

Willkommen  
Welcome  
Bienvenue



# Neue Materialien für CO<sub>2</sub>-freundlicheren Beton – Chancen und Herausforderungen

Frank Winnefeld, Andreas Leemann, Barbara Lothenbach  
Abteilung Beton und Asphalt

Infra-Tagung, Luzern, 26.01.2023



## Zementherstellung weltweit:

- $\approx 4.1$  Mia. t in 2020
- entspricht  $> 11 \text{ km}^3$  Beton oder  $> 1 \text{ m}^3$  pro Erdbewohner
- $\approx 5\text{-}8\%$  der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen:
  - 1 t Zement  $\approx 0.8 \text{ t CO}_2$
  - 1 t Beton  $\approx 0.1 \text{ t CO}_2$
  - zum Vergleich: 1 t Stahl  $\approx 0.6 \dots 2.2 \text{ t CO}_2$
- $\approx 2\text{-}3\%$  des weltweiten Energiebedarfs
- steigender Bedarf

[1] Cembureau: Activity Report 2021.

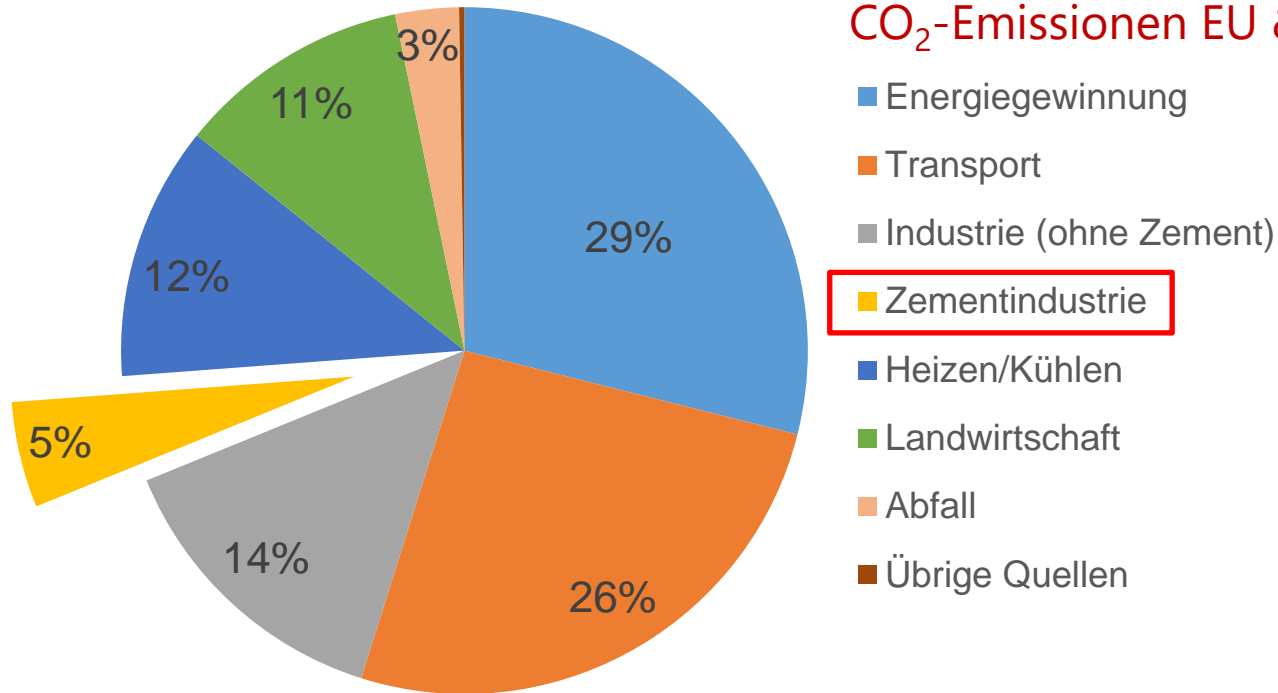
[2] Gartner: Cem. Concr. Res. 34 (2004), 1489.

[3] Damtoft, Lukasik, Herfort, Sorrentino, Gartner: Cem. Concr. Res. 38 (2008), 115.

[4] Juenger, Winnefeld, Provis, Ideker: Cem. Concr. Res. 41 (2011), 1232.

[5] IEA: Report PH3/30, 2000.

# Zement, Beton und CO<sub>2</sub>



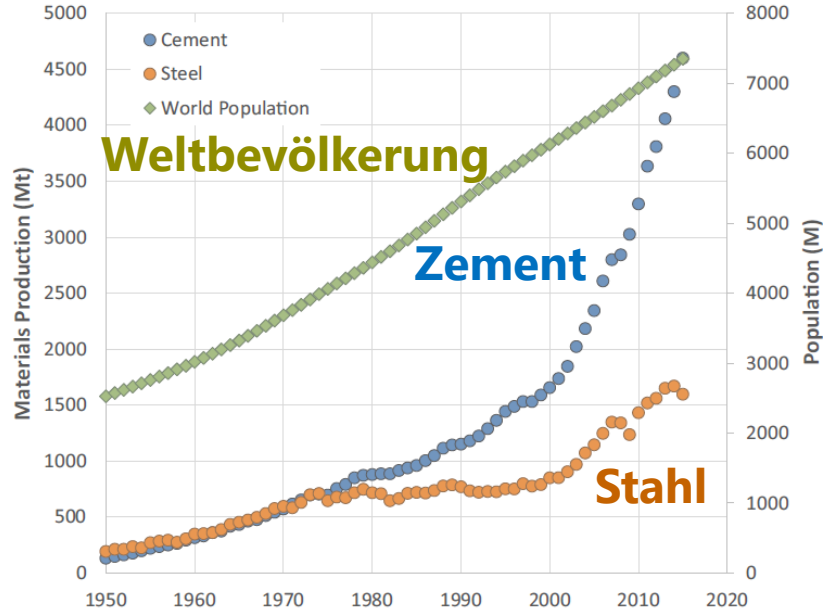
**≈ 70-90% der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Betons kommen vom Zement ! [2]**

[1] Miller, Horvath, Monteiro: Environ. Res. Lett 11 (2016), 074029.

[2] IEA, Energy and CO<sub>2</sub> emissions in the OECD, 2017,  
[https://www.iea.org/media/statistics/Energy\\_and\\_CO2\\_Emissions\\_in\\_the\\_OECD.pdf](https://www.iea.org/media/statistics/Energy_and_CO2_Emissions_in_the_OECD.pdf)

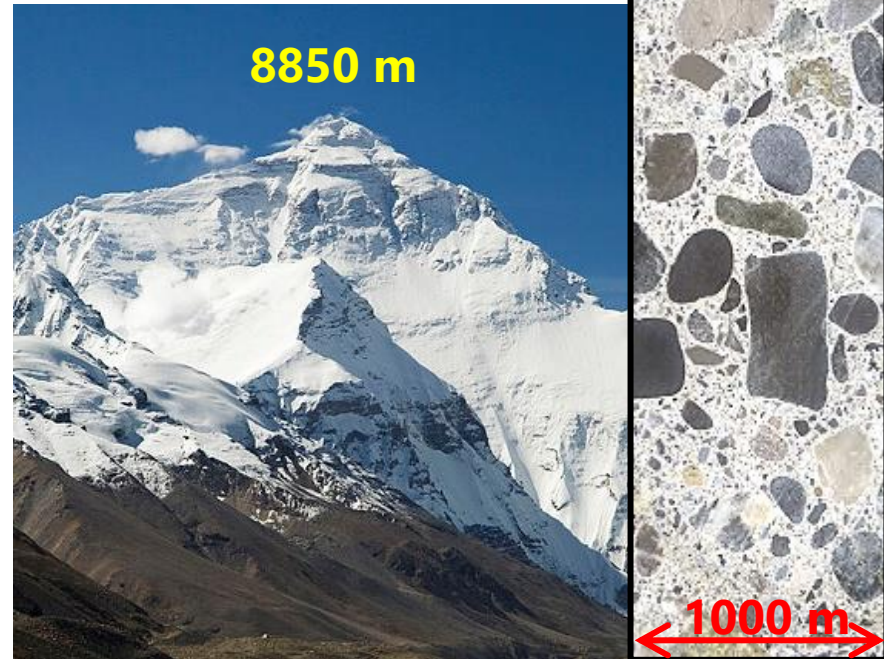
# Zement, Beton und CO<sub>2</sub>

## Steigender Bedarf [1]



Zementherstellung:  
4.1 Mia. t in 2020 [2]

