

Inhalt

- Ausgangslage
- Teil 1: CO₂-Absorption im Bauwerk
- Teil 2: CO₂-Absorption im Recyclingprozess
- Teil 3: neue Zusatzstoffe und Zemente (englisch)
- Zusammenfassung

CO₂-Speicherung in Beton

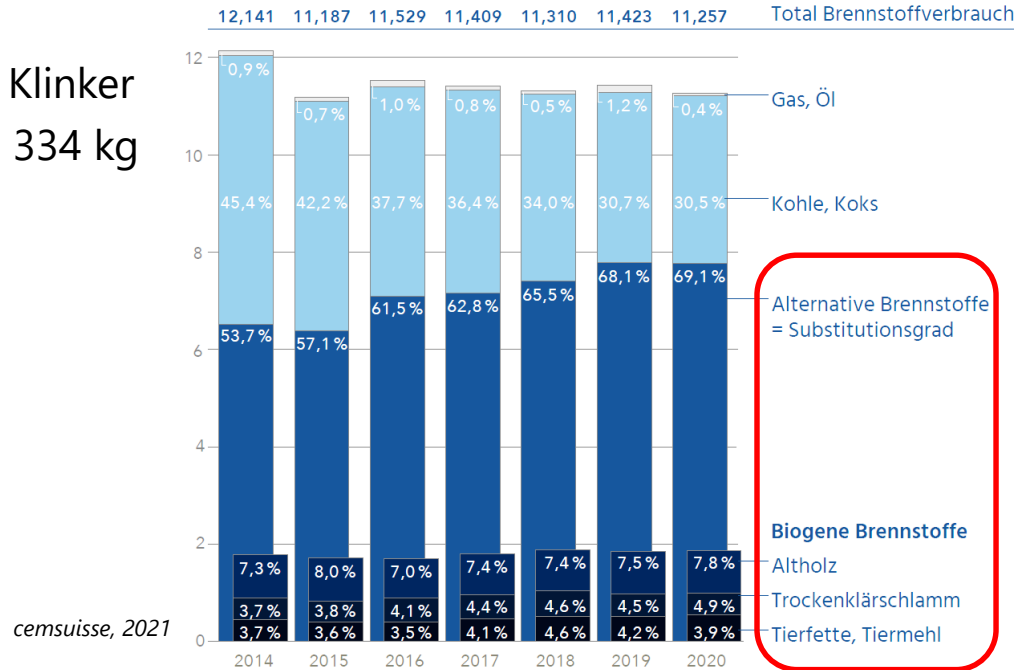
Ausgangslage: Wieviel CO₂ wird bei der Zementherstellung emittiert?

