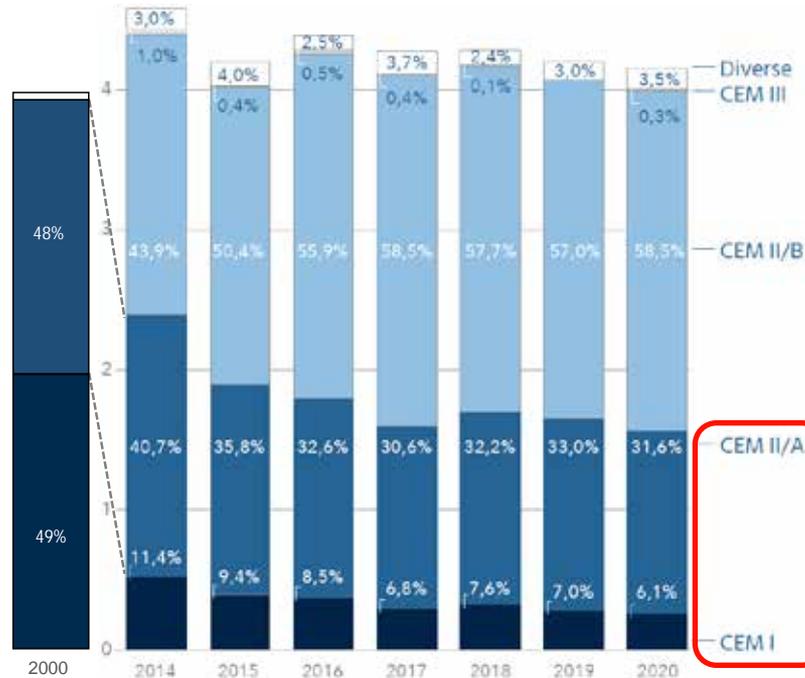


cemsuisse, 2021

Beton als natürliche CO₂-Senke

Ausgangslage: Reduktion des Klinkergehalts im Zement

§ Situation Schweiz: Trend zu Kompositzementen



cemsuisse, 2021

Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 1: Wieviel CO₂ nimmt Beton im Bauwerk auf?

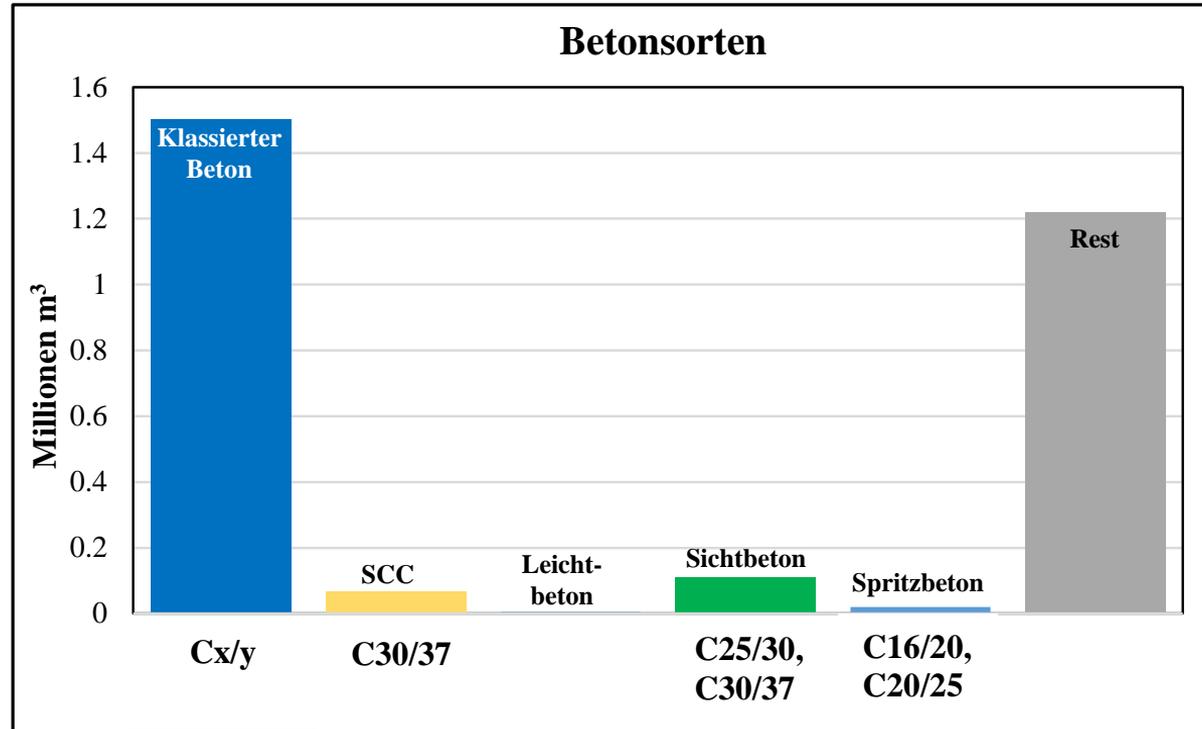
§ Abhängig von

- ∅ Betonqualität
- ∅ Exposition
- ∅ Bauteilabmessungen
- ∅ Beschichtungen
- ∅ Expositionsdauer
- ∅ Karbonatisierungsgrad



