Technische Universität Braunschweig

iBMB MPA TU BRAUNSCHWEIG

CO_2-reduzierte Betone

– Chancen und Herausforderungen für Forschung und Praxis

Dr.-Ing. Hans-W. Krauss

TU Braunschweig,
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

16.11.2016

Gliederung

- Einleitung
  - Neue Herausforderungen für die Bauindustrie
  - „Nachhaltigkeit" im Betonbau
- Technologie Nachhaltiger Betone am Beispiel CO_2-reduzierter Betone
- Neue Herausforderungen für Forschung und Praxis & aktuelle Forschungsergebnisse
- Zusammenfassung und Ausblick

Neue Herausforderungen für die Bauindustrie

Megatrends Gesellschaft

Bevölkerungswachstum & Globalisierung

Urbanisierung & Mobilität

Energie- & Ressourcenverbrauch

Klimawandel & Umweltschutz

Neue Randbedingungen / Ziele:

- Flexibilisierung
- Individualisierung
- Ressourcenschonung
- Energieeinsparung
- Reduzierung CO_2-Emissionen
- Recycling
- Verwendung lokal verfügbarer Ausgangsstoffe
- Länderübergreifende Regeln

„Nachhaltigkeit“ im Betonbau

Herstellphase

- Minimierung CO_2-Emissionen und Ressourcenverbrauch
- Gewährleistung optimaler Verarbeitungseigenschaften (bauaufgabenspezifisch)

Nutzungsphase

- Gewährleistung der geforderten Eigenschaften und Funktionen über eine definierte Lebensdauer (bauaufgabenspezifisch)
- Minimierung Energieverbrauch

Abriss und Recycling

- Minimierung des Anteils zu deponierender Stoffe
- hohe Qualität der rezyklierten Stoffe

LÖSUNGEN (BSP.):

- **CO_2-reduzierter Beton / „Ökobeton“**
- Ultrahochfester Beton
- Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung
- hybride / gradierte Bauteile

} **Sonderbeton / Hochleistungsbeton**

Strategien für CO_2-reduzierten Beton / „Ökobeton“

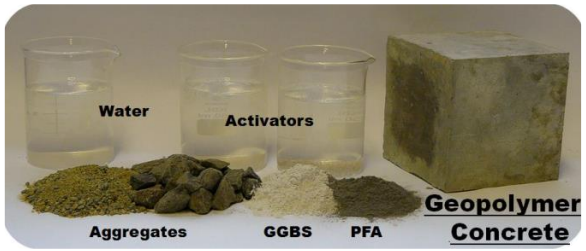
HAUPTZIEL:

Verringerung des Portlandzementgehalts im Beton

A)
Zement mit reduziertem Klinkeranteil

B)
Beton mit reduziertem Zementgehalt

C)
Alternative (klinkerfreie) **Bindemittel**

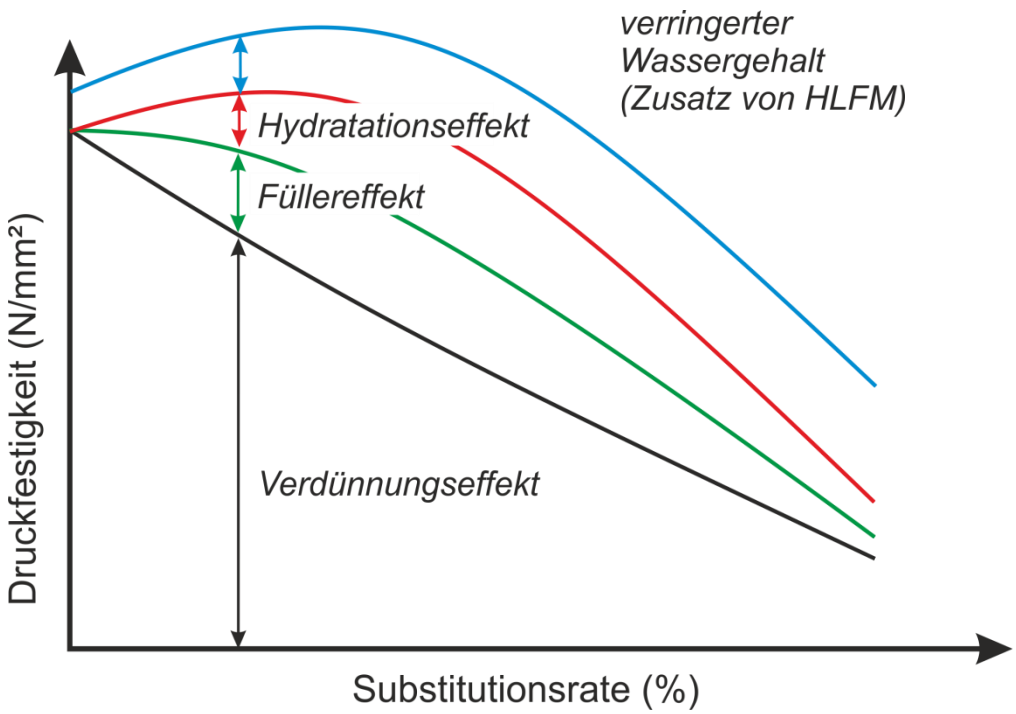


Technologie CO_2-reduzierter Betone

I. Reduzierung des Zementgehalts

➔ Erhöhung des Wasserzementwerts (Porosität)

➔ Verschlechterung technischer Betoneigenschaften



Kompensationsmaßnahmen:

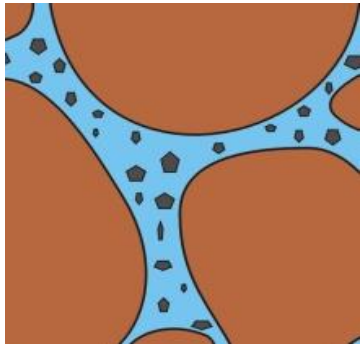
- **Füller** (inerte Zusatzstoffe)
  → Füllereffekt
- **reaktive Zusatzstoffe**
  → Füllereffekt + Reaktion
- **verringerter Wassergehalt**
  → verringerte Porosität
  (erfordert **Zusatz von Hochleistungsfließmitteln**)

Technologie CO_2-reduzierter Betone

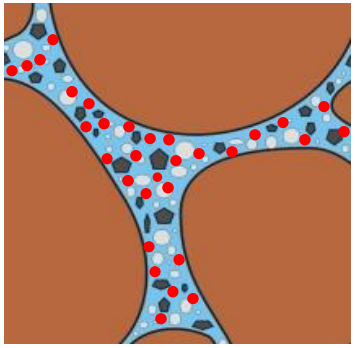
II. Erhöhung der Packungsdichte

Maßnahmen:

- Optimierung der Kornabstufung
- Einsatz von Hochleistungsfließmitteln



Beton mit üblicher Packungsdichte (Normalbeton)



Beton mit optimierter Packungsdichte

Vorteile:

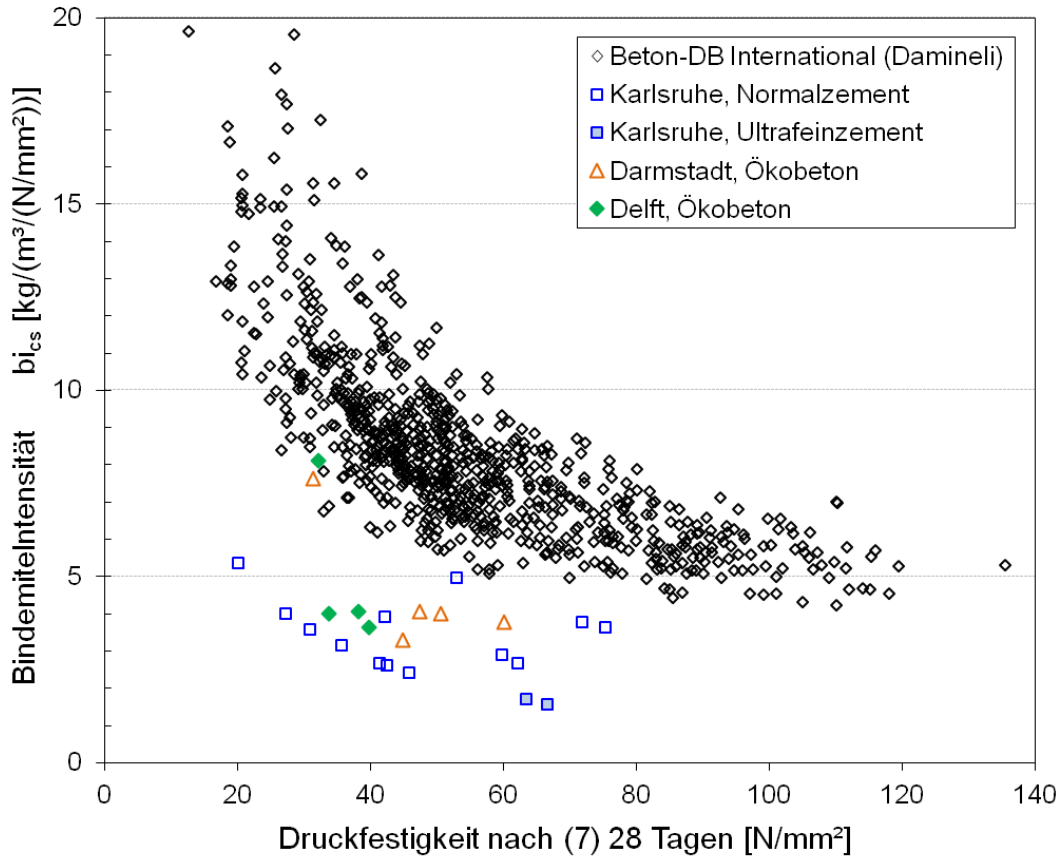
- Verringerung des Wasseranspruchs
- Verringerung des Leimvolumenanteils
- Bessere Kornverzahnung

Nachteile:

- hohe Viskosität
- Ausgangsstoffe hoher Qualität
- sehr genaue Prozesskontrolle

Technologie CO_2-reduzierter Betone

Effekt der Packungsdichteerhöhung auf die Festigkeit am Beispiel der **Bindemittelintensität bi_{cs}** (*nach Damineli et al., Cem. Con. Comp. 2010, in Anlehnung an Haist et al., Beton- u. Stahlbetonbau 2014*)



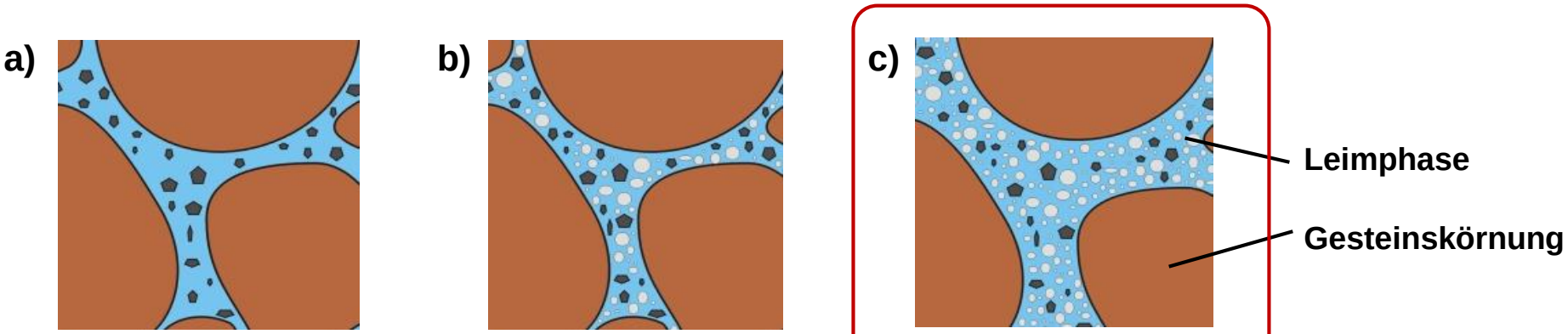
Bindemittelintensität:

$$bi_{cs} = \frac{\text{Bindemittelgehalt (kg/m}^3)}{\text{Druckfestigkeit (N/mm}^2)}$$