■ Grundsätzlich

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

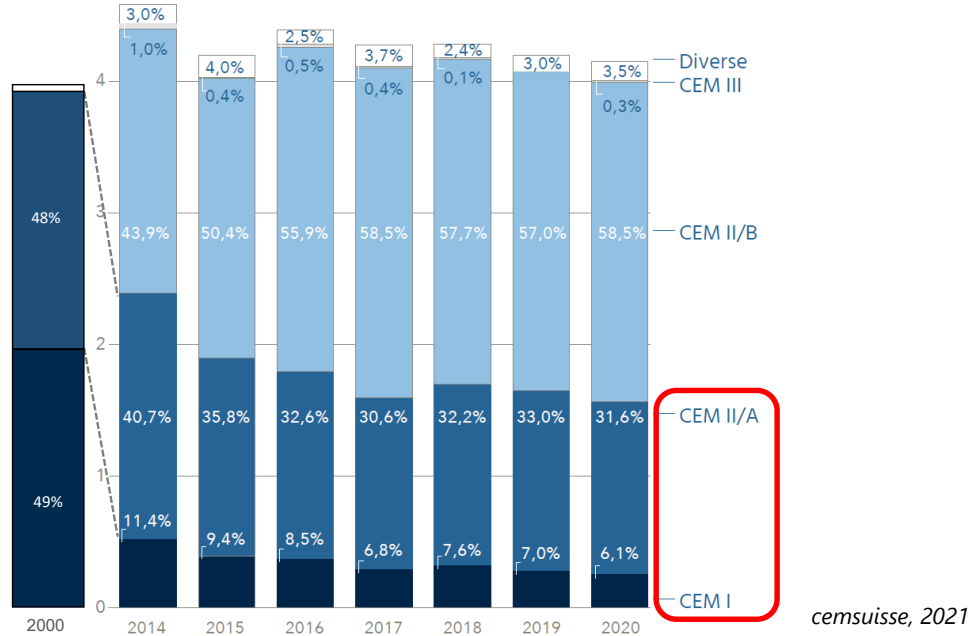
■ Situation Schweiz

- Brennstoffe



Ausgangslage: Reduktion des Klinkergehalts im Zement

- Situation Schweiz: Trend zu Kompositzementen

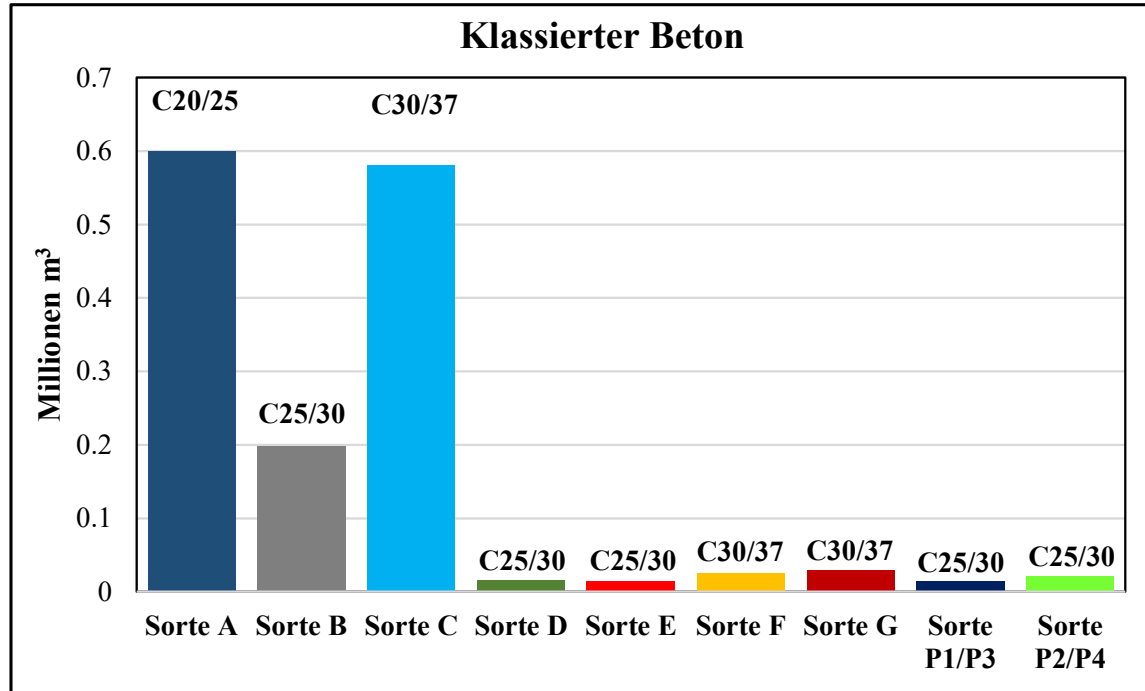


Teil 1: Wieviel CO₂ nimmt Beton im Bauwerk auf?

- Abhängig von
 - Betonqualität
 - Exposition
 - Bauteilabmessungen
 - Beschichtungen
 - Expositionsdauer
 - Karbonatisierungsgrad



Teil 1: Welche Betontypen werden in welchen Mengen produziert?



cemsuisse, 2011

Teil 1: Wie wird der Beton eingesetzt?

