Quo Vadis Beton?

Nachhaltig & Digital

Prof. Dr.-Ing. Michael Haist
T. Schack, B. Strybny, J. Link, M. Coenen, C. Vogel, M. Deiters, Ch. Heipke

11. DAfStb-Jahrestagung und 63. Forschungskolloquim

Berlin, 16. Oktober 2024

Bestandsaufnahme

Grande Dixence, Schweiz, 1960
Massenbeton

Auditorio de Tenerife,
Santa Cruz de Tenerife, Spanien
Sichtbeton

https://de.wikipedia.org/wiki/Auditorio_de_Tenerife#/media/Datei:Auditorio_de_Tenerife_Seitlich.jpg

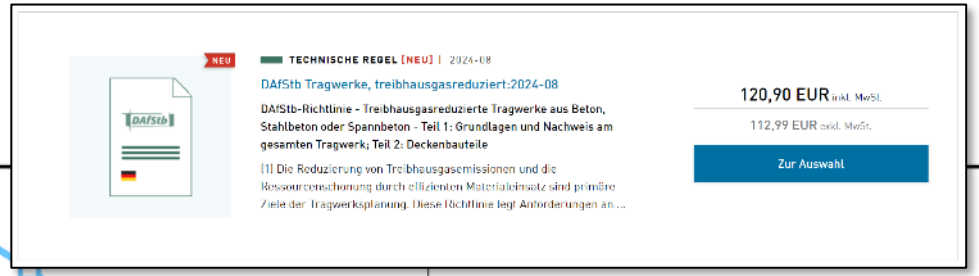
Le Corbusier, Cité Lumineuse
Sichtbeton

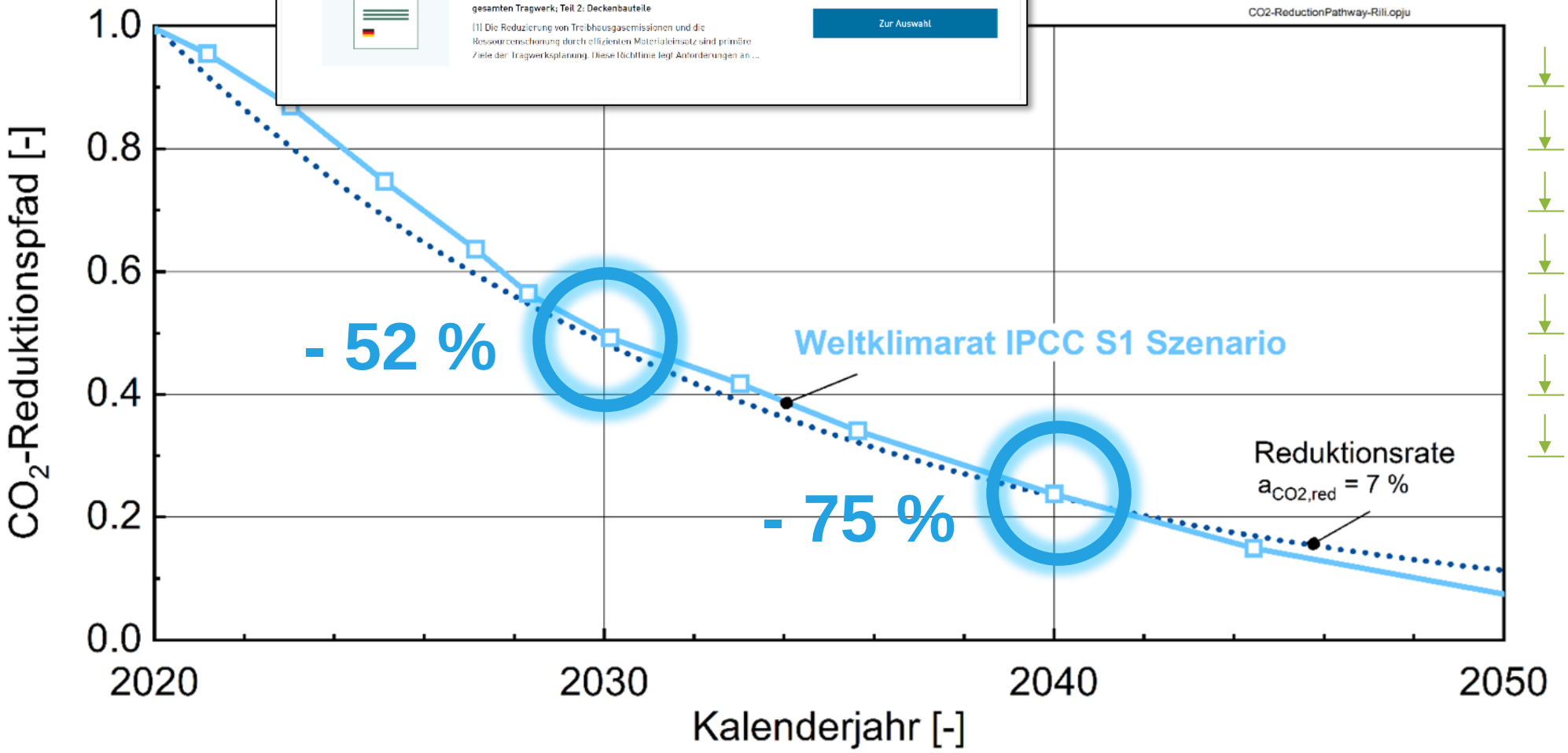
Bild: Baunetz (yk), Berlin

Haben wir Antworten?

Ziele kennen!

Ziel erreichen durch Beitrag aus Betontechnologie und Tragwerksoptimierung





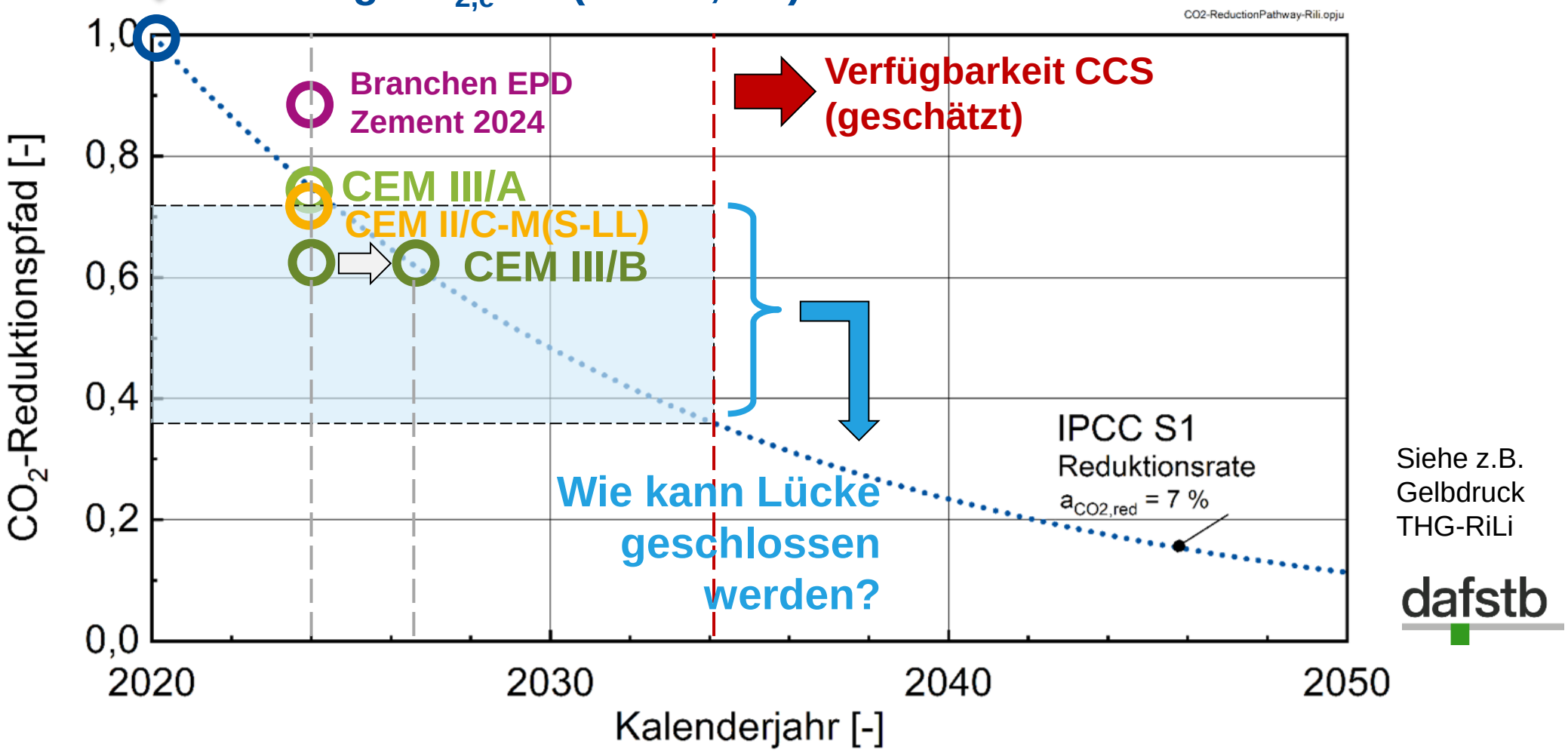
TM-10
TM-20
TM-30
TM-40
TM-50
TM-60
TM-70

dafstb

THG Rili 09/2024

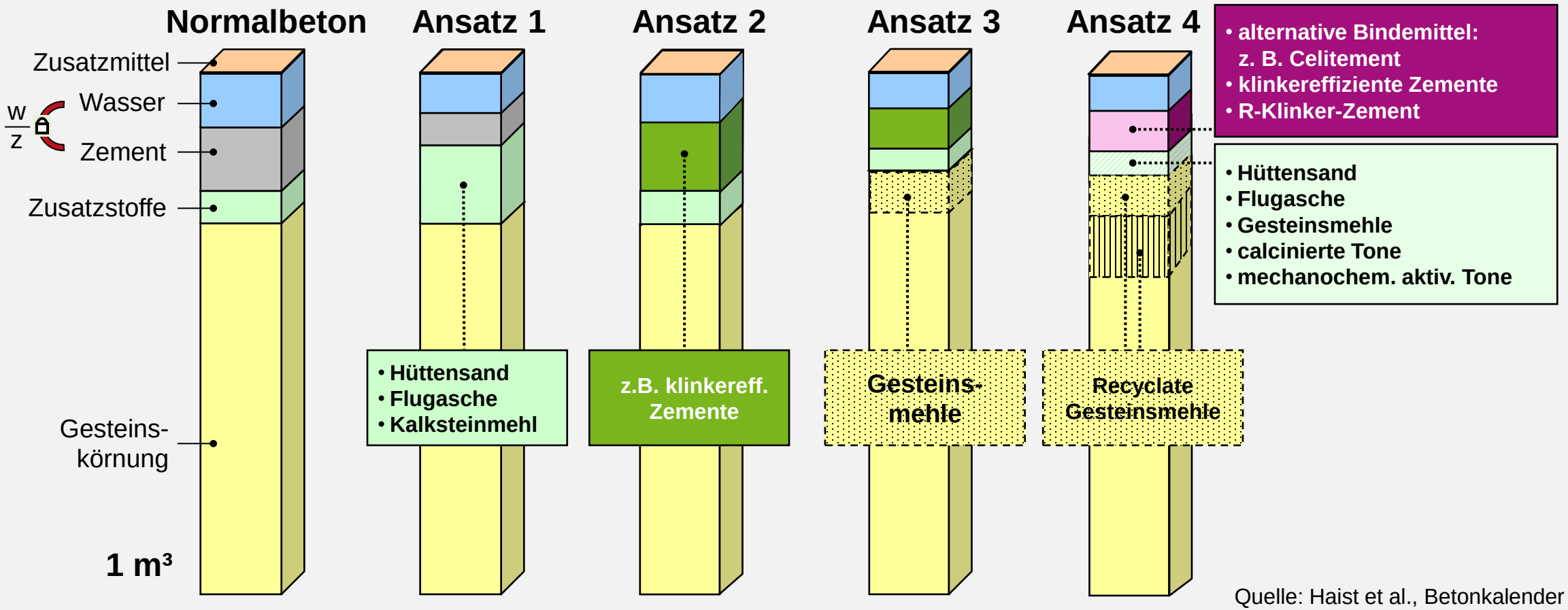
Ziele kennen … und Möglichkeiten bewerten