Technologie CO_2-reduzierter Betone

ALTERNATIVES REZEPTURENTWICKLUNGSKONZEPT – *REDCARB*-BETON

- **Maximale Wassereffizienz**: sehr hohe Mengen PCE-Fließmittel
  → sehr starke Verringerung des Wassergehaltes
  → sehr gute Dispergierung (Ausnutzung) der Feinstoffe
- **Erhöhung des Bindemittelleimvolumens**
  → größere Leimfilmdicke → bessere „Beweglichkeit" / Fließfähigkeit



Beton mit üblicher Packungsdichte | **Beton mit optimierter Packungsdichte** | **Beton mit optimierter Verarbeitbarkeit**

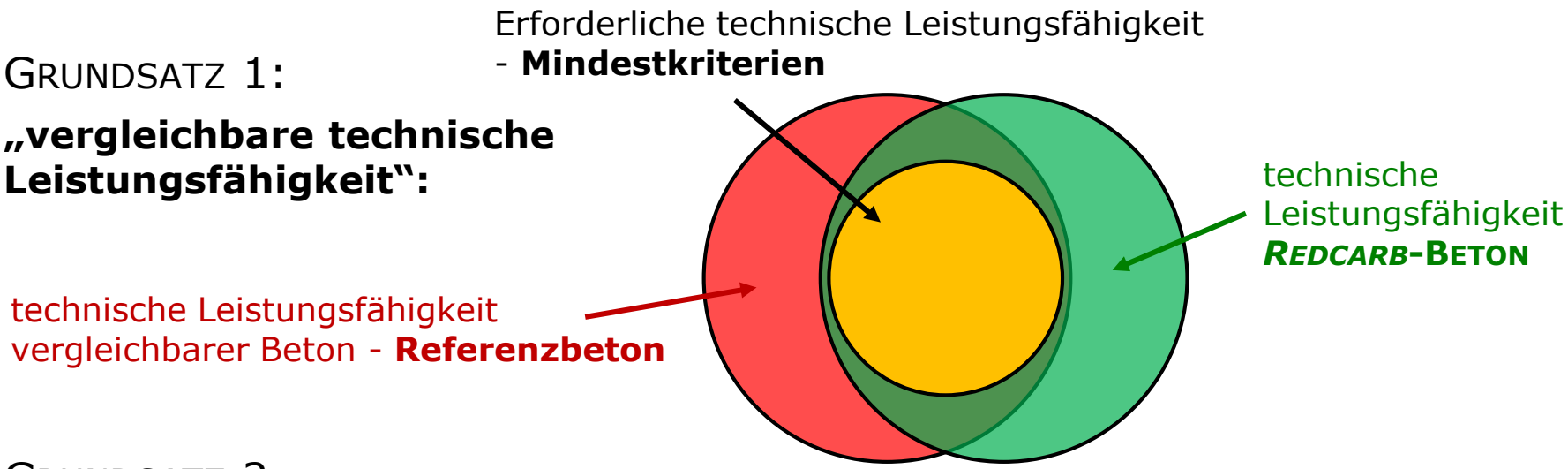
[nach Gläser, IFB Hannover]

- Moderate **Optimierung der Kornabstufung**

Technisch-ökologische Bewertung CO_2-reduzierter Betone

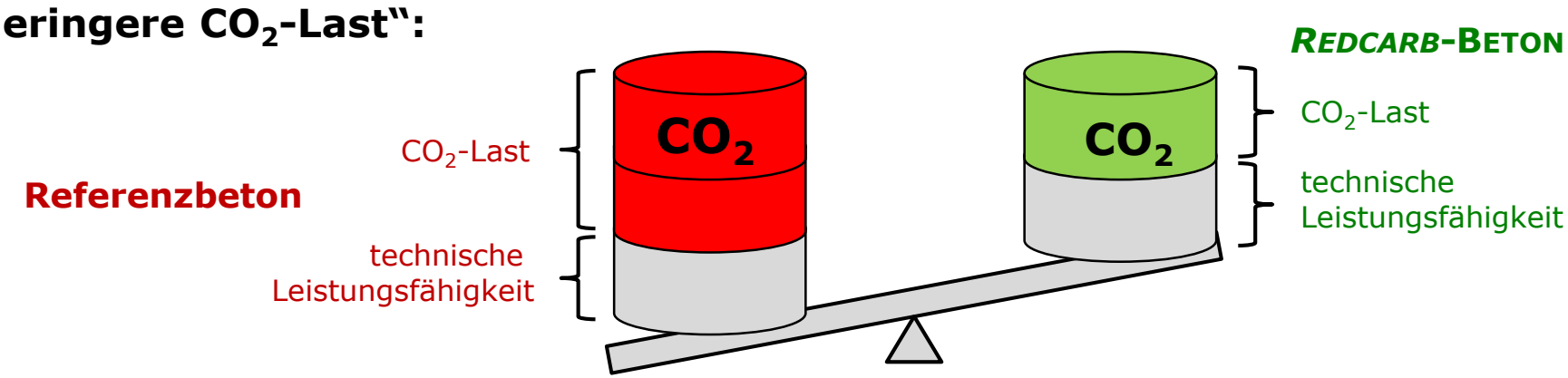
GRUNDSATZ 1:

„vergleichbare technische Leistungsfähigkeit“:



GRUNDSATZ 2:

„geringere CO_2-Last“:



Technisch-ökologische Bewertung CO_2-reduzierter Betone

PROBLEM:

Fehlende Grenzwerte / Kriterien für technische Leistungsfähigkeit

➔ Festlegung von **Performanceklassen (PC)** und **Referenzbetonen**

Anforderungen

Perfor-mance-klasse	Beispiel	Exposi-tions-klassen	Druckf.-klasse	Rezepturen Referenzbetone			
				Zementart	Zement (kg/m³)	Flugasche (kg/m³)	w/(z+f)
PC1	Innenbauteil	XC2	C20/25	CEM III/A 42,5N	270	60	0,52
PC2	Außenbauteil	XC4, XF1	C25/30		290	60	0,50
PC3	Massiges Bauteil	XC4, XF1	C25/30		260	90	0,46
PC4	Ingenieurbauwerk	XC4, XD2, XF3, XA2	C30/37		360	60	0,38
PC5	Fertigteil	XC4, XD3, XF3, XA2	C35/45	CEM I 52,5R	400	-	0,40

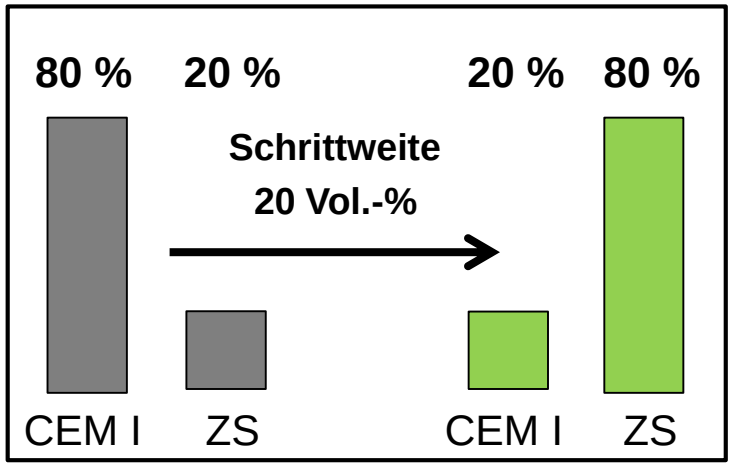
CO_2-Einsparpotenzial

➔ Ermittlung von **Performancekriterien** anhand von Versuchsergebnissen

Rezepturentwicklung *REDCARB*-BETON

Rezepturkomponenten:

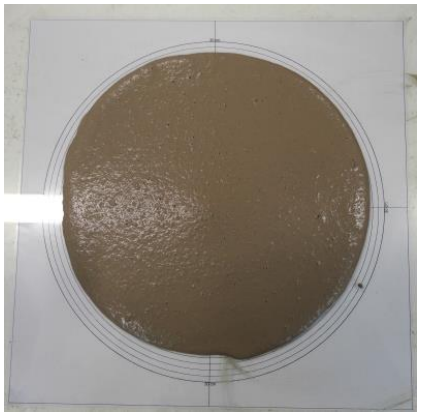
- Zement: **CEM I 52,5 R**
- 5 Zusatzstoffe (ZS):
  - Hüttensandmehl
  - Steinkohlenflugasche
  - Kalksteinmehl
  - Trassmehl
  - Phonolithmehl



