Karlsruher Institut für Technologie

IMB MPA CMM KARLSRUHE

13. Fachsymposium Zirkuläres Bauen

Industrielle Carbonatisierung von rezyklierten Gesteinskörnungen – aktueller Stand und Perspektiven

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Baustoffe und Betonbau
MPA Karlsruhe, CMM Karlsruhe



Karlsruher Institut für Technologie

IMB MPA CMM KARLSRUHE

13. Fachsymposium Zirkuläres Bauen

Industrielle Carbonatisierung von rezyklierten Gesteinskörnungen – aktueller Stand und Perspektiven + Förderprogramm VwV „R-Beton“

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Baustoffe und Betonbau
MPA Karlsruhe, CMM Karlsruhe



Inhalts-verzeichnis

1 Motivation



2 Begriffsbestimmung & Definitionen



3 Einflussfaktoren & Eigenschaften



4 Förderprogramm VwV „R-Beton“



5 Zusammenfassung & Ausblick

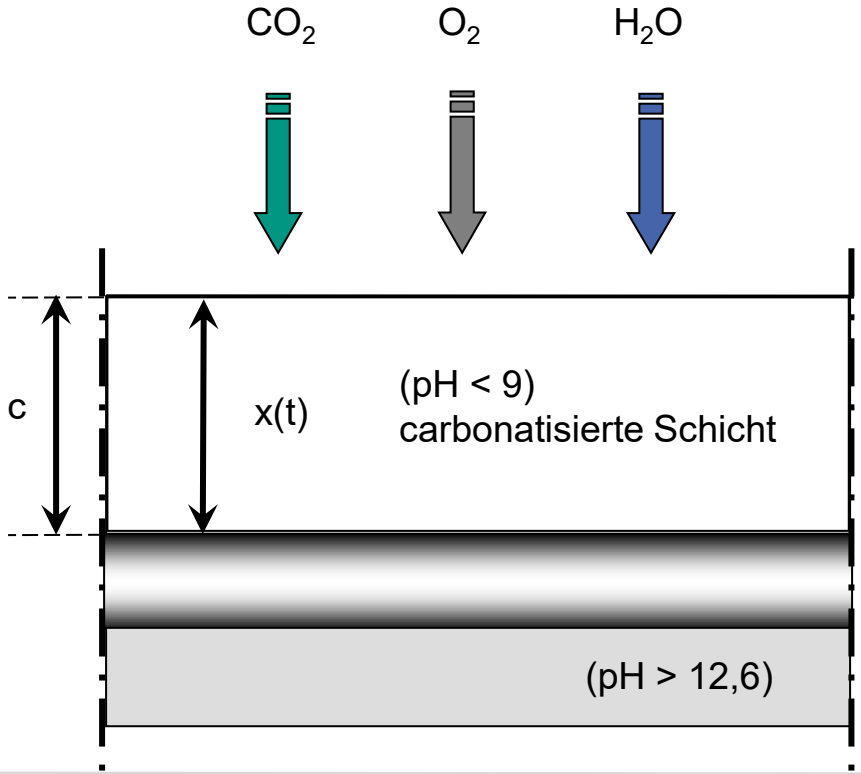


Dauerhaftigkeit von Beton - Carbonatisierung

Bewehrungskorrosion

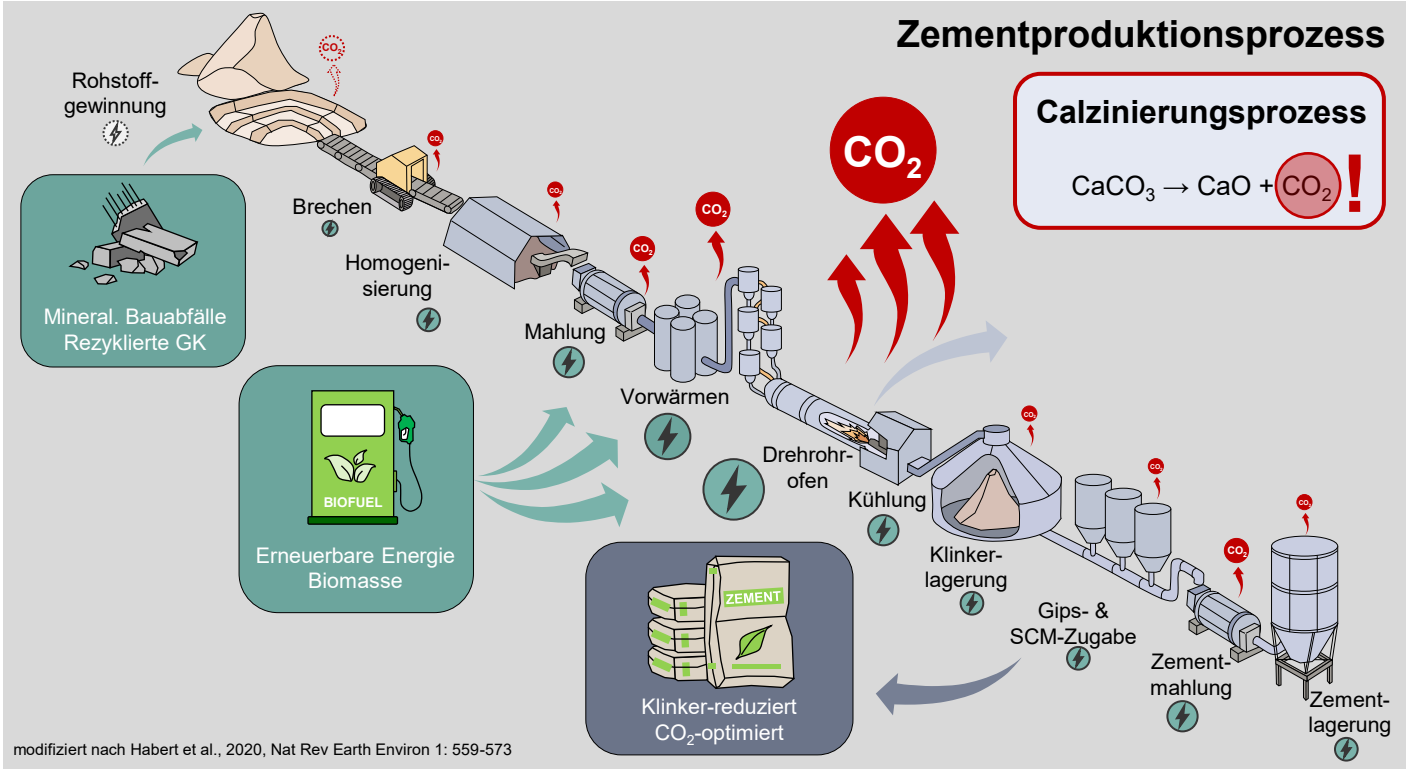




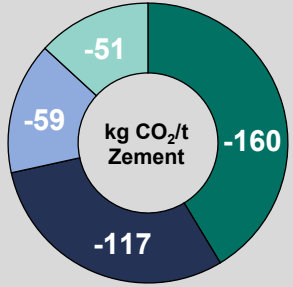


Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Motivation (I)