Beispiel: C30/37 gemäß Branchen EPD 2020:
225 kg $CO_{2,e}$/m³ (A1-A3, C3)



Siehe z.B.
Gelbdruck
THG-RiLi

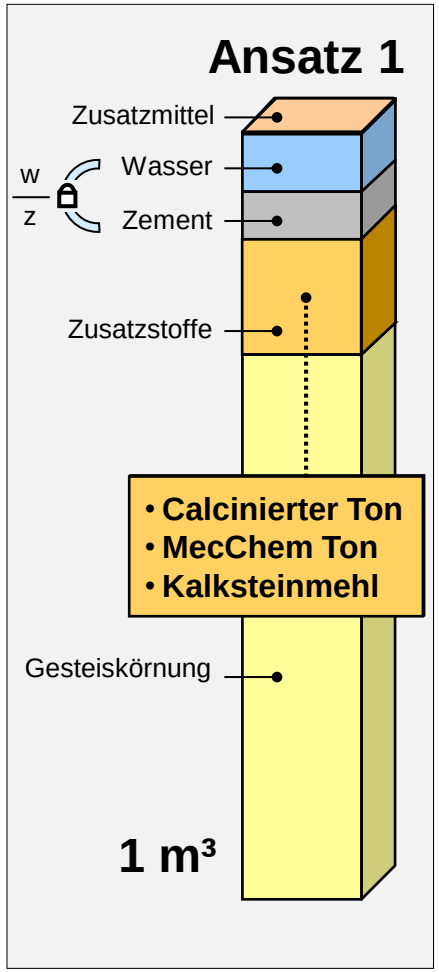
Wege zum nachhaltigen Beton



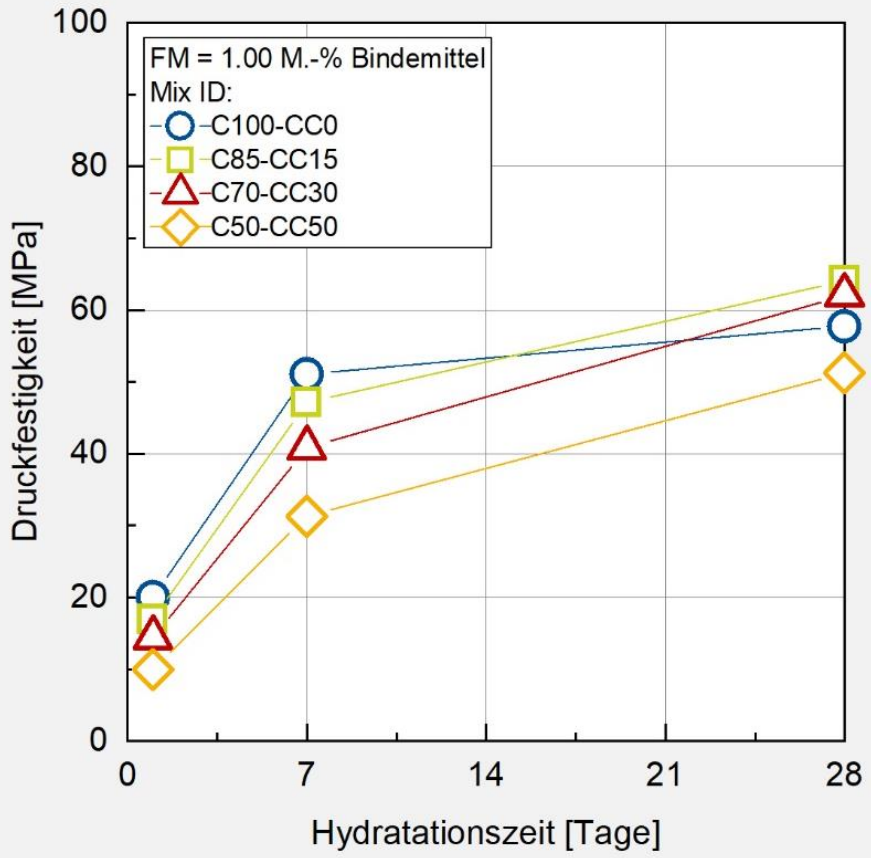
Quelle: Haist et al., Betonkalender 2022

Wie tragfähig sind derartige Ansätze?

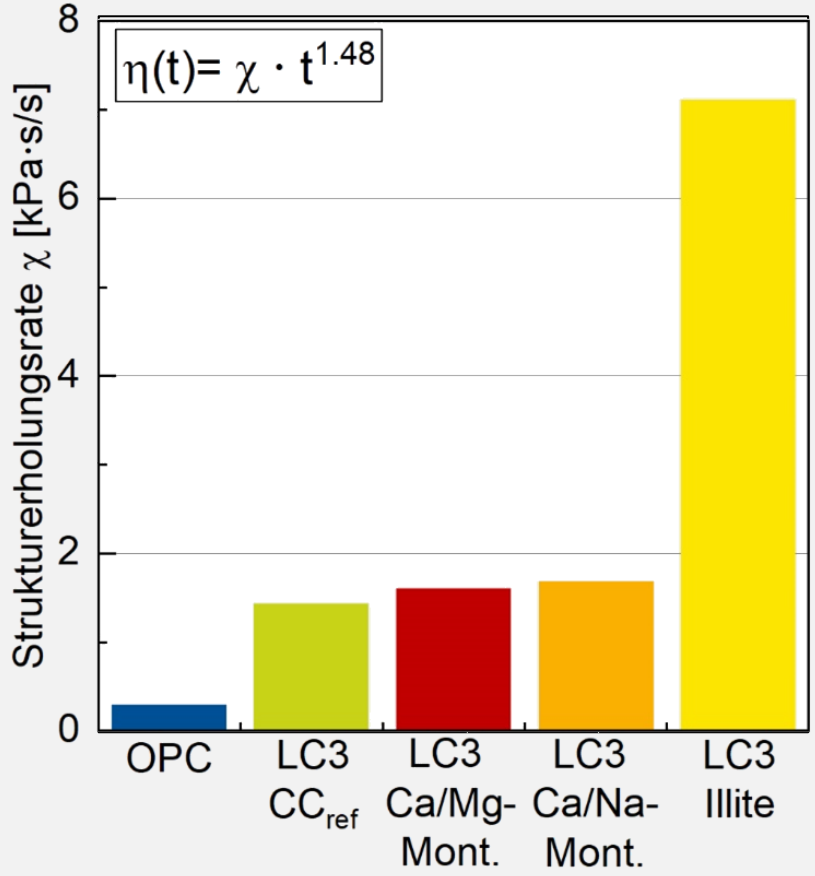
Ansatz 1: Neue Betonzusatzstoffe



Druckfestigkeitsentwicklung

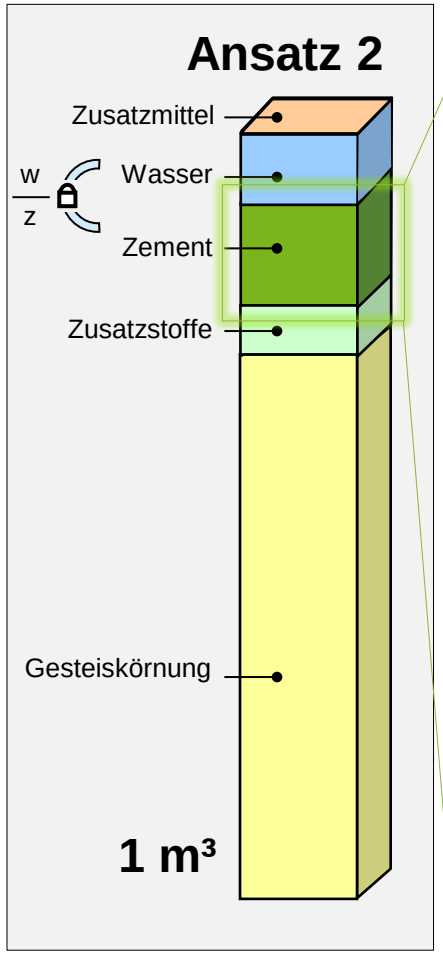


Rücksteifrate im Ruhezustand



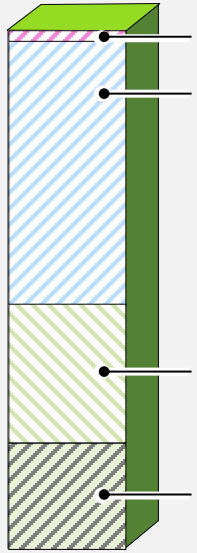
Frischbetonverhalten von Betonen mit aktivierten Tonen stark von Tonart abhängig

Ansatz 2: Klinkereffiziente Zemente



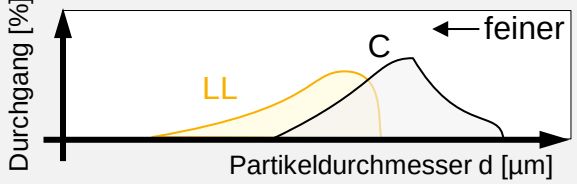
Klinkereffiziente Zemente: Neue technische Ansätze

Steigerung der Effizienz durch Mischung mehrerer Zementersatzstoffe

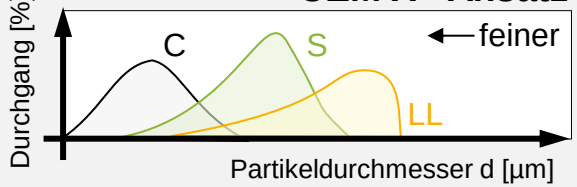


- Multikomponenten-Mischung
- Reduzierter Anteil reaktiver Bestandteile
- Anpassung der Korngröße an die Reaktivität