Rezepturabstimmung auf Mörtelebene

➔ maximale Fließfähigkeit

- Flüssigkeits-/Feststoff-Volumenverhältnis
- Leim-/Sand-Volumenverhältnis



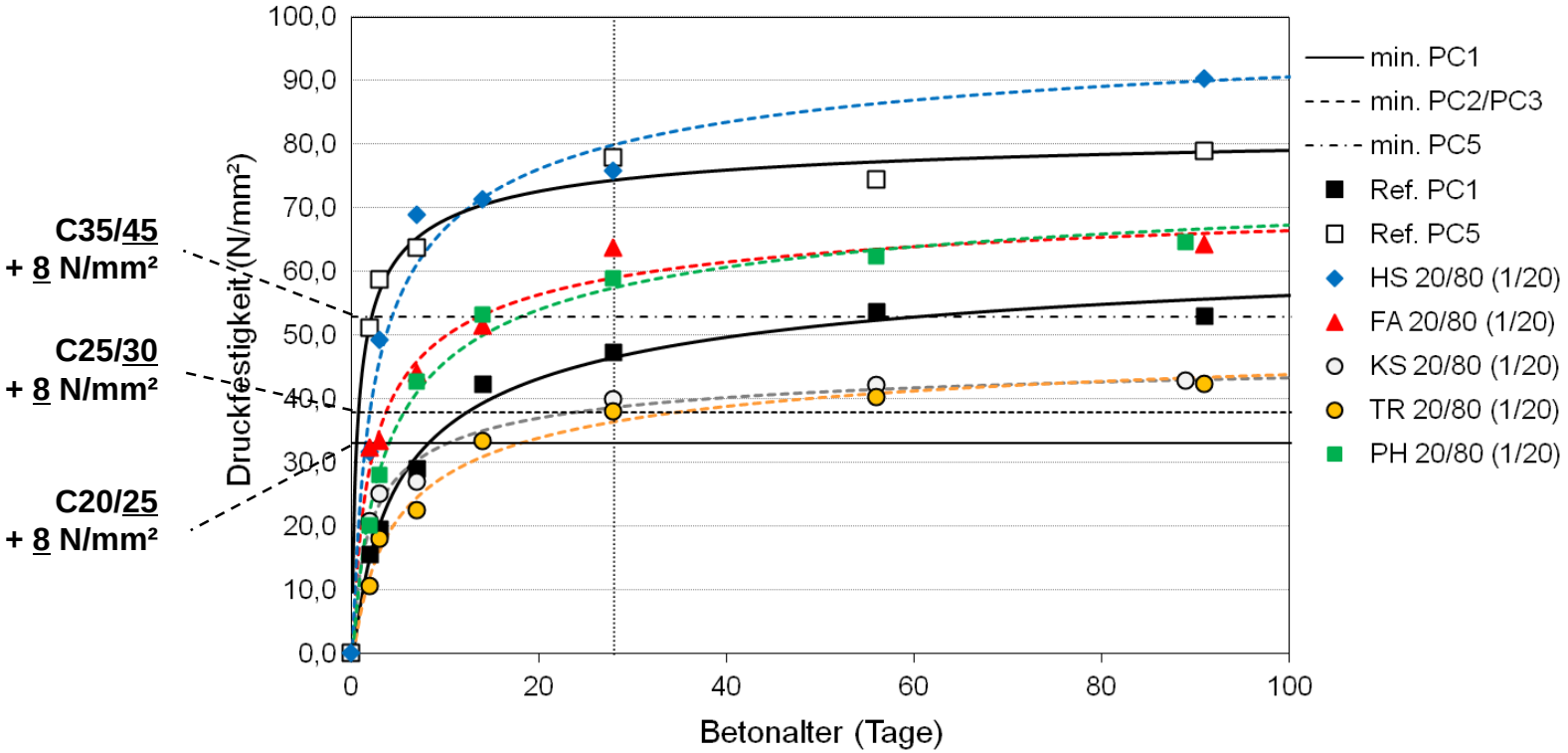
Beispielrezepturen *REDCARB*-BETON

Ergebnisse Rezepturabstimmung:

Beton	Zement		Zusatzstoff		Wasser (kg/m³)	FM/w	w/(z+f)	kg CO_2/m³
	Art	(kg/m³)	Art	(kg/m³)				
PC2	CEM III/A 42,5N	**290**	Flugasche	**60**	175	1,6 %	0,50	**163**
FA 20/80	CEM I 52,5R	**113**	Flugasche	**313**	127	5,0 %	0,30	**114**
FA 20/80	CEM I 52,5R	**112**	Flugasche	**312**	133	2,5 %	0,32	**113**
FA 40/60	CEM I 52,5R	**204**	Flugasche	**212**	125	5,0 %	0,31	**201**
HS 20/80	CEM I 52,5R	**91**	Hüttensand-mehl	**338**	124	5,0 %	0,30	**96**
KS 20/80	CEM I 52,5R	**110**	Kalkstein-mehl	**380**	127	5,0 %	0,27	**123**

Technische Leistungsfähigkeit *REDCARB*-BETON

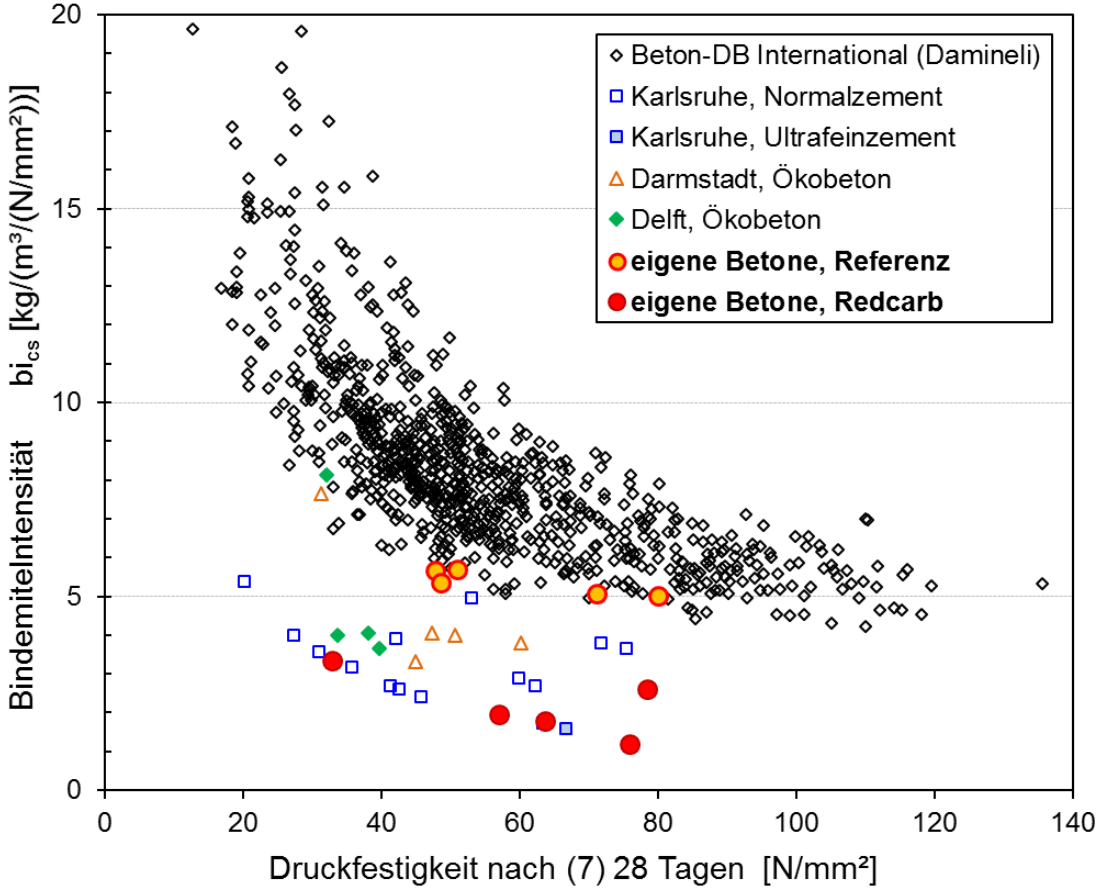
Festigkeitsentwicklung



- Sehr unterschiedliche Festigkeitsentwicklung → Einordnung in PC1 bis PC5
- Alle Betone erfüllen Frühfestigkeitskriterium (≥ 10 N/mm² nach 24 / 48 h)