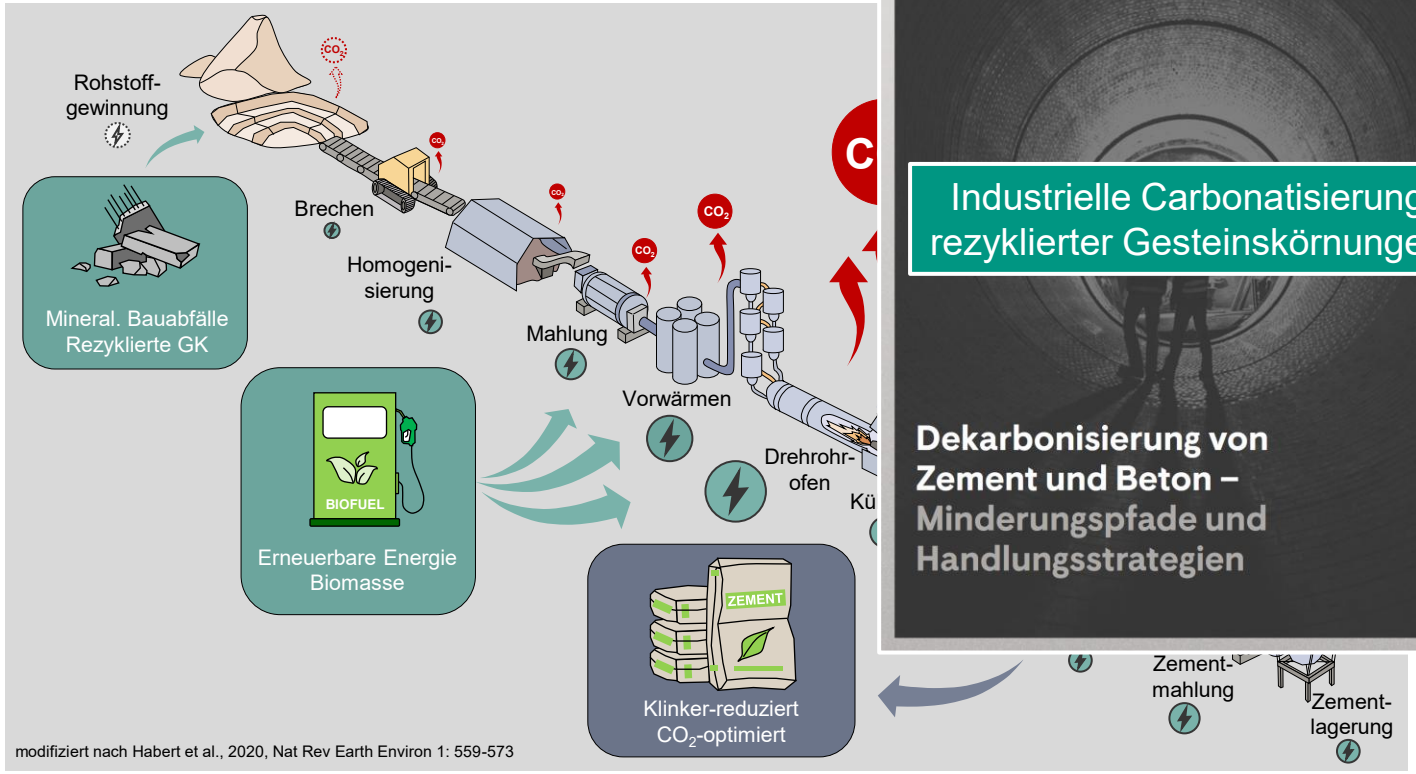
Roadmap Carbon Neutrality 2050
(CEMBUREAU - 5C Strategie)

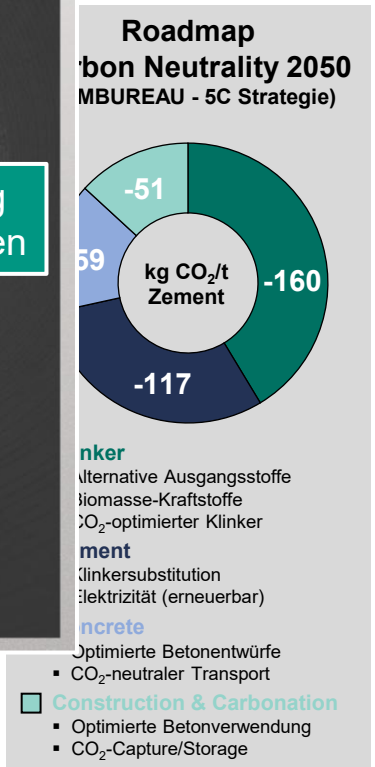


- **Clinker**
  - Alternative Ausgangsstoffe
  - Biomasse-Kraftstoffe
  - CO_2-optimierter Klinker
- **Cement**
  - Klinkersubstitution
  - Elektrizität (erneuerbar)
- **Concrete**
  - Optimierte Betonentwürfe
  - CO_2-neutraler Transport
- **Construction & Carbonation**
  - Optimierte Betonverwendung
  - CO_2-Capture/Storage

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

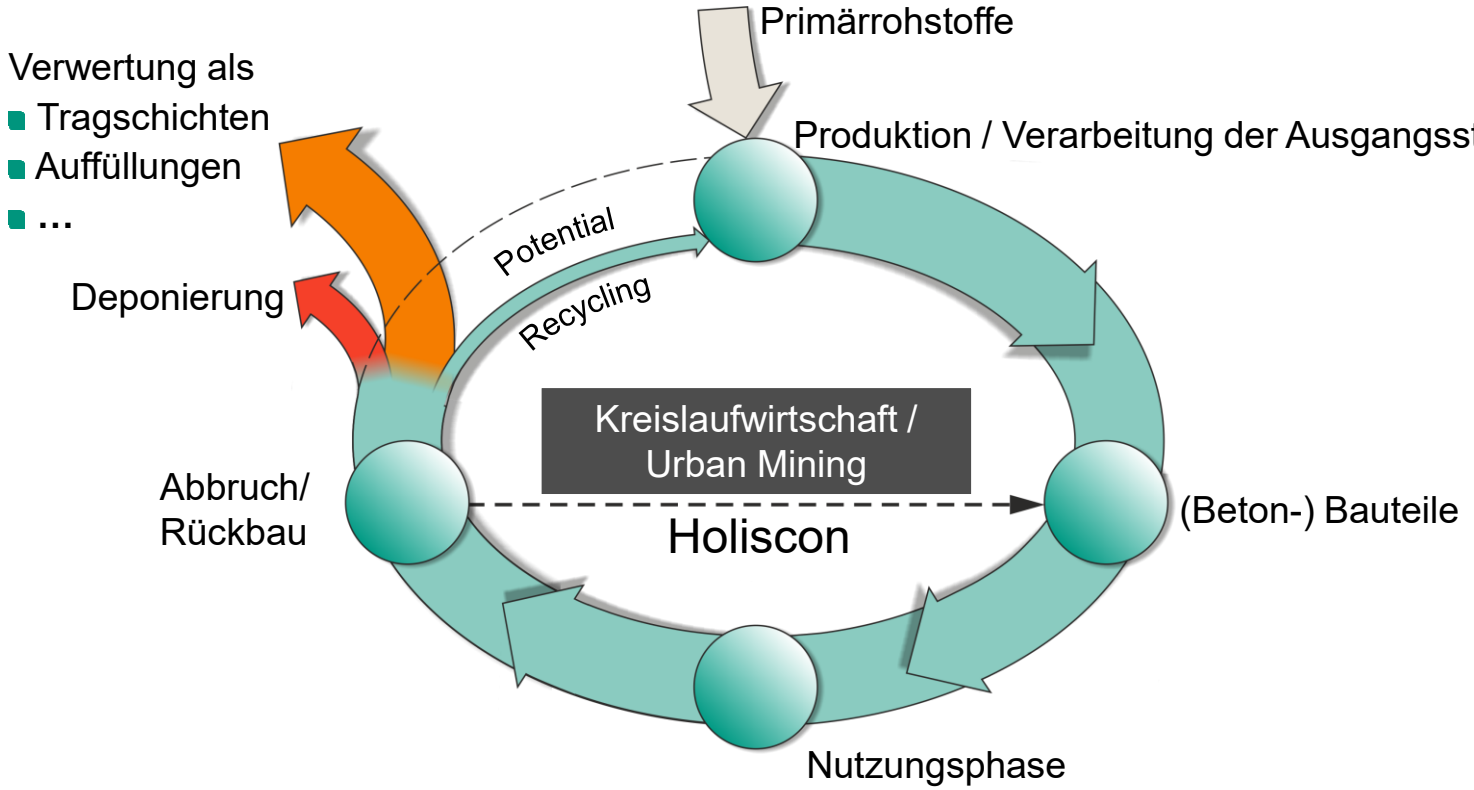
Motivation (I)





Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

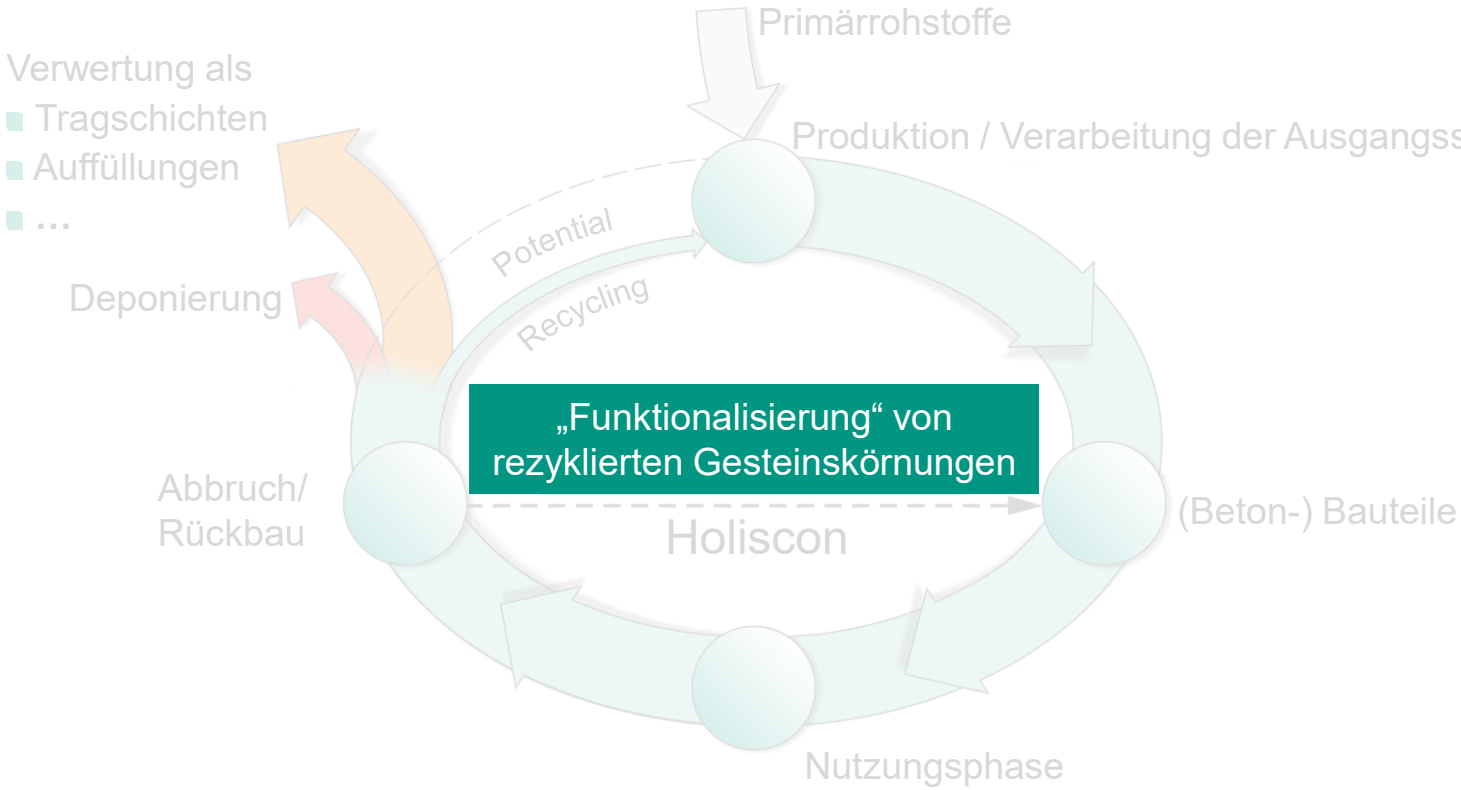
Motivation (II)



Quelle:

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Motivation (II)



Quelle:

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Motivation (III)

Ziele der „Funktionalisierung“

- CO_2 dauerhaft mineralisch binden
- Verbesserung der rezyklierten Gesteinskörnungen
- CO_2-Fußabdruck von Beton reduzieren
- Reaktive Bindemittel (Zemente und sog. SCM)



DFG SPP 2436 - Net-Zero-Concrete

Vergleich der Aktivierungsmethoden auf mikro- und makrostruktureller Ebene

Aktivierung von Zementstein / Abbruchbeton

C-(A)-S-H-Phasen



α-C_2S | Si-Al + $CaCO_3$

Thermische Aktivierung | CO_2-Aktivierung

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Vorbild Natur - Chemische Verwitterung

„CO_2-Schlucker“ durch natürliche Mineralcarbonatisierung



Quelle: Scinexx

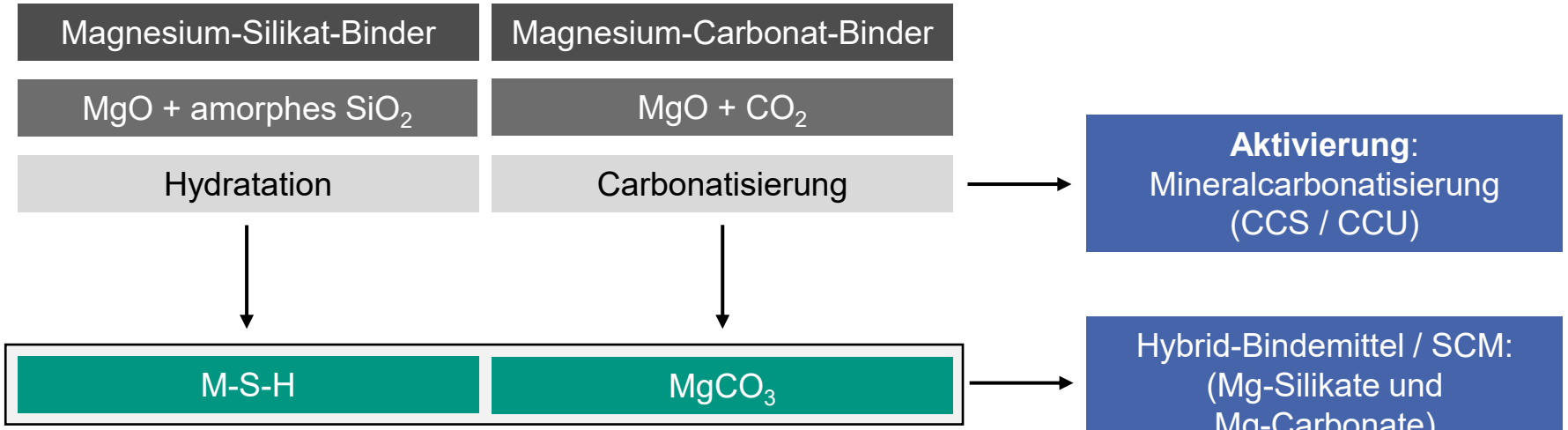
Die Aktivierung durch Mineral-carbonatisierung basiert darauf, dass Kohlensäure - die durch die Auflösung von CO_2 in einer wässrigen Lösung entsteht - mit alkalischen Kationen reagiert, die aus einem metalloxidhaltigen Material (Präkursor) gelöst werden