Beton als natürliche CO₂-Senke

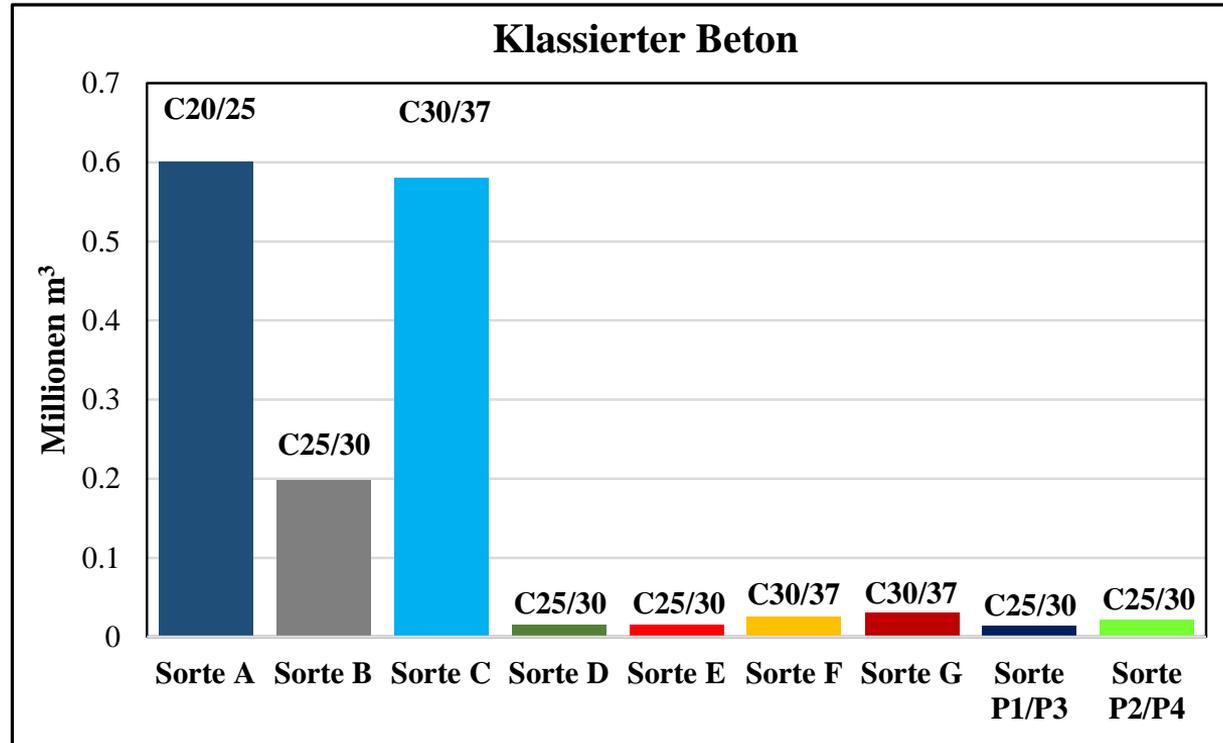
Teil 1: Welche Betontypen werden in welchen Mengen produziert?



cemsuisse, 2011

Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 1: Welche Betontypen werden in welchen Mengen produziert?



cemsuisse, 2011

Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 1: Wie wird der Beton eingesetzt?

Betonorte/ Bauteil	Anteil [%]	durchschn. Querschnitt [mm]	Bewitterung				
			Innenrau m [%]	unbewittert [%]	bewittert [%]	erdbe- deckt [%]	nass [%]
Sorte A							
Wände	45	200	100	-	-	-	-
Decken/Platten	45	200	100				
Foundationen	10	300	-	-	-	-	100
Sorte B							
Wände	50	200	50	50	-	-	-
Decken/Platten	50	200	50	50	-	-	-
Sorte C							
Fassaden	35	200	-	-	100	-	-
Stützen/Pfähle	10	250*	-	100	-	-	-
Stützmauern	55	300	-	50	50	-	
Sorten D, E, F, G							
Wände	5	400	-	-	50	50	-
Brücken, Tunnel, etc.	95	200	-	40	60	-	-
Sorte H							
Pfähle, erdbedeckt	100	200**	-	-	-	100	-
Sorte I							
Pfähle, nass	100	200**	-	-	-	-	100

Jonsson, CBI, 2005

Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 1: Karbonatisierungskoeffizient K basierend auf Festigkeit und Exposition

Exposition	Druckfestigkeit			
	<20 MPa	20-25 MPa	30-45 MPa	> 45 MPa
nass [mm/y ^{0.5}]	2.0	1.0	0.75	0.5
erdbedeckt [mm/y ^{0.5}]	3.0	1.5	1.0	0.75
bewittert [mm/y ^{0.5}]	5.0	2.5	1.5	1.0
unbewittert [mm/y ^{0.5}]	10.0	6.0	4.0	2.5
Innenraum [mm/y ^{0.5}]	15.0	9.0	6.0	3.5

Lagerblad, 2005

Lebensdauer

- § Spritzbeton: 10 Jahre
- § Wände, Decken, Platten, etc: 50 Jahre
- § Ingenieurbauten: 100 Jahre