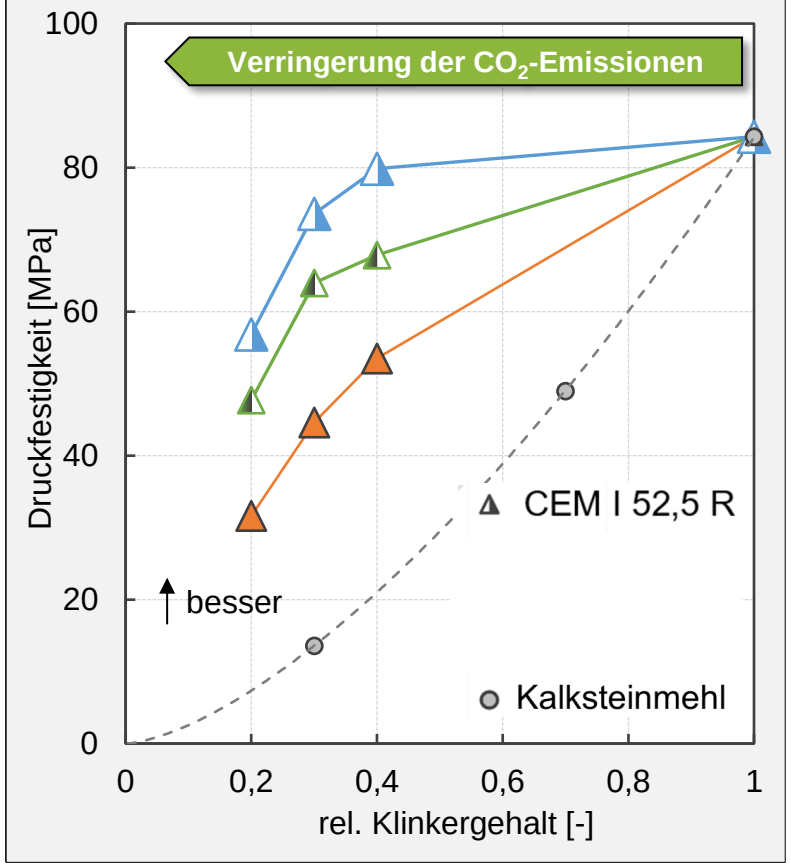
Komposit-Zement heute



CEM X+ Ansatz

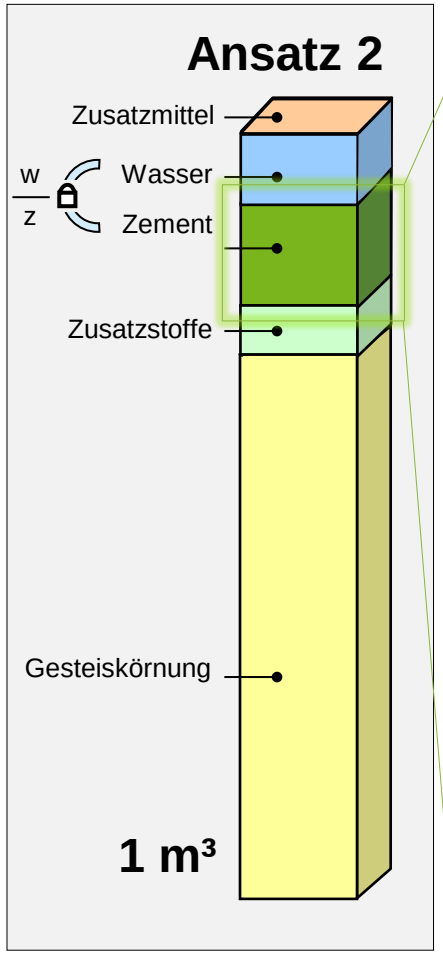


Druckfestigkeit CEM X+ Betone



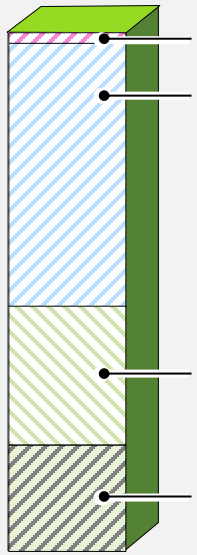
Schack, Tobias and Haist, Michael (2024) Performance assessment of eco-efficient concrete with ternary blended cementitious materials considering the effect of binder component fineness. Case Studies in Construction Materials (20) e03154.

Ansatz 2: Klinkereffiziente Zemente



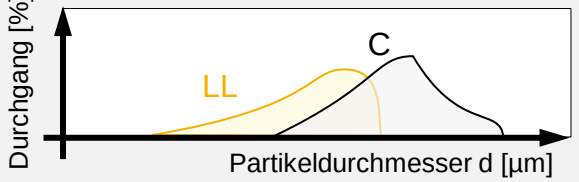
Klinkereffiziente Zemente: Neue technische Ansätze

Steigerung der Effizienz durch Mischung mehrerer Zementersatzstoffe

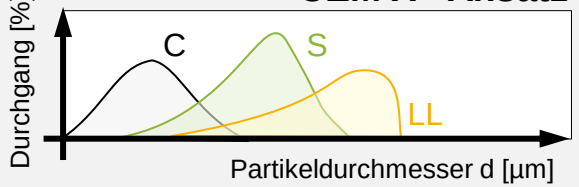


- Multikomponenten-Mischung
- Reduzierter Anteil reaktiver Bestandteile
- Anpassung der Korngröße an die Reaktivität

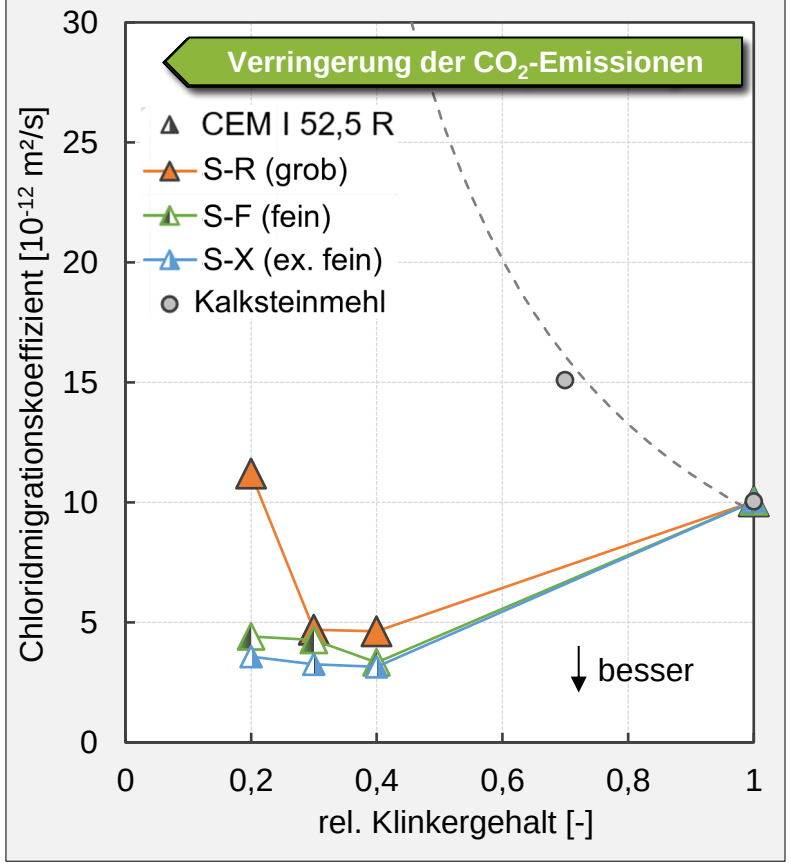
Komposit-Zement heute



CEM X+ Ansatz

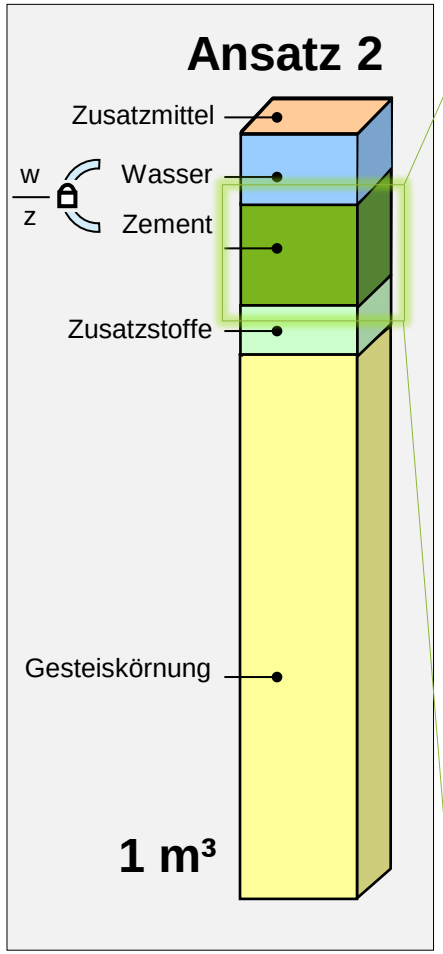


Chloridmigration CEM X+ Betone



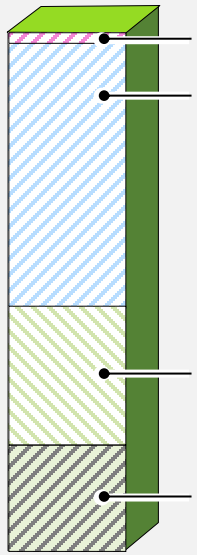
Schack, Tobias and Haist, Michael (2024) Performance assessment of eco-efficient concrete with ternary blended cementitious materials considering the effect of binder component fineness. Case Studies in Construction Materials (20) e03154.