Daraus entstehen unlösliche Karbonate (z.B. $CaCO_3$, $MgCO_3$ → natürliche Gesteine und Materialien aus Abfallströmen)

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Vorbild Natur - „Adaption“ Bindemittel

Magnesium-basierte Bindemittel



Kombination möglich (abh. von Ausgangsstoff (z.B. Olivin-Gruppe))

Quelle: C-SINC

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Begriffsbestimmung & Definitionen (I)

- **CCU** - Carbon Capture & Utilization → Abscheidung von CO_2 aus Industrieanlagen und / oder der Atmosphäre und Nutzung direkt als Rohstoff

- **CCS** - Carbon Capture & Storage → Abfangen des CO_2 direkt an der Industrie- aber auch Biogasanlage, evtl. Transport und dauerhafte Speicherung

- **Industrielle Carbonatisierung -** Technische Verfahren, bei denen CO_2 mit Materialien reagiert, um stabile Carbonate zu bilden (z.B. $CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3$)

  Hintergrund: Verbesserung der Materialeigenschaften & CO_2-Senke durch direkte Carbonatisierung (rezyklierte feine / grobe Gesteinskörnungen)



Quelle: Heinrich Feeß GmbH & Co. KG



Quelle: Jakob/Kies und Beton AG

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Begriffsbestimmung & Definitionen (II)

- **CCU** - Carbon Capture & Utilization → Abscheidung von CO_2 aus Industrieanlagen und / oder der Atmosphäre und Nutzung direkt als Rohstoff

- **CCS** - Carbon Capture & Storage → Abfangen des CO_2 direkt an der Industrie- aber auch Biogasanlage, evtl. Transport und dauerhafte Speicherung

- **Industrielle Carbonatisierung -** Technische Verfahren, bei denen CO_2 mit Materialien reagiert, um stabile Carbonate zu bilden (z.B. $CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3$)

  Hintergrund: Verbesserung der Materialeigenschaften & CO_2-Senke durch direkte Carbonatisierung (rezyklierte feine / grobe Gesteinskörnungen)

Erzwungene Rekarbonatisierung



Quelle: Heinrich Feeß GmbH & Co. KG



Quelle: Jakob/Kies und Beton AG

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Begriffsbestimmung & Definitionen (II)

- **CCU** - Carbon Capture & Utilization → Abscheidung von CO_2 aus Industrieanlagen und / oder der Atmosphäre und Nutzung direkt als Rohstoff

- **CCS** - Carbon Capture & Storage → Abfangen des CO_2 direkt an der Industrie- aber auch Biogasanlage, evtl. Transport und dauerhafte Speicherung

- **Industrielle Carbonatisierung -** Technische Verfahren, bei denen CO_2 mit Materialien reagiert, um stabile Carbonate zu bilden (z.B. $CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3$)

Hintergrund: Verbesserung der Materialeigenschaften &
CO_2-Senke durch direkte Carbonatisierung
(rezyklierte feine / grobe Gesteinskörnungen)

Beschleunigte Rekarbonatisierung



Quelle: Heinrich Feeß GmbH & Co. KG



Quelle: Jakob/Kies und Beton AG

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Einflussfaktoren & Eigenschaften (I)

Technologien und Konzepte







- Neustark
- Carborok
- ReConcrete (Heidelberg Materials)
- $reCO_2ver$ (Sika)
- B Eco Aggregates
- Rement (KIT)
- …

Unterschiedliche stoffliche und prozesstechnische Einflussfaktoren führen zu unterschiedlichen Carbonatisierungsgraden und Eigenschaften der aktivierten rezyklierten Gesteinskörnungen

Quelle: Heidelberg Materials, Neustark, Sika

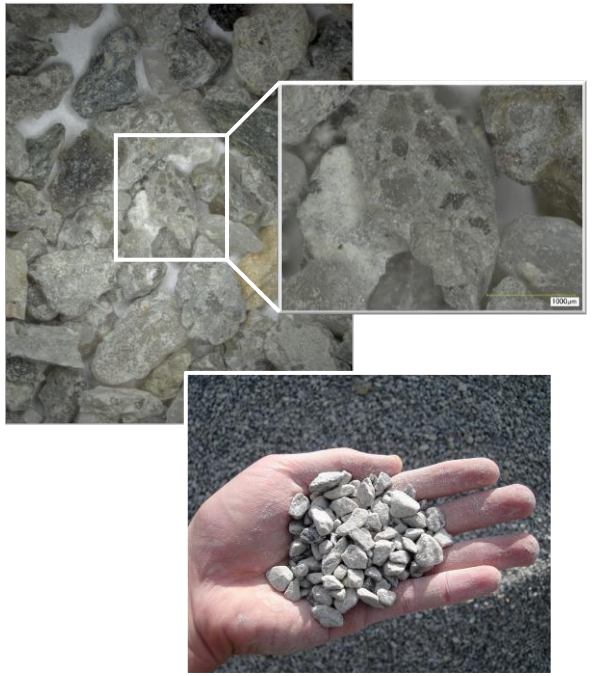
Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Einflussfaktoren & Eigenschaften (II)

CO_2-Bindekapazität bei rezyklierten Gesteinskörnungen (rGK) bei direkter Carbonatisierung

Stoffliche Einflussfaktoren

- Anteil an anhaftendem Zementstein (Ca-reiche Phasen: $Ca(OH)_2$, C-S-H, unhydratisierter Zement)
- Chemische Zusammensetzung der rGK (CaO-Gehalt)
- Korngröße / spezifische Oberfläche der rGK (Diffusion von CO_2: Betonbrechsande vs. grobe rGK)
- Porosität und Feuchtegehalt (zu trocken: kaum Reaktion, zu nass: CO_2-Transport blockiert)



Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Einflussfaktoren & Eigenschaften (II)

CO_2-Bindekapazität bei rezyklierten Gesteinskörnungen (rGK) bei direkter Carbonatisierung