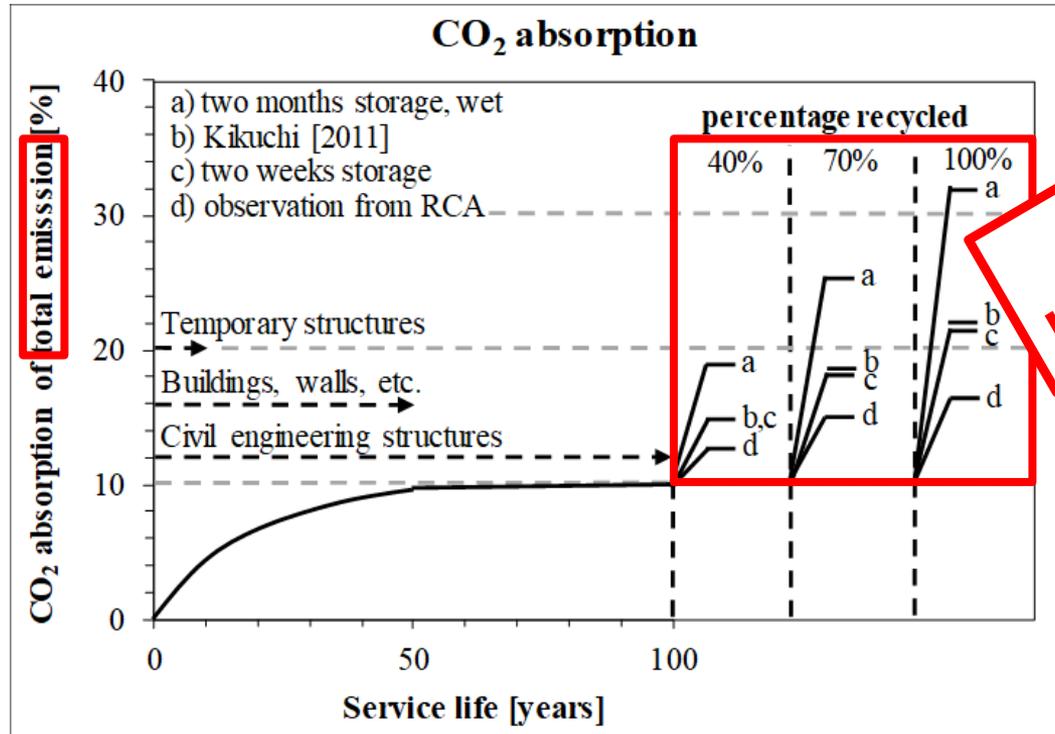
Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 1: Grosses Fragezeichen: Rückbau und Recycling

- § Schweiz, zwischen 65 and 90 % rezykliert (Schneider & Rubli, 2007/2009)
- § Karbonatisierungsgrad der rezyklierten Gesteinskörnung
 - ∅ CO₂-Absorption von Betongranulat geschätzt basierend auf experimentellen Beobachtungen von Kikuchi & Kuroda (2011).
 - ∅ Angenommener Karbonatisierungskoeffizient K für Lagerung von 2 Wochen respektive 2 Monaten
 - ∅ Dünnschliffbeobachtungen der Karbonatisierungstiefe von zwei zufällig ausgewählten Betongranulaten
- § Drei angenommene Szenarien
 - ∅ 40 % rezykliert, Rest als Betonabbruch gelagert
 - ∅ 70 % rezykliert, Rest als Betonabbruch gelagert
 - ∅ 100 % rezykliert

Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 1: CO₂ Absorption von Beton



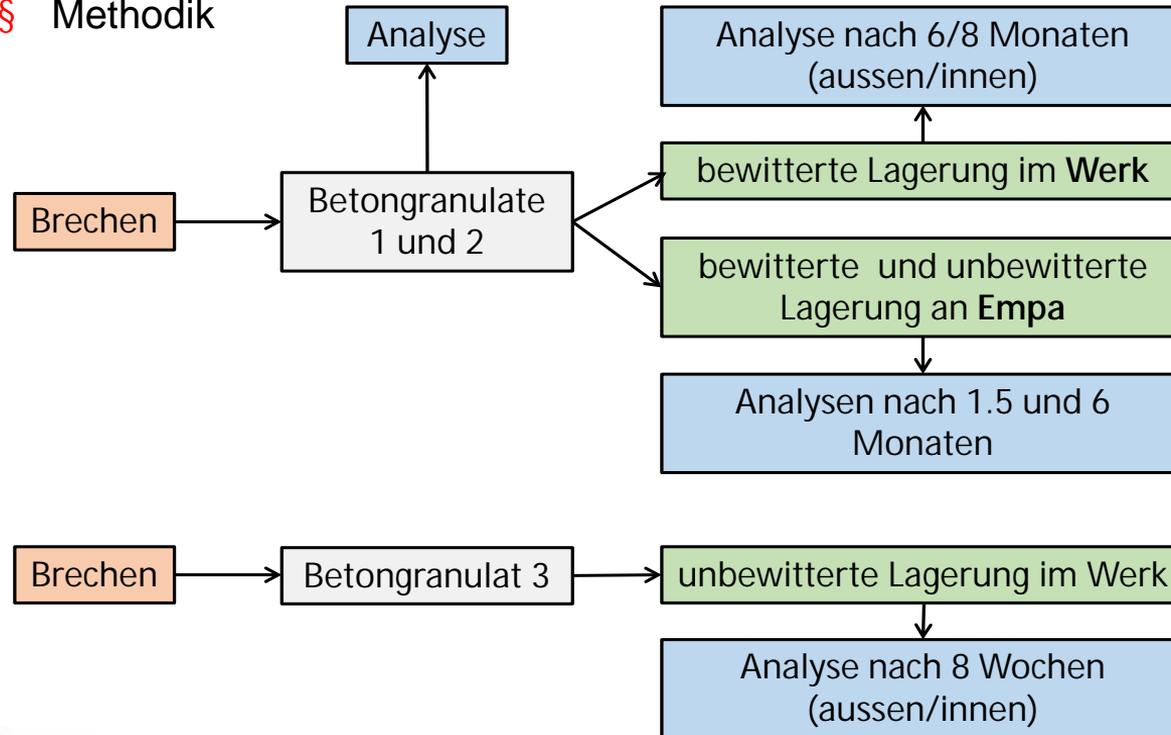
**Hohe
Unsicherheit!**

Leemann, CO2STO 2019

Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 2: CO₂-Absorption beim Recyclingprozess