≈ **11000 m** [3]



[1] Scrivener, John, Gartner: Cem. Concr. Res., 114 (2018), 2

[2] Cembureau, activity report 2021

[3] after M. Broekmans, Geological Survey of Norway

# Herstellung von Zement und Beton



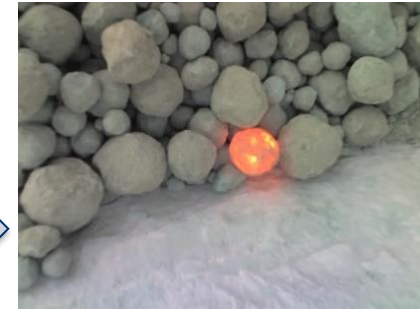
Mergel (75% Kalkstein,  
25% Ton)



Drehrohrofen, 1450°C



Zementklinker



 + Gips/Anhydrit  
ggf. Zusatzstoffe



Beton (ohne Kies = Mörtel)

+ Wasser  
+ Sand, Kies



idR Zusatzstoffe,  
Zusatzmittel



Portlandzement



Kugelmühle



# Wo kommt das CO<sub>2</sub> her?

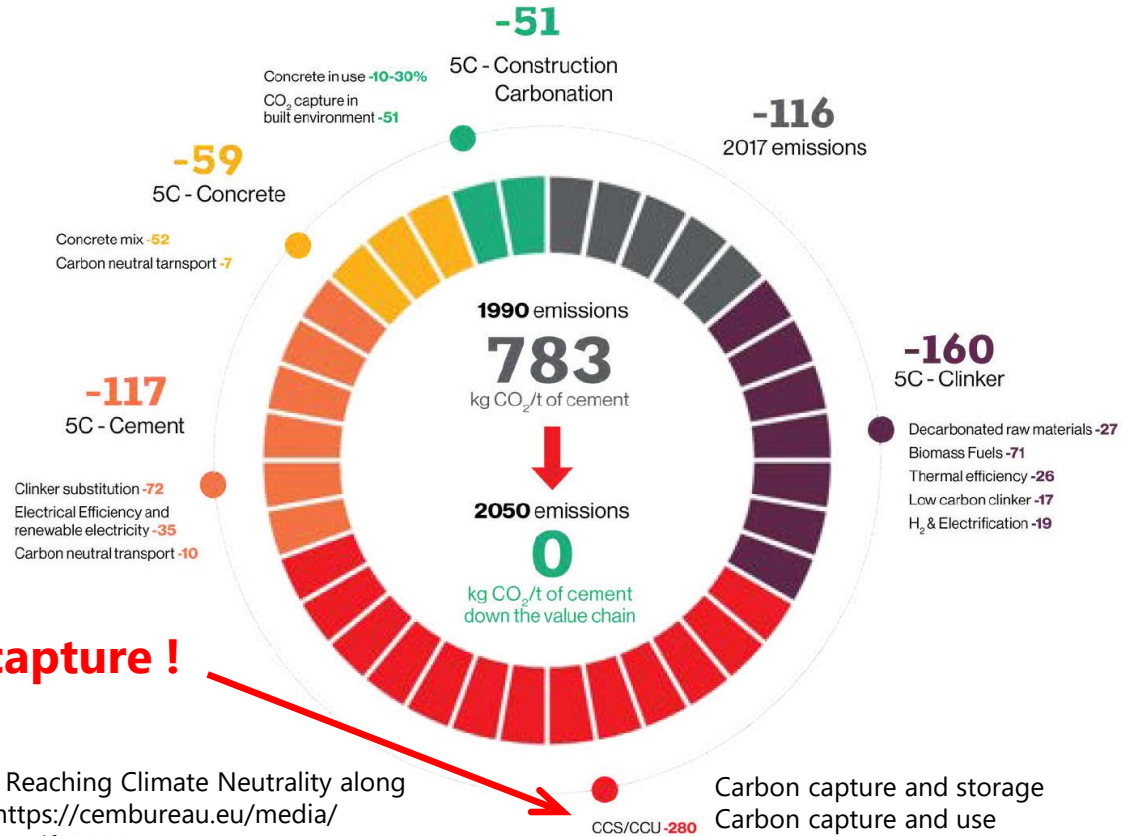


# Mögliche Lösungen für Net Zero 2050

## Cembureau Roadmap [1]

Siehe auch:

Cemsuisse Roadmap 2050 [2]

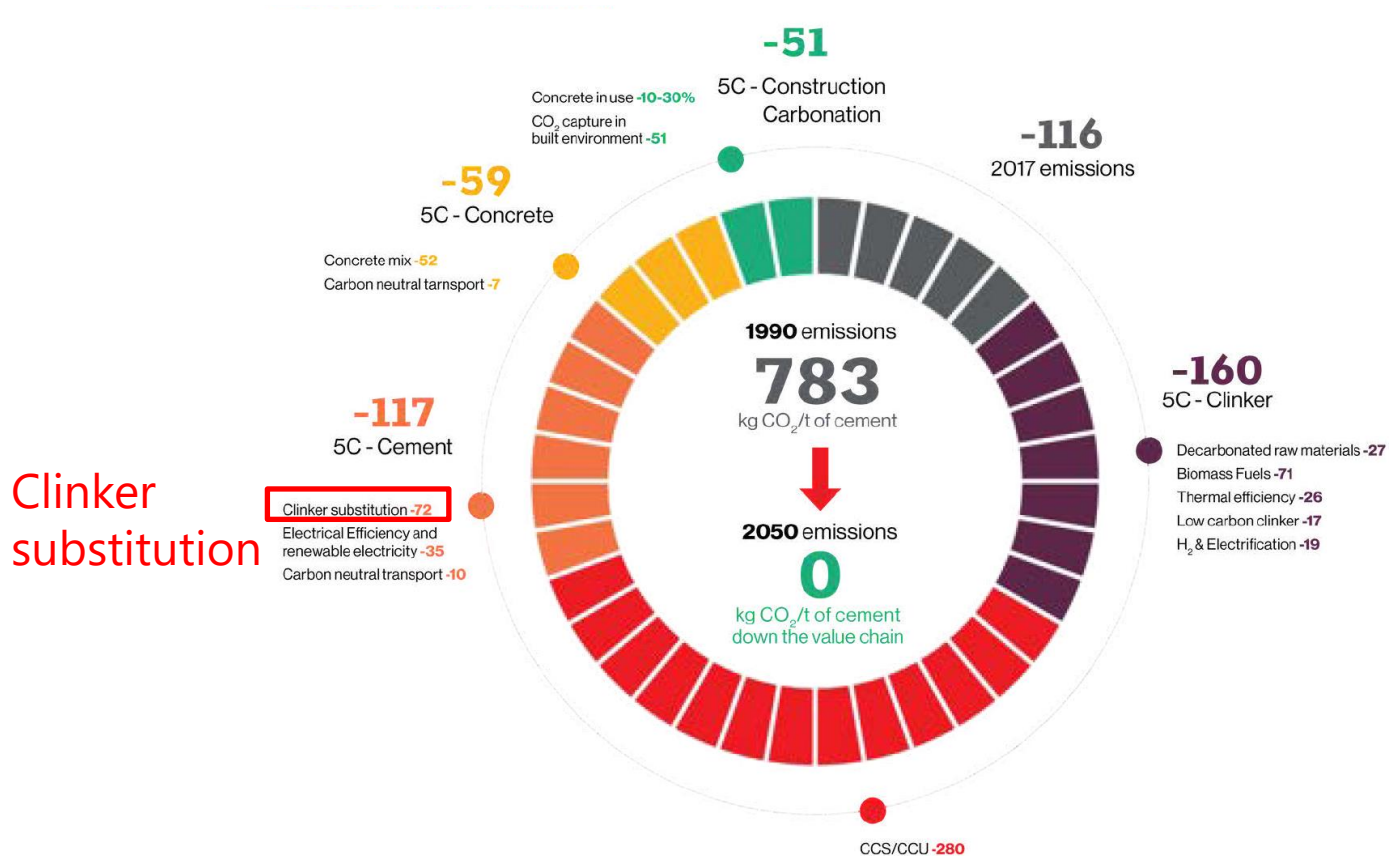


**Kein Net Zero ohne carbon capture !**

[1] Cembureau, Cementing the European Green Deal - Reaching Climate Neutrality along the Cement and Concrete Value Chain by 2050, siehe [https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap\\_final-version\\_web.pdf](https://cembureau.eu/media/kuxd32gi/cembureau-2050-roadmap_final-version_web.pdf), 2020.