Prozesstechnische Einflussfaktoren

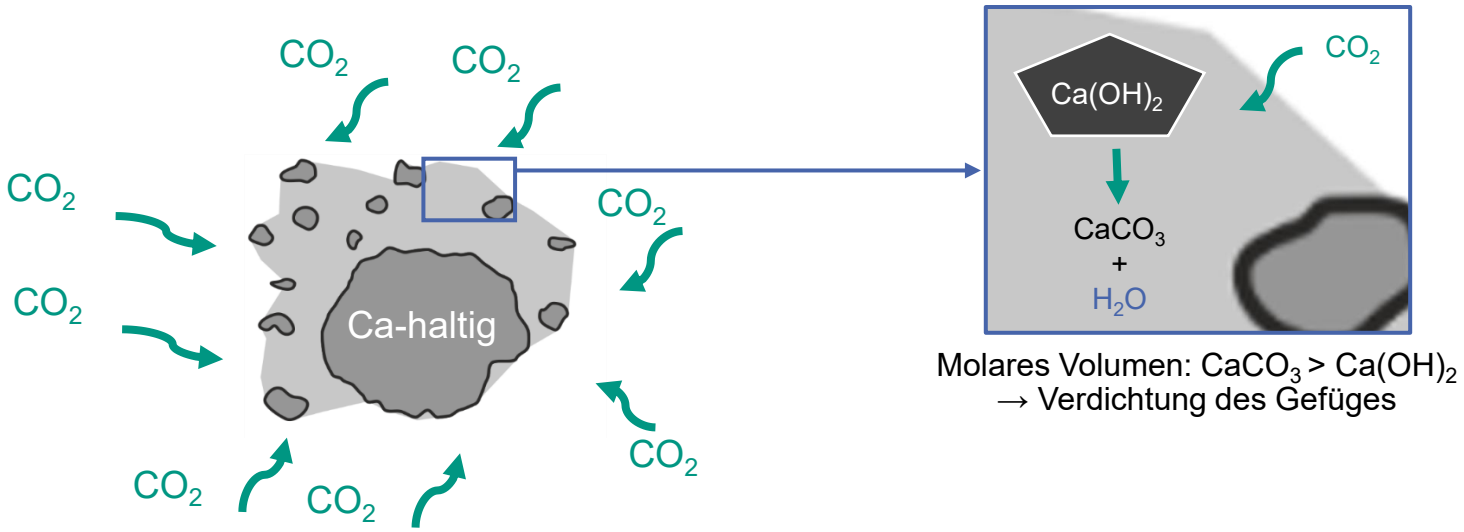
- CO_2-Konzentration (höhere Konzentration → schnellere Reaktion; 10 - 100 Vol.-% CO_2)
- Druck (erhöhter Druck → verbesserte CO_2-Löslichkeit und Reaktionskinetik)
- Temperatur (moderate Temperatur vs. hohe Temperatur [Austrocknung])
- Reaktionszeit (längere Exposition → höhere Carbonatisierungstiefe; Reaktion verlangsamt sich aber)
- Vorcarbonatisierungsgrad (junge vs. alte Betone)
- Art der direkten Carbonatisierung (trocken, semi-nass, nass → Carbonatisierungsgrad)

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Einflussfaktoren & Eigenschaften

Trockene Carbonatisierung

- CO_2: gasförmig, hoch konzentriert; Reaktionsart: Gas - Feststoff



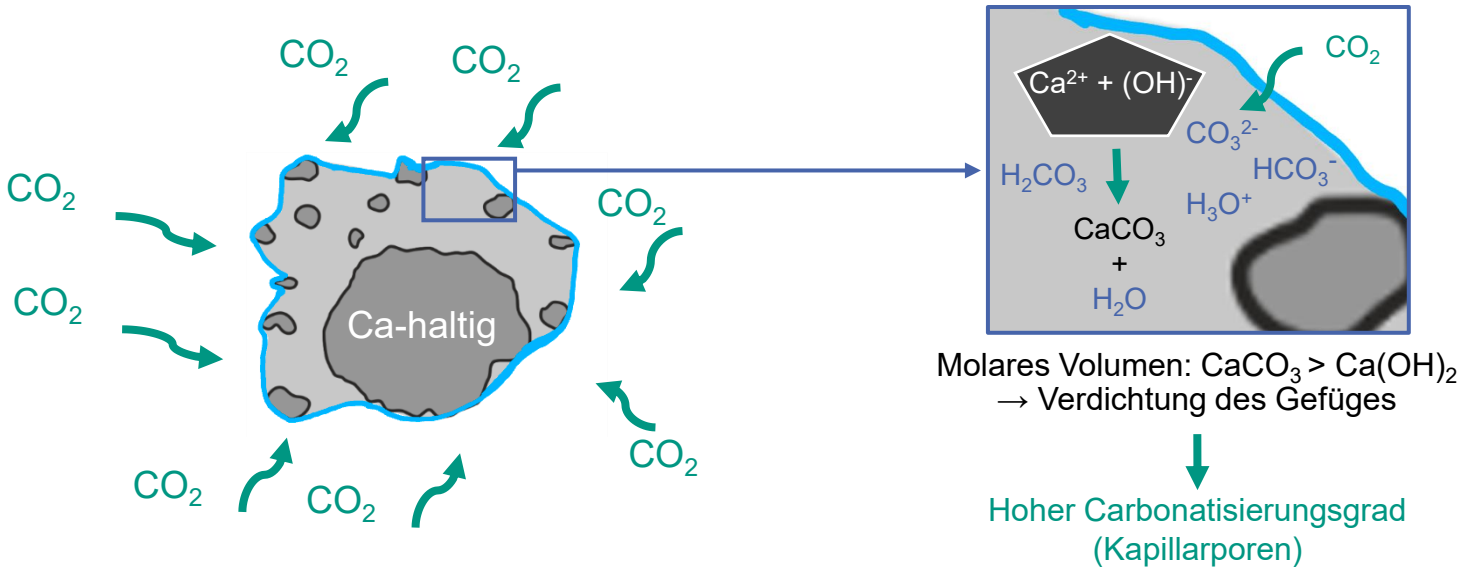
Molares Volumen: $CaCO_3 > Ca(OH)_2$
→ Verdichtung des Gefüges

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Einflussfaktoren & Eigenschaften

Semi-nasse Carbonatisierung

- CO_2: adsorbiertes Gas, hochkonzentriert; Reaktionsart: wässrige (Teil-) Lösung - Feststoff



Molares Volumen: $CaCO_3 > Ca(OH)_2$
→ Verdichtung des Gefüges

↓

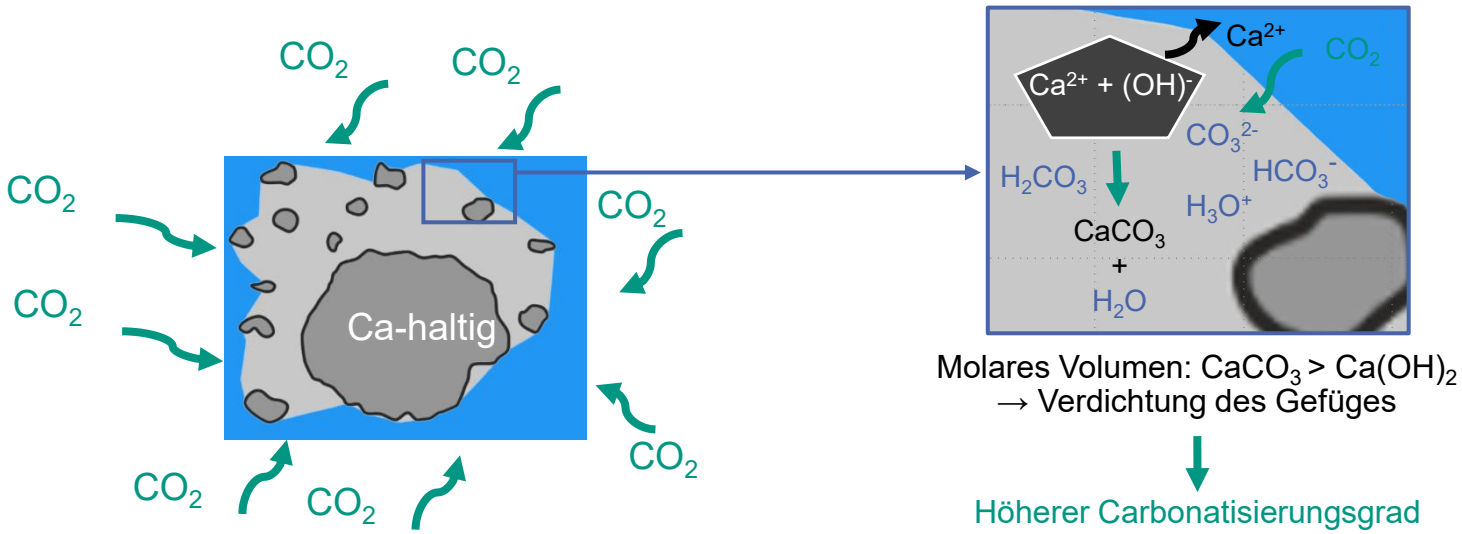
Hoher Carbonatisierungsgrad
(Kapillarporen)

