Kohlenstoff-management, Elektrifizierung und Kreislaufwirtschaft mit LT-Belitzement

Peter Stemmermann
3.4.2025

Institut für Technische Chemie

Institut für Technische Chemie (ITC)

Verfahrenstechnische Forschung für die Kreislaufwirtschaft →

Chemisches Recycling von Kunststoff - abfällen

Im Kontext der Schaffung einer umfassenden Kreislaufwirtschaft zum Schutze des Klimas, der Umwelt und der natürlichen Ressourcen sind nachhaltige Verwertungswege für alle Kunststoffabfälle erforderlich. →

CO_2 neutrale Kreisläufe für mineralische Baustoffe

Wir minimieren Rohstoffeinsatz und Treibhausgasemission der wichtigsten mineralischen Massenbaustoffe durch Forschung von den Grundlagen bis zu Pilotanlagen mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie. →

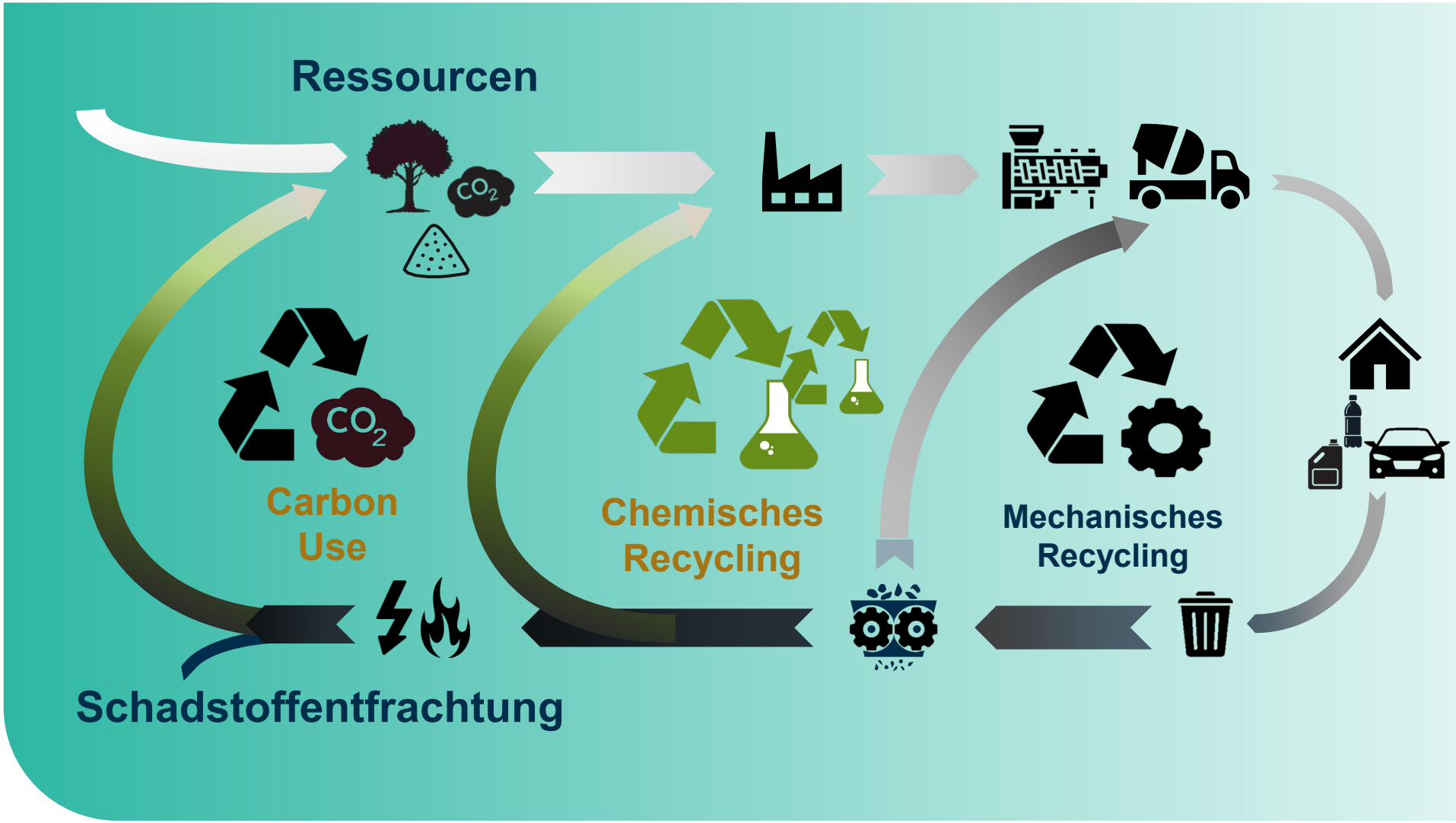
Thermo-chemischer Abbau von Schadstoffen

Wir untersuchen die Verwertung von Abfällen, für die es bisher keine technisch etablierten Lösungen gibt. Hierzu gehören Nanopartikel in Abfällen, Carbonfasern am Ende des Lebenszyklus und Polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) →

Video: Kohlenstoff-Kreislauf für zirkuläres Wirtschaften

Wege um von einer linearen Wirtschaftskette zur Kreislaufwirtschaft zu gelangen: ein Film zu den Arbeiten des ITC. →

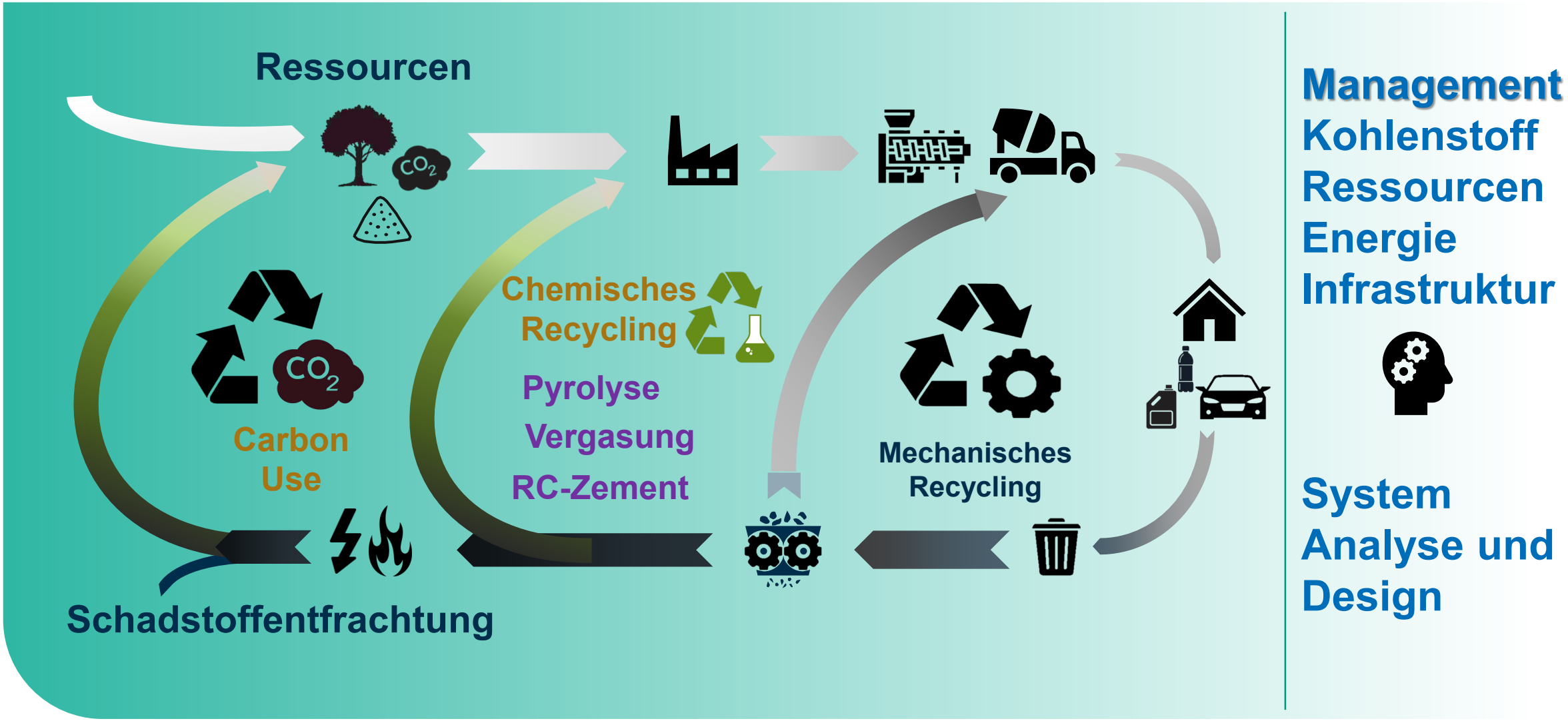
Kohlenstoffkreislauf der Kreislaufwirtschaft



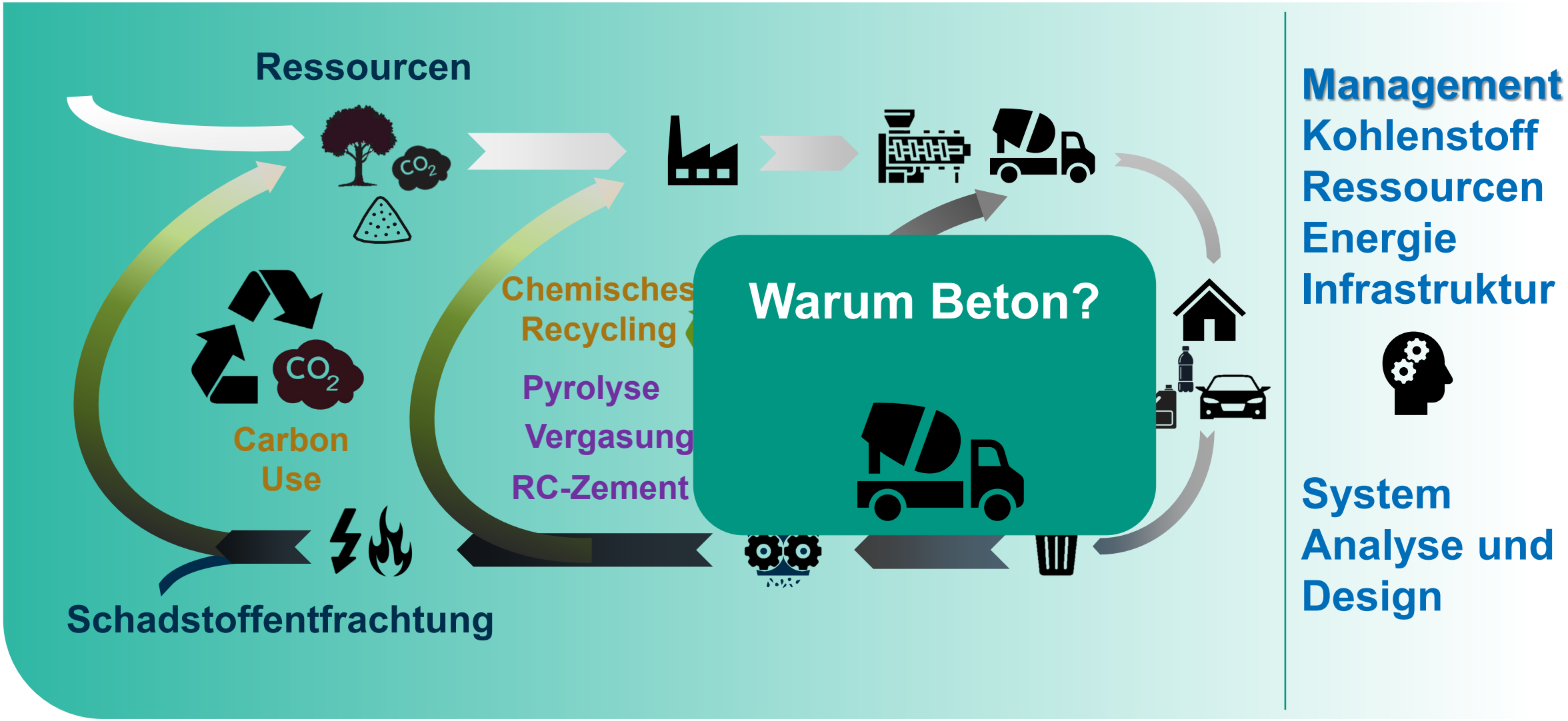
Management
Kohlenstoff
Ressourcen
Energie
Infrastruktur

System Analyse und Design

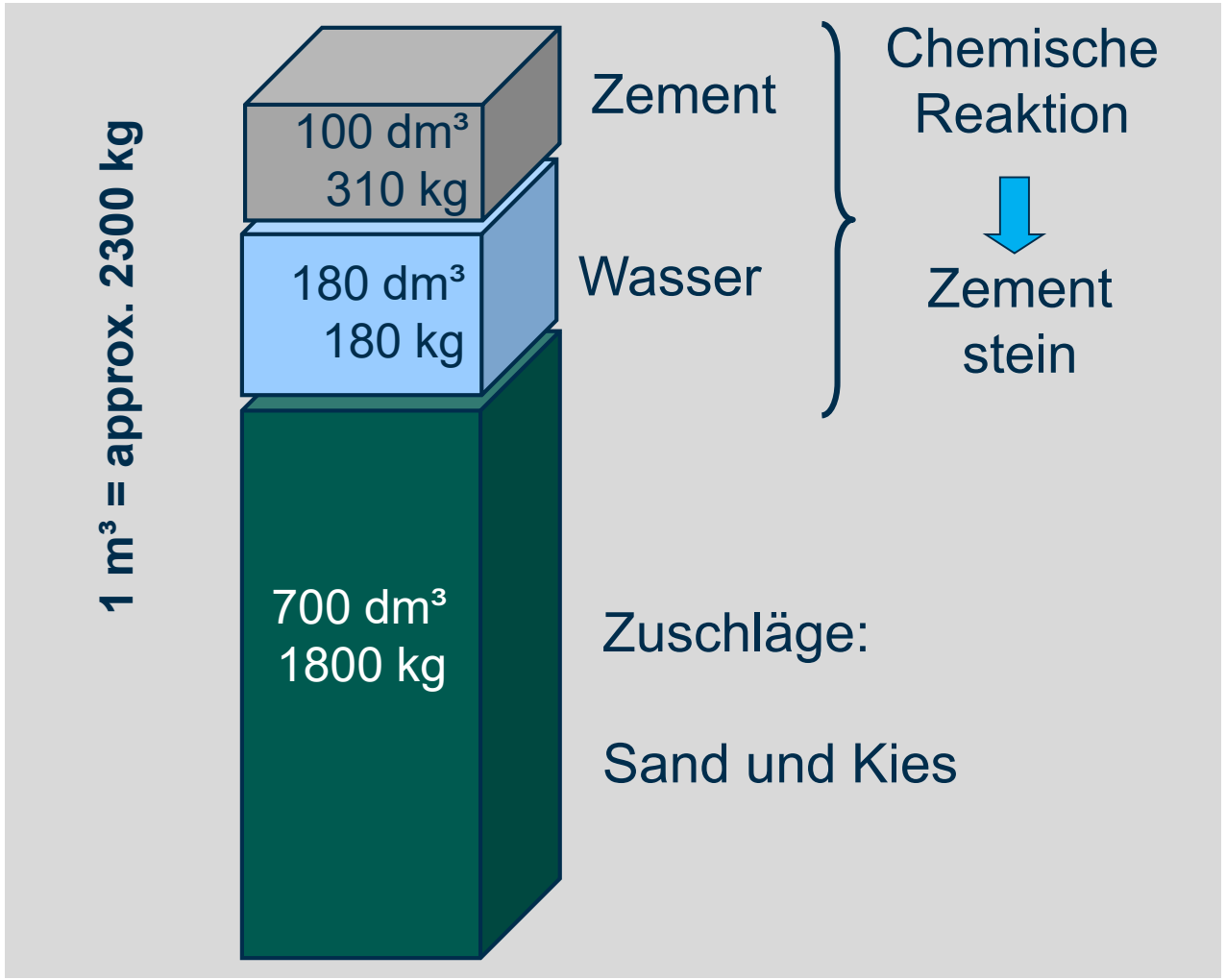
Kohlenstoffkreislauf der Kreislaufwirtschaft