Ansatz 2: Klinkereffiziente Zemente



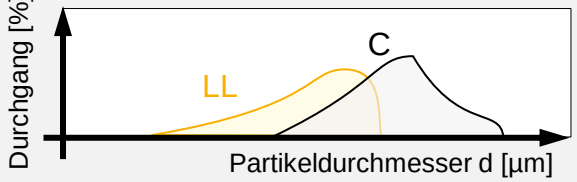
Klinkereffiziente Zemente: Neue technische Ansätze

Steigerung der Effizienz durch Mischung mehrerer Zementersatzstoffe

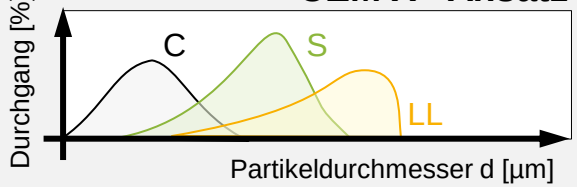


- Multikomponenten-Mischung
- Reduzierter Anteil reaktiver Bestandteile
- Anpassung der Korngröße an die Reaktivität

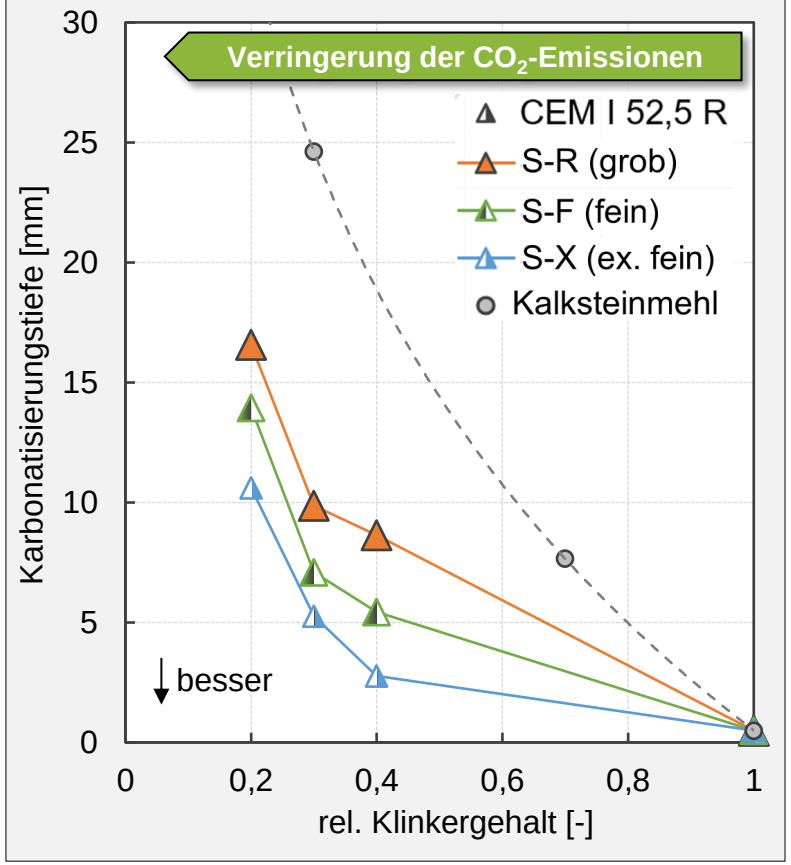
Komposit-Zement heute



CEM X+ Ansatz

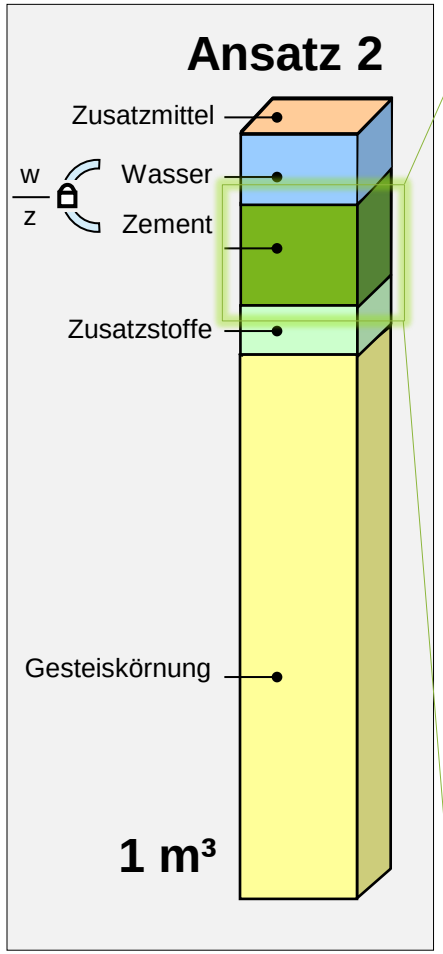


Karbonatisierung CEM X+ Betone



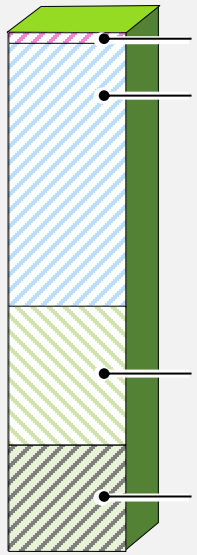
Schack, Tobias and Haist, Michael (2024) Performance assessment of eco-efficient concrete with ternary blended cementitious materials considering the effect of binder component fineness. Case Studies in Construction Materials (20) e03154.

Ansatz 2: Klinkereffiziente Zemente



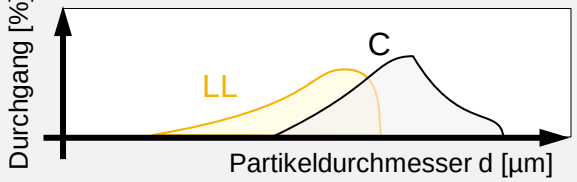
Klinkereffiziente Zemente: Neue technische Ansätze

Steigerung der Effizienz durch Mischung mehrerer Zementersatzstoffe

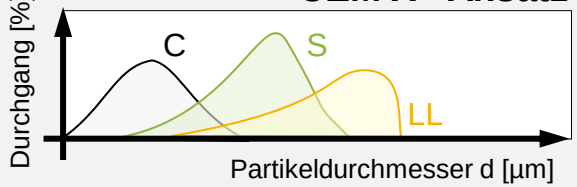


- Multikomponenten-Mischung
- Reduzierter Anteil reaktiver Bestandteile
- Anpassung der Korngröße an die Reaktivität

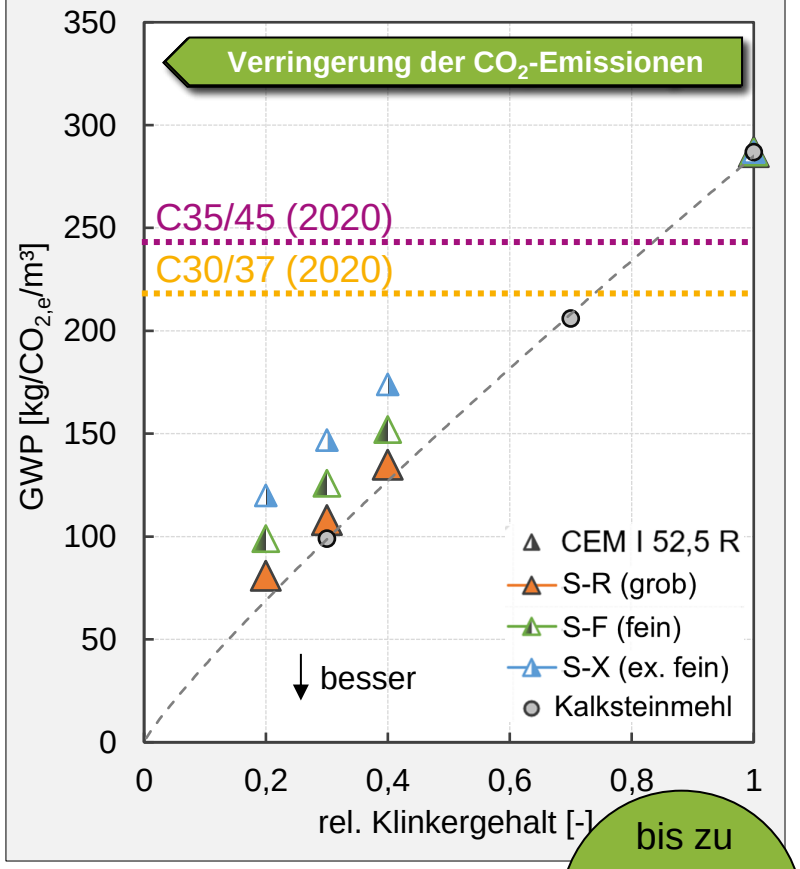
Komposit-Zement heute



CEM X+ Ansatz



CO_2-Emissionen CEM X+ Betone

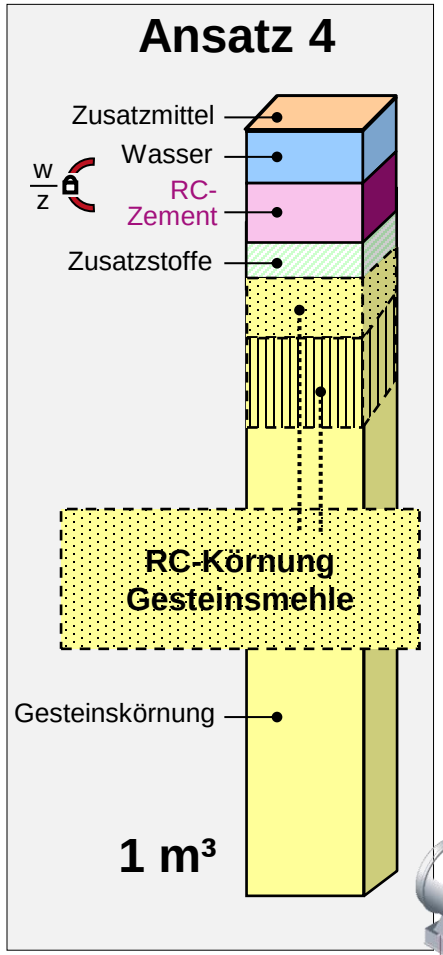


Erhebliche CO_2-Reduzierung bei hoher Performance schon heute möglich!

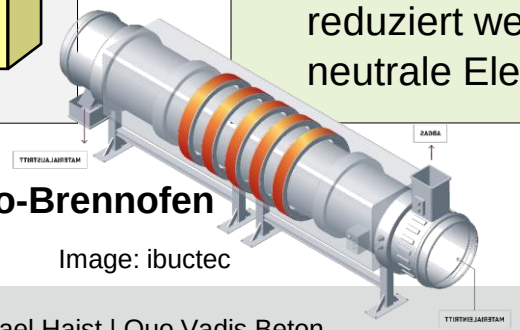
bis zu **- 50 %** CO_2

Schack, Tobias and Haist, Michael (2024) Performance assessment of eco-efficient concrete with ternary blended cementitious materials considering the effect of binder component fineness. Case Studies in Construction Materials (20) e03154.