[2] Cemsuisse, Roadmap 2050, siehe [https://www.cemsuisse.ch/app/uploads/2021/04/Cemsuisse\\_Roadmap\\_210422.pdf](https://www.cemsuisse.ch/app/uploads/2021/04/Cemsuisse_Roadmap_210422.pdf)

# Beispiel 1: Klinkerersatz



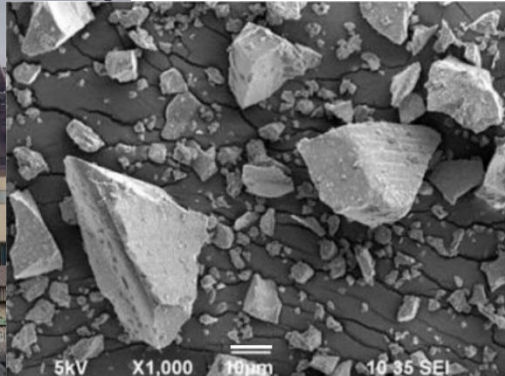


# Klinkererersatz - Überblick

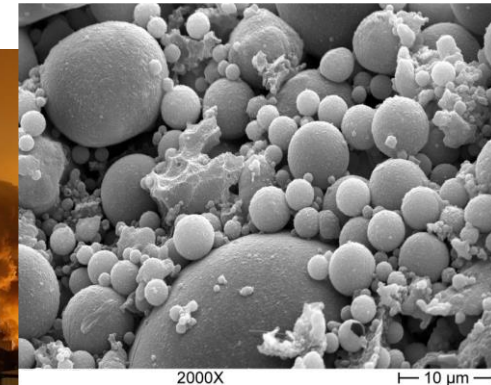
- teilweiser Ersatz des Zementklinkers im Zement durch Zusatzstoffe
- in der Regel Sekundärrohstoffe (v.a. Hüttensand, Flugasche – in CH importiert)
- etablierte Zusatzstoffe seit vielen Jahrzehnten bekannt, in Zement- und Betonnormen berücksichtigt
- ursprüngliche Motivation Kostensenkung, Abfallverwertung, spezielle Zementeigenschaften, d.h.  $\neq$  CO<sub>2</sub>-Reduktion



*Hüttensand (Schlacke)  
aus Roheisenherstellung*



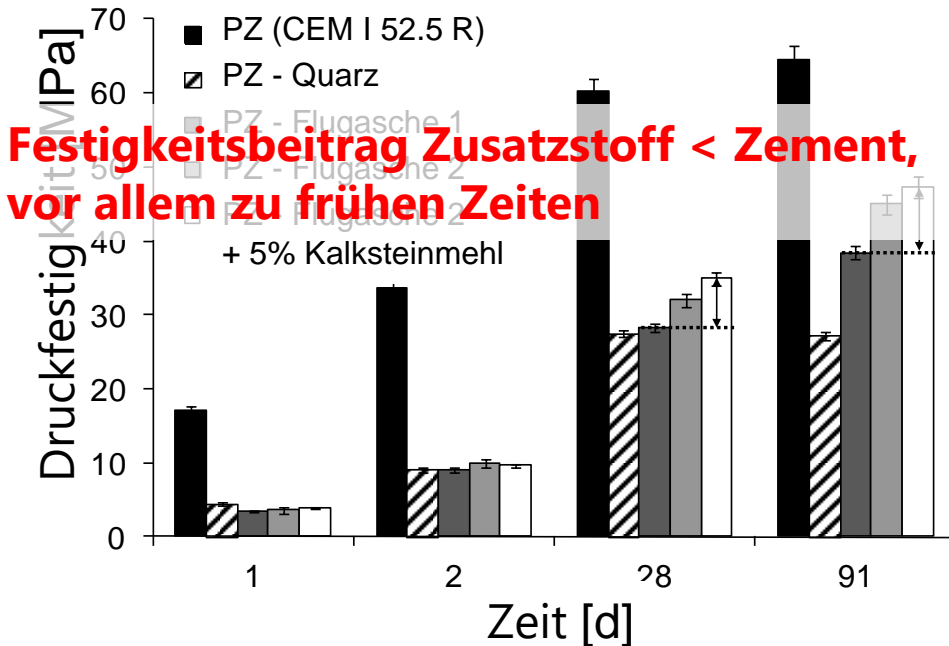
*Flugasche aus  
Steinkohlekraftwerken*



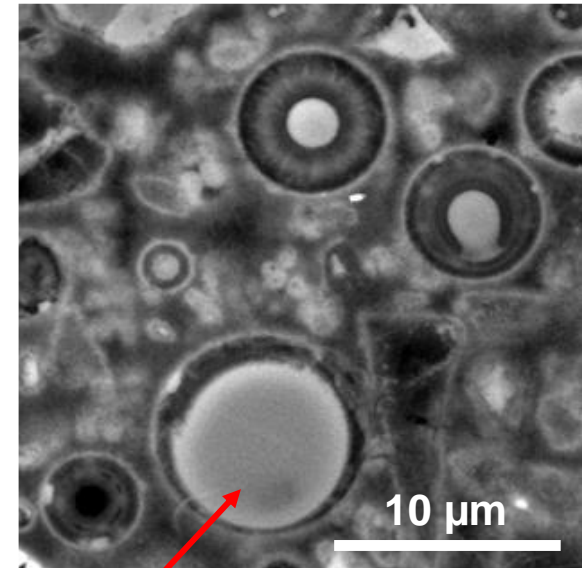
# Reaktivität von Zusatzstoffen

Druckfestigkeit von Mörteln  
50% Ersatz des Zementes durch Flugasche

Wasser/Bindemittel-Wert = 0.50



Abgebundene Zementpaste  
(Anschliff,  
Rasterelektronenmikroskop)