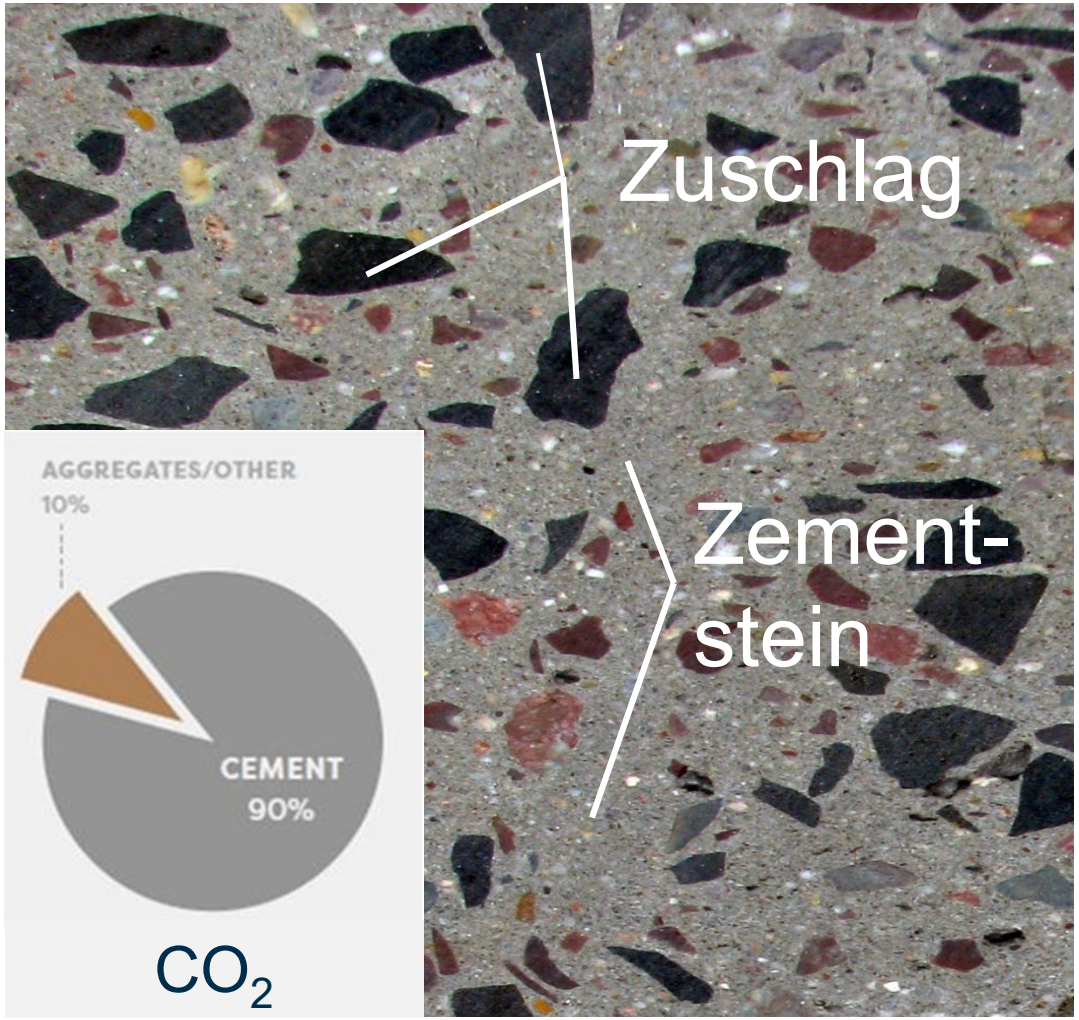


Kohlenstoffkreislauf der Kreislaufwirtschaft



Beton – eine kurze Einführung





Globale Betonproduktion (pro Jahr)

1m³ per capita
= 7,5km³

Matterhorn,
Schweiz

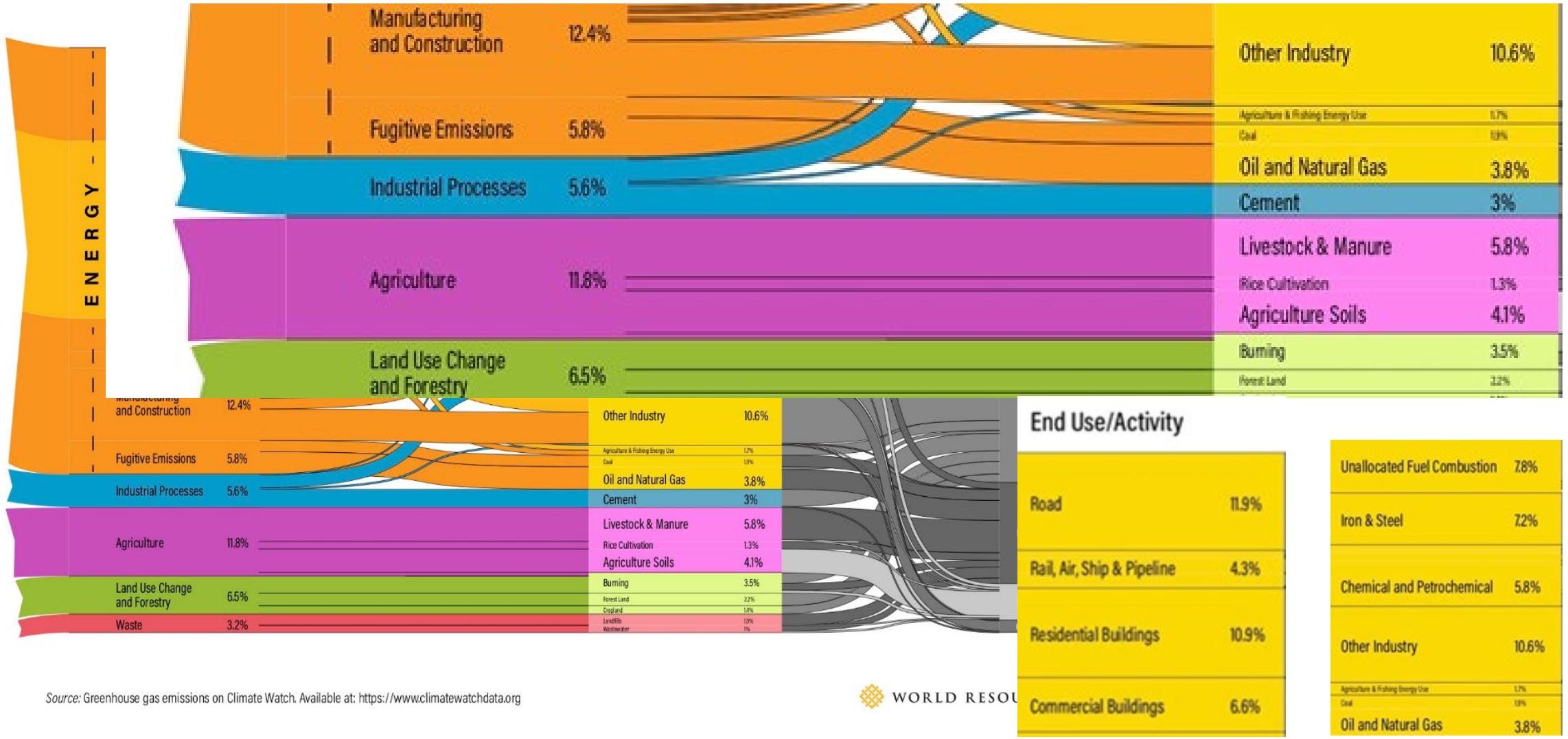
Pyramide

Energie

Zuschläge

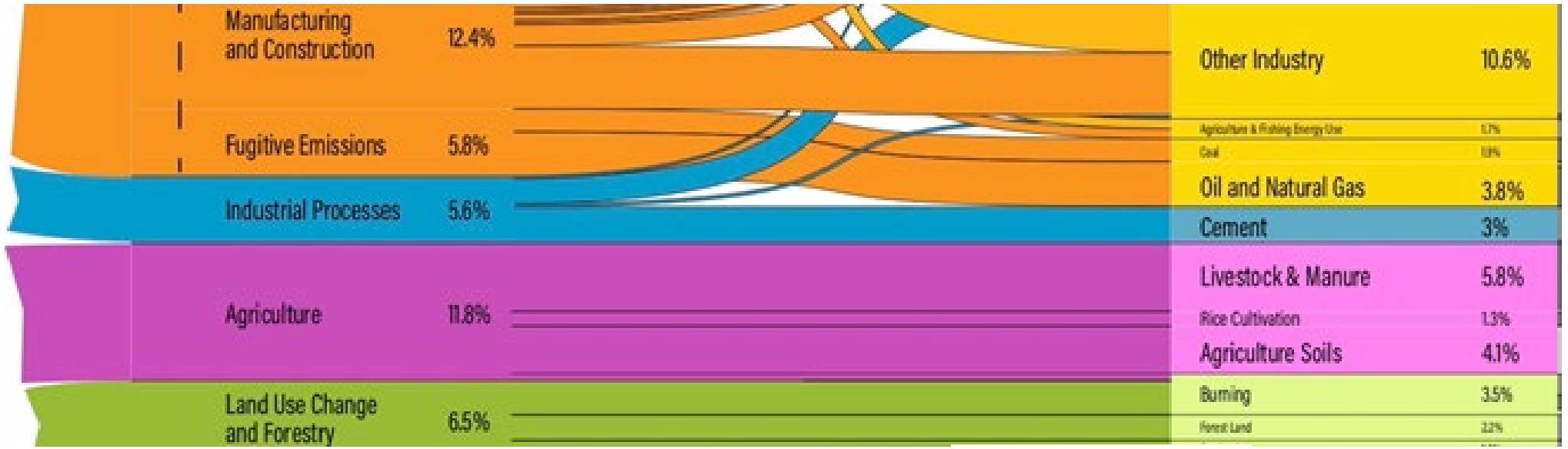
CO_2

Globale Treibhausgasemissionen (2016)
Total: 49.4 $GtCO_2e$ (35.5 Gt CO2)



Source: Greenhouse gas emissions on Climate Watch. Available at: https://www.climatewatchdata.org

Globale Treibhausgasemissionen (2016)
Total: 49.4 $GtCO_2e$ (35.5 Gt CO2)