Technische Leistungsfähigkeit *REDCARB*-BETON

„Bindemittelintensität" im Vergleich



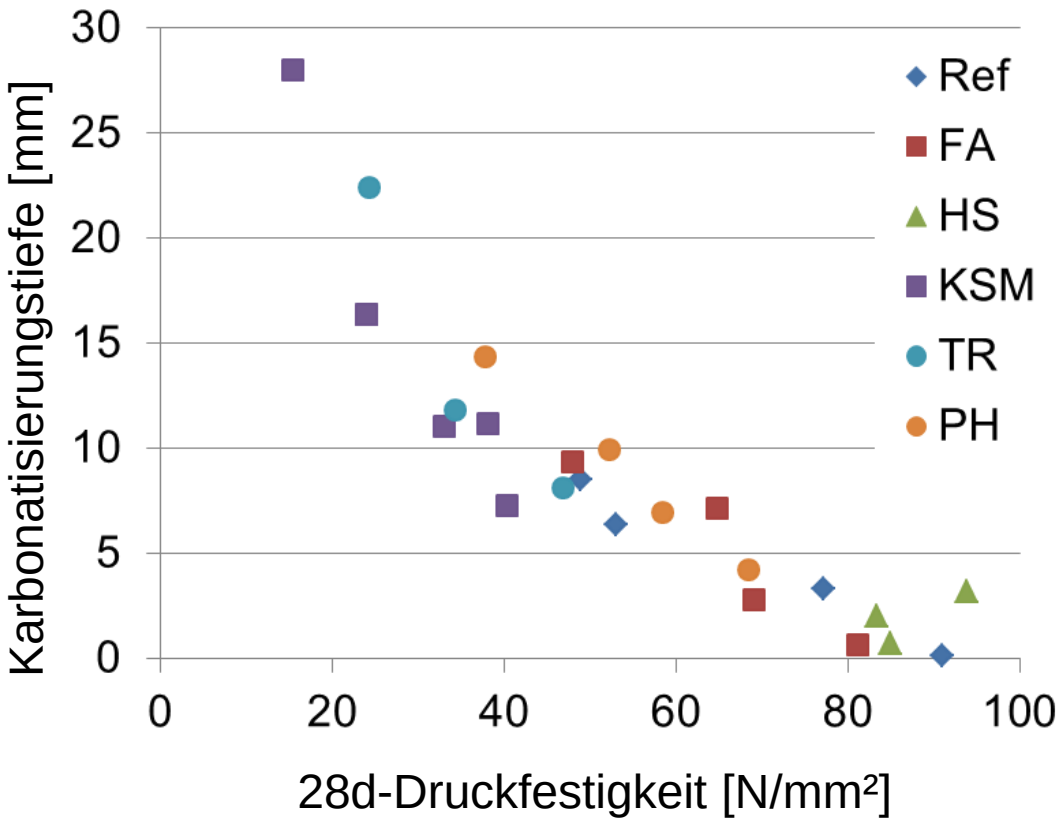
Vorteil des neuen Ansatzes:

- **geringere Anforderungen an die Qualität der Ausgangsstoffe**
  - ➔ Verwendung lokaler Betonausgangsstoffe
  - ➔ Kostenreduzierung
- **verbesserte Verarbeitbarkeit**
  - ➔ Erhöhte Akzeptanz in der Baupraxis

Herausforderung „Dauerhaftigkeit“

Dauerhaftigkeit *REDCARB*-BETON

– Beispiel ***Karbonatisierung***



Schnellkarbonatisierung:

- Probenalter 28 d
- 2% CO_2, 65 % LF
- Dauer: 28 d

[Ergebnisse Begemann, IFB Hannover]

Herausforderung „Normen und Richtlinien“

Aktuelle Betonnormen (DIN EN 206-1 / DIN 1045-2):

→ **deskriptiver Ansatz**

- $f_{ck,\ Ökobeton} \geq f_{ck,Norm}$ ✓
- $(w/z)_{eq,Ökobeton} \neq$ max. $(w/z)_{eq,Norm}$ ✗
- $Z_{Ökobeton} \ll$ min. Z_{Norm} ✗