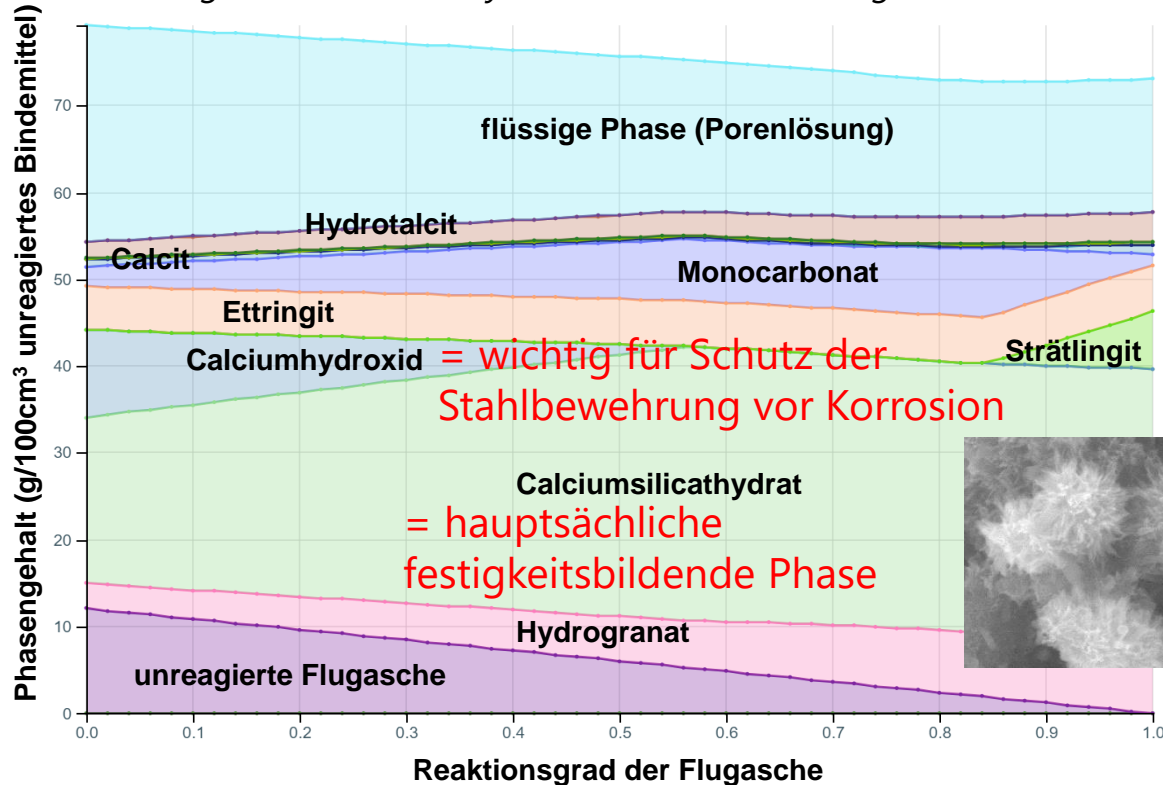
Flugasche

# Reaktivität von Zusatzstoffen

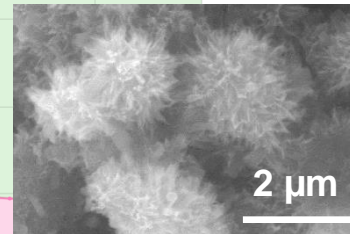
## Phasengehalte (Volumen) eines hydratisierten Zement-Flugasche Gemisches

70 Masse-% Zement, 30 Masse-% Flugasche, Wasser/Bindemittel-Wert = 0.50

Berechnung mittels thermodynamischer Modellierung (CemGEMS [1])



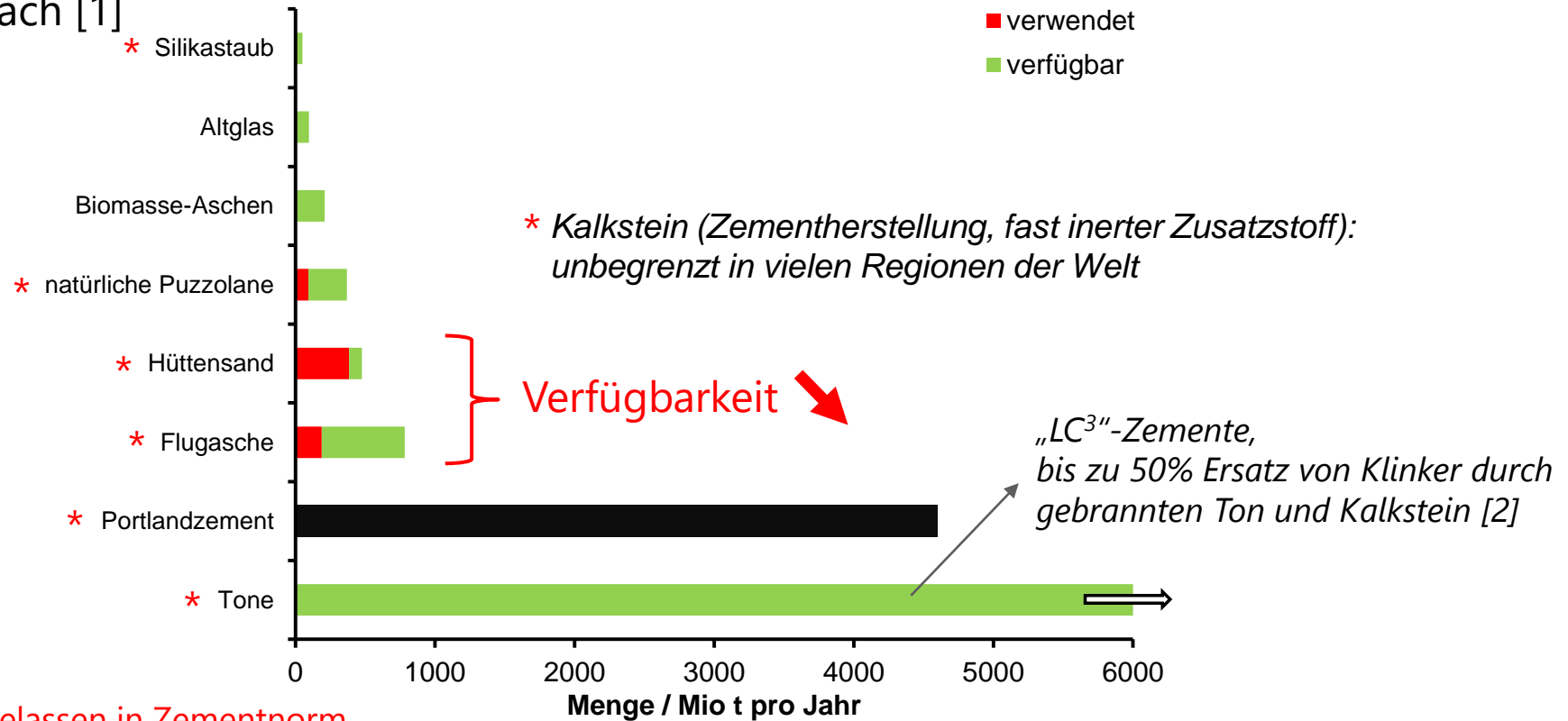
Korrosion Bewehrungsstahl



[1] D. Kulik, Winnefeld, A. Kulik, Miron, Lothenbach: RILEM Tech. Lett., 6 (2021) 36.

# Verfügbarkeit von Zusatzstoffen

nach [1]



\* zugelassen in Zementnorm

[1] Scrivener, John, Gartner: Report of the United Nations Environment Programme, 2016.

[2] Scrivener, Martirena, Bishnoi, Maity: Cem. Concr. Res., 114 (2018) 49.

# Neue Zusatzstoffe?

Material	Chemistry	Used as SCM (Mt/y)	Total volume est. (Mt/y)	Comments
Blast furnace slag	Ca-Si-Al	330	300–360	Nearly fully used, latent hydraulic
Coal fly ash	Si-Al	330–400	700–1100	Subject to limitations on carbon content, reactivity
Natural pozzolans	Si-Al	75	Large accessible reserves	Large variety/variability, often high water demand
Silica fume	Si	0.5–1	1–2.5	Used in high-performance concrete
Calcined clays	Si-Al	3	Large accessible reserves	Metakaolin performs best, often high water demand
Limestone	CaCO <sub>3</sub>	300	Large accessible reserves	Cementitious contribution in combination with reactive aluminates
Biomass ash	Si	0	100–140	Competition with use as soil amendment, high water demand, (for some: high alkali contents)
MSWI bottom ash	Si-Al-Ca	0	30–60	Expansive and corrosive components, leaching issues
Steel slag	Ca-Si-Fe	0 (negligible)	170–250	Various types, can contain expansive components (CaO) or leachable heavy metals (Cr, ...). Low reactivity
Copper slag	Fe-Si	0 (some as filler)	30–40	Low reactivity, leaching of heavy metals, more research needed
Other non-ferro slags	Fe-(Si)-(Ca)	0 (some as filler)	5–15 Mt/y each (FeCr, Pb, Ni)	Low reactivity, leaching of heavy metals, more research needed
Bauxite residue	Fe-Al-Si	0	100–150	High alkali content, low reactivity, color
Waste glass	Si-Na-Ca	0 (or negligible)	50–100	Glass recycling preferable, high alkali content