Betonart/ 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

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

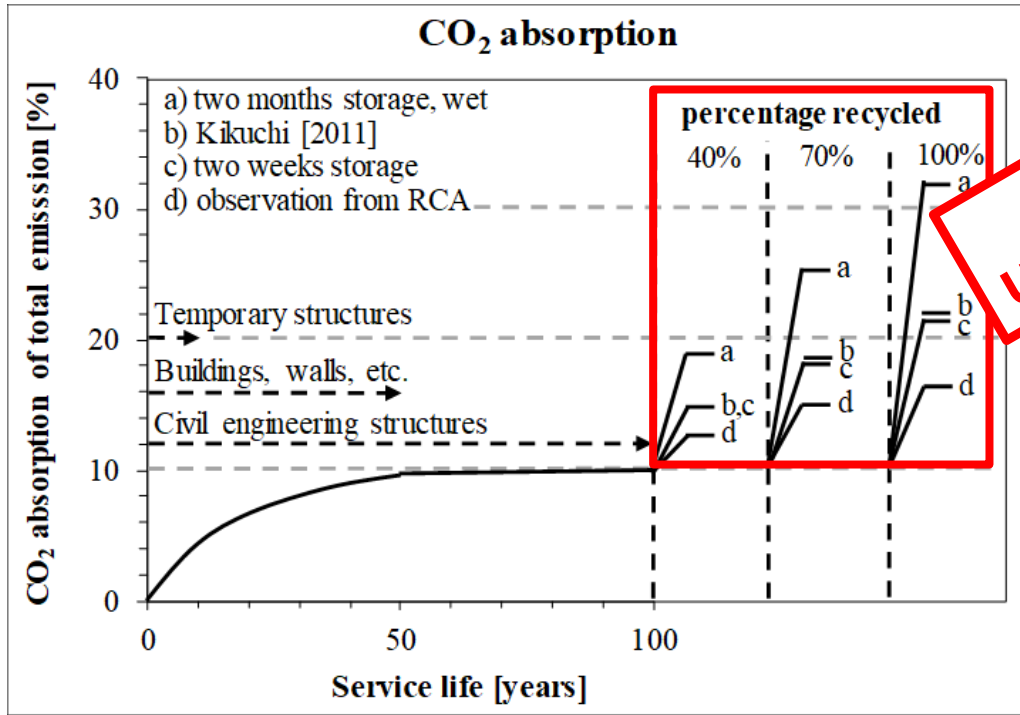
Lebensdauer

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

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

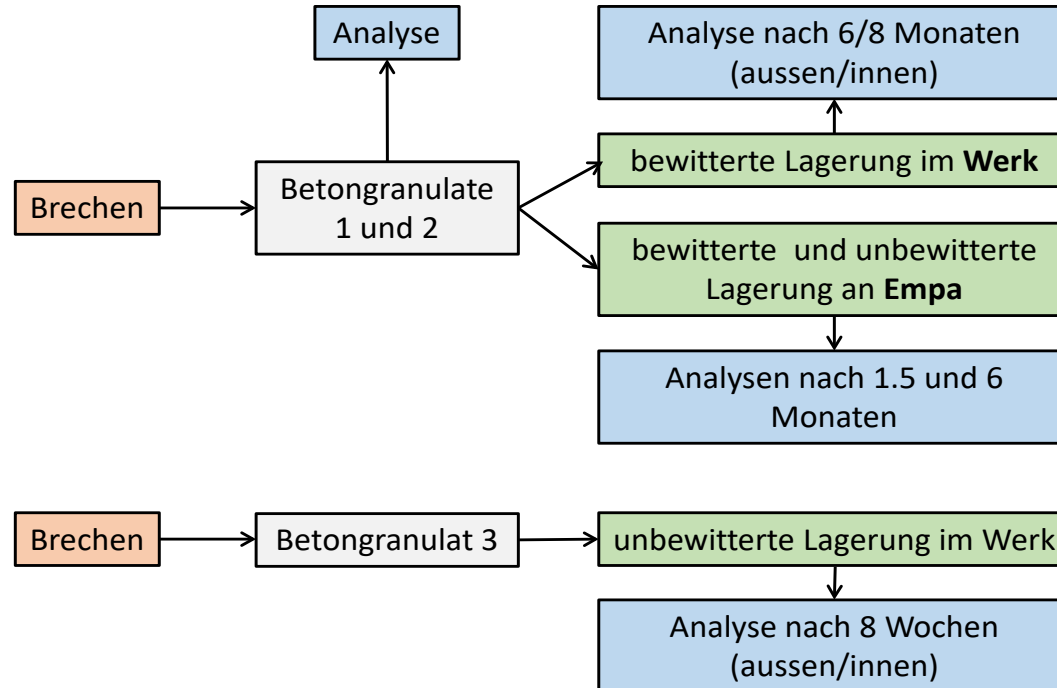
Teil 1: CO₂ Absorption von Beton



Hohe Unsicherheit!