Zementherstellung

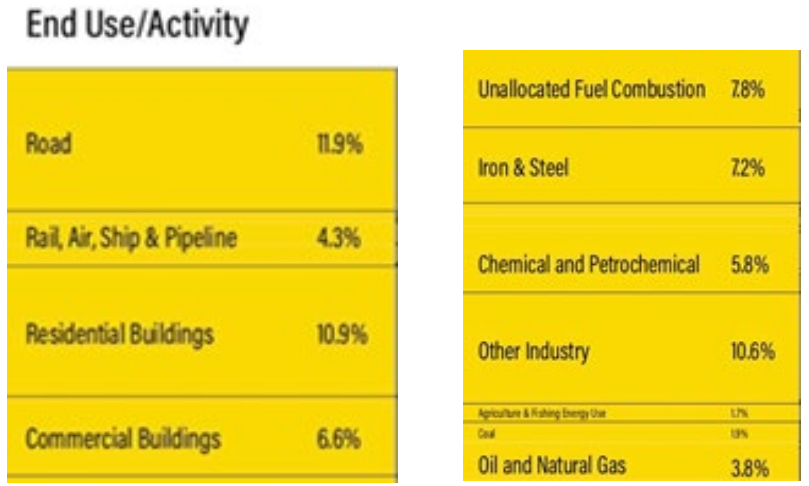
Prozessemissionen (limestone) 3%

Energie 2%

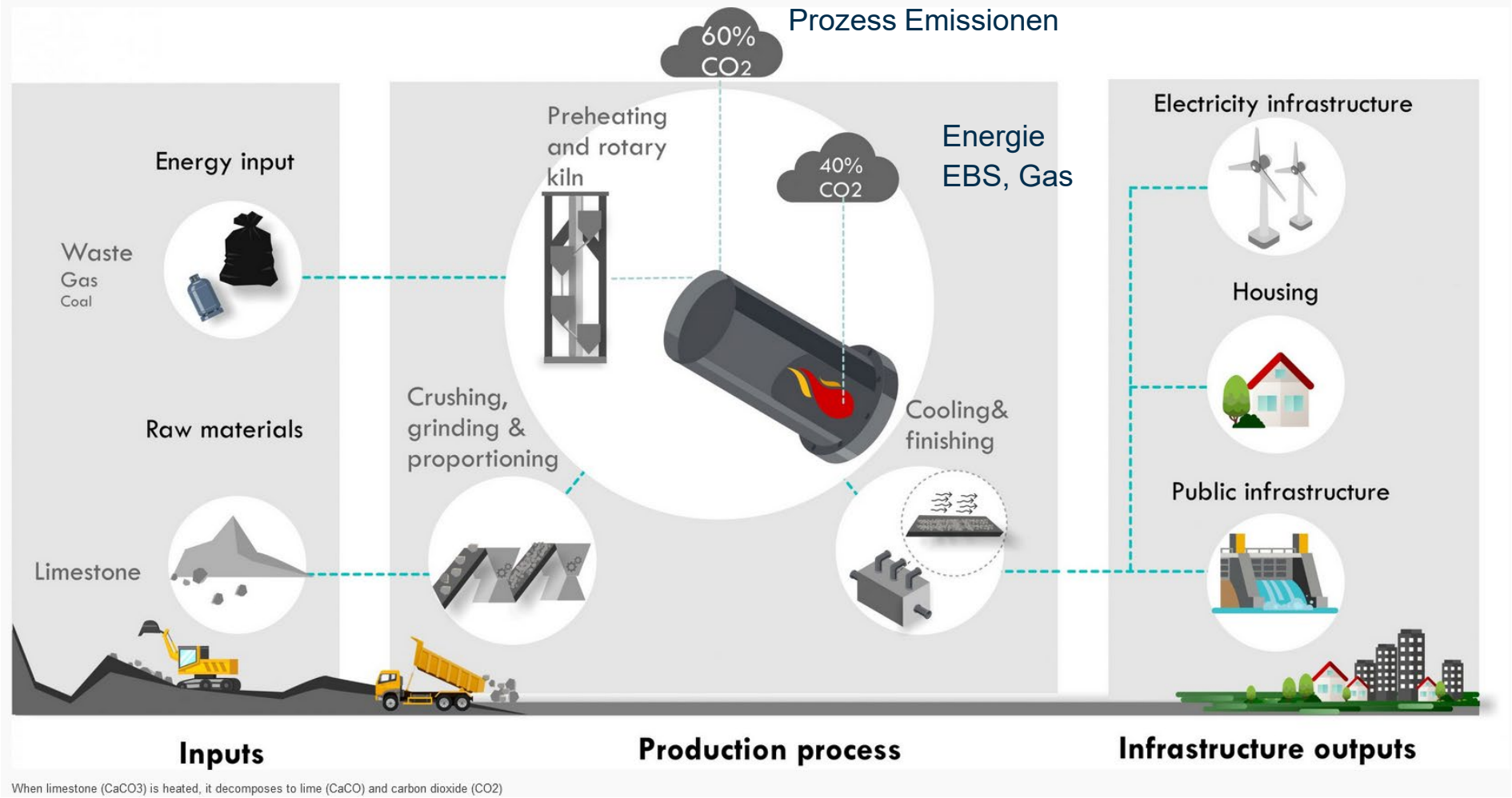
5% der GHG

=7% der

CO_2 Emissionen



Herstellung von Zementklinker: 0,8 t CO_2/t

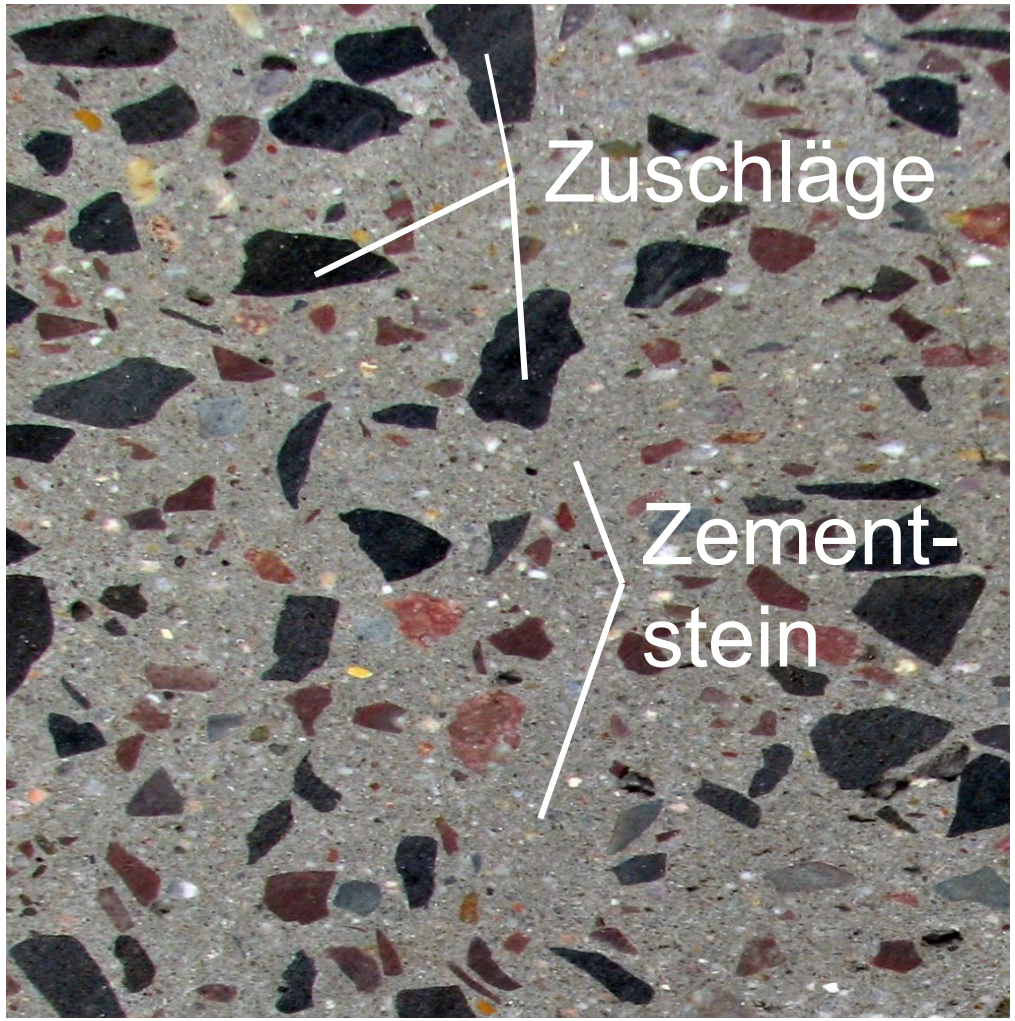


https://bellona.org/news/ccs/2021-01-how-can-recycling-in-the-cement-and-concrete-sector-contribute-to-climate-change-mitigation

Kreislaufwirtschaft für Beton

1. **Reduce / Redesign**: optimierte Betonmischung, strukturelle Planung, alternative Zemente
2. **Repair**: Verlängerung der Lebensdauer, Schutz der Bewehrung
3. **Reuse:** für Fertigteile (begrenzt mgl.)
4. **Recycle** „closed loop“: Recycling als Zement + Zuschläge (Forschung)
5. **Downcycle**: gebrochener Beton als Schotter, Zuschlag und Füllstoff
6. **Mitigate**: Kohlenstoff-Sequestrierung

Beton – Recycling



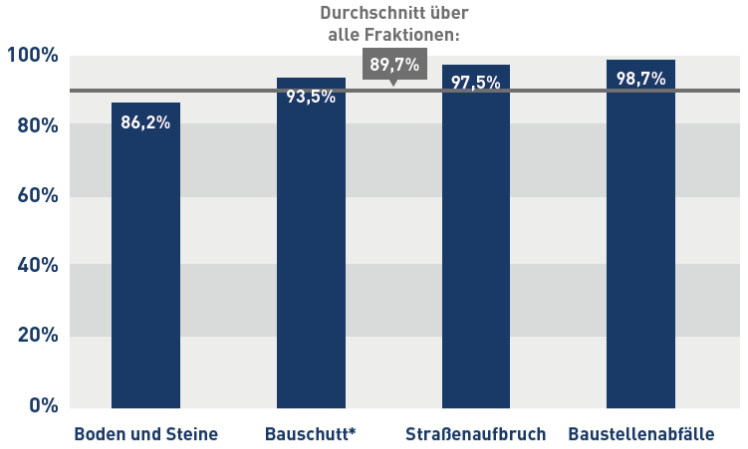
"Recycling an airfield N03 - geograph.org.uk - 379756" by Jim Bain is licensed under CC BY-SA 2.0.

Beton-
brech-
sand

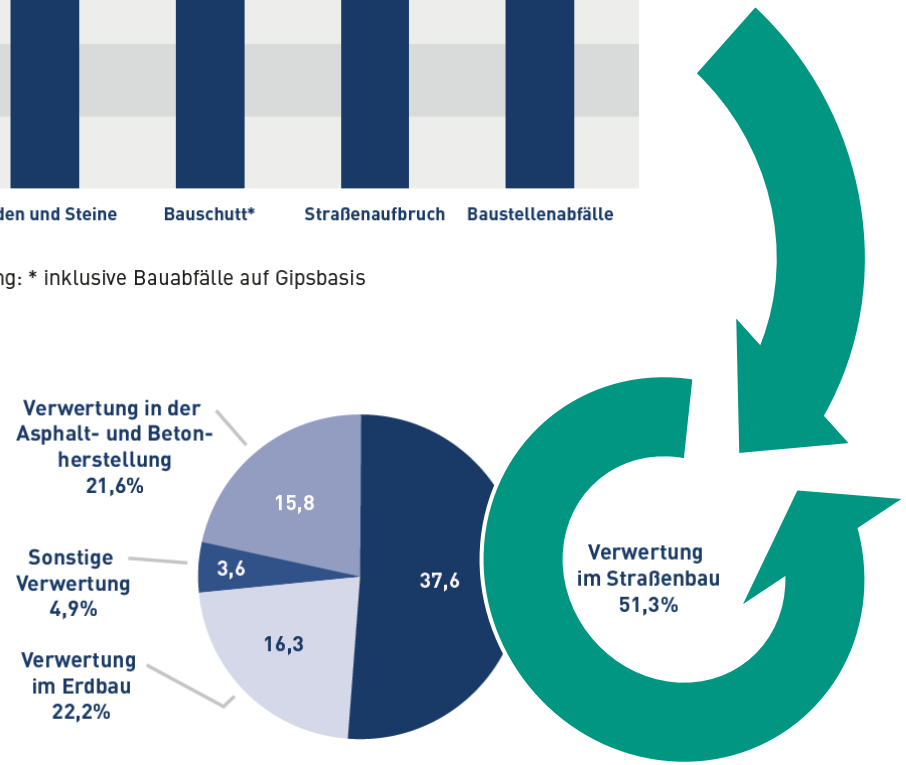
RC-Beton
Straßenbau

Beton Recycling Deutschland

- Wiederverwendung von gebrochenen Zuschlägen aus Abfallbeton in konstruktivem Beton <= 1%
- Einmalige Kaskadennutzung 94% (meist Straßenbau)
- Wiederverwendung und closed loop Recycling hauptsächlich in Forschungs- und Demonstrationsprojekten
- Kein Recycling von Zementstein aus Betonabfällen in Zementklinker etabliert



Anmerkung: * inklusive Bauabfälle auf Gipsbasis

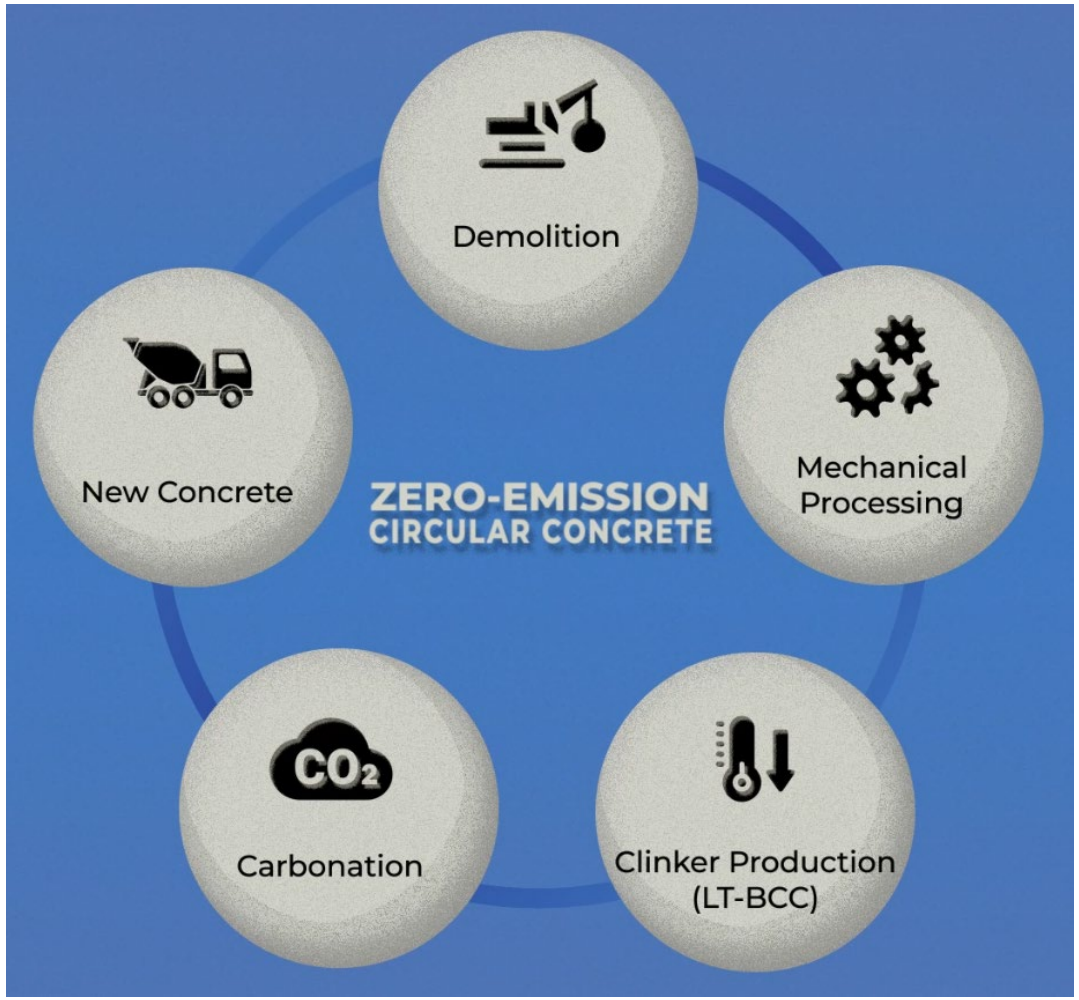


Kreislaufwirtschaft Bau *Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018,* 2021.