- Vor allem Schlacken und Aschen aus anderen Prozessen als Kohleverstromung und Roheisenherstellung, Altglas, mineralische Bauabfälle, ...
- Verfügbare Mengen limitiert, aber von lokalem Interesse
- z.B. problematische Eigenschaften (v.a. Schwermetallgehalte)



# Neue Zusatzstoffe: Beispiel pyrometallurgische Schlacke

Edelmetallrückgewinnung

z.B.  $\approx 250'000$  t/a in einer Anlage



Elektroschrott



Gebrauchte  
Katalysatoren



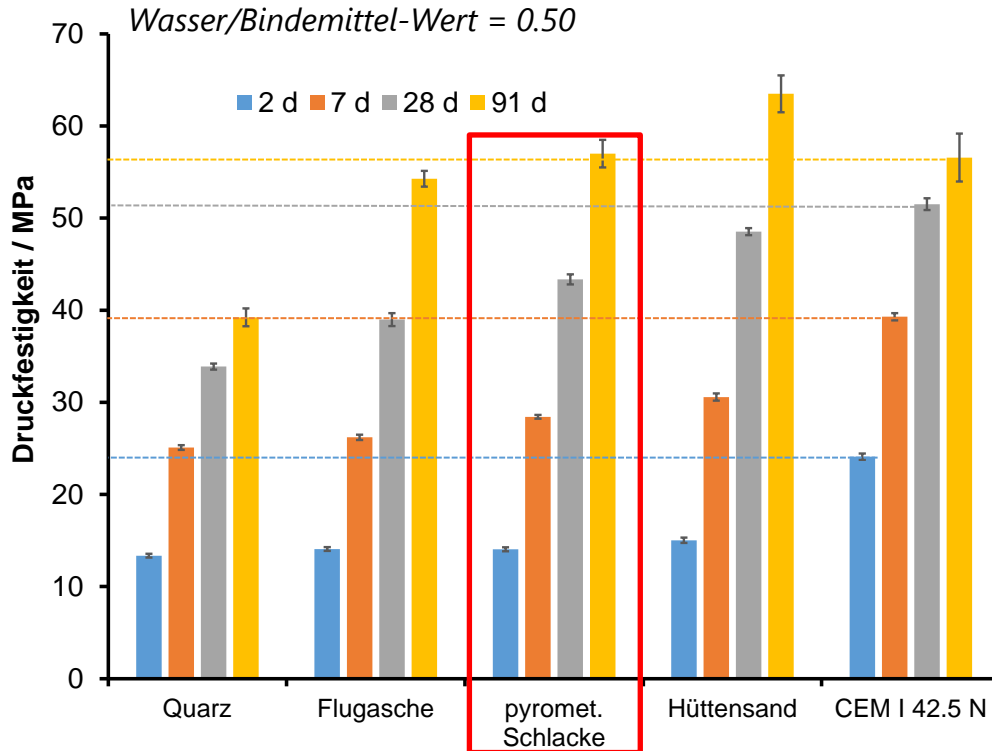
Rostasche






Andere Abfälle

# Pyrometallurgische Schlacke - Eigenschaften

Druckfestigkeit von Mörteln  
30% Ersatz des Zementes durch Zusatzstoffe



- Festigkeit 
- Dauerhaftigkeit im Beton 
- Zusammensetzung: 

Oxid	M.-%
FeO	35-45
SiO <sub>2</sub>	25-30
CaO	15-20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3-6
MgO	1-2
SO <sub>3</sub>	0.4-0.8
K <sub>2</sub> O	0.4-0.8
Na <sub>2</sub> O	1.5-2
Andere	2-5 z.B. Cu, Cr, Pb, Zn, je < 1 M.-%

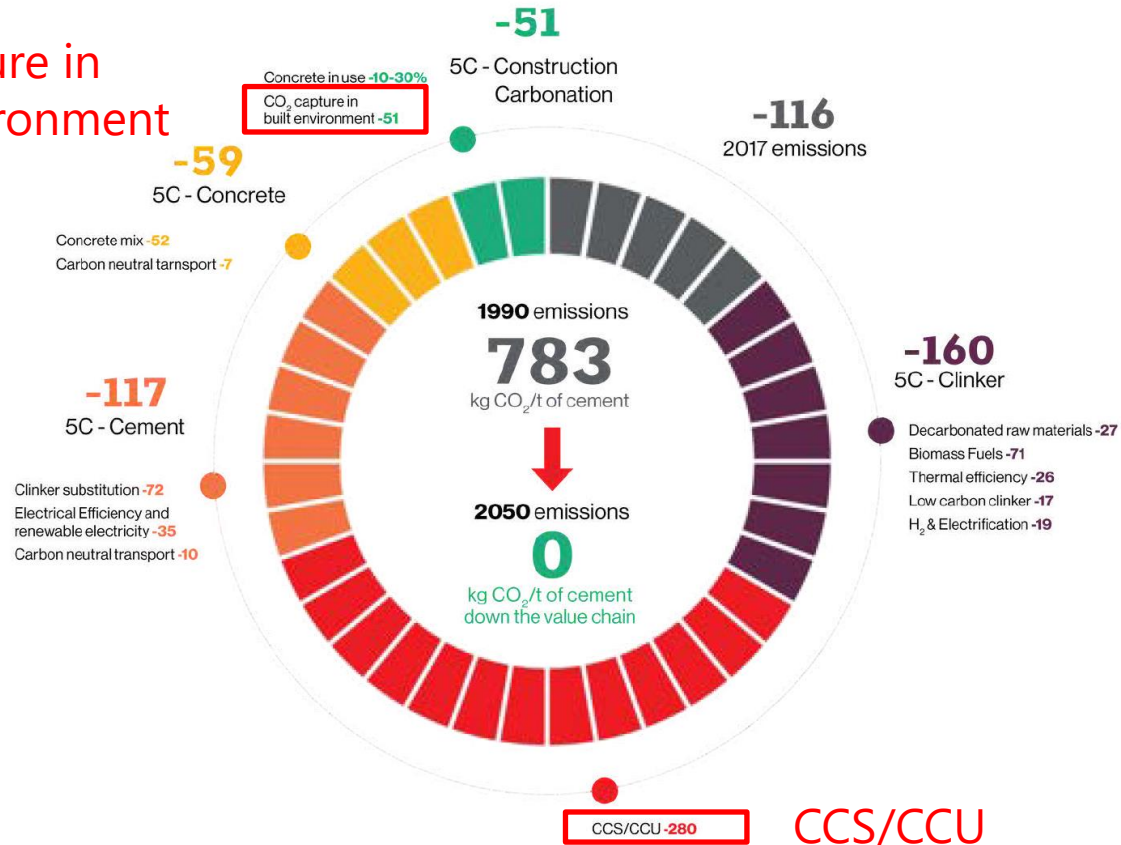
In CH: Grenzwerte  
Abfallverordnung  
(VVEA) gelten

[1] Pedersen, Winnefeld, Lothenbach: 2<sup>nd</sup> ICCM (2021), 321.

[2] Hallet, Pedersen, Lothenbach, Winnefeld, De Belie, Pontikes: Cem. Concr. Res., 151 (2022), 1106624.