} **„Ökobeton“-Rezepturen nicht normkonform!**

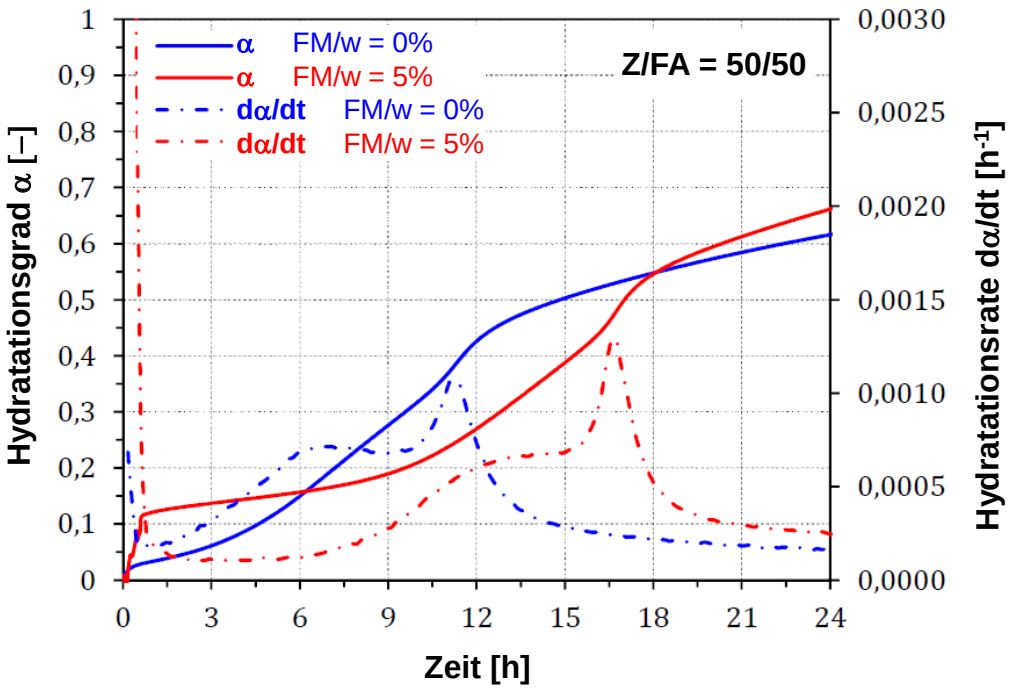
Zukünftige Betonnormen (vgl. DIN EN 206:2014):

→ **Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit**

→ Konzept der gleichen Leistungsfähigkeit von Kombinationen aus Zement und Zusatzstoff

Herausforderung „Prozessverständnis“

Einfluss von Hochleistungsfließmittel auf die Hydratation



Einflussfaktoren:

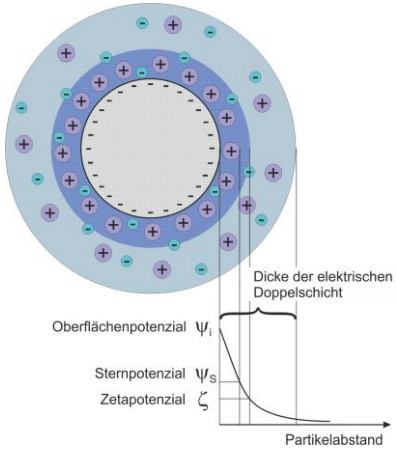
- PCE-Typ (Ladungsdichte, Haupt-/ Seitenkettenlängen, uvm.)
- spezifische Oberfläche Feststoff
- chemische Zusammensetzung Feststoffe und Porenlösung
- Temperatur, Zeit
- Mischenergie

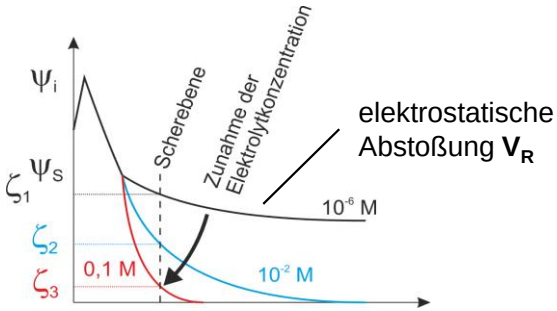
Herausforderung „Prozessverständnis“ *[Diss. Krauss 2013]*

Agglomeration und räumliche Anordnung Zement-/Zusatzstoffpartikel

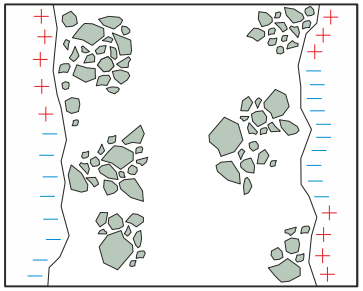
Zetapo-tential [mV]	Kreide		Kalkstein		Quarz	Ton
	K1	**K2**	**K3**	**K4**	**Q3**	**T1**
pH = 12	**-10**	**-12**	**-6**	**~ 0**	**-43**	**-25**
pH = 13,5	**$\lvert\zeta\rvert < 10$**					

- stabil, dispergiert
- geringe Agglomerationsneigung
- instabil, hohe Agglomerationsneigung

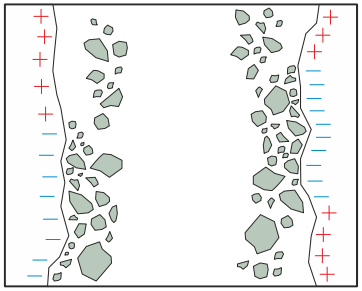




Partikelagglomeration & Partikelanordnung:

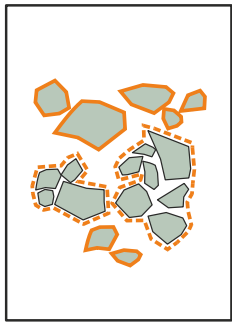


Kreidemehl

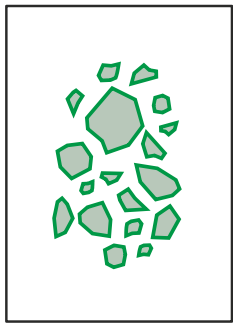


Kalksteinmehl

Keimbildungsfunktion:



Kreidemehl

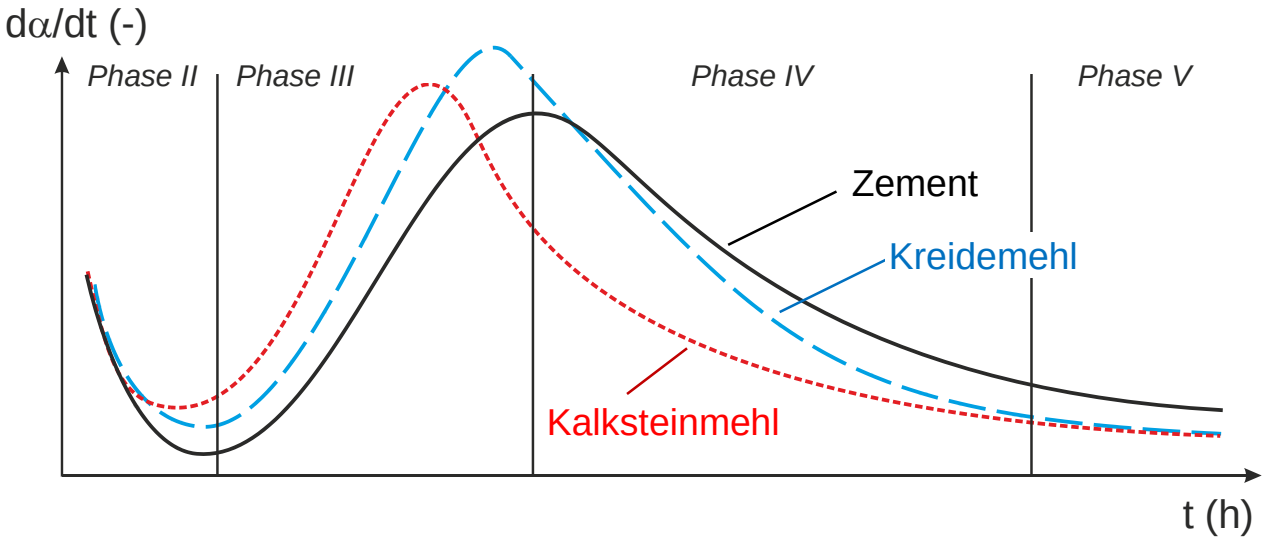


Kalksteinmehl

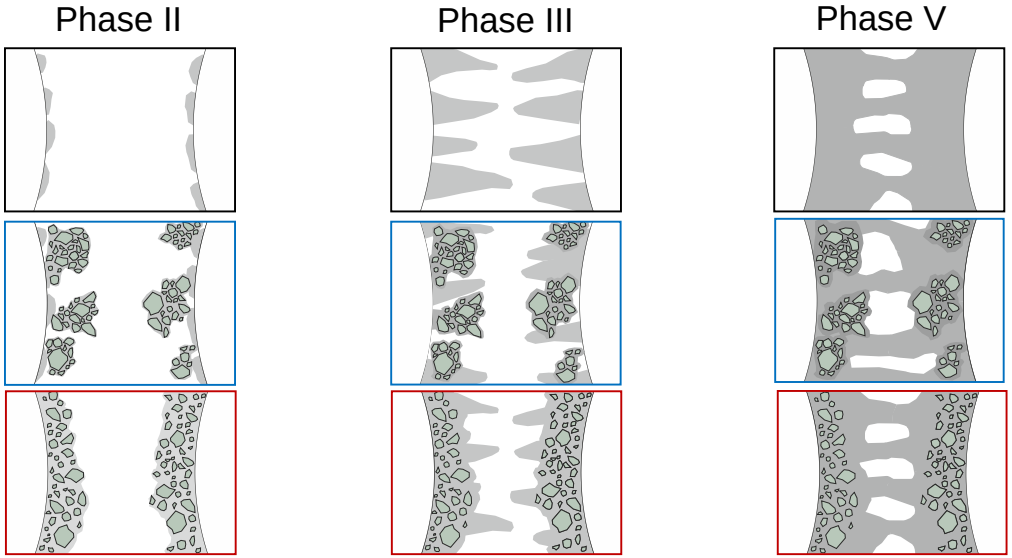
Herausforderung „Prozessverständnis“

[Diss. Krauss 2013]

Einfluss auf Hydratationsrate



Einfluss auf Gefügeentwicklung



Zusammenfassung und Ausblick

- Zukunft Baupraxis: **Ressourceneinsparung, bauaufgabenspezifische Anforderungen ➔** individuelle betontechnologische Lösungen (außerhalb der heutigen Normungen und Richtlinien)
- CO_2-reduzierte Betone nach **Prinzip der maximalen Wassereffizienz**
  - hohe technische Leistungsfähigkeit (Nachhaltigkeit)
  - Verwendung lokaler Ausgangsstoffe möglich
- Weiterer **Arbeitsbedarf für Forschung und Entwicklung:**

Prozessverständnis

- Hydratationskinetik
- Festigkeitsentwicklung
- Gefüge u. Porenstruktur
- Transportmechanismen
- Dauerhaftigkeit

Optimierung

- Granulometrie
- Fließmittelgehalt
- Verarbeitbarkeit
- Dauerhaftigkeit
- Nachbehandlung

Werkstoffmodelle

- Phasenentwicklung
- Gefügeentwicklung
- Festigkeit, Schwinden
- Dauerhaftigkeit
- bauaufsichtl. Regelung

PROJEKT GEFÖRDERT DURCH:

niedersächsische technische hochschule

iBMB MPA TU BRAUNSCHWEIG

Technische Universität Braunschweig,
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann,
Dr.-Ing. Hans-Werner Krauss,
Dipl.-Ing. Anne Wachsmann,
Dr.-Ing. Wibke Hermerschmidt

Leibniz Universität Hannover,
Institut für Baustoffe

Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus,
Dipl.-Ing. Christoph Begemann

Technische Universität Clausthal
Institut für nichtmetallische Werkstoffe

Prof. Dr. rer. nat. Albrecht Wolter,
Dr. rer. nat. Maren Heidmann-Ruhz

Industriebeirat

Holcim

BASF We create chemistry

garant

Vielen Dank!