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Einflussfaktoren & Eigenschaften

Nasse Carbonatisierung

- CO_2: gelöstes Gas, hochkonzentriert; Reaktionsart: wässrige Lösung - Feststoff



Molares Volumen: $CaCO_3 > Ca(OH)_2$
→ Verdichtung des Gefüges

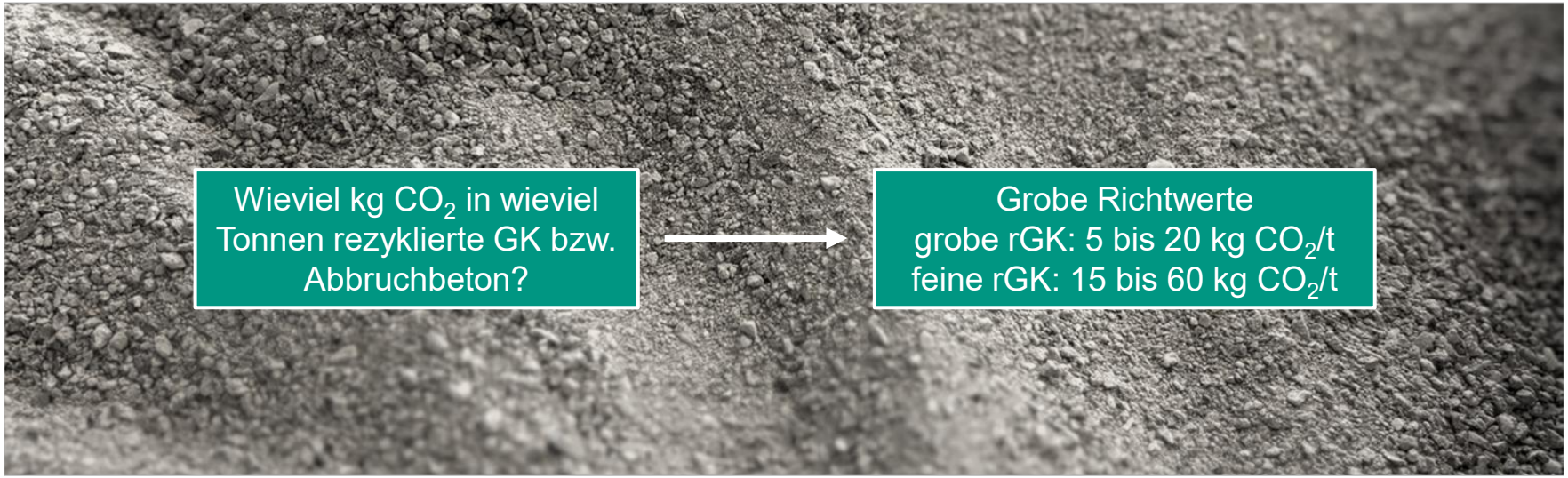
↓

Höherer Carbonatisierungsgrad
(Kapillar- und Gelporen)

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Einflussfaktoren & Eigenschaften

Carbonatisierungsgrad der CO_2-Mineralisierung



Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Zusammenfassung & Ausblick (I)



Quelle: Heinrich Feeß GmbH & Co. KG



Quelle: Jakob/Kies und Beton AG

Erfahrungswerte für die industrielle Carbonatisierung rezyklierter Gesteinskörnungen

Messverfahren und Qualitätssicherung für die CO_2-Aufnahme



- CSA
- TG-MS
- Massenänderung
- DTA-TG
- XRD
- FT-IR

Validiertes Verfahren zur quantitativen Bestimmung der CO_2-Aufnahme rezyklierter Gesteinskörnungen

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Zusammenfassung & Ausblick (I)



Quelle: Heinrich Feeß GmbH & Co. KG



Quelle: Jakob/Kies und Beton AG

Erfahrungswerte für die industrielle Carbonatisierung rezyklierter Gesteinskörnungen

Messverfahren und Qualitätssicherung für die CO_2-Aufnahme

Beeinflussung der CO_2-Aufnahme- und Bindekapazität der Rezyklate

Werkseigene Produktionskontrolle i. V. m. Fremdüberwachung

Anwendungsempfehlung zur industriellen Carbonatisierung rezyklierter Gesteinskörnungen in BaWü

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Zusammenfassung & Ausblick (II)





Quelle: Rement

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Förderprogramm VwV „R-Beton“ (I)

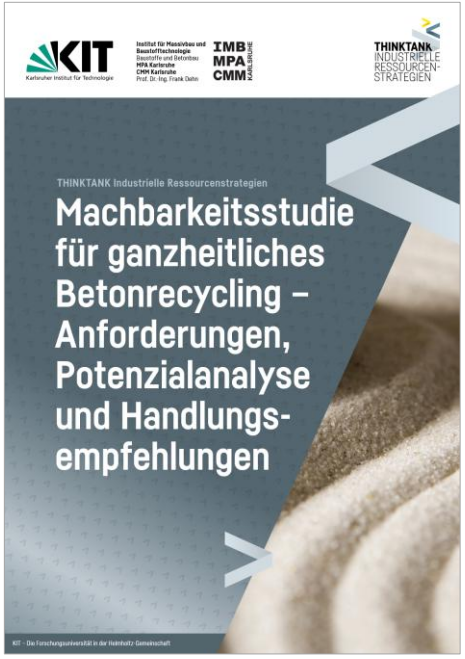
Baden-Württemberg
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft

Karlsruher Institut für Technologie

Förderung von ressourcen- und klimaschonendem Beton (VwV R-Beton)

- Unterstützung des Einsatzes von Recyclingmaterial bei der Betonherstellung (Hochbau und Fertigteilbereich)
- CO_2-reduzierter R-Beton unter Nutzung innovativer (CCS-) Technologien (z.B. CO_2-Beaufschlagung rezyklierter Gesteinskörnungen)
- Flächendeckender Einsatz von R-Beton





Quelle: TTIrs, KIT

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

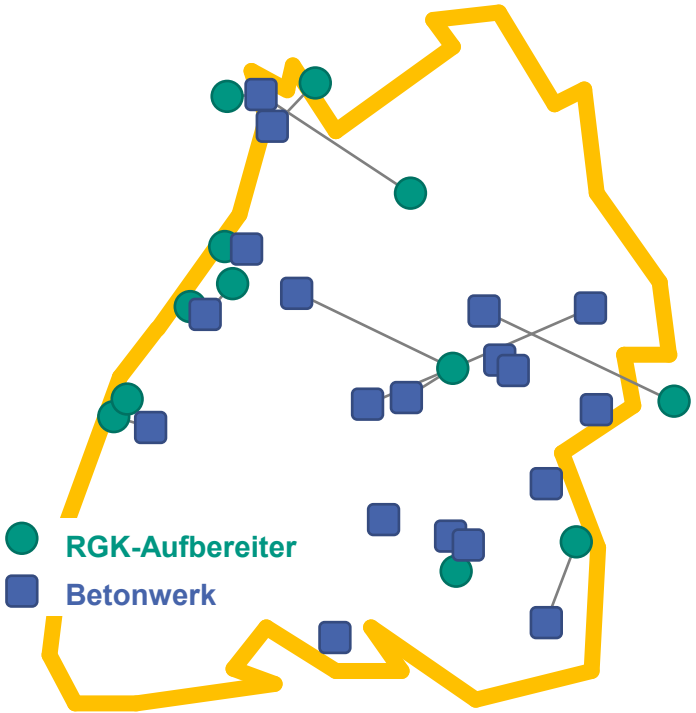
Förderprogramm VwV „R-Beton“ (II)