Teil 2: CO₂-Absorption beim Recyclingprozess

- Methodik



Teil 2: Probenahme Werk (BG2)



CO₂-Speicherung in Beton

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

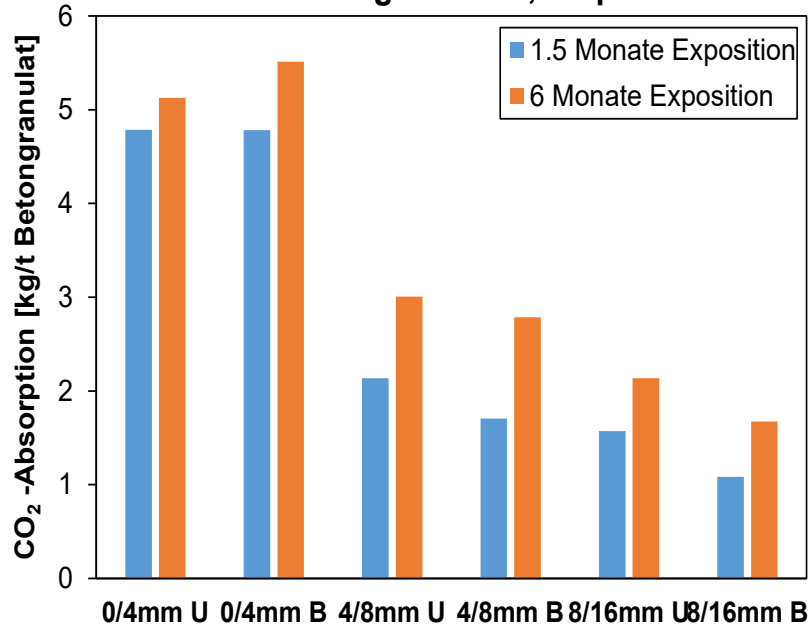


Teil 2: BG3 - Fraktion 4/8 mm nach 2 Monaten im Kern des Haufwerks



Teil 2: CO₂-Absorption Einzelfraktionen

Betongranulat 2, Empa



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

U = unbewittert, B = bewittert

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	-	-

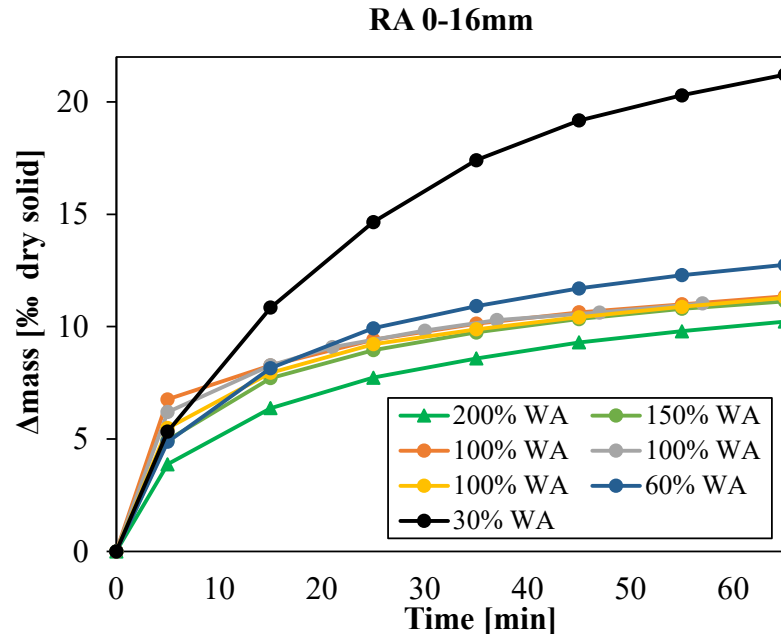
¹ Durchschnittswert Rand-Kern des Haufwerks