# Beispiel 2: CO<sub>2</sub>-Aufnahme von (Alt-)Beton

## CO<sub>2</sub> capture in built environment

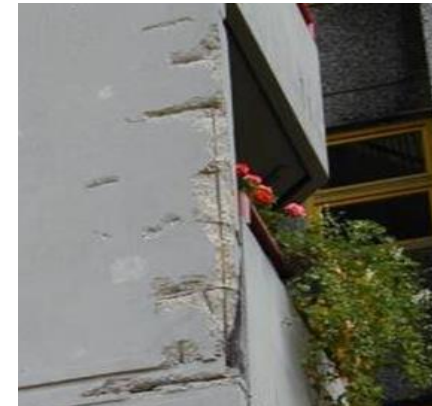


# Natürliche CO<sub>2</sub>-Aufnahme von Beton

- Bei natürlicher Bewitterung nimmt Beton CO<sub>2</sub> aus der Luft auf. => **Carbonatisierung**
- Theoretisch kann das ganze CO<sub>2</sub>, welches beim Zementbrennen aus dem Kalkstein abgespalten wurde, wieder aufgenommen werden.
- Dieser Prozess ist am Bauwerk aber unerwünscht:
  - Carbonatisierung senkt den pH-Wert des Betons.
  - Schutz der Stahlbewehrung vor Korrosion geht verloren.



carbonatisiert      nicht carbonatisiert (eingefärbt)



Korrosion der Stahlbewehrung

# Carbonatisierung von Betonabbruch

- Die natürliche Carbonatisierung am Bauwerk verläuft sehr langsam: ca. 10-35% des abgegebenen  $\text{CO}_2$  innerhalb von 100 Jahren [1,2].
- Betonabbruch nimmt viel rascher  $\text{CO}_2$  auf (grössere Oberfläche).
- Der Prozess kann zusätzlich beschleunigt werden (höhere  $\text{CO}_2$ -Konzentration).
- $\approx 10 \text{ kg CO}_2$  können in 1 t Betongranulat gespeichert werden [3].
- Das carbonatisierte Material mit dem eingespeicherten  $\text{CO}_2$  kann in neuen Baustoffen wiederverwendet werden.



[1] Pade, Guimaraes: Cem. Concr. Res. 37 (2007), 1348.

[2] Leemann: CO2STO2019 (2019), 27.

[3] Tiefenthaler, Braune, Bauer, Sacchi, Mazzotti: Front. Climat., 3 (2021), 729259.



# Projekt „DemoUpCarma“



Funded by BFE and BAFU, coordinator: ETH Zürich

## Project goals: Demonstration of CO<sub>2</sub> Management Solutions

### Domestic solution:

CO<sub>2</sub> utilization and storage in concrete - **CCUS**

CO<sub>2</sub> mineralization of demolished concrete aggregates and concrete mixing water to be used for the production of fresh concrete

**CO<sub>2</sub> stored permanently in concrete** used for building or road construction  
up to 500 tCO<sub>2</sub> in 2022/2023

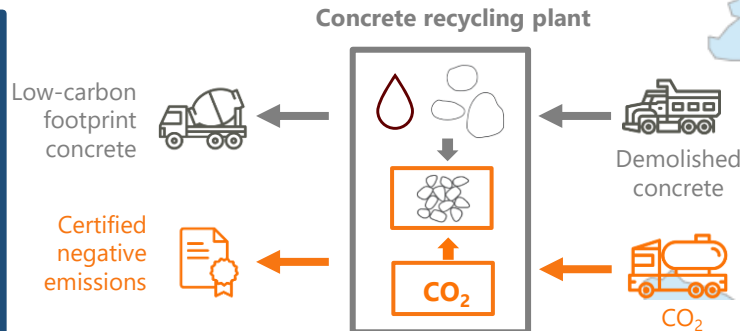
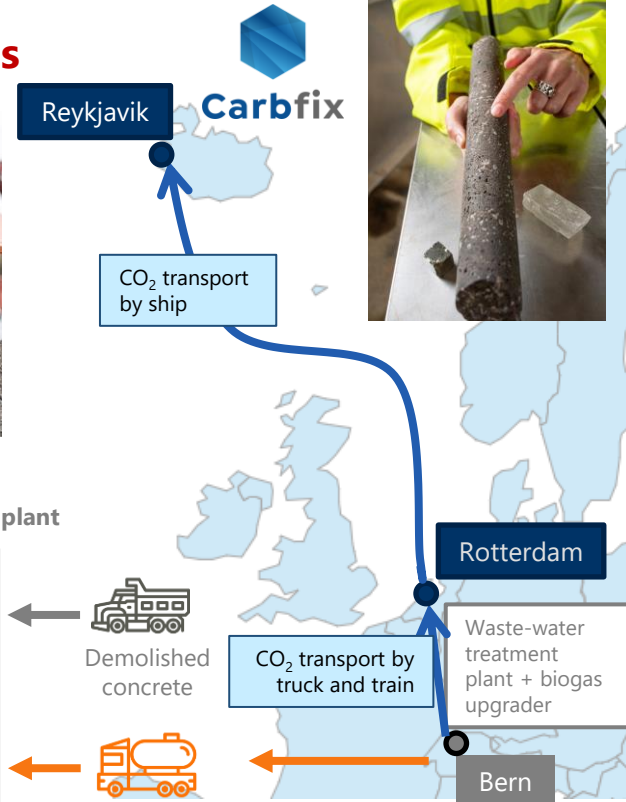
### International solution:

CO<sub>2</sub> transport and geological storage abroad – **CCTS**

**CO<sub>2</sub>** is dissolved in seawater and injected in basalt reservoirs

**CO<sub>2</sub>** is stored permanently via mineralization in the **underground**

up to 1000 tCO<sub>2</sub> in 2022/2023



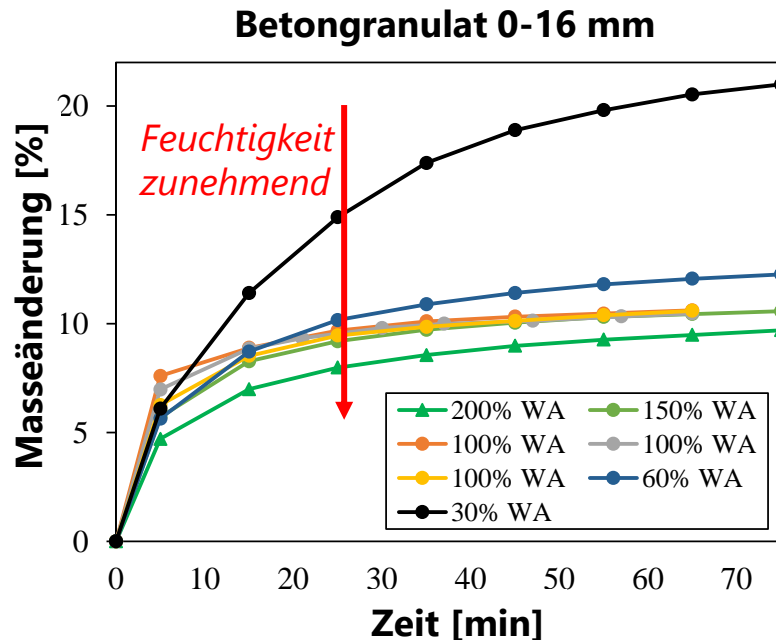
# Projekt „DemoUpCarma“



WP2: Demonstration of CO<sub>2</sub> utilization and storage in concrete (domestic solutions, CCUS)



## CO<sub>2</sub>-Absorption von Betongranulat: Abhängigkeit vom Feuchtegehalt



- Laborreaktor, Fluten mit 100% CO<sub>2</sub>
- Trockeneres Betongranulat kann mehr CO<sub>2</sub> absorbieren als feuchteres
- Signifikanter Anstieg der CO<sub>2</sub>-Absorption erst bei tiefen Feuchtegehalten ≤ 30 % WA
- Anlieferungszustand Betongranulat: 115 % WA !