Strategie: Kreislaufbeton aus rezykliertem Zementklinker und rezyklierter karbonisierter Gesteinskörnung

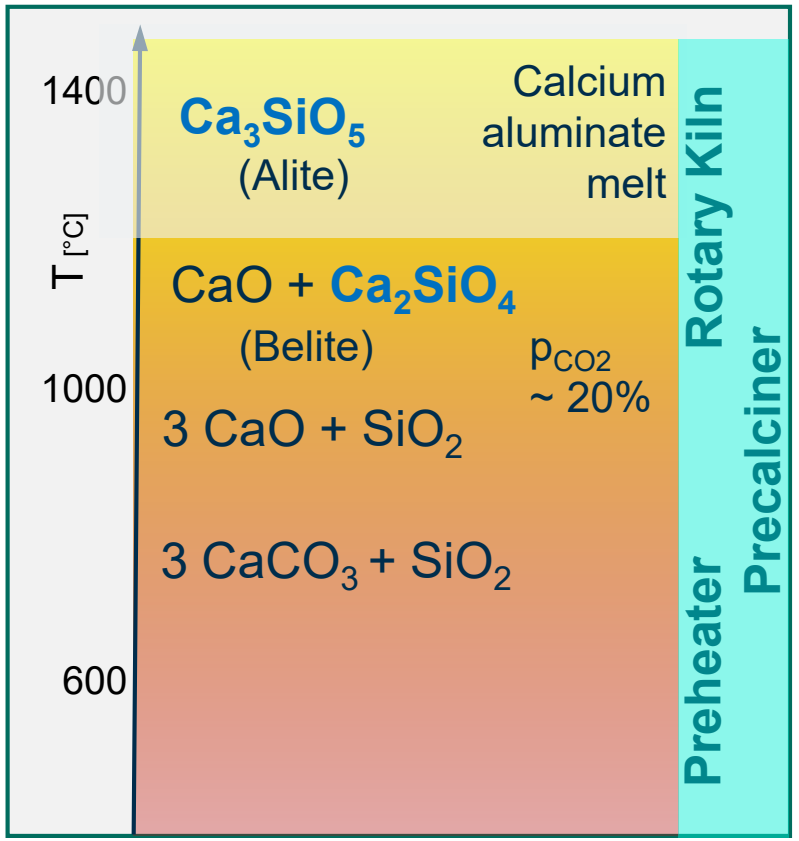
- Beim Brechen von Altbeton werden grobe Zuschlagstoffe und Feinanteile gewonnen
- Feinkorn wird zusammen mit Kalkstein als Rohmaterial für die Zementklinkerherstellung mit Carbon Capture verwendet
- Integrierte Sequestrierung von CO_2 in grober Gesteinskörnung
- ABER: Die Kapazität zur CO_2-Sequestrierung reicht nur für Prozessemissionen aus
  - elektrische Beheizung erforderlich
  - Klinkerherstellung bei niedriger Temperatur

  → Neues Klinkerverfahren



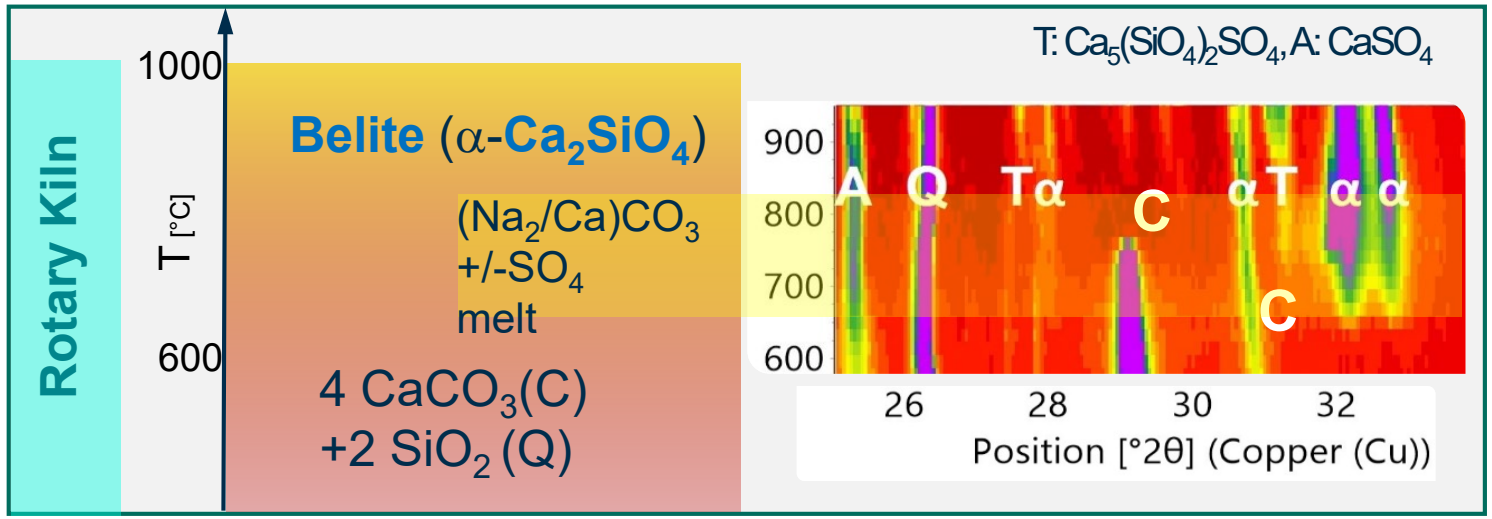
Tief-Temperatur - Belit Zementklinker

OPC Klinker



LT-Belit Klinker

- **Zugabe von 2% Flux, z.B. Na_2CO_3 / K_2SO_4**
- **p_{CO2} ~ 100%**
- **Geringfügig reduzierter CaO Gehalt (CaO/SiO_2 = 2)**



XRD, in-situ

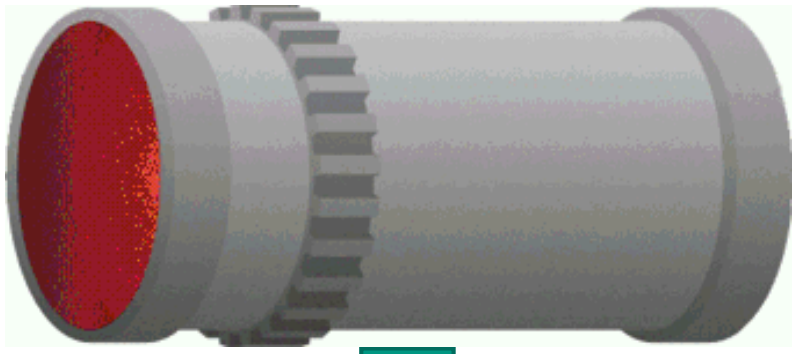
H. Hunsinger et al. (2016) **EP 2 880 000 B1**

Tief-Temperatur - Belit Zementklinker

Rohstoffe

- Betonbrechsand
  (andere CaO reiche entsäuerte Reststoffe z.B. Porenbeton)
- Kalkstein
- 2% Flussmittel

Drehrohrofen, $T_{max.}$ 1000°C
CO_2-Atmosphäre, elektrisch beheizt (oxyfuel)



CO_2

Verwendung zur Karbonatisierung rezyklierter Gesteinskörnungen

LT-Belit Zement Klinker

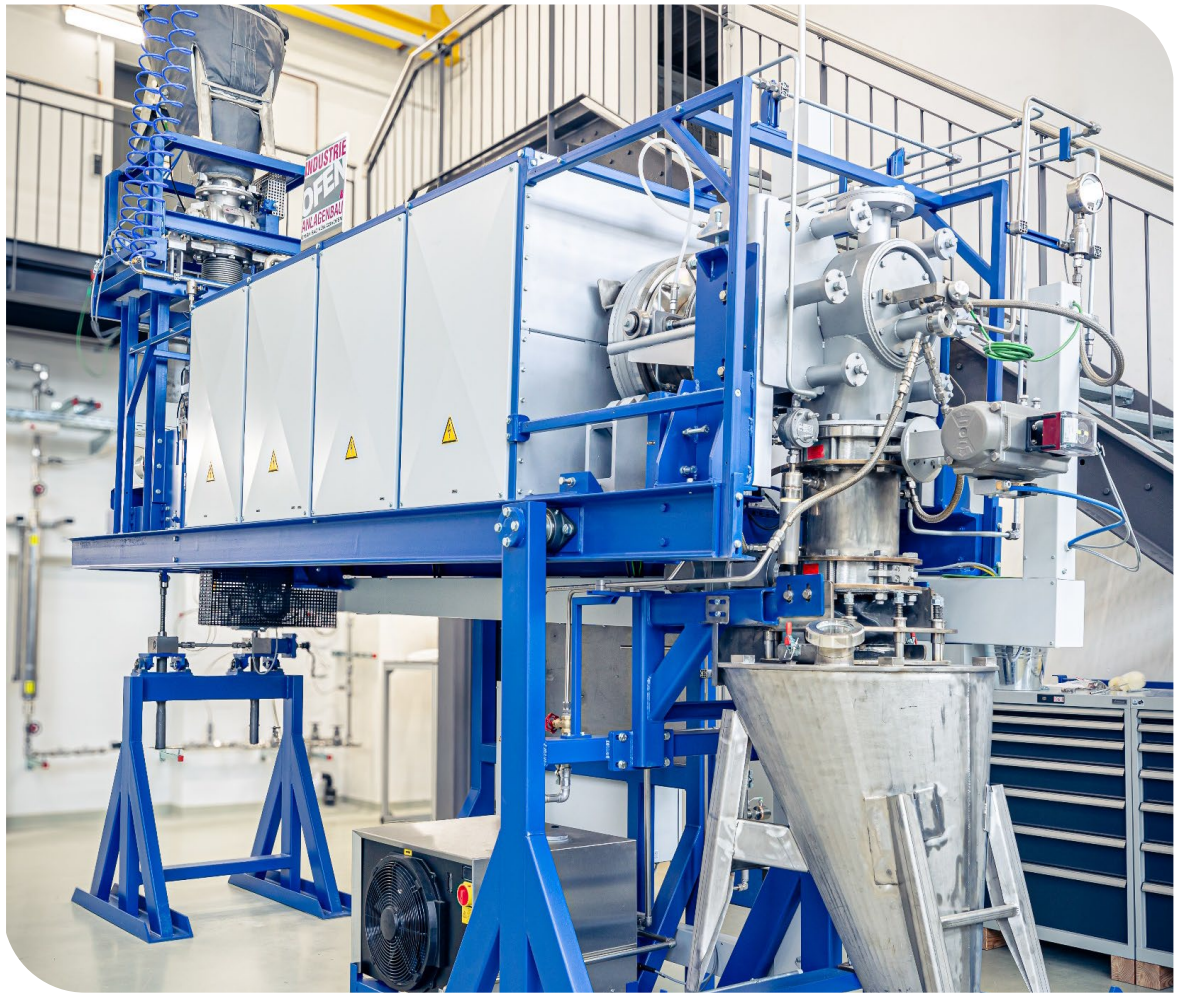
OPC Klinker Substitut in

- Zement (Beton)
- Porenbeton
- ...

Frühfestigkeit

Pilotanlage

- Auslegung Durchsatz ca. 10 kg/h
- Getestet mit Durchsatz bis 100 kg/h
- Verweilzeit ca. 25 Minuten
- Voll bilanzierbar
- Betrieb in konzentriertem CO_2 (95%+5% O_2)
- Speziell angepasste Rohmischungen ermöglichen die Fixierung von kritischen Elementen in unlöslichen Mineralien
- Produkt nach EN 197-1, außer wenn vorhanden, bei hohen Chlorgehalten

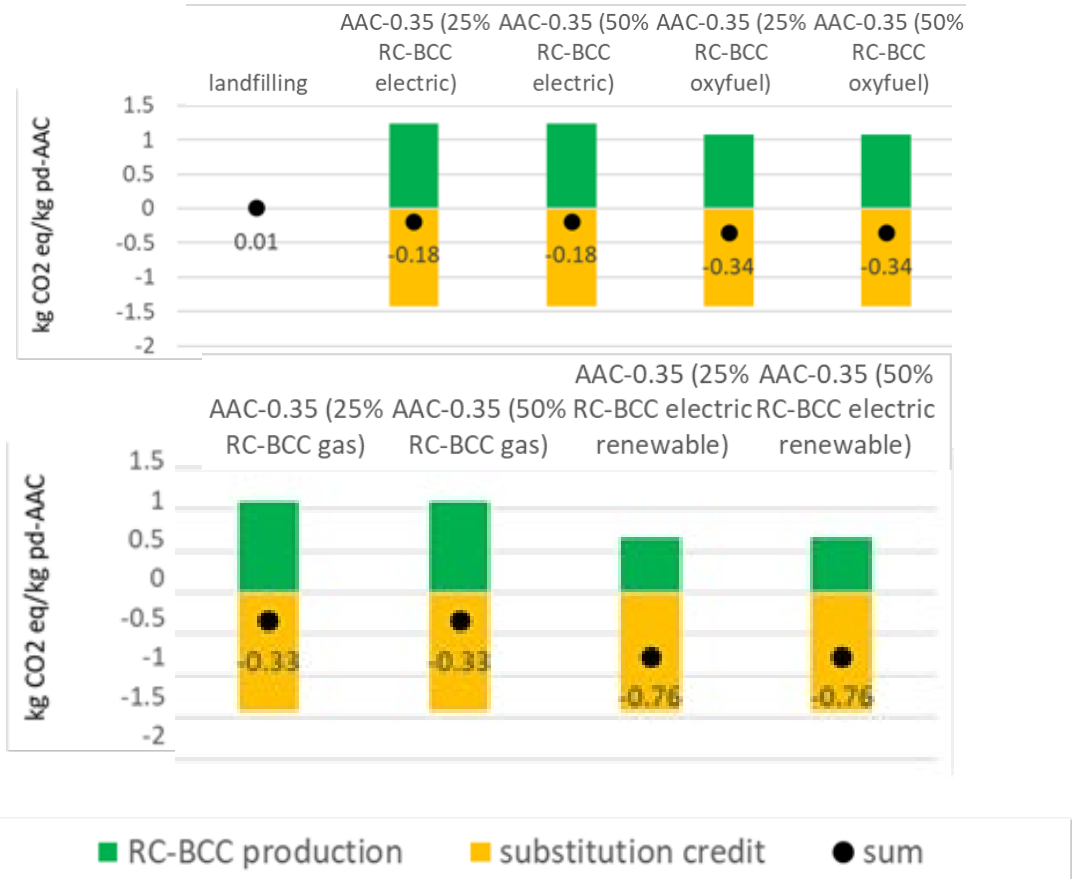


Nachhaltigkeitsindikatoren und Wirtschaftlichkeit: Bewertung LT-Belit Klinker aus Porenbetonabfall

Energie / CO_2 Bilanz pro Tonne Klinker

Heat supply Thermal efficiency (est.)		**Electric** 60%	**Oxyfuel** 50%
Process Heat	MJ/t *kWh/t*	(1937) *538*	2606
Electric Units Ventilation, Control Milling, Oxygen Generation	kWh/t	110	179
Total Electricity	kWh/t	648	179
Total Energy	MJ/t	2333	3250
CO_2 fuel + process emissions	kg/t	369	502
$c(CO_2)$	%	95-100	90-95

GWP Reduktion pro kilo Porenbetonabfall



Stemmermann, P., Volk, R., Steins, J. J. & Beuchle, G. Recycling belite cement clinker from post-demolition autoclaved aerated concrete – assessing a new process. *Resources, Conservation and Recycling* **203**, (2024).