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

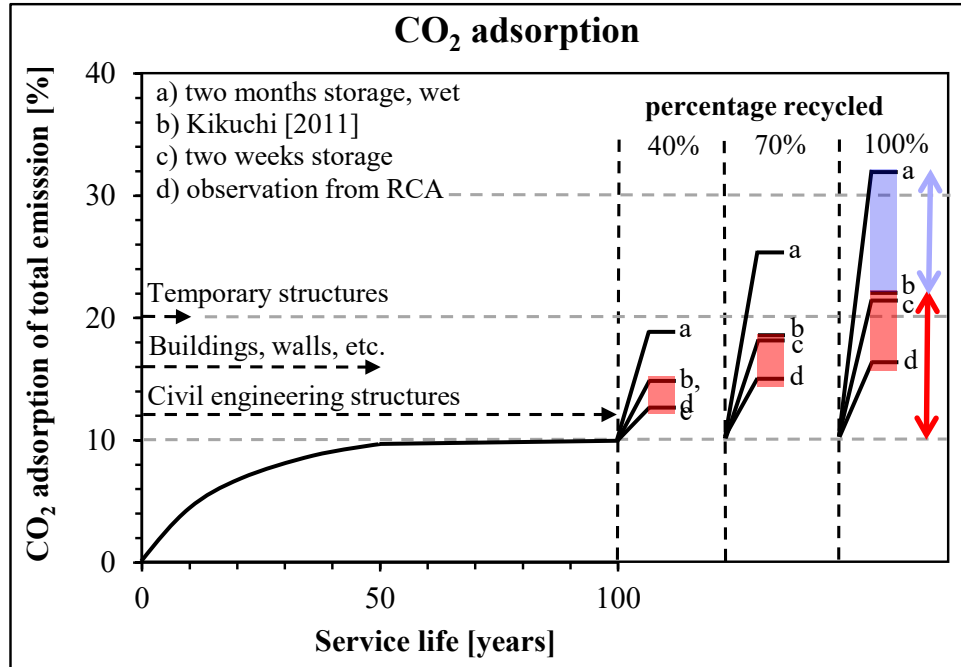
Teil 2: natürliche CO₂-Absorption verglichen zu beschleunigter Karbonatisierung

- Technologie Neustark



- Deutlicher Anstieg der CO₂-Absorption bei ≤ 30 % WA₂₄
- Tiefer Feuchtegehalt (~30% RH) werden im Betonwerk üblicherweise nicht erreicht

Teil 2: CO₂-Absorption von Beton in der Recyclingphase



- Bei 100% Recycling maximale CO₂-Absorption vergleichbar zu Wert während Lebensdauer der Bauwerke
- Beschleunigte Karbonatisierung mit 100 % CO₂: maximal nochmals 10 % der totalen CO₂-Emission absorbiert