Ansatz 4: CO_2-neutrale RC-Klinker Zemente

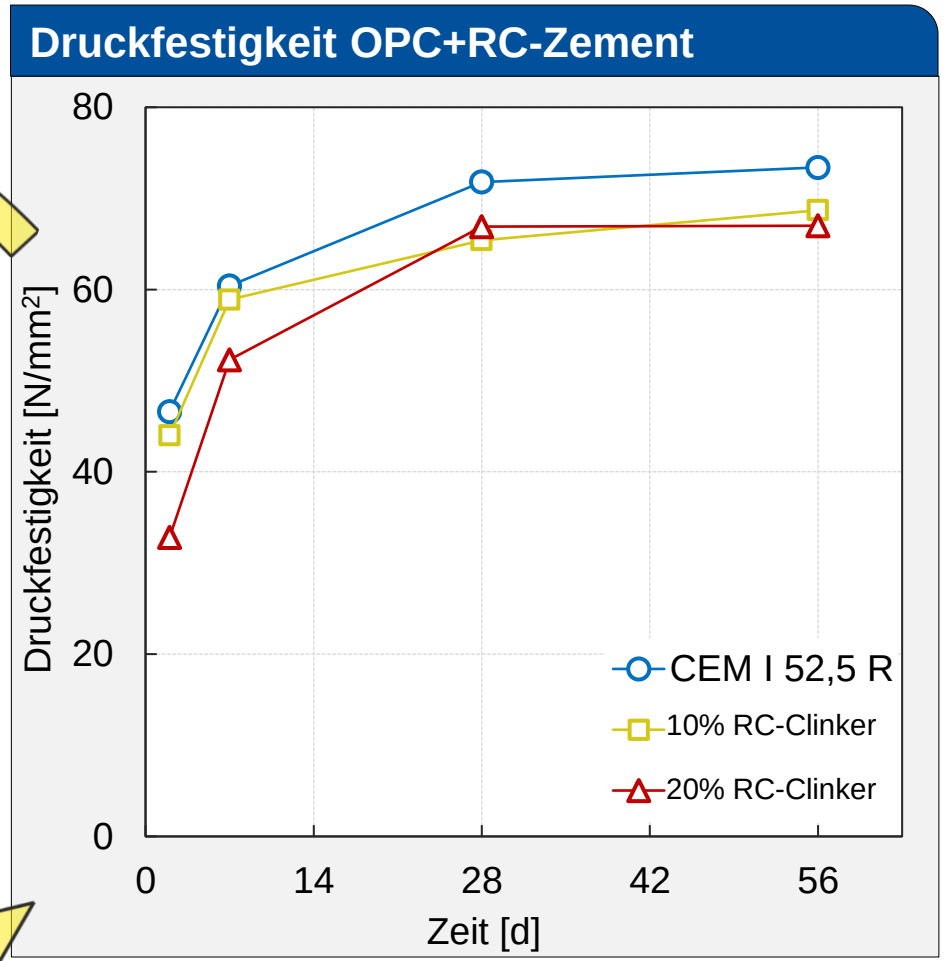


- RC Brechsande enthalten bis zu 70 % an Zementstein → CaO, SiO_2
- **Brechsand kann als CO2-neutrale CaO-Quelle genutzt werden**
- Klinker-Brenntemperatur kann signifikant reduziert werden → Potenzial für CO_2-neutrale Elektro-Brennöfen



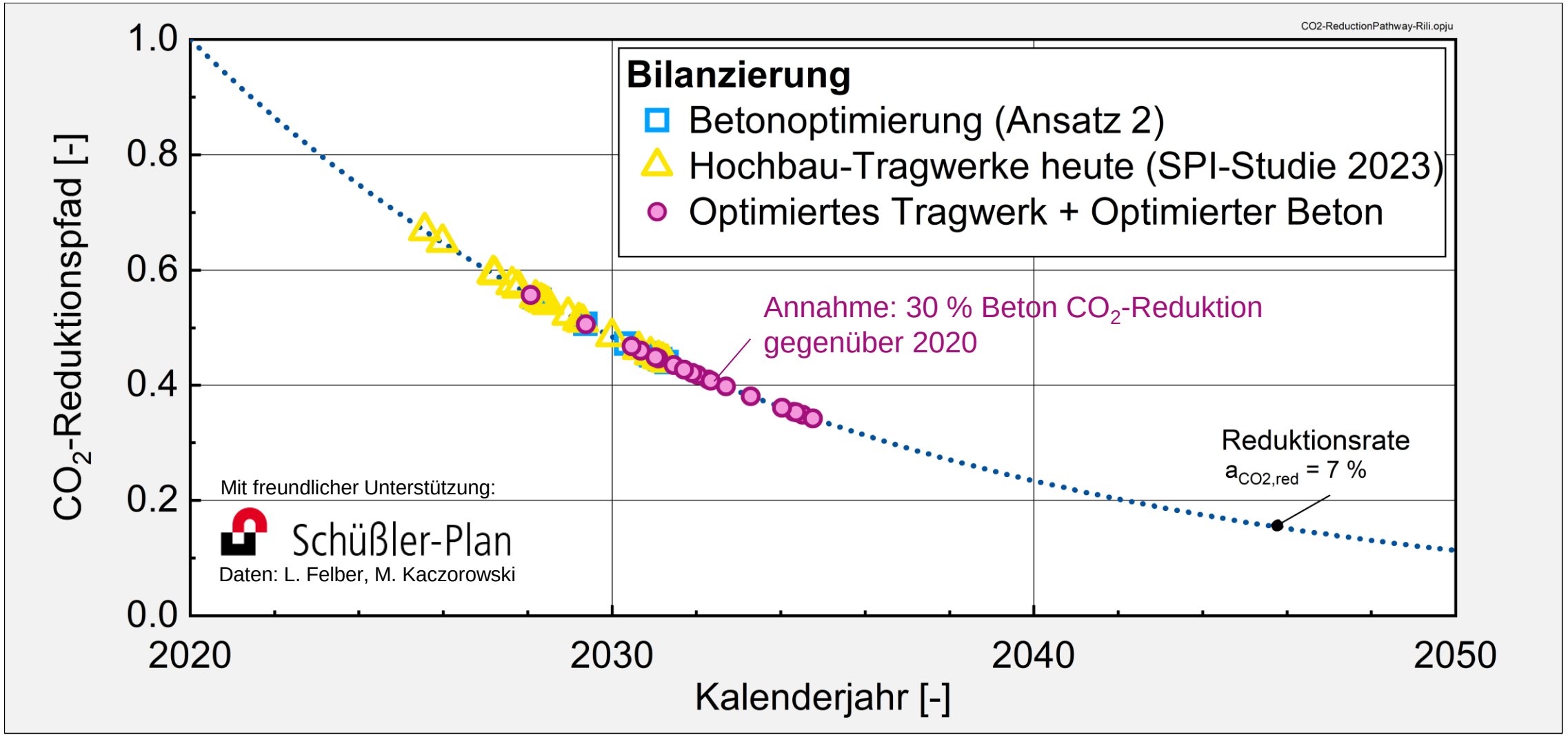
Elektro-Brennofen

Image: ibuctec



Funded by: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

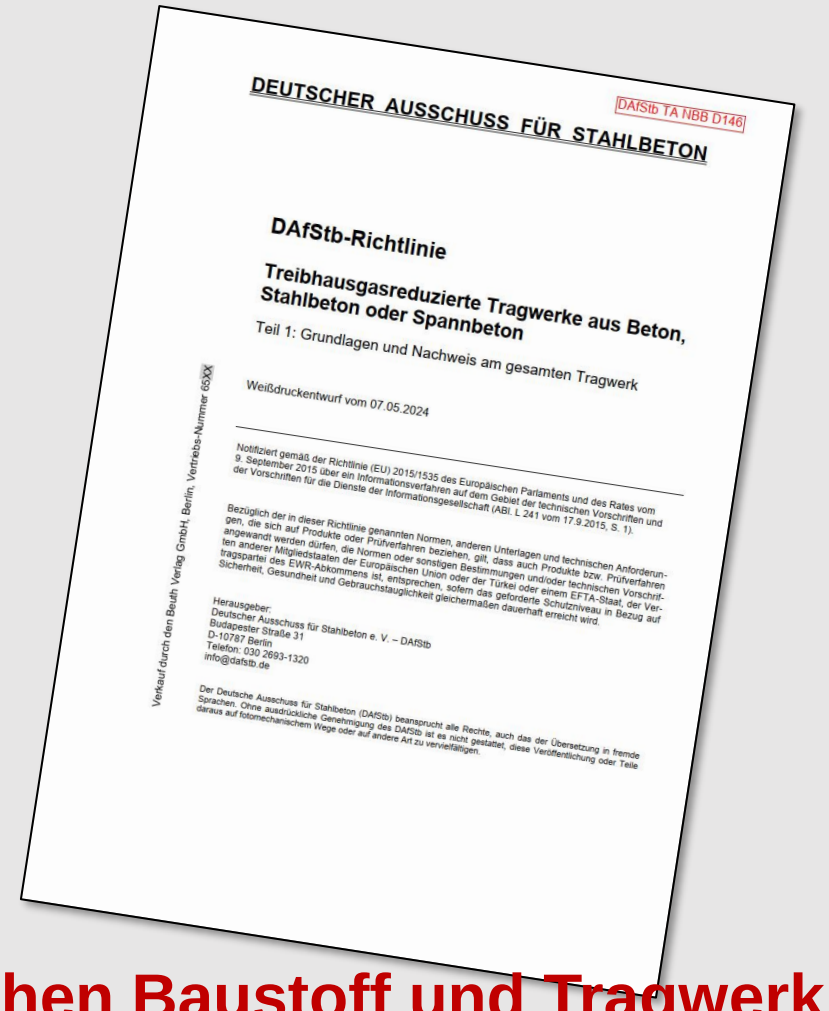
Ziele kennen! Ergebnisse einordnen (Bsp. Hochbau)



DAfSTb TA Nachhaltig Bauen mit Beton

Ziele

- **Umsetzung der Vorgaben des Klimaschutzgesetzes für den Betonbau**
- **Übergang** hin zu einem klimaverträglichen und ressourceneffizienten Betonbau **aktiv gestalten!**
- **Technologieoffenheit** durch gezielte Ausgestaltung des Nachweises **sicherstellen!**
- **Anreizsystem** und regulatorischen Rahmen **für klimaverträgliche und ressourceneffiziente Lösungen schaffen → Klimaverträglich Bauen ist ein Mehraufwand der bezahlt werden muss!**



DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON

DAfStb TA NBB D146

DAfStb-Richtlinie

Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton

Teil 1: Grundlagen und Nachweis am gesamten Tragwerk

Weißdruckentwurf vom 07.05.2024

Verkauf durch den Beuth Verlag GmbH, Berlin, Vertriebs-Nummer 65XX

Notifiziert gemäß der Richtlinie (EU) 2015/1535 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. September 2015 über ein Informationsverfahren auf dem Gebiet der technischen Vorschriften und der Vorschriften für die Dienste der Informationsgesellschaft (ABl. L 241 vom 17.9.2015, S. 1).