LT-Belit Klinker in der Porenbeton-Produktion

- LT-Belite Klinker aus realem Porenbetonabfall kann bis zu 50% des in der Porenbetonproduktion eingesetzten Zements ersetzen (Produktionsversuch Xella).
- Ein hoher und schwankender Sulfatgehalt in den Sekundärrohstoffen wird durch angepasste Mineralisierer gebunden.
- RC-Belit-Klinker aus Porenbeton bzw. Altbeton zeigen bei der Porenbetonherstellung ähnliche Eigenschaften
- Ein 25%iger Ersatz von Zement durch Belite-Klinker aus einem 1,5t-Testbrand wurde an einem Standort der Xella im industriellen Maßstab erfolgreich getestet

REPOST gefördert durch

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

URBAN

CO_2-REDUZIERTER BETON DURCH UPCYCLING VON RESTSTOFFEN AUS DER BETONAUFBEREITUNG UND CCU

- Entwicklung und Demonstration von Kreislaufbeton in halbindustriellem Maßstab (50t)
- Teilweiser Ersatz von OPC durch Belite-Klinker
- Entwicklung von Karbonisierungstechnologien

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ptJ
Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

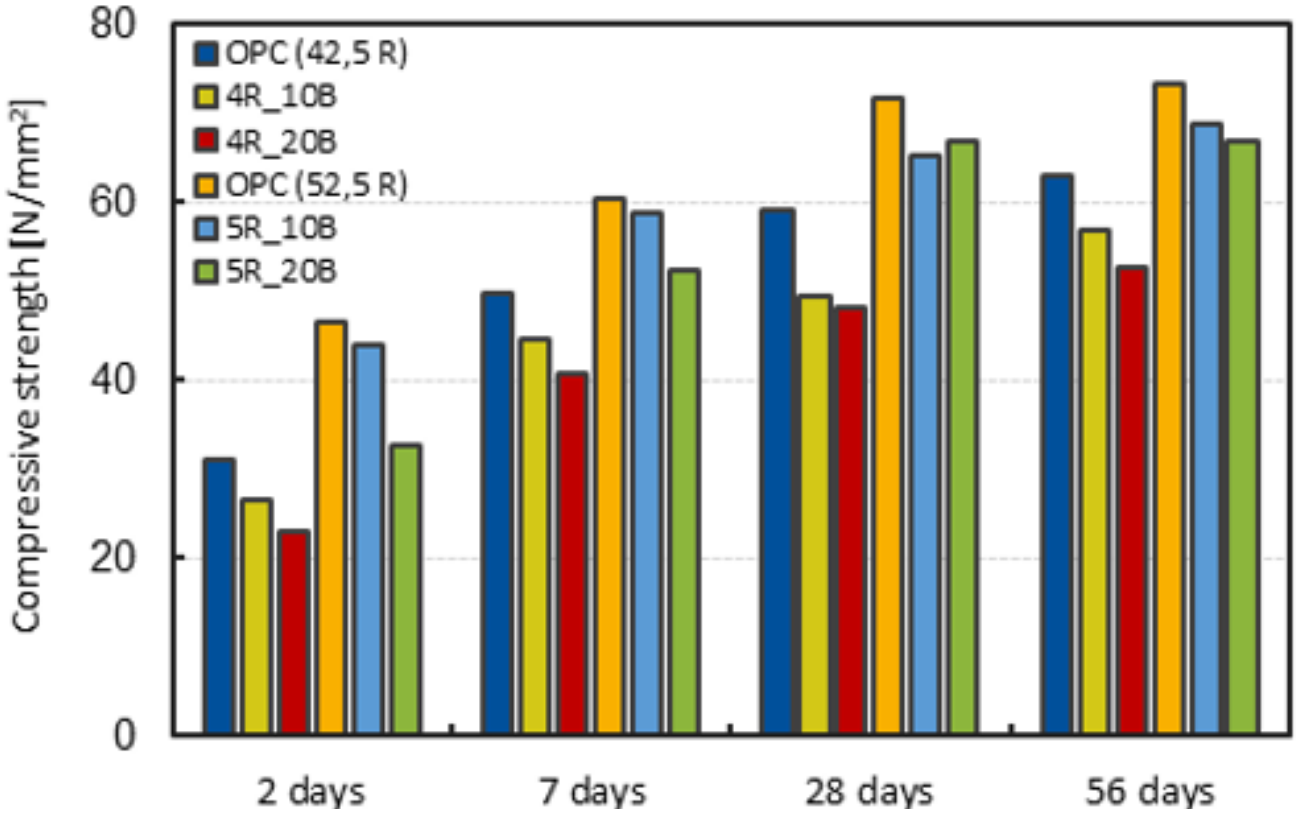
URBAN: Erste Ergebnisse

78TH·RILEM·WEEK·&·RILEM·CONFERENCE·ON·SMART·MATERIALS·AND·STRUCTURES:·MEETING·THE·MAJOR·CHALLENGES·OF·THE·21ST·CENTURY·SMS·2024·—·CONCRETE·WITH·RECYCLED·(BELITE)·CEMENT·CLINKER·—·A·COMBINATION·OF·CLIMATE·PROTECTION·AND·RESOURCE·EFFICIENCY¶

Deiters,·M.·V.[(1)],·Gerlach,·J.[(3)],·Schumacher,·K.[(3)],·Schack,·T.[(1)],·Schweike,·U.[(2)],·Beuchle,·U.[(2)],·Stapf,·D.[(2)],·Stemmermann,·P.[(2)]·and·Haist,·M.[(1)]¶

Compressive strength of mortars (w/b = 0.50; paste content = 440 l/m³) with pure OPC (CEM I 42.5 R and CEM I 52.5 R, respectively) and OPC with 10 % (10B) and 20% (20B) RC-Clinker

→ Neues Ziel: 50% Substitution



Zentrale Fragen aus der bisherigen Entwicklung

Fluktuationen

- der Versorgung mit sekundären Rohstoffen
- der Zusammensetzung und Homogenität — *(DFG-Projekt, BMBF Verbundantrag)*
- Schadstoffe (Chemische Fixierung – Abtrennung) — *(f. Chlor, Sulfat liegen Lsg. vor)*

Skalierung

- Elektrisch beheizter Drehrohrofen — (*Helmholtz-Antrag*)
- Wärmerückgewinnung aus CO_2
- Trocknung / Abscheidung von Wasserdampf

CO_2

- Dezentrale Speicherung / Nutzung — *(mehrere Vorh. mit WW KIT)*
- Grundlagenforschung zur Bildung, Analytik und Thermodynamik von Karbonatschmelzen — *(laufend)*

Heizung: Evaluation technischer Optionen

Elektrisch

- Widerstandsheizung: Nachteil geringe Energiedichte
- Induktionsheizung: Etwas geringere Effizienz, hohes Potential
- Plasmabrenner: Sehr hohe Temperaturen möglich, aber geringe Lebensdauer, niedrige Effizienz (Kühlung nötig, Wärmeübertragung über Trägergas)
- Lichtbogen: bisher keine auf Drehrohre übertragbare Lösungen (Elektroden)
- Schockwellen Heizung: Pilotanlagen, hohes Potential bis 1000°C

Gas

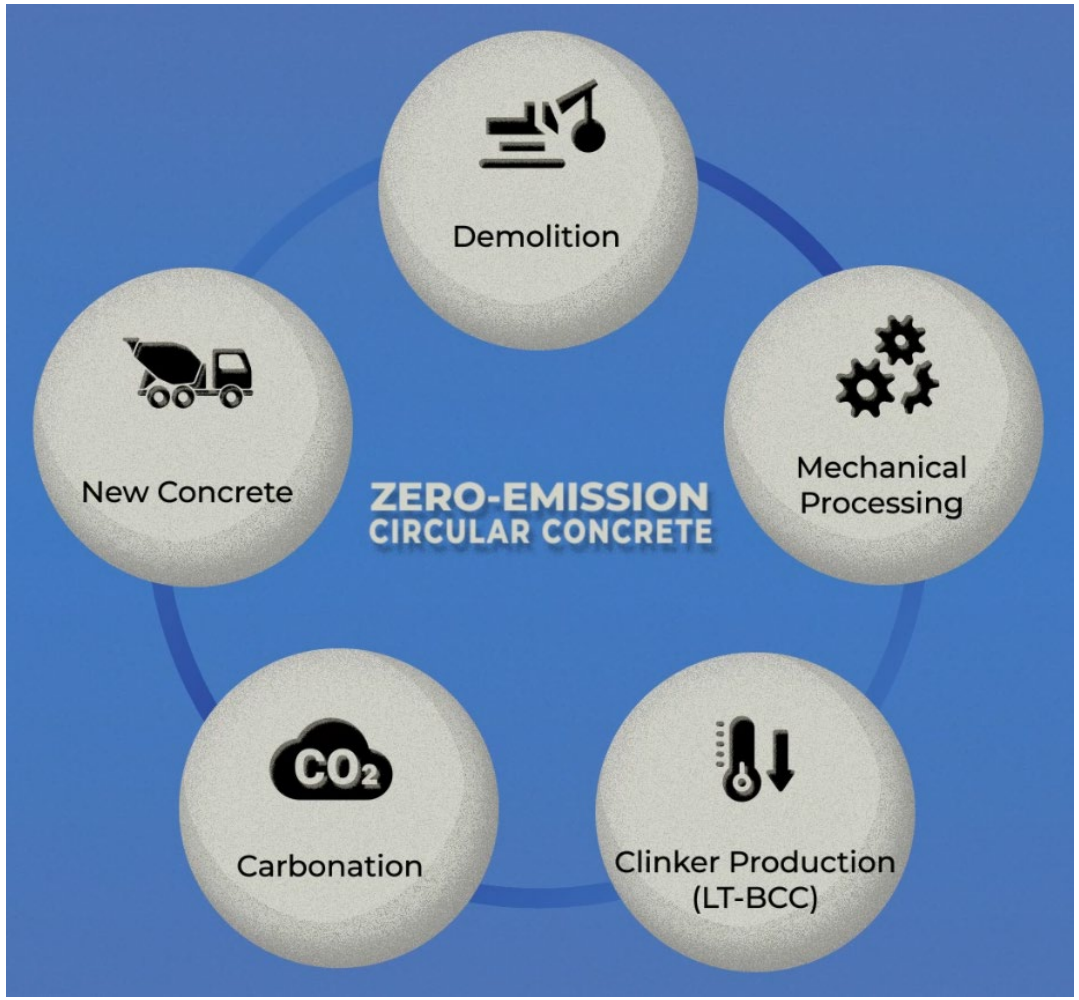
- Oxyfuel: technisch verfügbar, erhöhte CO_2-Emissionen; hybride Lösungen?

Fraunhofer ISI (2024): Direct electrification of industrial process heat. An assessment of technologies, potentials and future prospects for the EU. Study on behalf of Agora Industry.

Kreislaufbeton aus rezykliertem Zementklinker und rezyklierter karbonisierter Gesteinskörnung

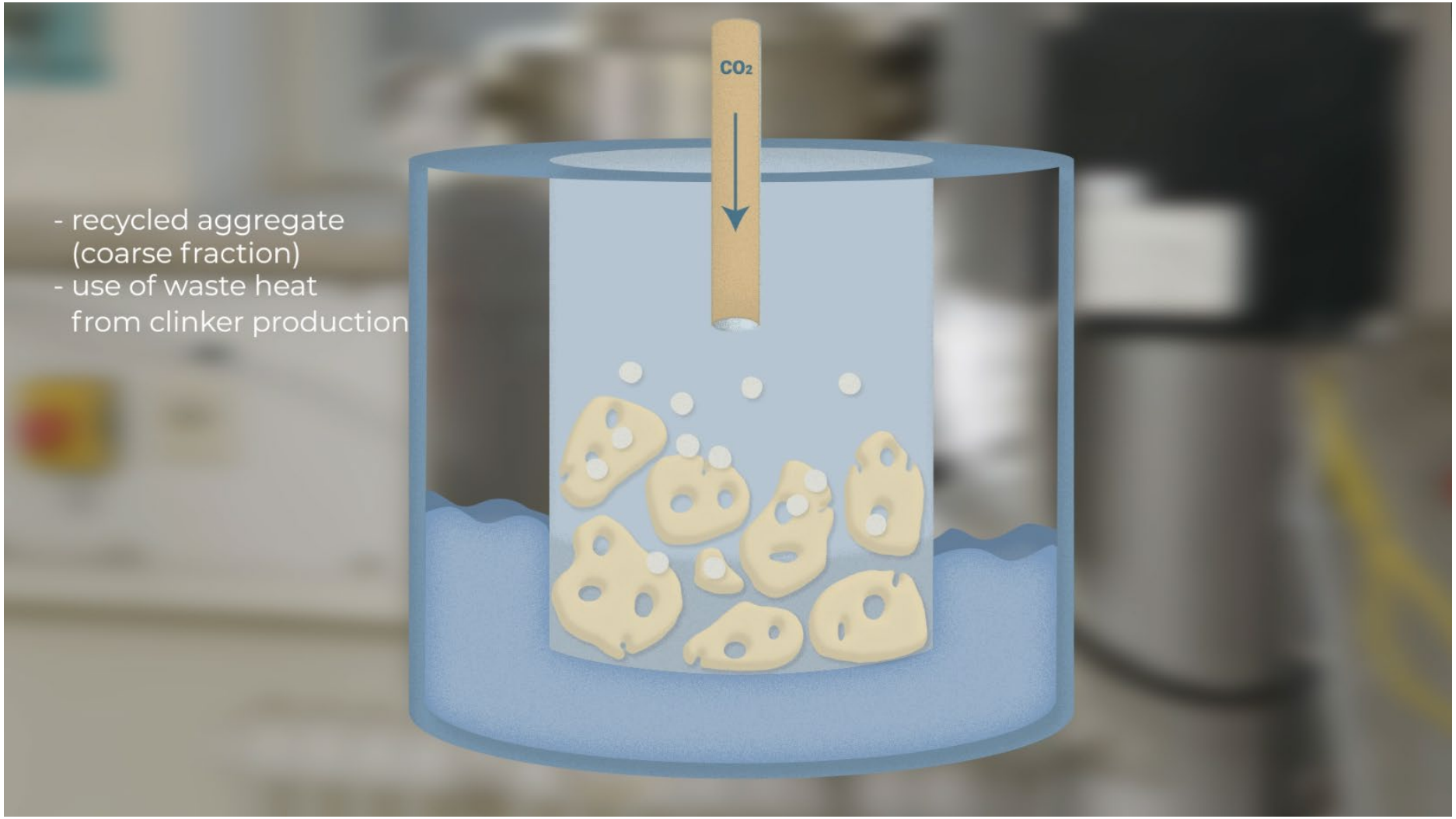
- Beim Brechen von Altbeton werden grobe Zuschlagstoffe und Feinanteile gewonnen
- Feinkorn wird zusammen mit Kalkstein als Rohmaterial für die Zementklinkerherstellung mit Carbon Capture verwendet
- Integrierte Sequestrierung von CO_2 in grober Gesteinskörnung
- ABER: Die Kapazität zur CO_2-Sequestrierung reicht nur für Prozessemissionen aus
  - elektrische Beheizung erforderlich
  - Klinkerherstellung bei niedriger Temperatur