Leemann, CO2STO 2019

Teil 2: CO₂ Absorption von Beton

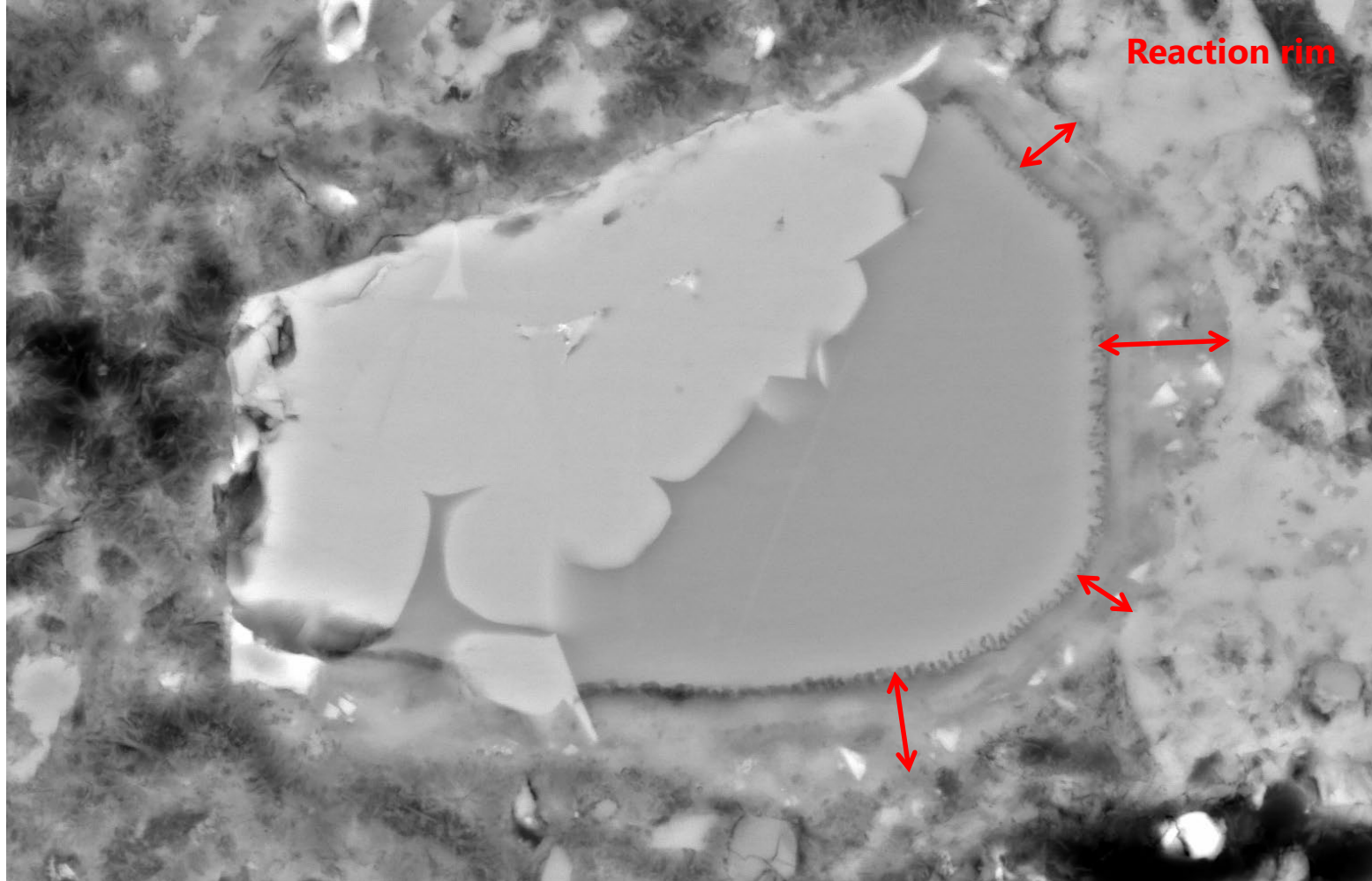
- Ergebnisse verschiedener Studien

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

Part 3: Wollastonite

- Calcium silicate mineral: CaSiO₃
- Natural mineral with estimated sources of 0.100·10⁹ tons (Portland cement (PC) production: 4.1·10⁹ tons)
- CO₂-emission
 - Portland cement clinker (PC): 1450 °C in cement kiln, ~510 kg/t geogenic CO₂
 - Wollastonite (CaSiO₃): 1200 °C in cement kiln, ~340 kg/t geogenic CO₂
 - Lower CO₂ emission of wollastonite compared to PC
- Reactivity of wollastonite
 - Stable in alkaline environment
 - Prone to carbonation (treated with 100 % CO₂: (~ 60% of geogenic emission absorbed)
 - Reactive in alkaline environment after carbonation
- Industrially produced wollastonite clinker: potential as supplementary cementitious material?