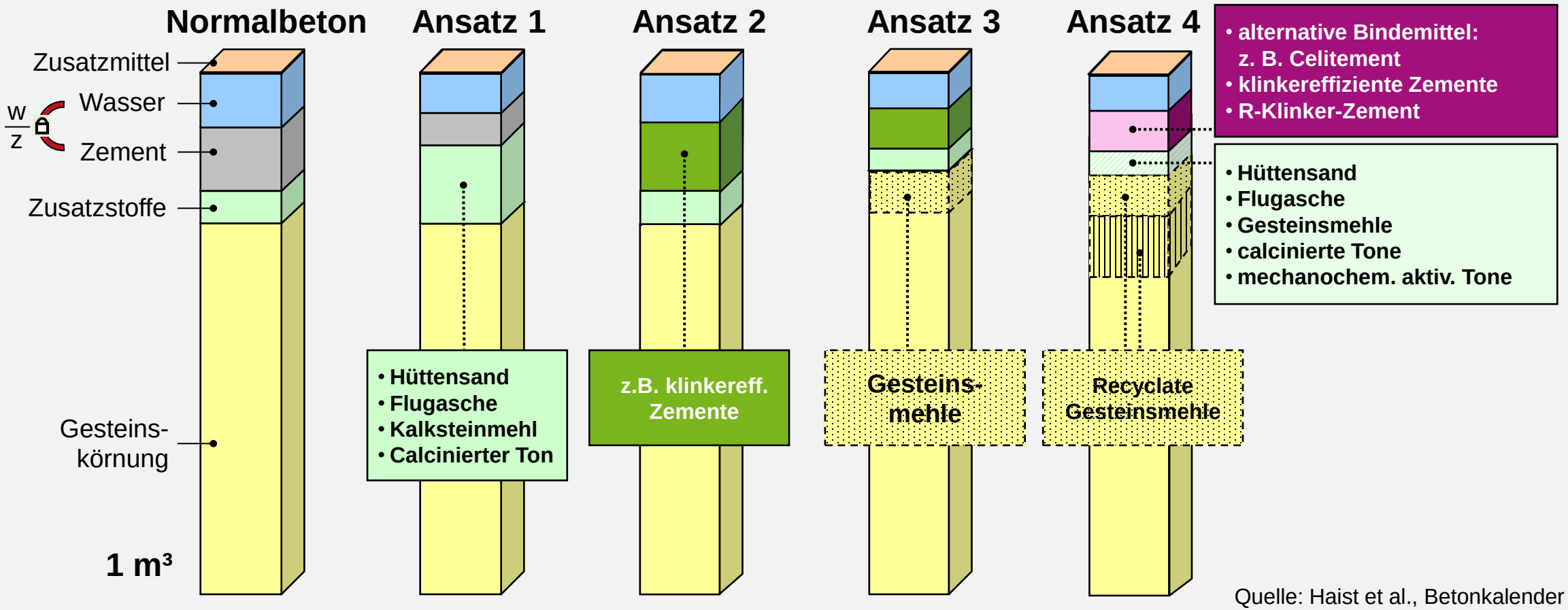
Bezüglich der in dieser Richtlinie genannten Normen, anderen Unterlagen und technischen Anforderungen, die sich auf Produkte oder Prüfverfahren beziehen, gilt, dass auch Produkte bzw. Prüfverfahren angewandt werden dürfen, die Normen oder sonstigen Bestimmungen und/oder technischen Vorschriften anderer Mitgliedstaaten der Europäischen Union oder der Türkei oder einem EFTA-Staat, der Vertragspartei des EWR-Abkommens ist, entsprechen, sofern das geforderte Schutzniveau in Bezug auf Sicherheit, Gesundheit und Gebrauchstauglichkeit gleichermaßen dauerhaft erreicht wird.

Herausgeber:
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. – DAfStb
Budapester Straße 31
D-10787 Berlin
Telefon: 030 2693-1320
info@dafstb.de

Der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) beansprucht alle Rechte, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen. Ohne ausdrückliche Genehmigung des DAfStb ist es nicht gestattet, diese Veröffentlichung oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege oder auf andere Art zu vervielfältigen.

Klimaschutz in der Schnittstelle zwischen Baustoff und Tragwerk!

Betonproduktion sicher beherrschen!

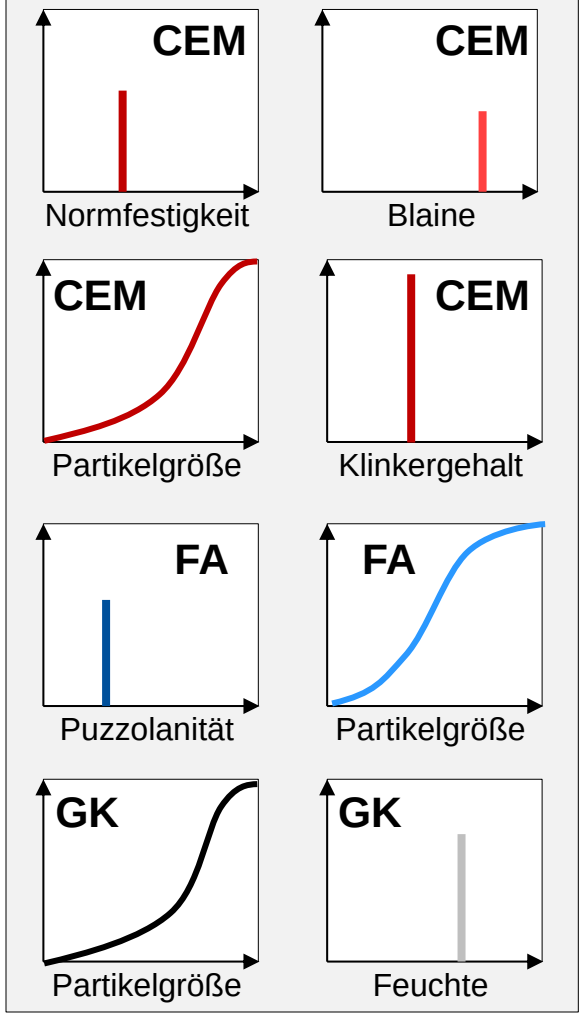


Quelle: Haist et al., Betonkalender 2022

Wie können solch komplexe Mischungen zielsicher beherrscht werden?

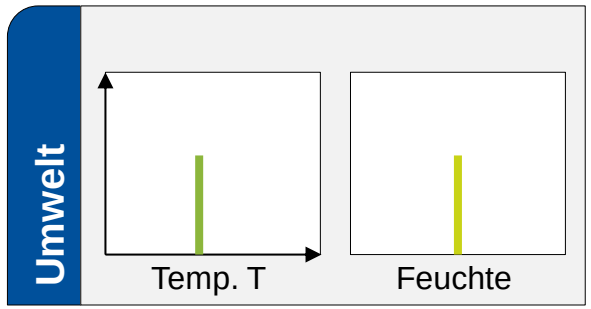
Robustheit als Planungskenngröße

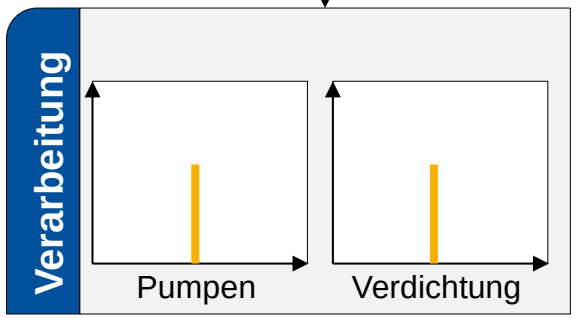
Ausgangsstoffe

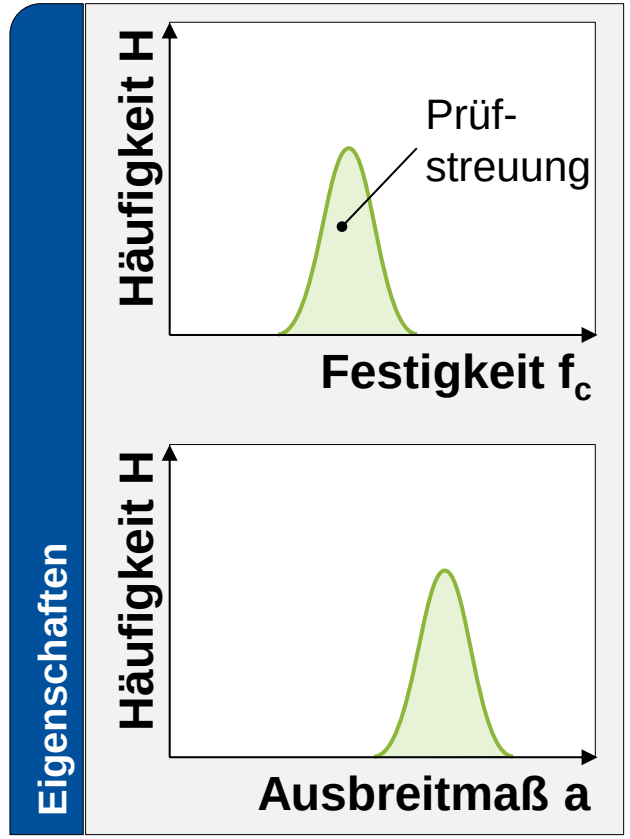


Mischungsentwurf

Ausgangsstoff		Einwaage [kg/m³]	Volumenanteil [dm³/m³]
Zement CEM		310	100
Zusatzstoffe, z.B. Flugasche FA		80	35
Wasser		170	170
Zusatzmittel		3,0	2,8
Gesteins-körnung GK	▪ Sand 0/2	356	134
	▪ Kies 2/8	707	269
	▪ Kies 8/16	707	269