  → Neues Klinkerverfahren



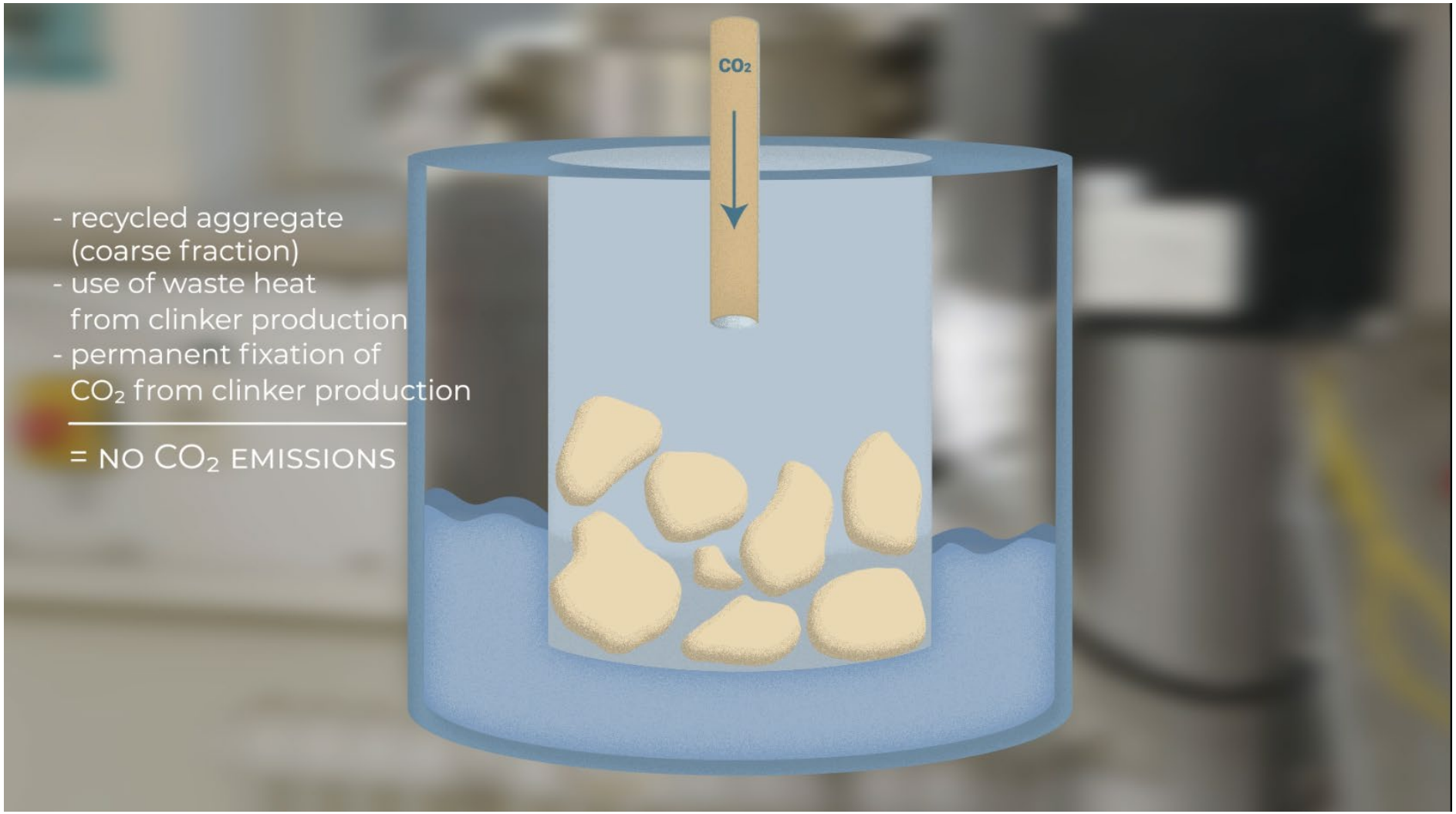
Hydrothermale Karbonatisierung

Sequestrierung von abgeschiedenem CO_2 in grobem rezyklierten Zuschlägen



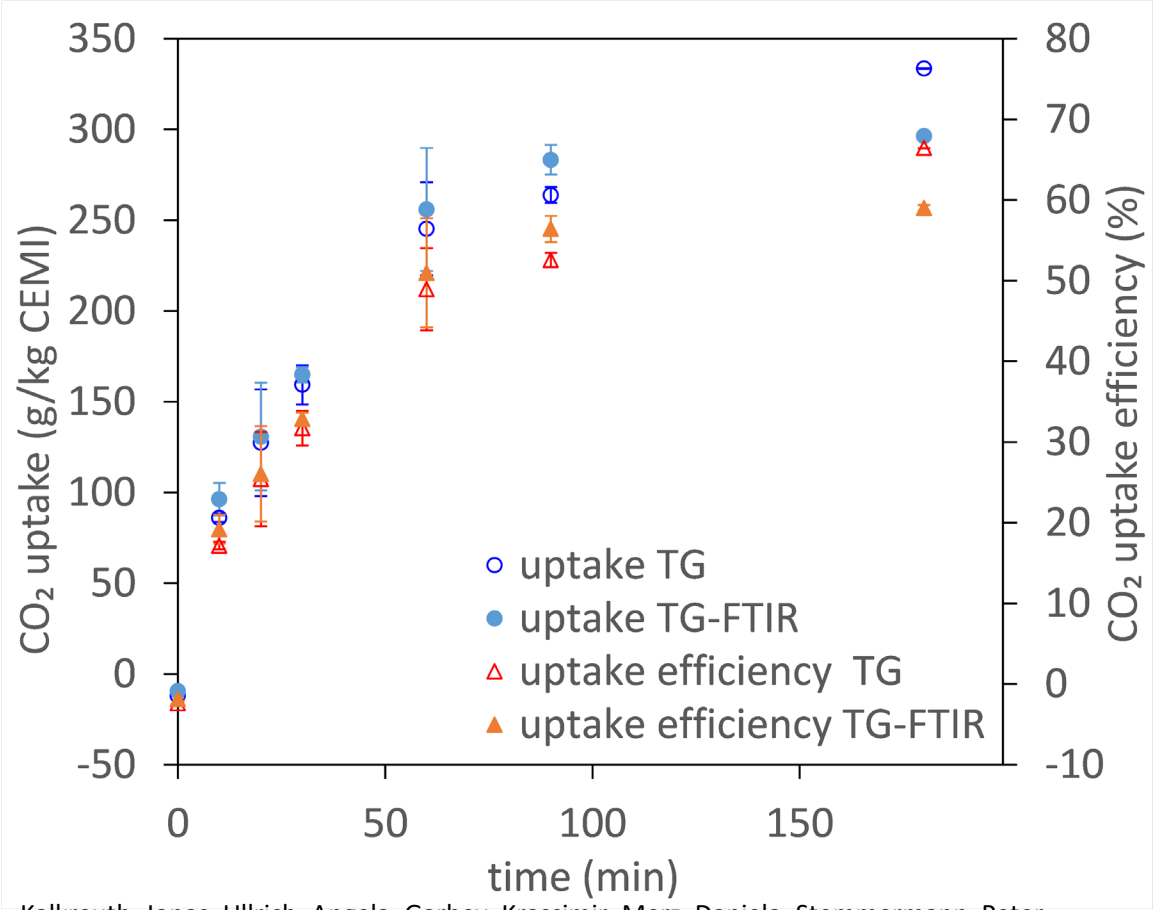
Hydrothermale Karbonatisierung

Sequestrierung von abgeschiedenem CO_2 in grobem rezyklierten Zuschlägen



Hydrothermale Karbonatisierung von groben Zuschlägen

- Modellsystem: Scheiben aus Zementstein (30 mm ∅, 5 mm Dicke; 28d alt, CEM-I, 42,5/R)
- Hydrothermale Karbonatisierung (170 °C, P_{PH2O} 8 bar, P_{PCO2} 8 bar)
- Zeitliche Entwicklung der CO_2-Aufnahme und der Aufnahmeeffizienz, bestimmt durch TG und TG-FTIR
- 60 % Aufnahme nach 90 Minuten



Kalkreuth, Jonas; Ullrich, Angela; Garbev, Krassimir; Merz, Daniela; Stemmermann, Peter; Stapf, Dieter (2023): Accelerated carbonation of hardened cement paste: Quantification of calcium carbonate via ATR infrared spectroscopy. In: *J. Am. Ceram. Soc.* 106 (in press).

Karbonatisierter Brechsand als Supplementary Cementitious Materials

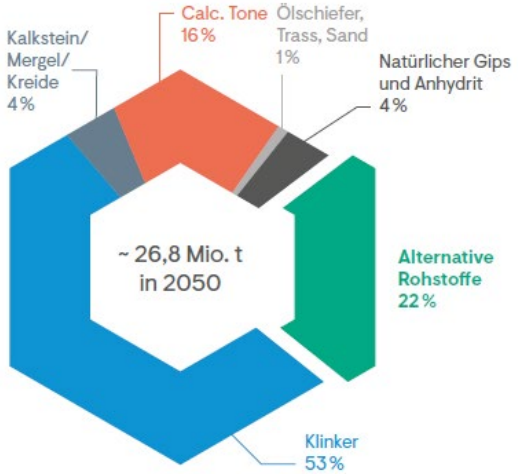
Wichtigste Maßnahme zur Emissionsminderung SCMs

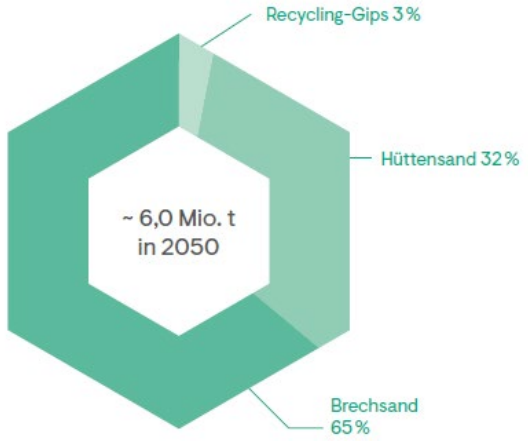
Heute:

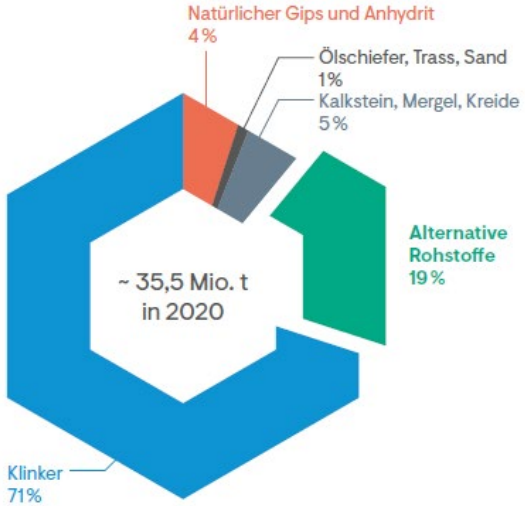
- Flugasche aus fossilen Kraftwerken
- granulierte Hochofenschlacke

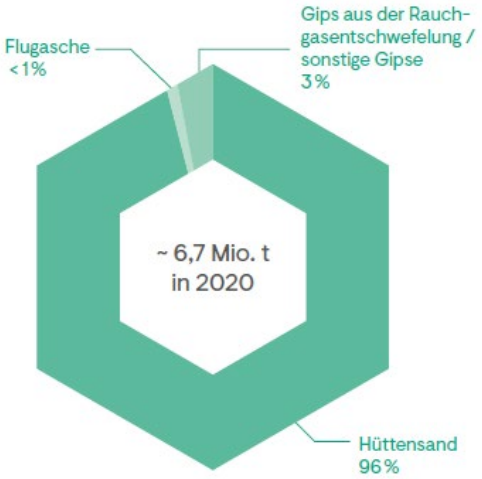
Künftig:

- kalzinierte Tone
- (karbonatisierter) Brechsand









Verein Deutscher Zementwerke, V.D.Z. Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2022.