WA = Wasseraufnahme Betongranulat nach 24 h

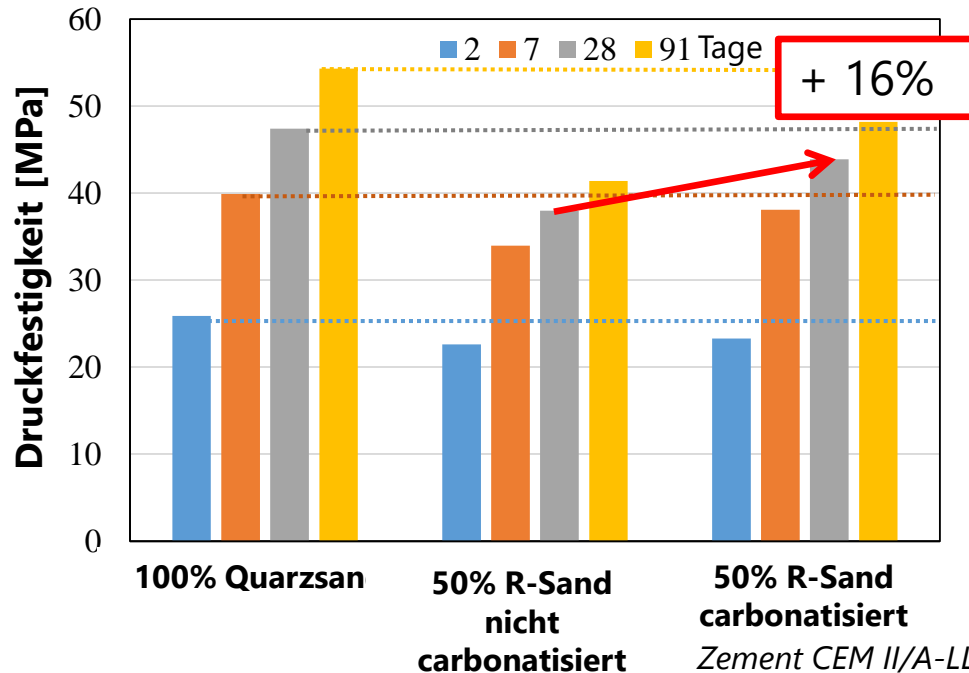
# Projekt „DemoUpCarma“



WP2: Demonstration of CO<sub>2</sub> utilization and storage in concrete (domestic solutions, CCUS)

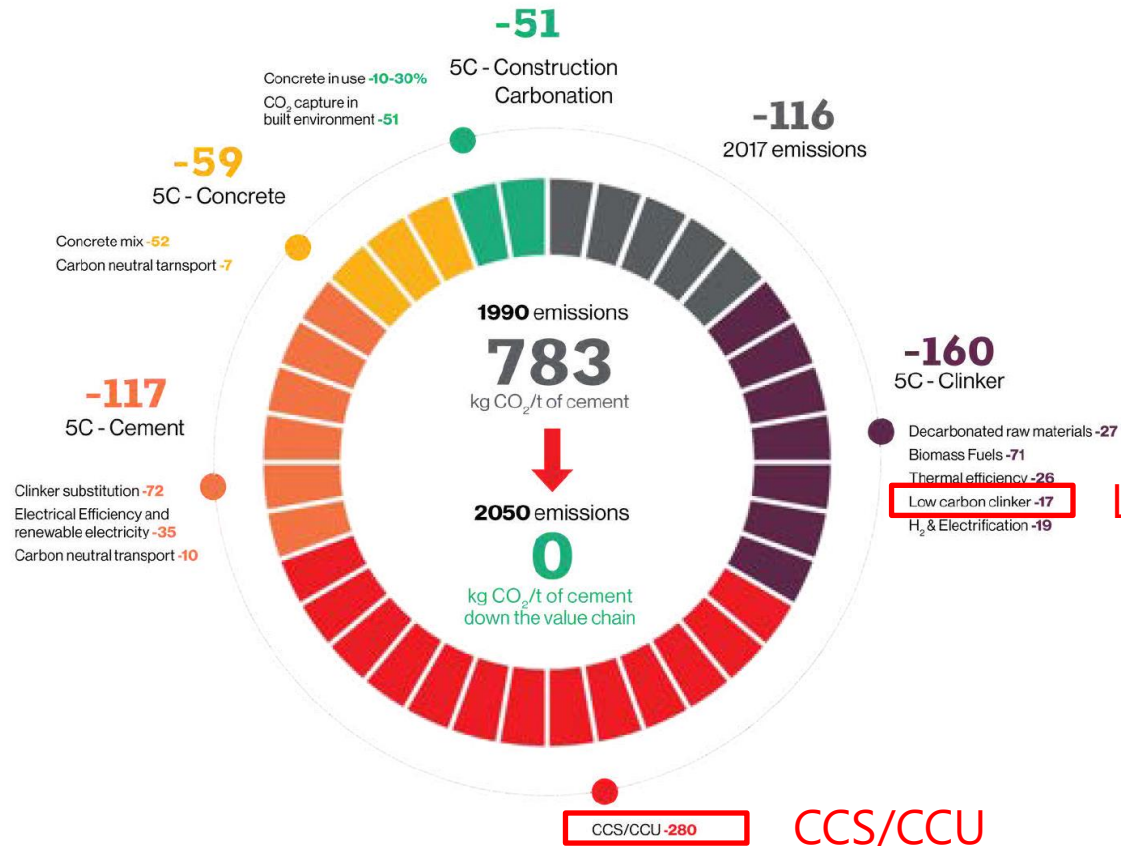


## Druckfestigkeit von Mörteln: Ersatz von 50% Quarzsand durch Recyclinggranulat 0-2 mm



- Ersatz von Quarzsand durch Recyclingsand reduziert Festigkeit (analog zu Recyclingbeton)
- Carbonatisierter Recyclingsand erreicht höhere Festigkeit als nicht carbonatisierter  
=> Potential zur Reduktion des Zementgehalts => Reduktion CO<sub>2</sub>
- Derzeit Forschung am Beton (mechanische Eigenschaften, Dauerhaftigkeit, CO<sub>2</sub>-Footprint)

# Beispiel 3: CO<sub>2</sub>-negativer Zement



Low carbon clinker

# Wie macht man einen Zement CO<sub>2</sub>-negativ?

1. Kein in den Rohmaterialien gebundenes CO<sub>2</sub>
2. Aufnahme von CO<sub>2</sub> bei Herstellung und/oder Erhärten des Zementes

Support The Guardian | Subscribe | Find a job | Sign in | Search

News | Opinion | Sport | Culture | Lifestyle | More

International edition

Environment > Climate change | Wildlife | Energy | Pollution

## Greenhouse gas emissions

### Revealed: The cement that eats carbon dioxide



**Alok Jha**, green technology correspondent  
Wed 31 Dec 2008 14:59 GMT

This article is over 9 years old

176 | 36

▲ Cement works in Clitheroe, Lancashire. Cement accounts for 5% of the world's CO<sub>2</sub> emissions - more than aviation. Photograph: Christopher Thomond

Cement, a vast source of planet-warming carbon dioxide, could be transformed into a means of stripping the greenhouse gas from the atmosphere, thanks to an innovation from British engineers.

The new environmentally friendly formulation means the cement industry could change from being a "significant emitter to a significant absorber of CO<sub>2</sub>," says Nikolaos Vlasopoulos, chief scientist at London-based Novacem, whose invention has garnered support and funding from industry and environmentalists.

The new cement, which uses a different raw material, certainly has a vast

Mögliche Lösung:

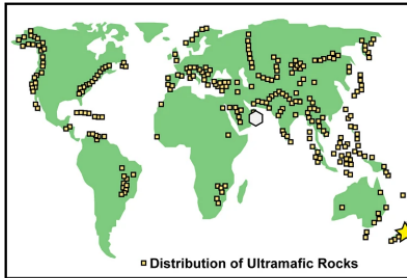
**Zement auf Basis von Magnesiumverbindungen**

- [1] Vlasopoulos, Cheeseman: PCT Patent Application PCT/GB2009/001610 (2009).  
[2] Gartner, Sui: Cem. Concr. Res. 114 (2018), 27.