Baden-Württemberg
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft

Karlsruher Institut für Technologie

Wissenschaftliche Begleitung

- Vor-Ort-Begleitung und wissenschaftliche Auswertung von erweiterten Erstprüfungen
- Probenahme und Charakterisierung von rezyklierten Gesteinskörnungen
- Quantifizierung der CO_2-Aufnahme in Rezyklaten
- Empfehlung zur Weiterentwicklung der normativen Grundlagen



Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Förderprogramm VwV „R-Beton“ (III)

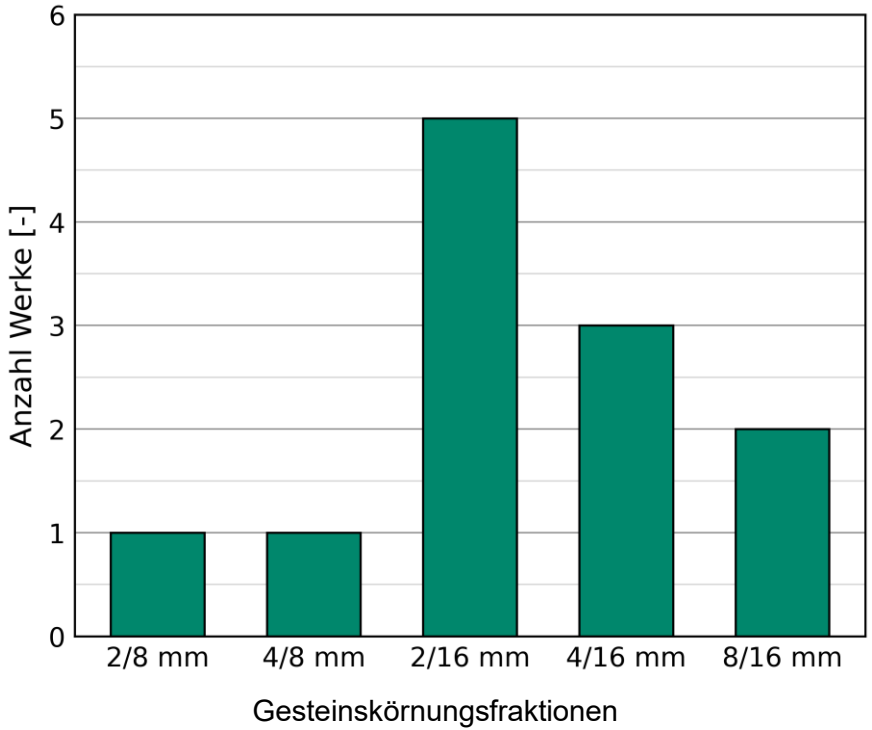
Baden-Württemberg
Ministerium für Umwelt, Klima
und Energiewirtschaft

Karlsruher Institut für Technologie

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Vorgehen

- Besuch von neun Transportbetonwerken
- Begleitung von 22 erweiterten Erstprüfungen
- Probenahme und Analyse der rezyklierten Gesteinskörnungen
- Herstellung und Prüfung eigener Betone



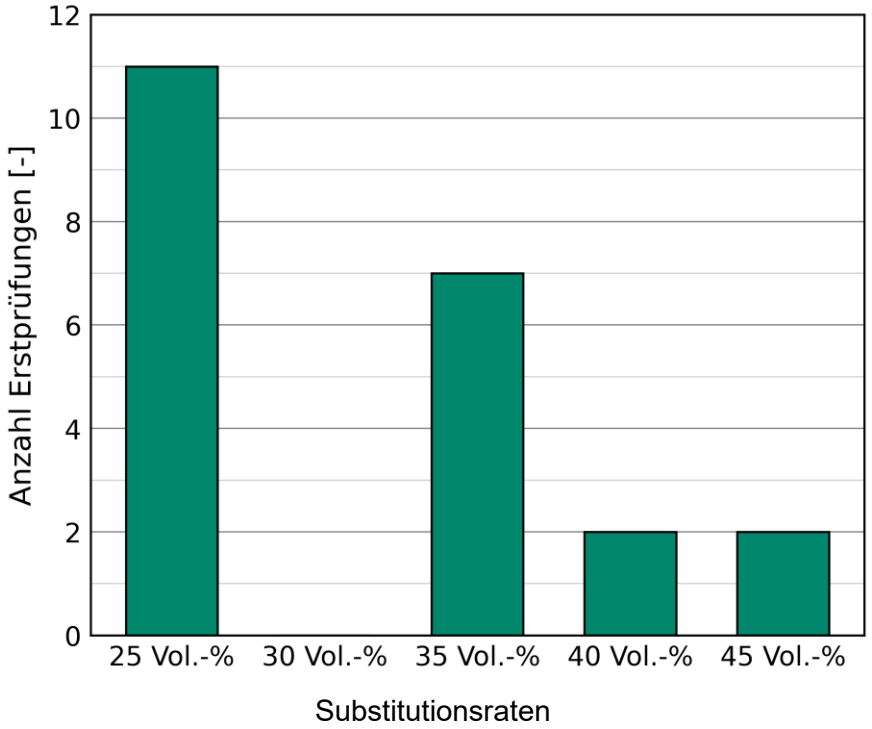
Förderprogramm VwV „R-Beton“ (III)

Baden-Württemberg
Ministerium für Umwelt, Klima
und Energiewirtschaft

Karlsruher Institut für Technologie

Vorgehen

- Besuch von neun Transportbetonwerken
- Begleitung von 22 erweiterten Erstprüfungen
- Probenahme und Analyse der rezyklierten Gesteinskörnungen
- Herstellung und Prüfung eigener Betone



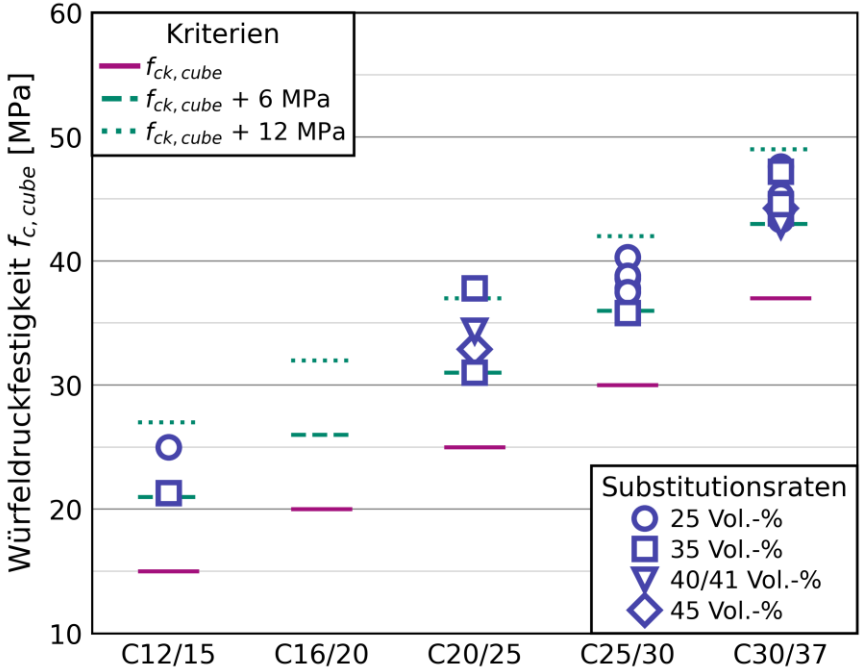
Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