CO_2Valorize: Nutzung von CO_2 für kohlenstoffarmen Zement

SIEMENS

KIT Karlsruhe Institute of Technology

FLSmidth

DTU

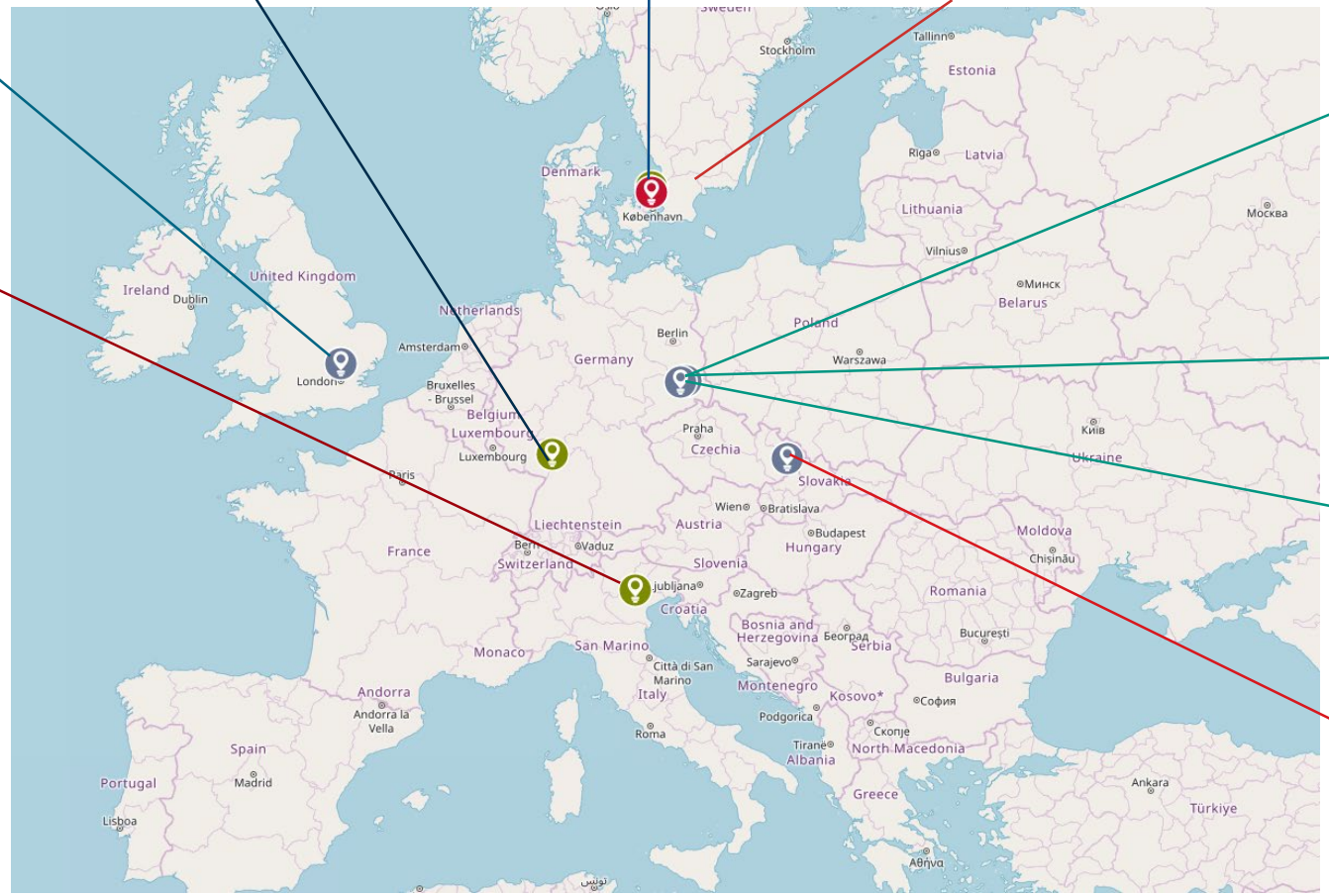
HZDR innovation

HZDR HELMHOLTZ ZENTRUM DRESDEN ROSSENDORF

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

CEMMAC CEMENT

Università degli Studi di Padova



Marie Skłodowska-Curie Doctoral Network, 8 PhDs

Carbonation of slag, fly ash, recycled concrete fines and mine tailings.

Industrial leader: FLSmidth, Denmark

Zementwerke: CCS

- Pipeline-Netz erst langfristig verfügbar (Planung, Bau, Investitionen)
- Nur bei hoher Kapazität und Nutzung wirtschaftlich
- Nicht flexibel (Lock-in Effekt)
- CCS Kapazitäten onshore gering / kaum erkundet
- Resilienz
- Abfallmitverbrennung in Zementwerken <-> Kreislaufwirtschaft
- Verlust / Transformation industrieller Strukturen

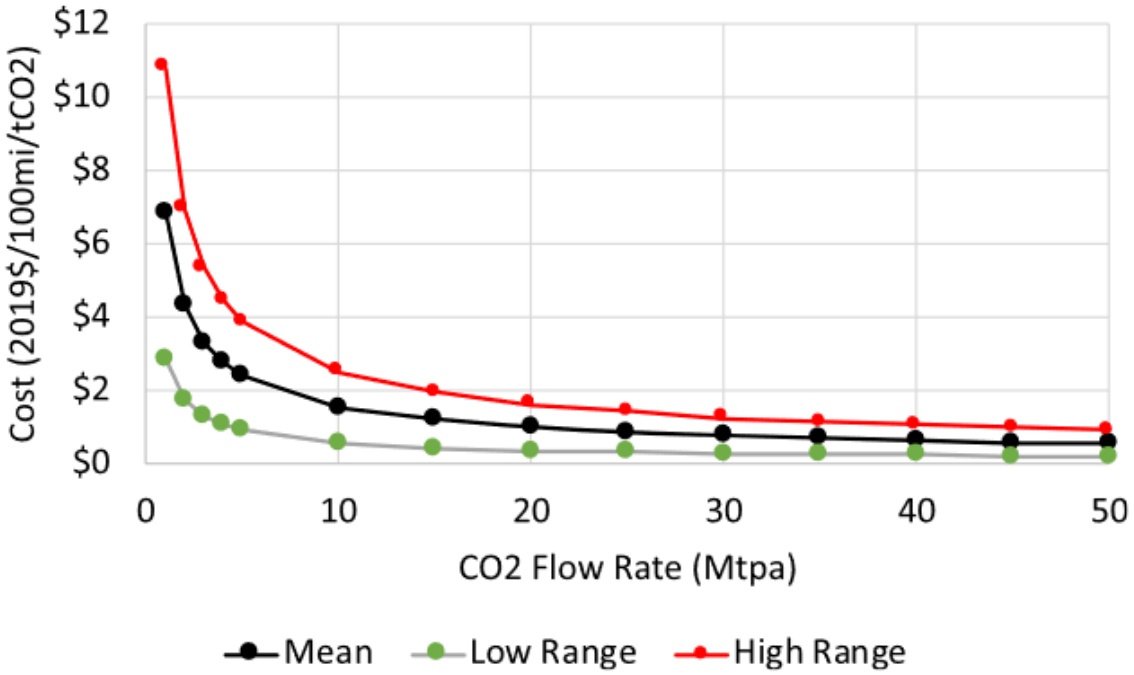


Fig. 1. Total CO_2 transport costs for a 100-mile onshore pipeline in the United States in 2019 current dollars. Low and high cost range reflect two standard deviations away from the mean and are based on the capital cost factors updated from Heddle et al. (2003) as visible in Table 1.

Smith, E. *et al.* The cost of CO2 transport and storage in global integrated assessment modeling. *International Journal of Greenhouse Gas Control* **109**, 103367 (2021).

Open Grid Europe: Aufbau eines Pipeline Netzes für CO_2

OGE (14.11.2022). Moving towards climate neutrality with OGE [online] [Zugriff am: 14. November 2022]. Verfügbar unter: https://co2-netz.de/en

Our CO_2 transportation grid

Join OGE on the path to climate neutrality!

We support you in your climate-neutral handling of CO_2 with our own CO_2 transportation infrastructure.

Open Grid Europe betreibt in Deutschland das größte Ferngasnetz

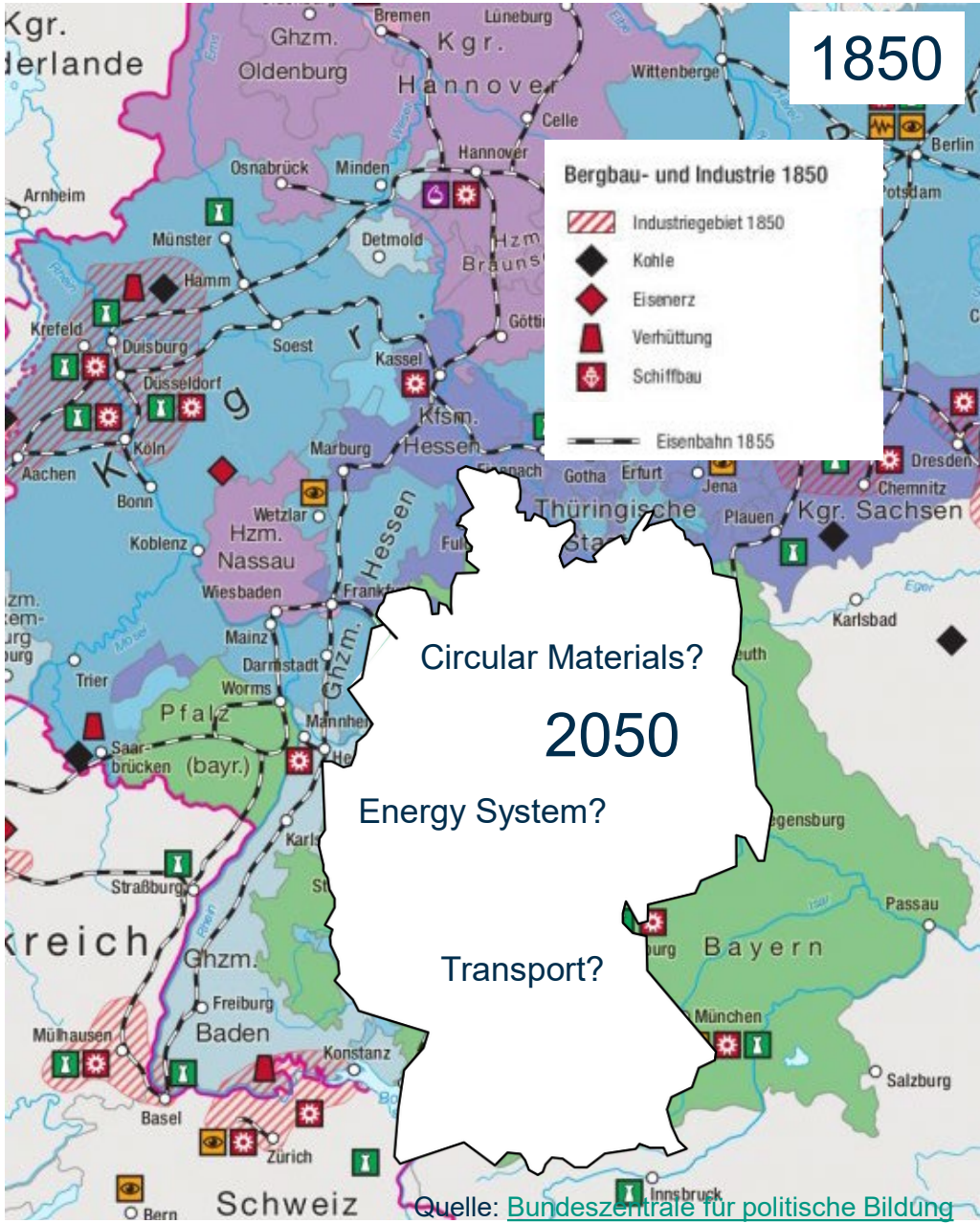
Innovationspool – Projekt Industrielle Transformation 2050

Motivation und Zielsetzung

- Wichtigste Standortfaktoren der industriellen Produktion seit Beginn der Industrialisierung: Verfügbarkeit von fossilen Rohstoffen und Energieträgern.
- Energiewende und Kreislaufwirtschaft verändern beide Standortfaktoren fundamental → Transformation des industriellen Systems erforderlich.

→Die Transformation des industriellen Systems bis 2050 ist disruptiv und erfordert die simultane infrastrukturelle und technologische Anpassung!

Zielsetzung: „Industrielle Transformation 2050“ unter dem Blickwinkel des technologischen und geographischen Redesigns der Grundstoffindustrie für eine klimaneutrale Kreislaufwirtschaft