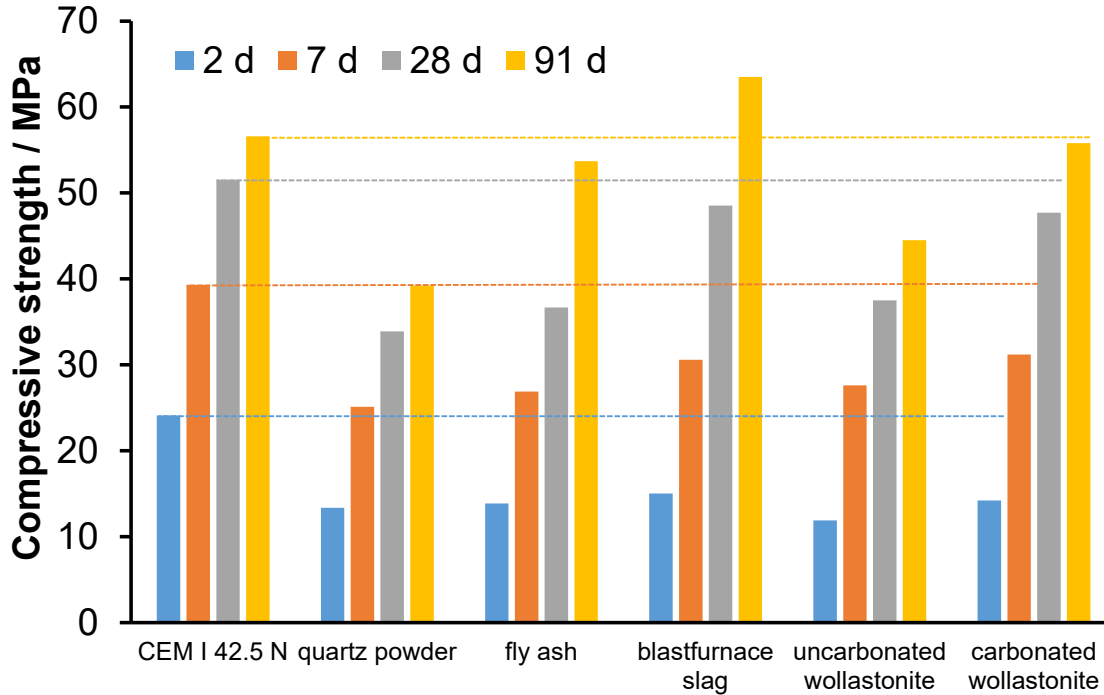


Reaction rim

	HV	spot	WD	mag	□	det	10 μm
	12.00 kV	4.5	10.1 mm	14 000 x		CBS	

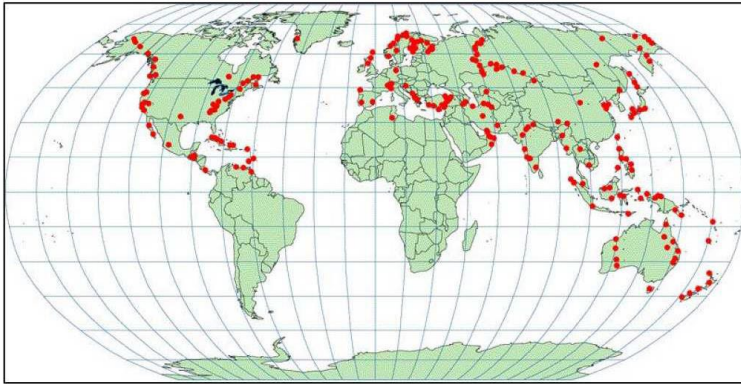
CO₂-Speicherung in Beton

Part 3: Compressive strength: EN 196-1 mortars with 30% cement replacement



Part 3: CO₂-negative cements based on magnesium carbonates ("MOMS")

- Binder manufacturing process [1,2]:
 - (1) CO₂ absorption by Mg compounds or Mg containing solutions such as
 - Olivine, Mg₂SiO₄, Serpentine, Mg₆Si₄O₁₀(OH)₈
 - Mg containing brines (e.g. from desalination plants)
 - (2) Calcination (partial) of the obtained magnesium carbonates
 - (3) Mixtures of magnesium oxide and magnesium carbonate as binder



Mining locations for **Mg-silicates** [3]

[1] Gartner & Sui: Cem. Concr. Res. 2018, 114, 27-39.

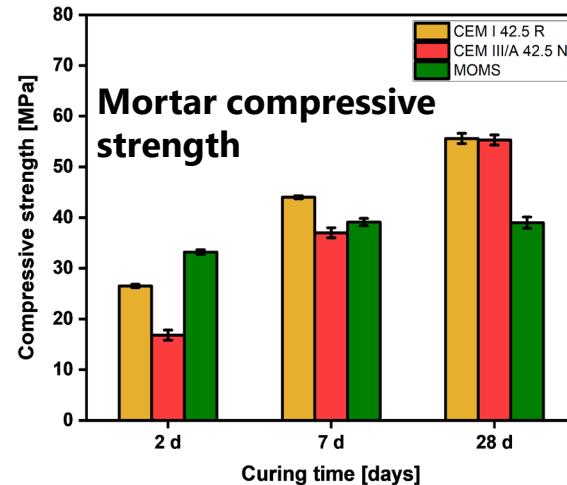
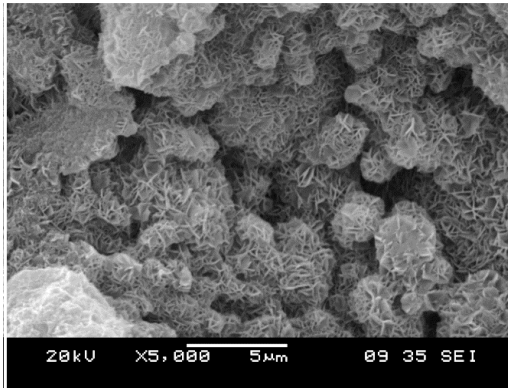
[2] Vlasopoulos & Cheeseman: Patent Application PCT/GB2009/001610, International Publication Number WO 2009/156740 A1, 12/30/2009.