§ Methodik



Beton als natürliche CO₂-Senke

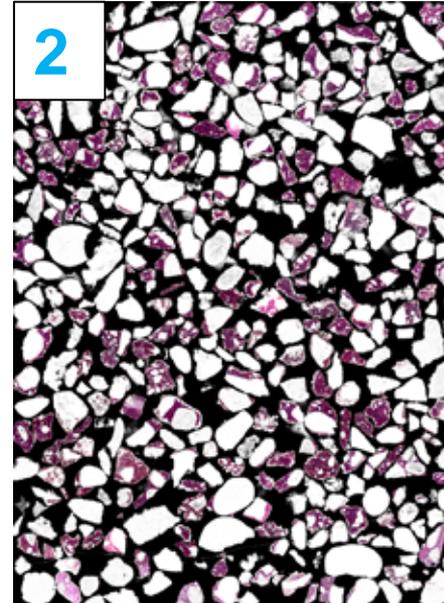
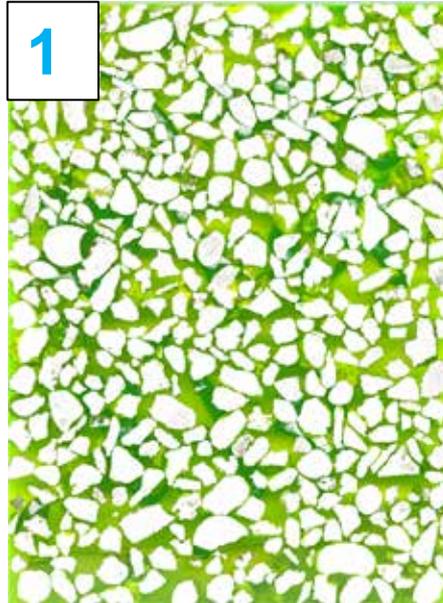
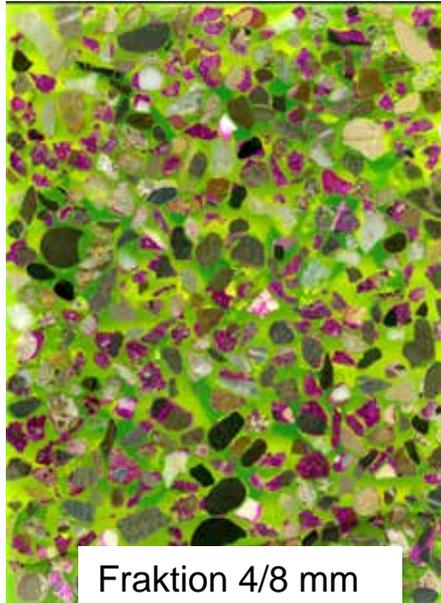
Teil 2: Methodik

- § Auftrennen des Betongranulats in Einzelfractionen (0/4mm, 4/8 mm, 8/16 mm, 16/D_{max} mm)
- § Einbetten einer Partikel-Lage in viskosen Epoxy mit Farbstoff
- § Abschleifen einer Lage mit Dicke $d_{\max}/2$
- § Einsprühen mit Phenolphthalein
- § Scan mit 1200 dpi (0/4 mm) resp. 800 dpi (> 4mm) auf Isopropanol-Schicht
- § Bildanalyse: Anteil an unkarbonatisiertem Zementstein
- § Berechnung der CO₂-Aufnahme durch Differenzbildung des unkarbonatisierten Zementsteins von Zeitpunkt t_1 zu t_2 zu t_3
- § Annahme einer Betonrezeptur (z. Bsp. 305 kg/m³ CEM I, w/z 0.55)
- § Berechnung der CO₂-Aufnahme bei 60% Karbonatisierungsgrad im karbonatisierten Zementstein

Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 2: Methodik

- § Segmentation aufgrund der Farbsättigung → Epoxidharz - Partikel
- § Segmentation aufgrund der Farbe → unkarbonatisierter Anteil in Partikeln



Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 2: Probenahme Werk (BG2)