# Magnesium-basierte Zemente

Rohmaterial: Magnesiumsilicat  
z.B. Olivin (natürliches Gestein)

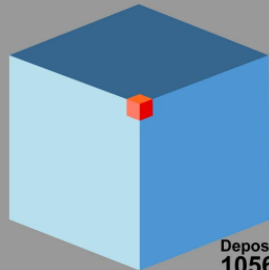


Billions of tonnes of olivine per year required to:

105 Sequester All Anthropogenic CO<sub>2</sub>  
+  
26 Global Reduction of 10 Billion Tonnes CO<sub>2</sub>

131 Billion Tonnes

Semail Ophiolite, Oman  
1.4x10<sup>8</sup> Billion Tonnes Olivine (Estimated)  
(Assuming 60% Olivine)

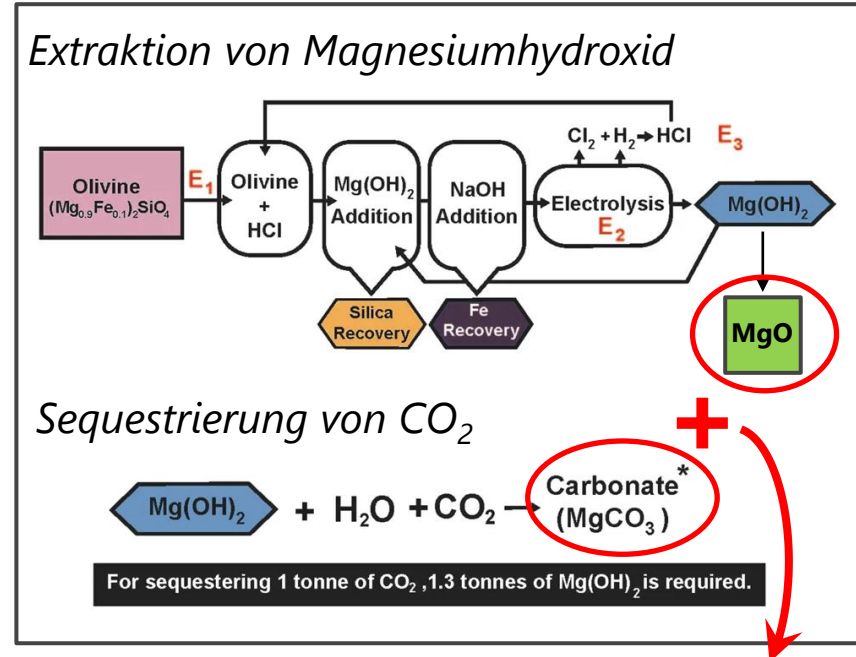


Deposit Lifetime  
1056 years

Weltweite Verteilung der Vorkommen  
von Magnesiumsilicaten [1]

[1] Scott et al.: Communications Earth & Environment 2, 1–6 (2021)

Beispiel für einen technischen Prozess [1]

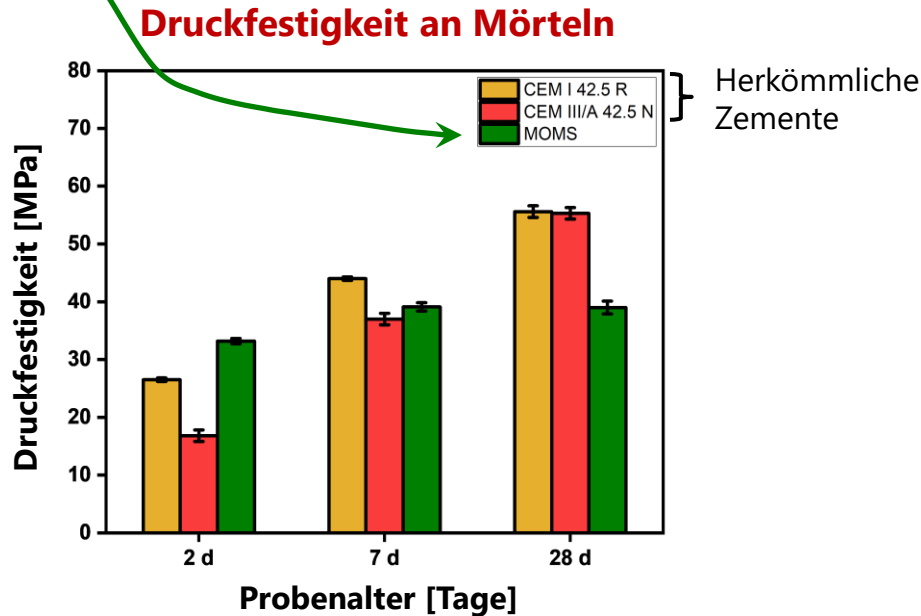


Nutzung von Gemischen aus Magnesiumoxid  
und Magnesiumcarbonaten als Bindemittel

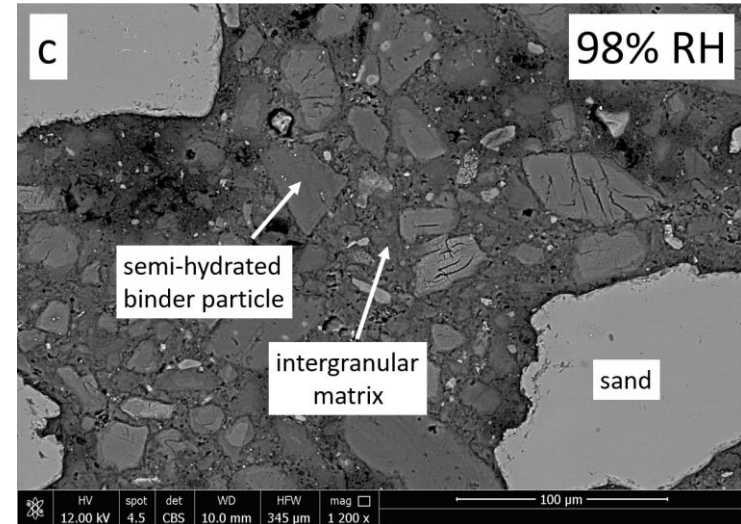
# Magnesium-basierte Zemente

Bindemittel auf Basis

MgO (~70-90 wt%) und Hydromagnesit ( $\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )



**Mikrostruktur (Rasterelektronenmikroskop)**



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

[2] Winnefeld, Leemann, German, Lothenbach: Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry 38 (2022), 100672

[3] German, PhD Thesis (Empa, ETH Zürich), 2023.

[4] Zhou, German, Leemann, Lura, Toropovs, Wyrzykowski, Griffa: Cem Concr. Res.: in preparation.

# Magnesium-basierte Zemente

«Advanced Grant» für Empa-Zementforscherin

## Startschuss für die Reise zu CO<sub>2</sub>-negativem Zement

11.07.2022 | NORBERT RAABE

Die Zementindustrie emittiert grosse Mengen von klimaschädlichem Kohlendioxid – doch alternative Bindemittel auf der Basis von Magnesiumcarbonat könnten CO<sub>2</sub> sogar binden. Beton als Kohlenstoffsenke? Ein Forschungsprojekt, das vor kurzem den ersten «Advanced Grant» des Schweizerischen Nationalfonds (SNF) für die Empa erhielt, soll die Grundlagen dazu erkunden und praktische Anwendungen vorbereiten.



Umweltfaktor Beton: Der Zement für seine Herstellung muss mit Blick aufs Klima weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen. Bild: istockphoto.com

SNF Advanced Grant (2023-2027)  
für B. Lothenbach  
4 Doktoranden, 1 PostDoc

Kooperation mit Universität Oulu (FIN)

<https://www.empa.ch/web/s604/zementforschung-grant>

## Was kann schnell erreicht werden?

- Weitere Reduktion Klinkergehalt im Zement bzw. Beton: **Beton wird vielfältiger !**
  - CH  $\approx 73\%$ ,  $< 50\%$  technisch schwer machbar
  - Neue Materialien: Verfügbarkeit, Gleichmässigkeit, Eigenschaften, Normung und Zulassung beachten  
(z.B. SIA MB 2049, kommende SIA 215-1/-2, Abfallverordnung VVEA)
- Weitere Reduktion des Anteils fossiler Energien **Beton wird teurer ?**
- Speicherung von CO<sub>2</sub> in Altbeton und Recyclingwasser (fällt im Betonwerk an)

## Was braucht noch Zeit?

### Kosten für CO<sub>2</sub> ?

- Carbon Capture and Storage / Use: **Anwendungsgebiete der neuen Zemente ?**
  - Ohne CCS/CCU kein NetZero 2050:  
Wo und wie wird gespeichert? Ausreichende Kapazität?
  - CO<sub>2</sub>-negative Zemente:  
Eigenschaften und Dauerhaftigkeit müssen erforscht werden.



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