[3] Pisch, Gartner, Gimenez, Meyer V.: 13th Annual Conference on Carbon Capture, Utilization and Storage Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2014.

Part 3: CO₂-negative cements based on magnesium carbonates ("MOMS")

- Binder working principle [1-4]:
 - Reactive MgO (~70-80 wt%) + hydromagnesite ($\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
 - Main reaction product with water: Brucite, $\text{Mg}(\text{OH})_2$
 - Mechanical strength achieved by intergrowth of brucite crystals

SEM [1]



[1] Zhang: PhD thesis, Imperial College London, UK, 2013

[2] Kuenzel, Zhang, Ferrándiz-Mas, Cheeseman, Gartner: Cem. Concr. Res. 103 (2018) 123-129.

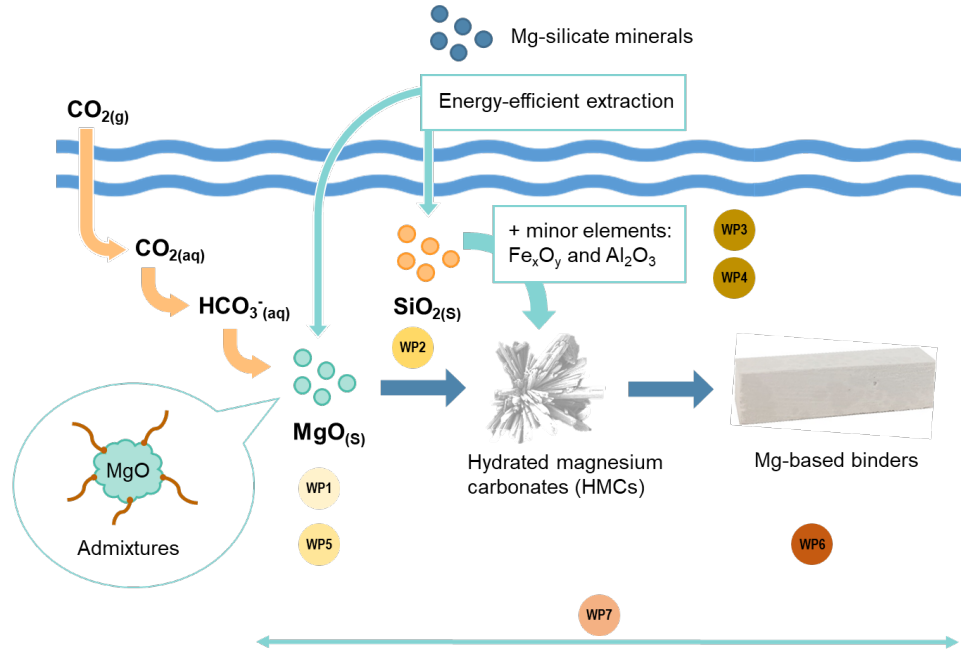
[3] Winnefeld, Epifania, Montagnaro, Gartner: Cem. Concr. Res. 126 (2019), 105912.

[4] German, PhD Thesis (Empa, ETH Zürich), 2019-2023.

CO₂-Speicherung in Beton

Part 3: CO₂-negative cements based on magnesium carbonates (“MOMS”)

SNF Advanced Grant (Barbara Lothenbach, Empa, Concrete & Asphalt Lab, 2023-2027)



WP3 + WP4	Composite binders
WP2	Carbonation conditions
WP1	Workability
WP5	Minor constituents Kinetics
WP6	Mechanical properties
WP7	Digital twins

1 PI
1 PostDoc
4 PhD

Zusammenfassung

- Knapp **10 %** der totalen CO₂-Emission während ihrer Lebensdauer von Betonbauwerken absorbiert
- CO₂-Absorption in der Recyclingphase im Betonwerk
 - Karbonatisierungsgrad und -geschwindigkeit steigen mit sinkender Korngrösse
 - Karbonatisierung verlangsamt sich mit der Zeit
 - Feinstfraktion innerhalb von wenigen Wochen vollständig karbonatisiert
 - (gröbere) 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)
- Beschleunigte Karbonatisierung mit 100 % CO₂
 - Potential um ca. 10% des total emittierten CO₂ zu absorbieren
- Wollastonit
 - Industriell-produzierbarer Zusatzstoff mit relativ kleiner CO₂-Emission
- Mg-Zement
 - Potentiell CO₂-negativer Zement, noch relativ weit von Anwendung entfernt