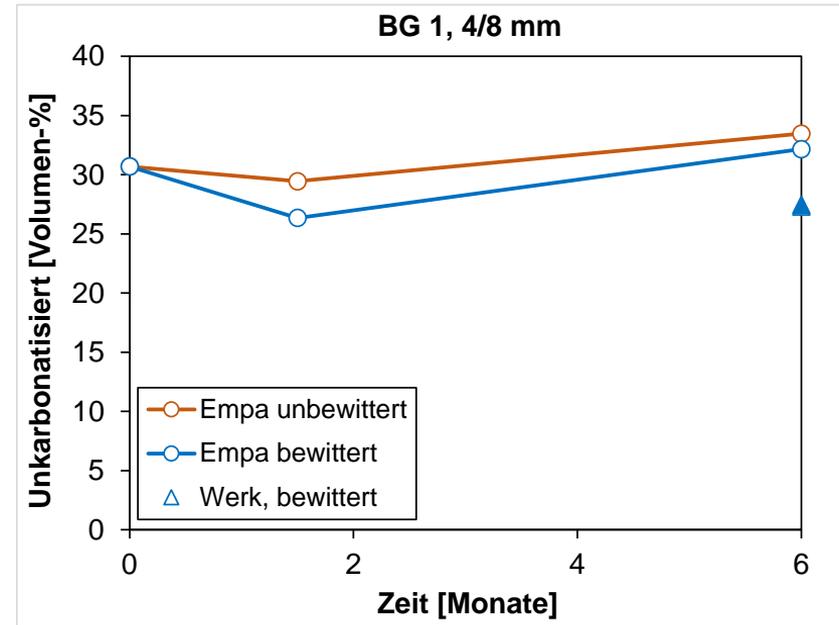
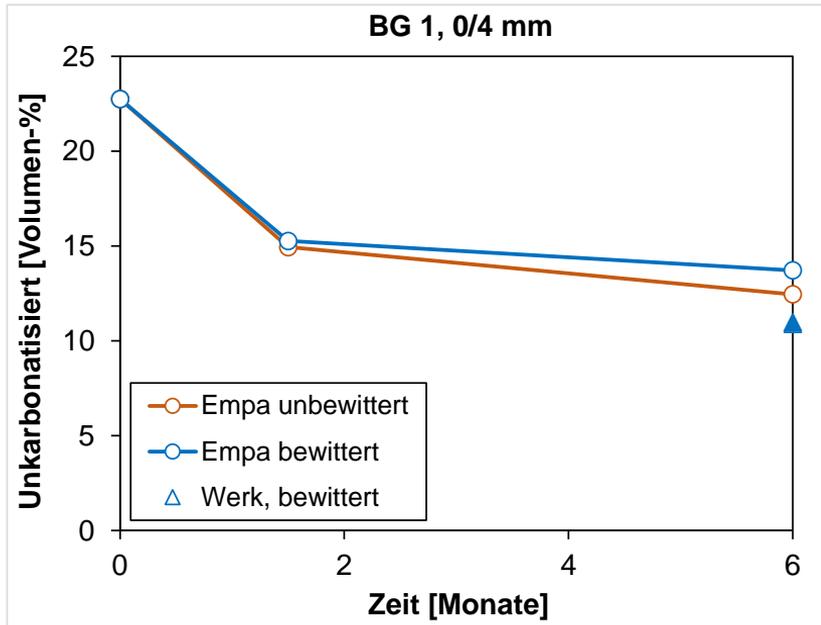


Exposition: 8 Monate



Beton als natürliche CO₂-Senke

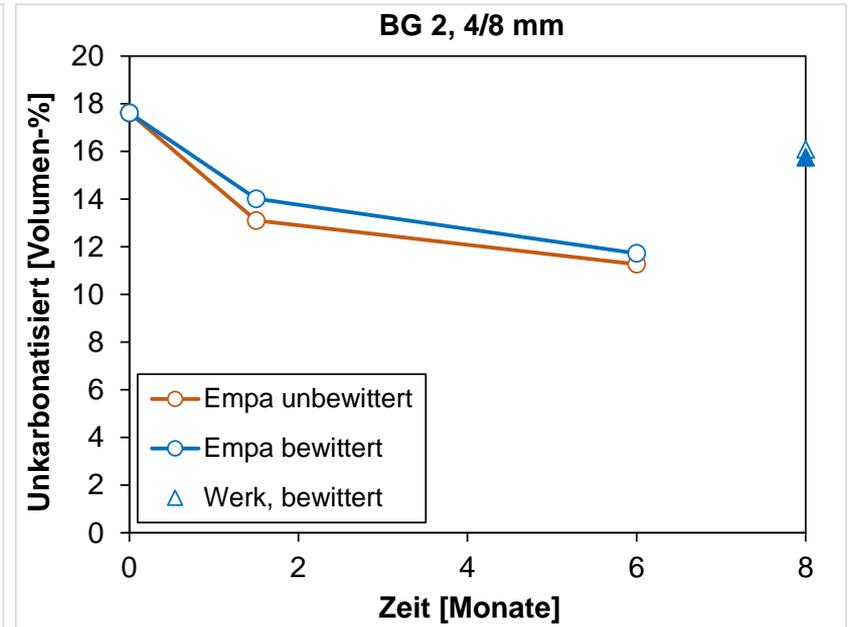
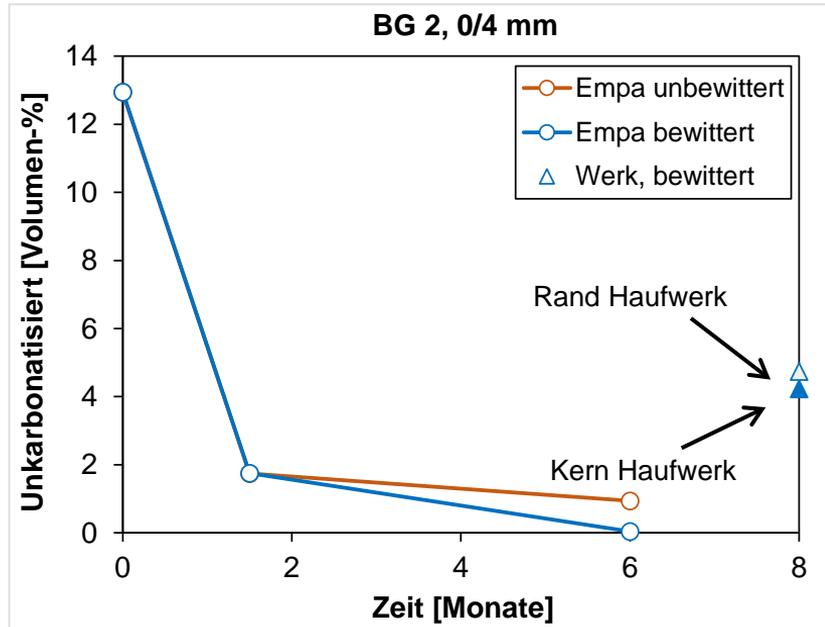
Teil 2: BG1 - Anteil unkarbonatisiert