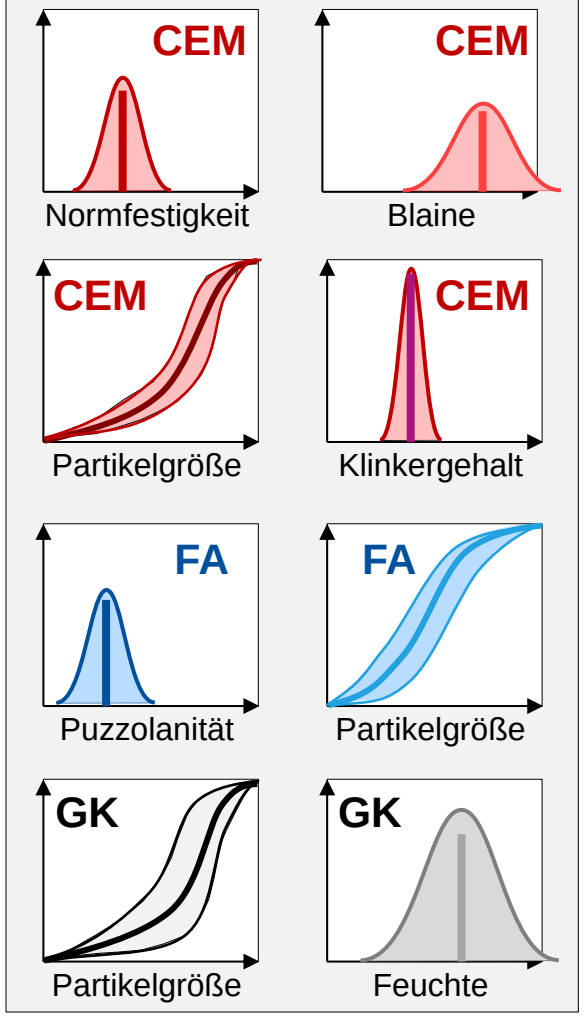






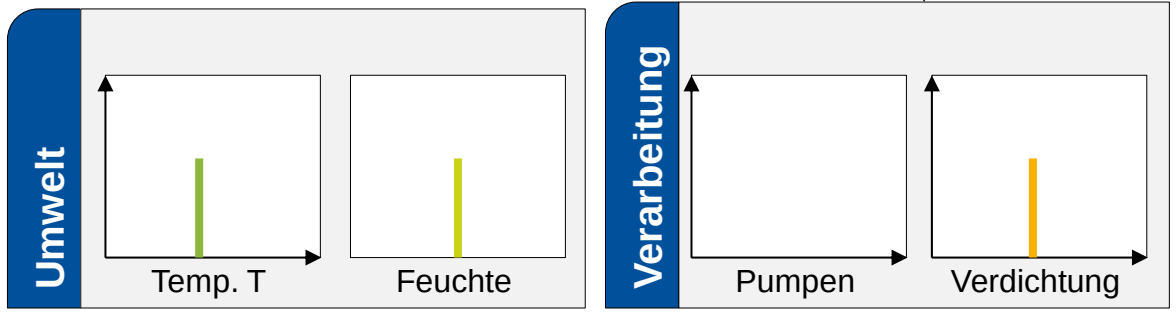
Robustheit als Planungskenngröße

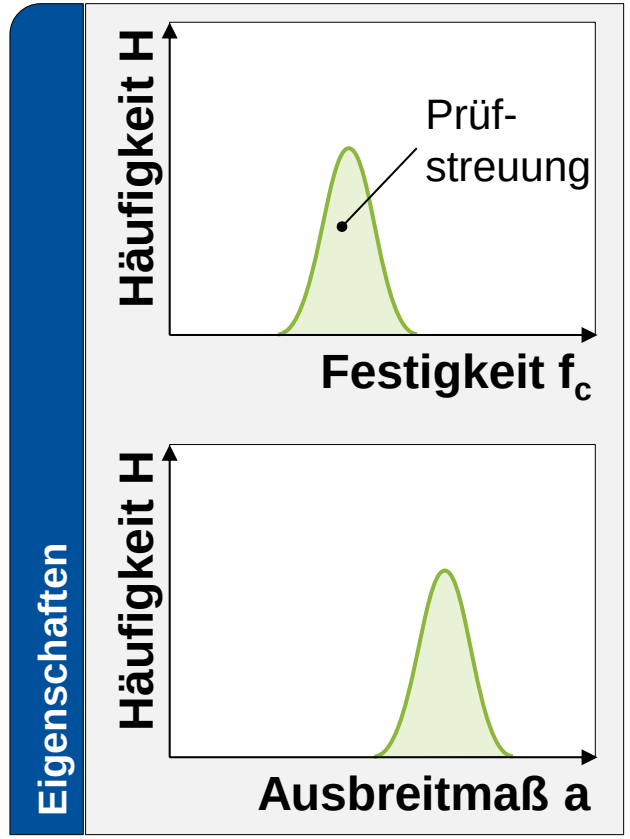
Ausgangsstoffe



Mischungsentwurf

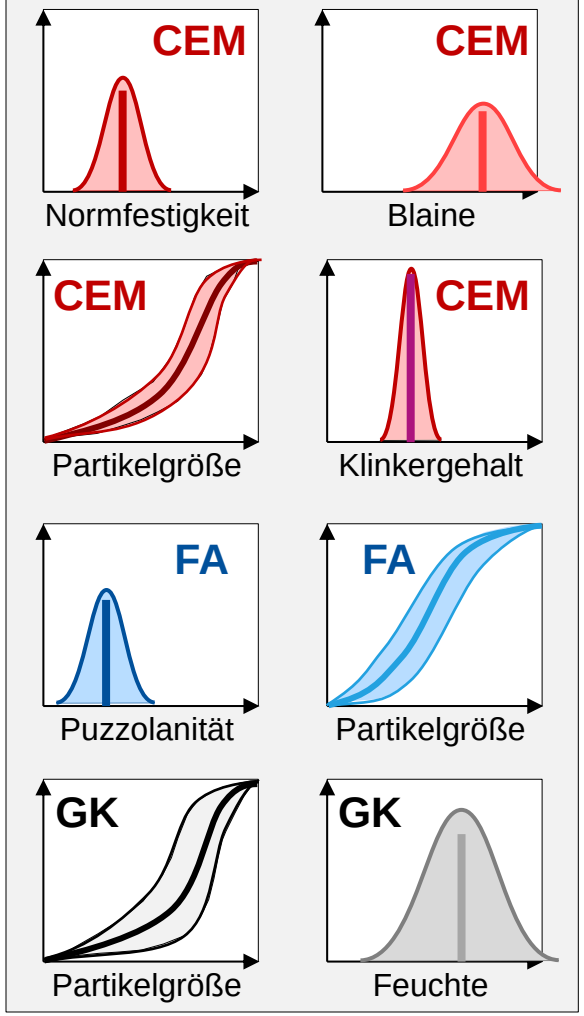
Ausgangsstoff		Einwaage [kg/m³]	Volumenanteil [dm³/m³]
Zement CEM		310	100
Zusatzstoffe, z.B. Flugasche FA		80	35
Wasser		170	170
Zusatzmittel		3,0	2,8
Gesteins-körnung GK	▪ Sand 0/2	356	134
	▪ Kies 2/8	707	269
	▪ Kies 8/16	707	269





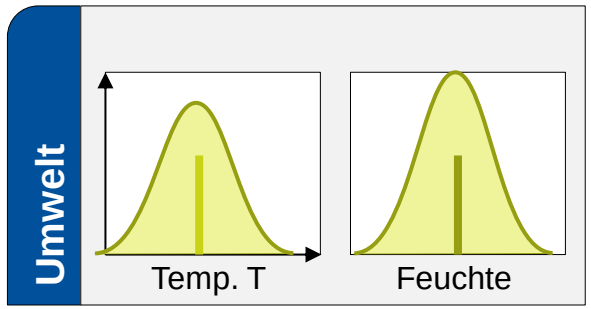
Robustheit als Planungskenngröße

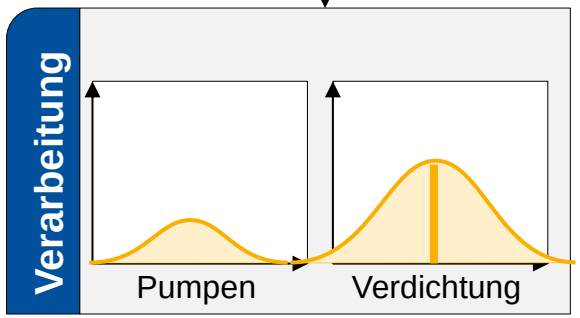
Ausgangsstoffe

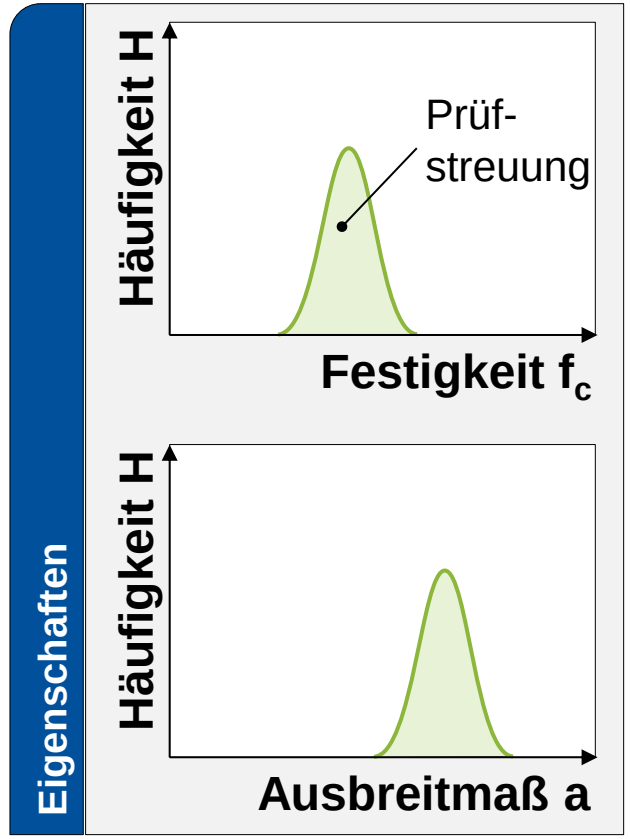


Mischungsentwurf

Ausgangsstoff		Einwaage [kg/m³]	Volumenanteil [dm³/m³]
Zement CEM		310	100
Zusatzstoffe, z.B. Flugasche FA		80	35
Wasser		170	170
Zusatzmittel		3,0	2,8
Gesteins-körnung GK	▪ Sand 0/2	356	134
	▪ Kies 2/8	707	269
	▪ Kies 8/16	707	269