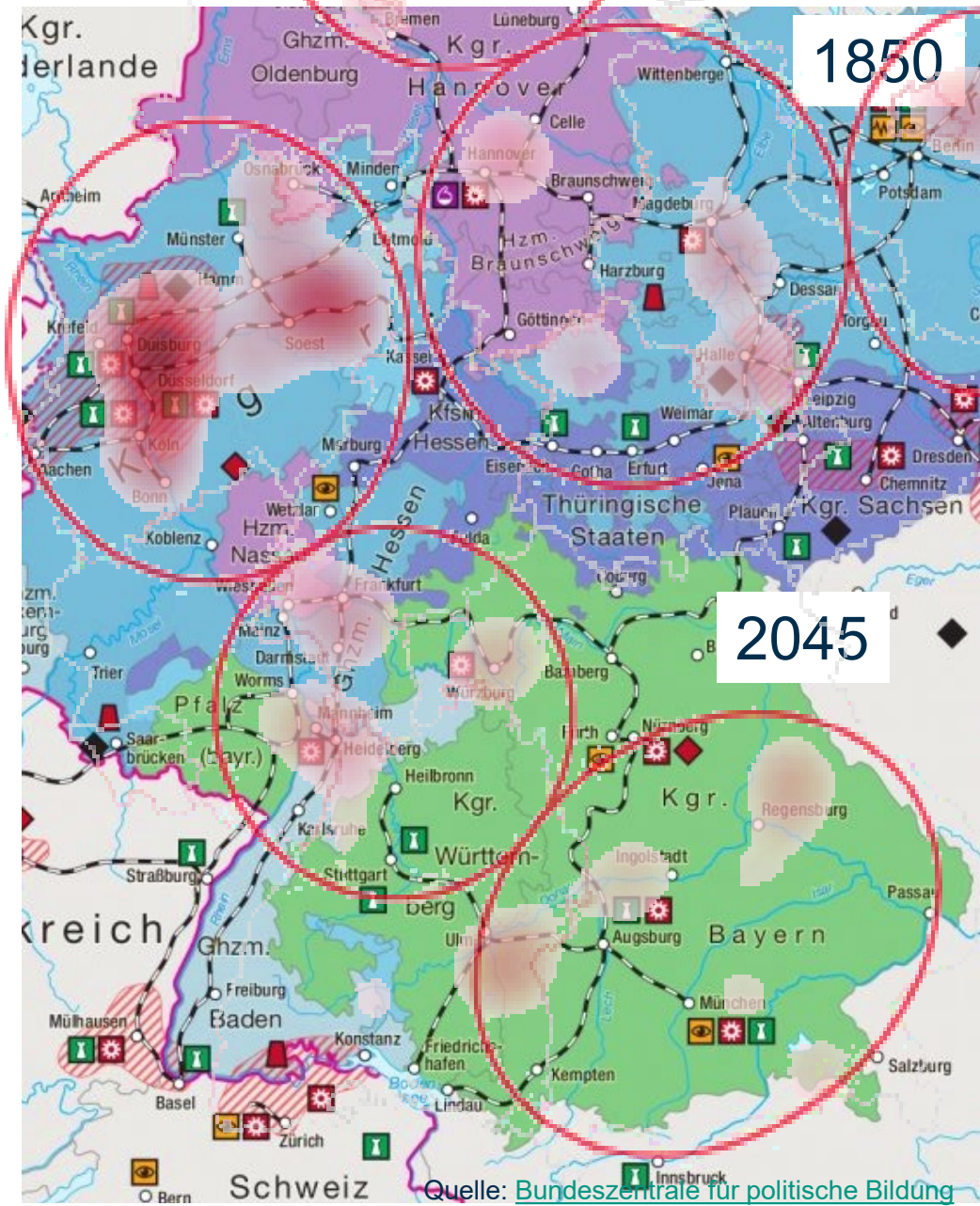


Innovationspool – Projekt Industrielle Transformation 2050

Dringlichkeit: Carbon Management Strategie der Bundesregierung vom 11.9.2024

- „Für die Entwicklung von CCS/CCU ist es absehbar, dass CCS/CCU-Cluster in Regionen mit einer hohen Konzentration an Emittenten eine wichtige Rolle spielen werden. Dort wird sich die CO_2-Infrastruktur frühzeitig entwickeln und kann dann sukzessive an ein überregionales Transportnetz angeschlossen werden.“
- Simulation 2045 (Prognos AG 2023)
- Die Netzplanung ist privatwirtschaftlich zu entwickeln. Eine eigene Netzplanung für die CO_2-Transportinfrastruktur wird die Bundesregierung nicht durchführen.

Zielsetzung: „Industrielle Transformation 2050“ unter dem Blickwinkel des technologischen und geographischen Redesigns der Grundstoffindustrie für eine klimaneutrale Kreislaufwirtschaft



Quelle: Bundeszentrale für politische Bildung

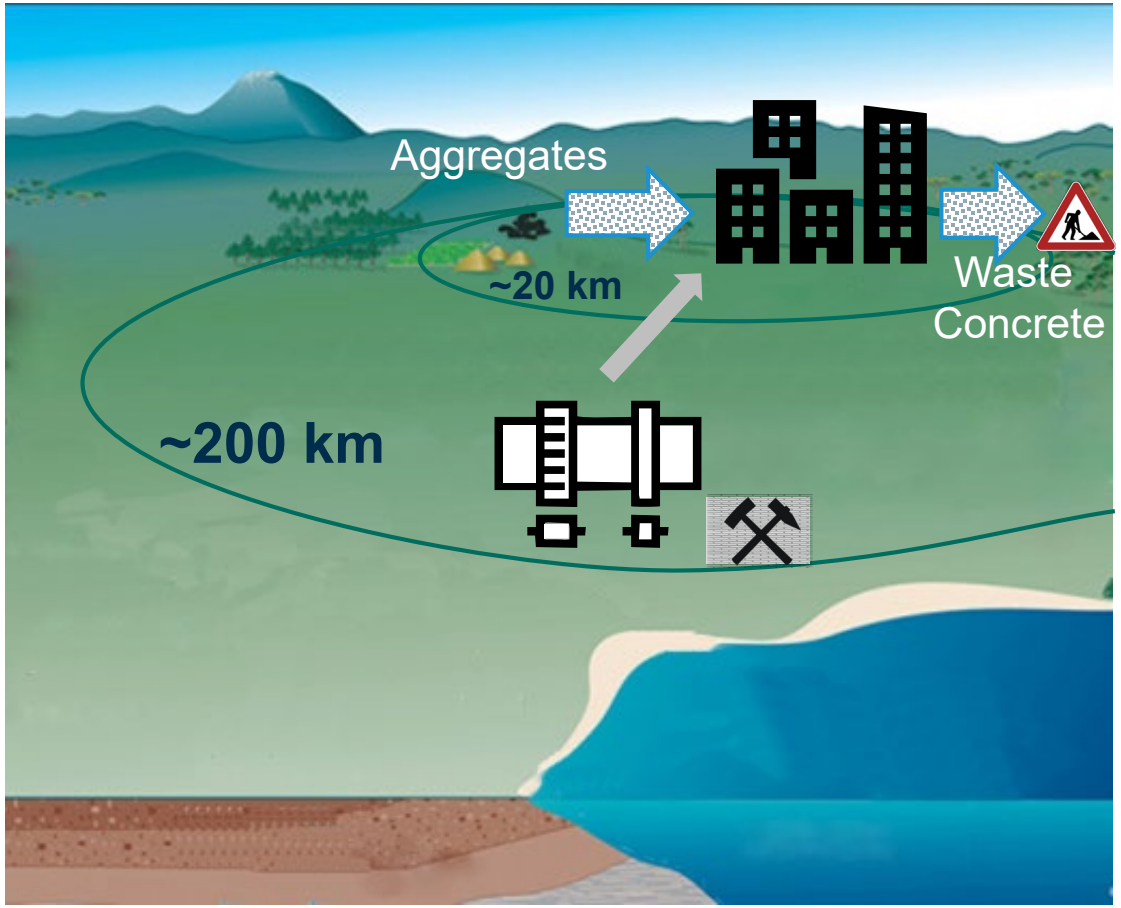
Ressourcen- und Kohlenstoffmanagement in urbanen Regionen

Herausforderung

37 % der weltweiten CO_2-Emissionen entfallen auf die bebaute Umwelt

- davon entfallen 27% auf den Betrieb von Gebäuden
- 10% auf das Bauwesen (7% Zement).

Der Sektor ist für ~40% der verbrauchten Primärrohstoffe und 64% der Abfälle in Deutschland verantwortlich



1 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector., 2022. Nairobi.
2 Lutter, S. et.al. Die Nutzung natürlicher Ressourcen - Ressourcenbericht für Deutschland 2022. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

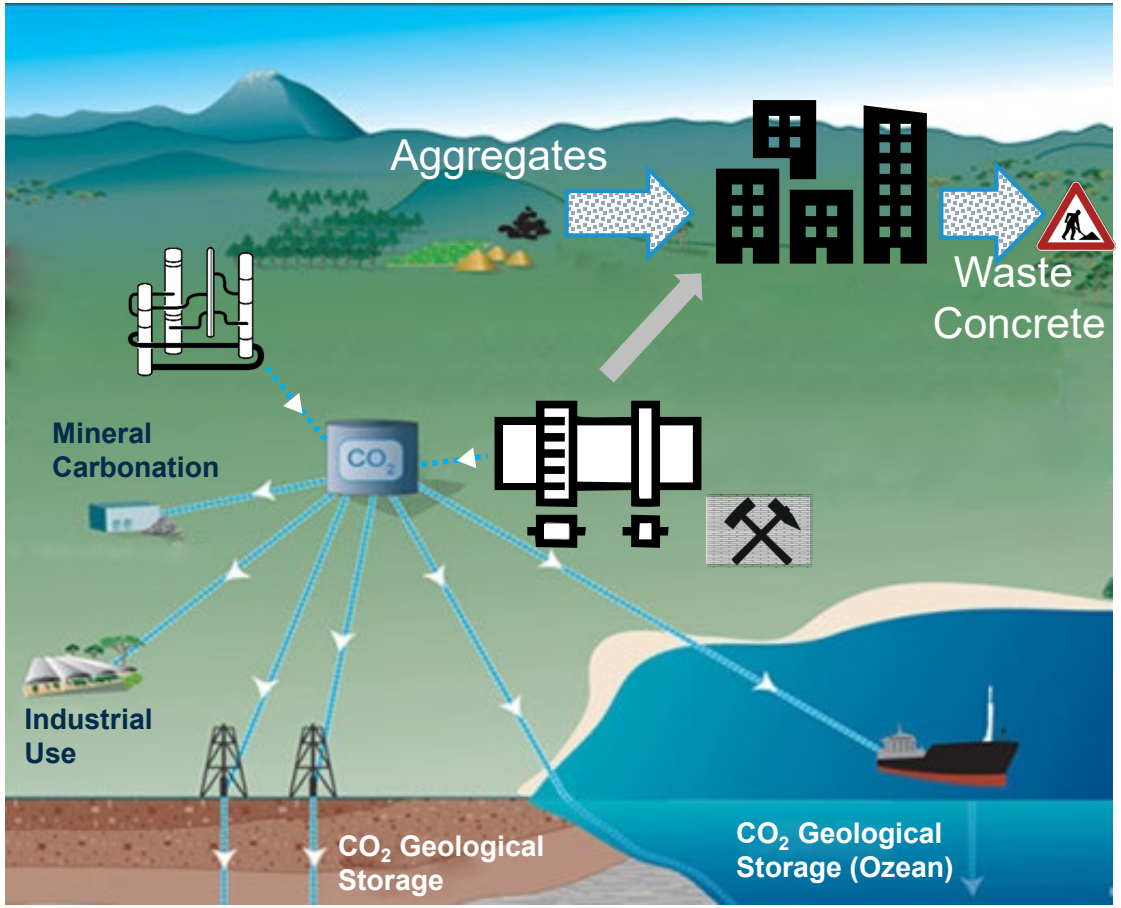
Ressourcen- und Kohlenstoffmanagement in urbanen Regionen

Herausforderung

37 % der weltweiten CO_2-Emissionen entfallen auf die bebaute Umwelt

- davon entfallen 27% auf den Betrieb von Gebäuden
- 10% auf das Bauwesen (7% Zement).

Der Sektor ist für ~40% der verbrauchten Primärrohstoffe und 64% der Abfälle in Deutschland verantwortlich



1 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector., 2022. Nairobi.
2 Lutter, S. et.al. Die Nutzung natürlicher Ressourcen - Ressourcenbericht für Deutschland 2022. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Ressourcen- und Kohlenstoffmanagement in urbanen Regionen

Herausforderung

37 % der weltweiten CO_2-Emissionen entfallen auf die bebaute Umwelt

- davon entfallen 27% auf den Betrieb von Gebäuden
- 10% auf das Bauwesen (7% Zement).

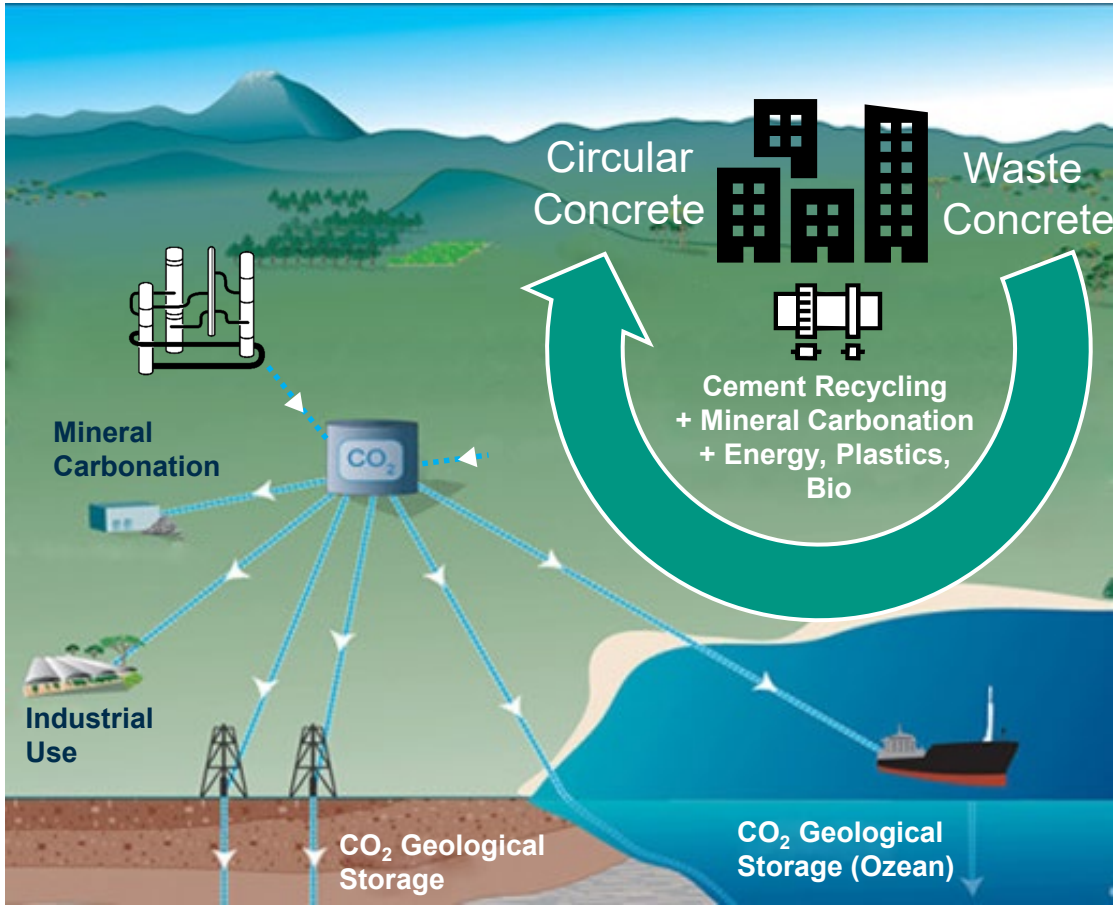
Der Sektor ist für ~40% der verbrauchten Primärrohstoffe und 64% der Abfälle in Deutschland verantwortlich

Zielsetzung

Entwicklung nachhaltiger Technologien zur weitgehend lokalen/regionalen Schließung des Kohlenstoffkreislaufs im Bau

Ausschöpfung des Potenzials von Betonabfällen für die CO_2-Speicherung

Entwicklung von Optionen zur systemischen Integration von Energie- und Stoffkreisläufen (Mineralien, Kunststoffe, Biogene)



1 2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector., 2022. Nairobi.
2 Lutter, S. et.al. Die Nutzung natürlicher Ressourcen - Ressourcenbericht für Deutschland 2022. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.