- § Karbonatisierung nur in der Sandfraktion
- § Karbonatisierung der Fraktion 4/8 und 8/16 mm bleibt innerhalb der Streuung konstant
- § BG 1: ungewöhnlich hohe Betonqualität (rückgebaute Eisenbahnschwellen)

Beton als natürliche CO₂-Senke

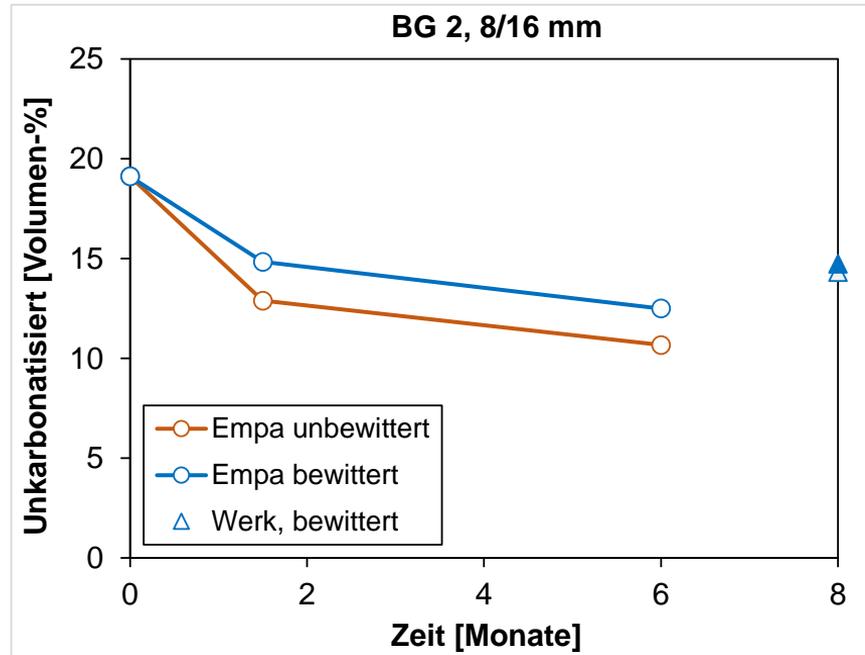
Teil 2: BG2 - Anteil unkarbonatisiert



- § Karbonatisierungsgrad von Zeit und Korngrösse abhängig
- § gleicher Karbonatisierungsgrad am Rand und im Kern des Haufwerks

Beton als natürliche CO₂-Senke

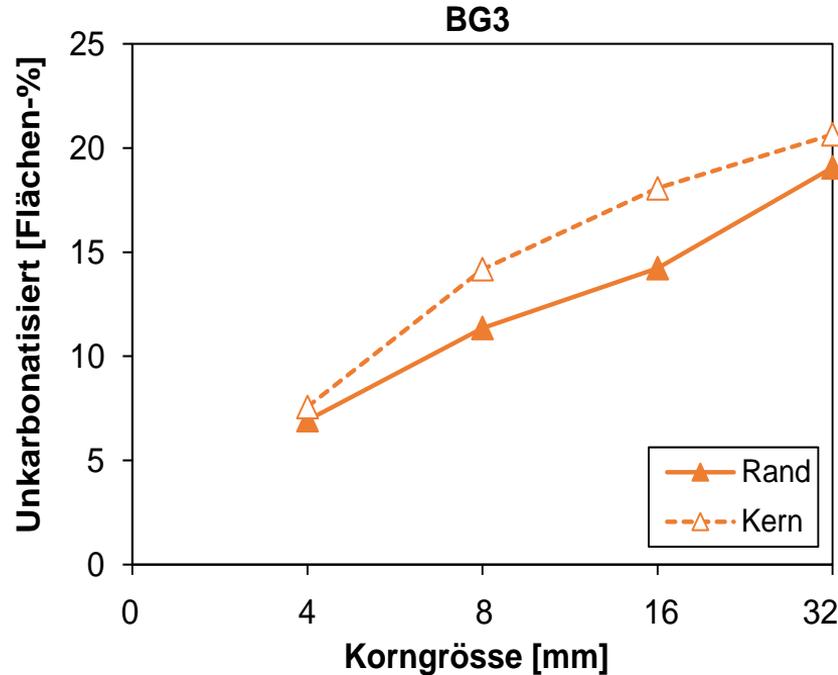
Teil 2: BG2 - Anteil unkarbonatisiert



§ Fraktion 16/32 mm wegen geringer Anzahl Körner nicht repräsentativ!

Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 2: BG3 - Anteil unkarbonatisiert in überdachter Lagerung



§ guter Zusammenhang zwischen Korngrösse und Karbonatisierung

Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 2: BG1 - Fraktion 4/8 mm nach 6 Monaten am Rand des Haufwerks