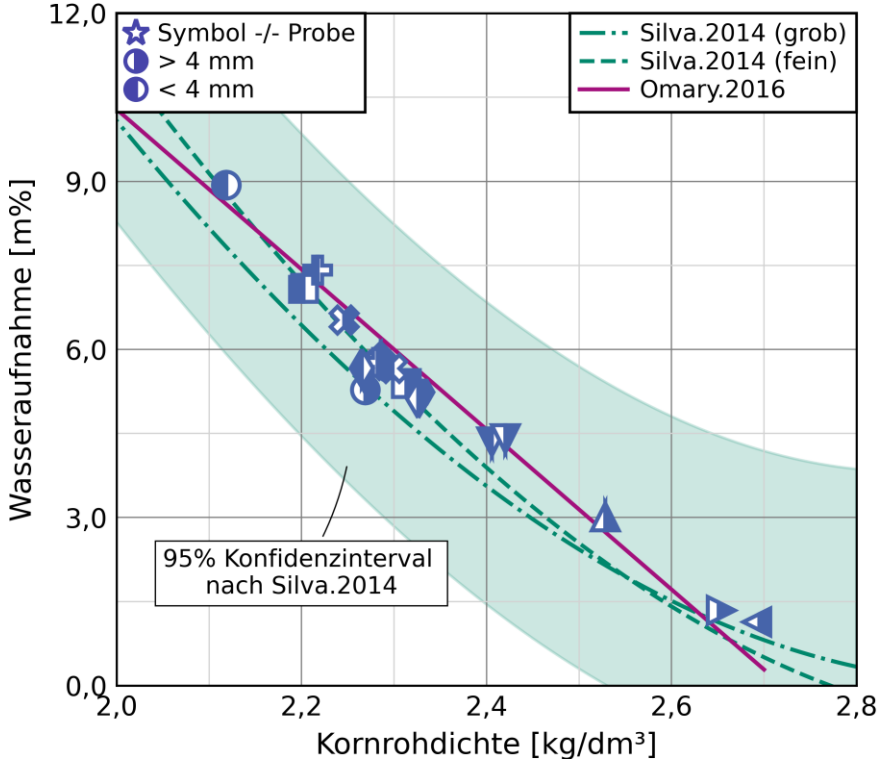
Förderprogramm VwV „R-Beton“ (IV)

Baden-Württemberg
Ministerium für Umwelt, Klima
und Energiewirtschaft

Karlsruher Institut für Technologie

Ausgewählte Ergebnisse





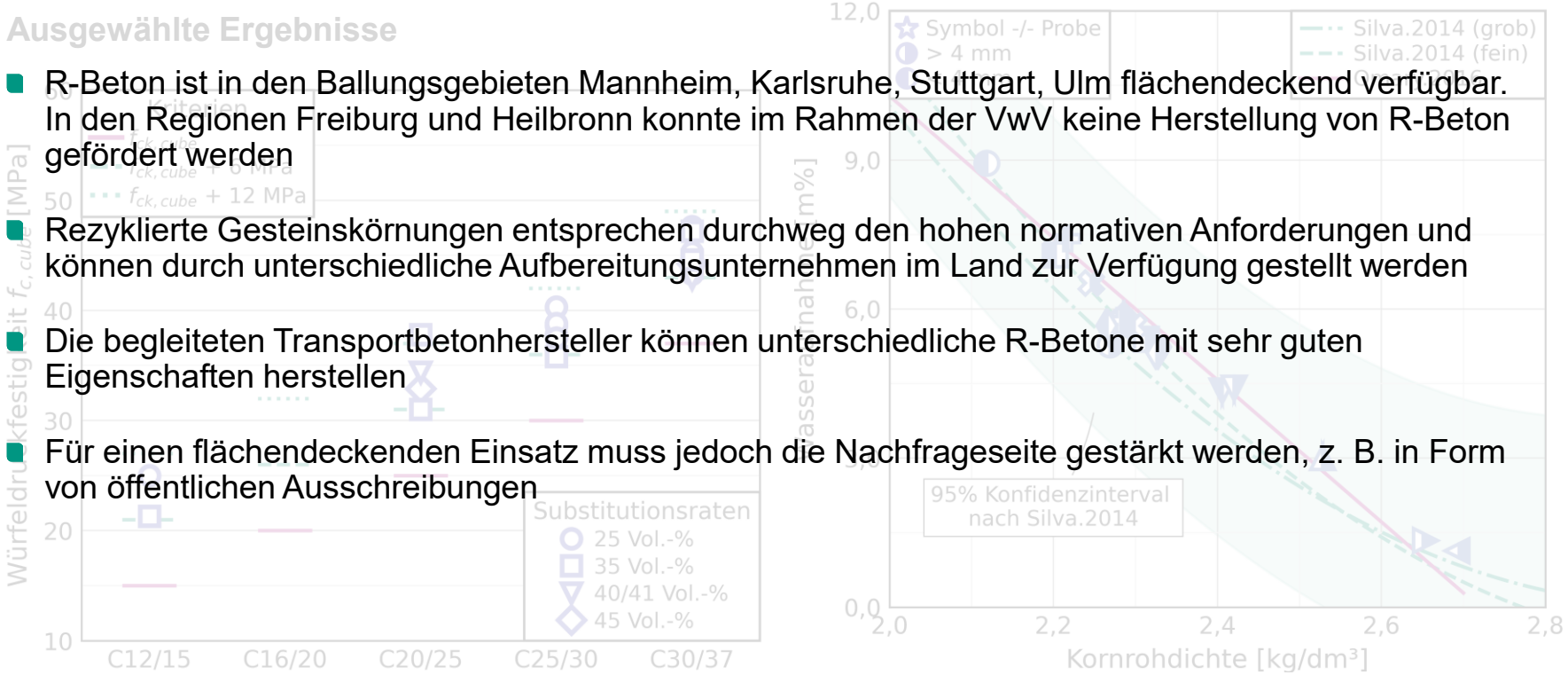
Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Förderprogramm VwV „R-Beton“ (IV)

Baden-Württemberg
Ministerium für Umwelt, Klima
und Energiewirtschaft

Karlsruher Institut für Technologie

Ausgewählte Ergebnisse



- R-Beton ist in den Ballungsgebieten Mannheim, Karlsruhe, Stuttgart, Ulm flächendeckend verfügbar. In den Regionen Freiburg und Heilbronn konnte im Rahmen der VwV keine Herstellung von R-Beton gefördert werden
- Rezyklierte Gesteinskörnungen entsprechen durchweg den hohen normativen Anforderungen und können durch unterschiedliche Aufbereitungsunternehmen im Land zur Verfügung gestellt werden
- Die begleiteten Transportbetonhersteller können unterschiedliche R-Betone mit sehr guten Eigenschaften herstellen
- Für einen flächendeckenden Einsatz muss jedoch die Nachfrageseite gestärkt werden, z. B. in Form von öffentlichen Ausschreibungen

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Besuchen Sie uns auf **www.betoninstitut.de**

Folgen Sie uns auf LinkedIn

Copyright © IMB/MPA/CMM Karlsruhe - Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Alle Rechte vorbehalten Keine unerlaubte Verbreitung