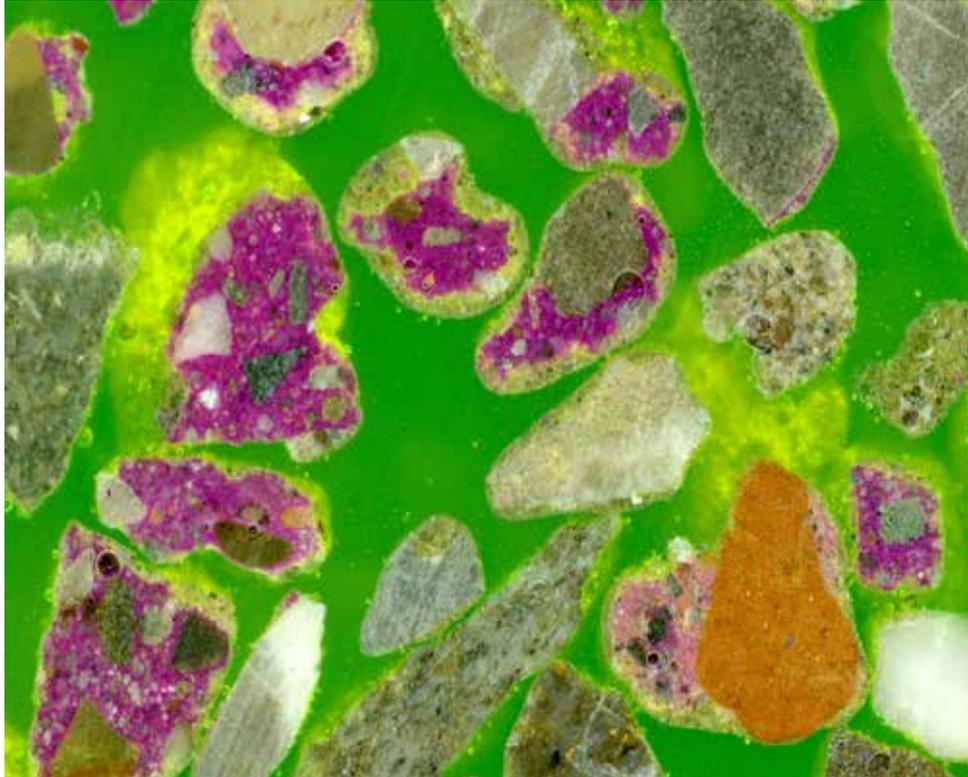
Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 2: BG2: Fraktion 4/8 mm nach 8 Monaten am Rand des Haufwerks



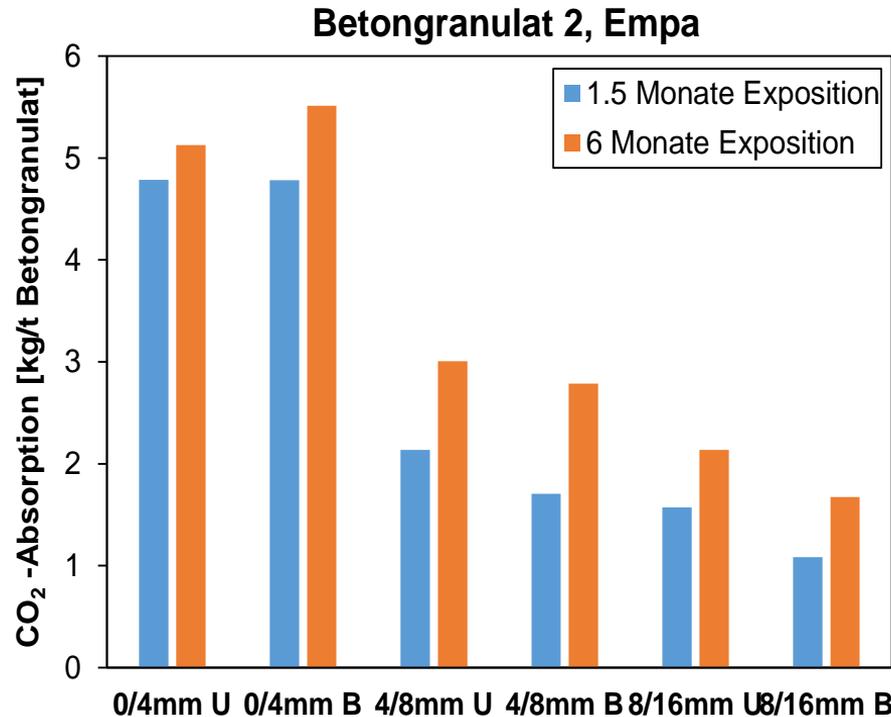
Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 2: BG3 - Fraktion 4/8 mm nach 2 Monaten im Kern des Haufwerks



Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 2: CO₂-Absorption Einzelfractionen



- § höchste CO₂-Absorption in Sandfraktion
- § Differenz zwischen CO₂-Absorption von 1.5-6 Monate relativ gering

U = unbewittert, B = bewittert

Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 2: CO₂-Absorption der BG am Ende der Exposition

Material	Lagerung	Exposition [Monate]	Absorbiertes CO ₂ (geogene Emission) [%]
BG1	U, Empa	6	11.5
	B, Empa	6	10.1
	B, Werk, Rand	6	13.2
	B, Werk, Kern	6	13.1
BG2	U, Empa	6	16.9
	B, Empa	6	16.4
	B, Werk, Rand	8	8.9
	B, Werk, Kern	8	9.4
BG3	U, Werk, Rand	2	20.9
	U, Werk, Kern	2	16.2

Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 2: Sensitivitätsabschätzung der gewählten Berechnungsparameter bezogen auf totalen CO₂-Emission

Zement	Menge [kg/m ³]	w/z [-]	Zementstein- volumen [l/m ³]	CaO im Klinker [kg/m ³]	CO _{2,abs} BG2 [kg/t]	CO _{2,abs} BG3 [kg/t]
CEM I	300	0.55	276	185	5.6	11.3
CEM I	290	0.64	288	179	5.1 (-0.5)	10.4 (-0.9)
CEM I	310	0.49	266	191	6.0 (+0.4)	12.1 (+0.8)
CEM II/A-LL	300	0.55	277	160	4.8 (-0.8)	9.7 (-1.6)
CEM I*	300	0.55	276	185	7.0 (+1.4)	14.1 (+2.8)

* gerechnet mit einer CO₂-Absorption im karbonatisierten Zementstein von **75** anstatt **60%**

geänderte Parameter = **rot**

Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 2: natürliche CO₂-Absorption verglichen zu beschleunigter Karbonatisierung

Material	CO ₂ -Absorption		
	[kg CO ₂ /t Betongranulat]	Anteil geogene CO ₂ -Emission [%]	Anteil totale CO ₂ - Emission (inkl. Brennstoff) [%]
BG 1 Werk (6 Monate)	10.2 ¹	13.2	8.0
BG 2 Werk (8 Monate)	5.6 ¹	9.2	5.5
BG 3 Werk (2 Monate)	11.3 ¹	18.6	11.2
Neustark	8.2 ²	-	-
Zirkulit	(?) ³	-	-

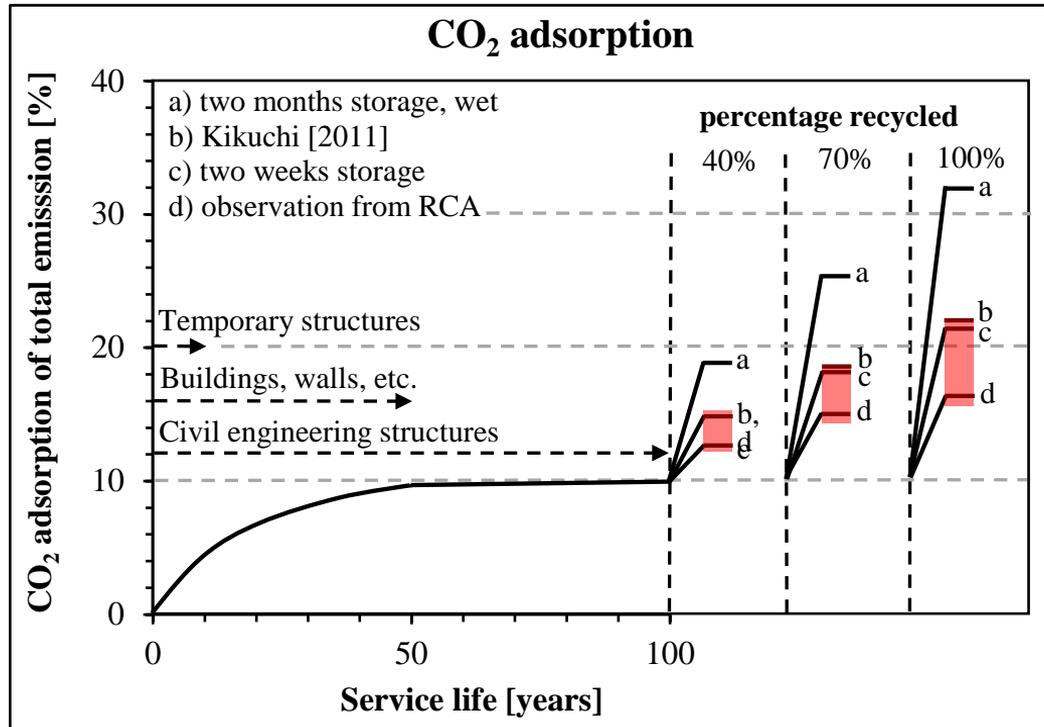
¹ Durchschnittswert Rand-Kern des Haufwerks

² beschleunigte CO₂-Absorption am Ende des Recyclingprozesses mit 100 % CO₂ für 1 Stunde

³ 10 kg CO₂ pro 1750 kg Sekundärrohstoffe in 1 m³ Recyclingbeton

Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 2: CO₂-Absorption von Beton in der Recyclingphase



§ Bei 100% Recycling maximale CO₂-Absorption vergleichbar zu Wert während Lebensdauer der Bauwerke

Leemann, CO2STO 2019

Beton als natürliche CO₂-Senke

Teil 2: CO₂ Absorption von Beton

§ Ergebnisse verschiedener Studien

Publikation	Land	absorbiertes CO ₂ (geogen) [%]	
		Lebensdauer	Recycling
Pade & Guimaraes, 2007	Schweden	18	15
	Norwegen	16	17
	Dänemark	24	33
	Island	30	6
Xi et al., 2016	Global	42 (Beton)	4
		72 (alle Zement-basierten Materialien)	
Andrade & Sanjuán, 2018	Spanien	11	-
Nygaard & Leemann, 2012 Leemann, 2019	Schweiz	16	8-25*
Leemann, 2021	Schweiz	-	6-15*

* 70 %
Recyclingsgrad

Beton als natürliche CO₂-Senke

Zusammenfassung

- § Knapp **10 %** der totalen CO₂-Emission während ihrer Lebensdauer von Betonbauwerken absorbiert
- § CO₂-Absorption in der Recyclingphase im Betonwerk
 - ∅ Karbonatisierungsgrad am Rand nicht wesentlich höher als im Kern des Haufwerks
 - ∅ Unbewittertes Betongranulat karbonatisiert etwas schneller als bewittertes Betongranulat
 - ∅ Karbonatisierungsgrad und -geschwindigkeit steigen mit sinkender Korngrösse
 - ∅ Karbonatisierung verlangsamt sich mit der Zeit
 - Feinstfraktion innerhalb von wenigen Wochen vollständig karbonatisiert
 - (größere) Partikel karbonatisieren nach Wurzel-Zeit-Gesetz
 - ∅ CO₂-Absorption des Betongranulats während Lagerung im Bereich von **5.5-11.1 %** des total emittierten CO₂ (844 kg CO₂ / Tonne Klinker)



Holcim

A MEMBER OF
 **HOLCIM**