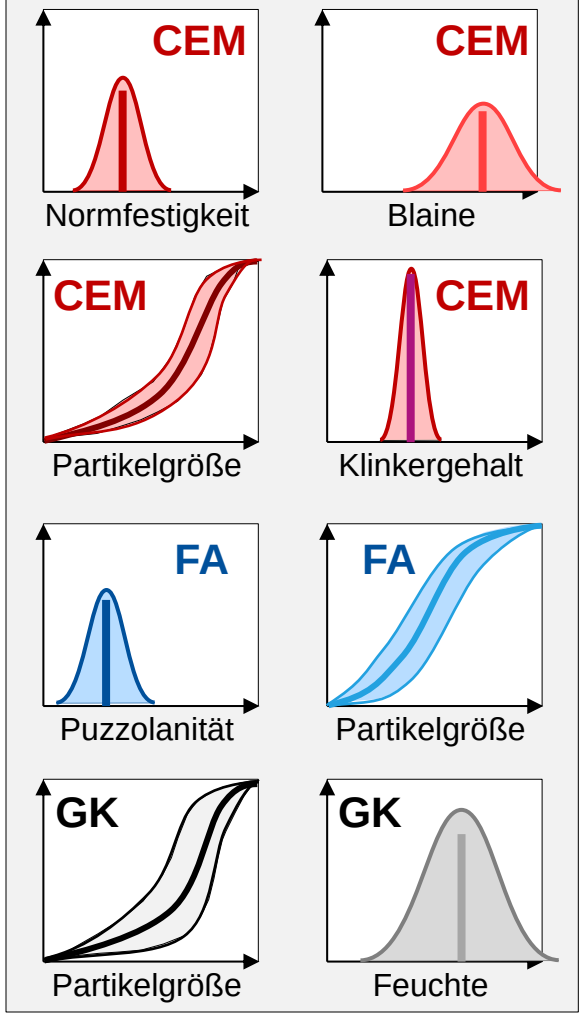






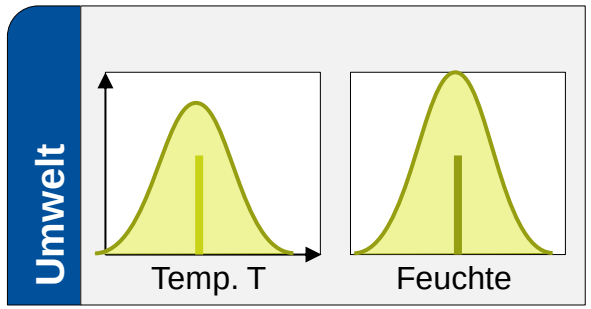
Robustheit als Planungskenngröße

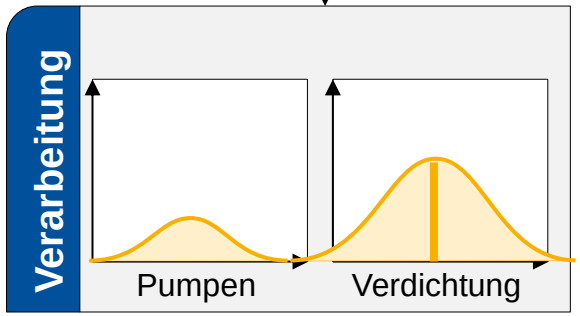
Ausgangsstoffe

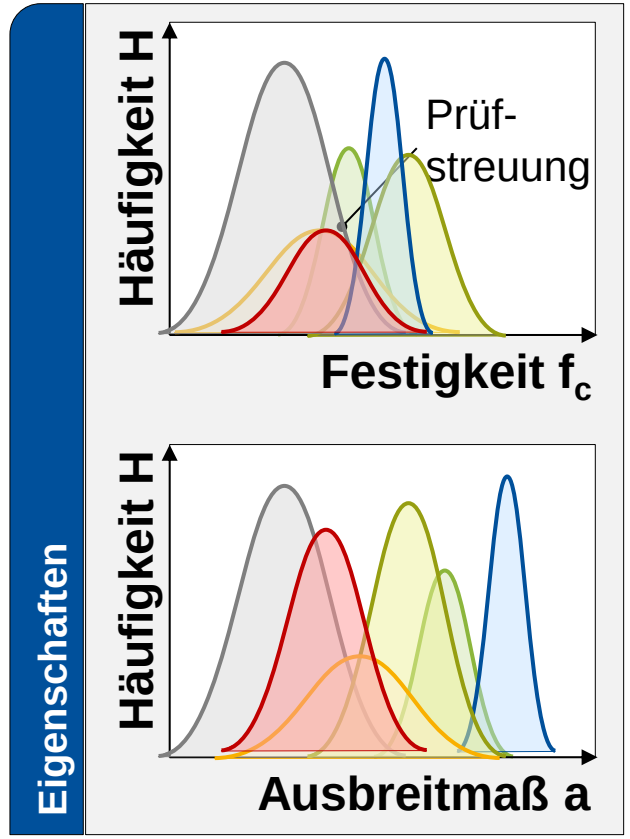


Mischungsentwurf

Ausgangsstoff		Einwaage [kg/m³]	Volumenanteil [dm³/m³]
Zement CEM		310	100
Zusatzstoffe, z.B. Flugasche FA		80	35
Wasser		170	170
Zusatzmittel		3,0	2,8
Gesteins-körnung GK	▪ Sand 0/2	356	134
	▪ Kies 2/8	707	269
	▪ Kies 8/16	707	269

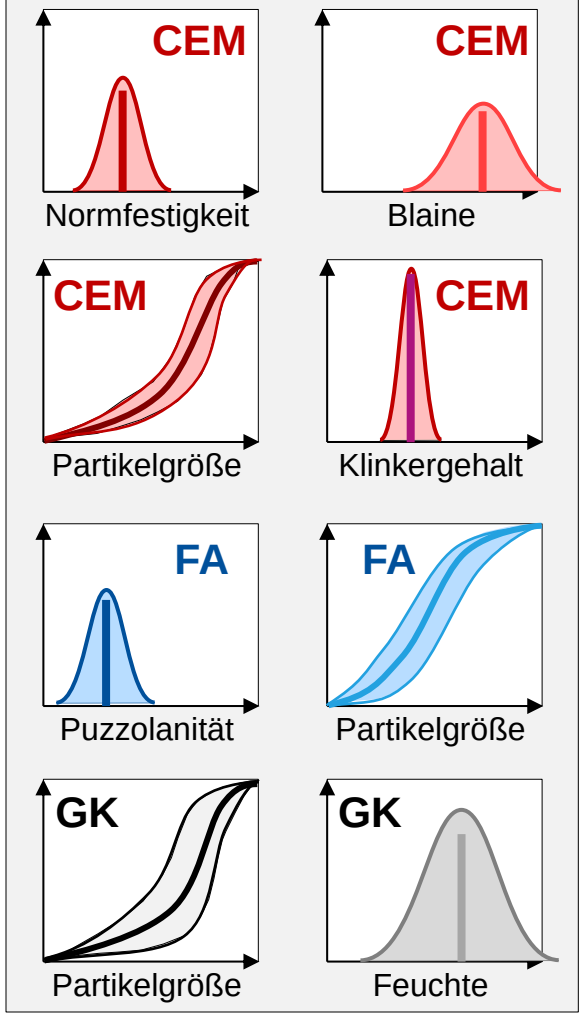






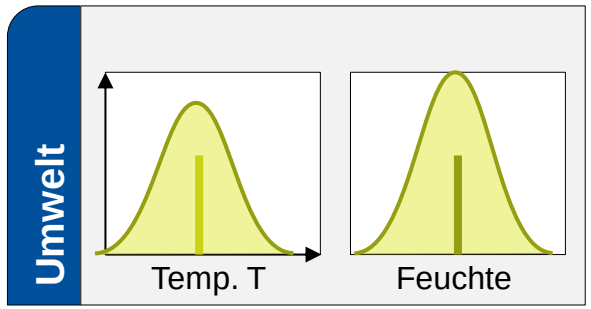
Robustheit als Planungskenngröße

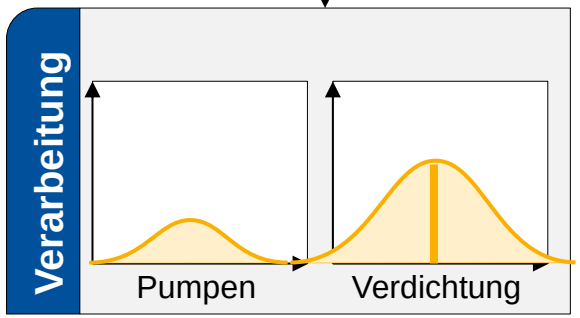
Ausgangsstoffe

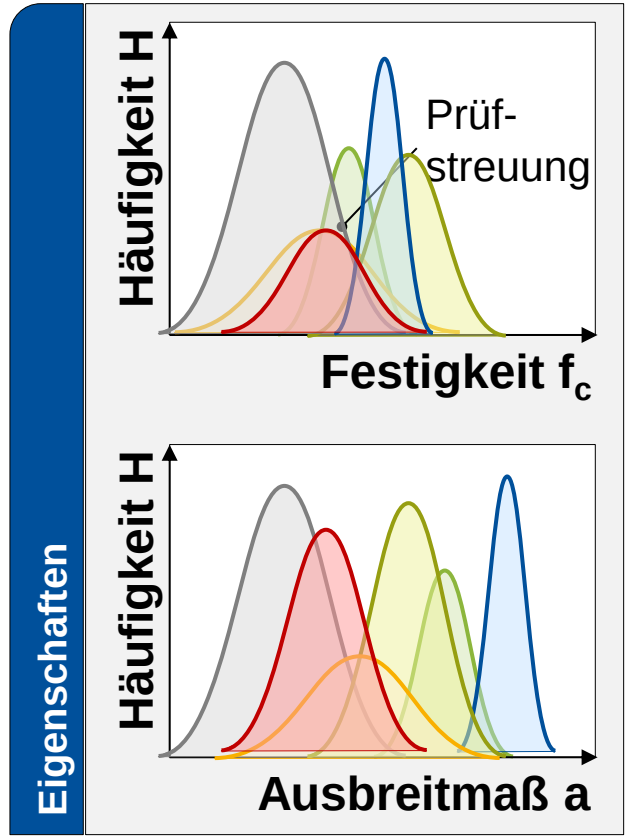


Mischungsentwurf

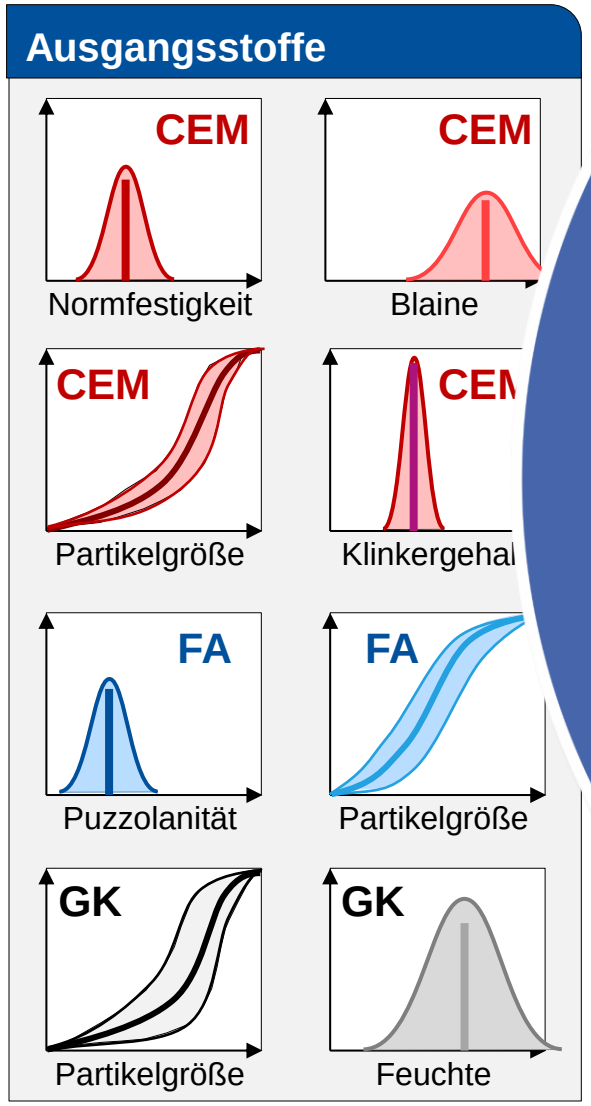
Ausgangsstoff		Einwaage [kg/m³]	Volumenanteil [dm³/m³]
Zement CEM		**310 ± 20**	100
Zusatzstoffe, z.B. Flugasche FA		**80 ± 8**	35
Wasser		**170 ± 3**	170
Zusatzmittel		**3,0 ± 0,2**	2,8
Gesteins-körnung GK	▪ Sand 0/2	**356 ± 25**	134
	▪ Kies 2/8	**707 ± 13**	269
	▪ Kies 8/16	**707 ± 32**	269

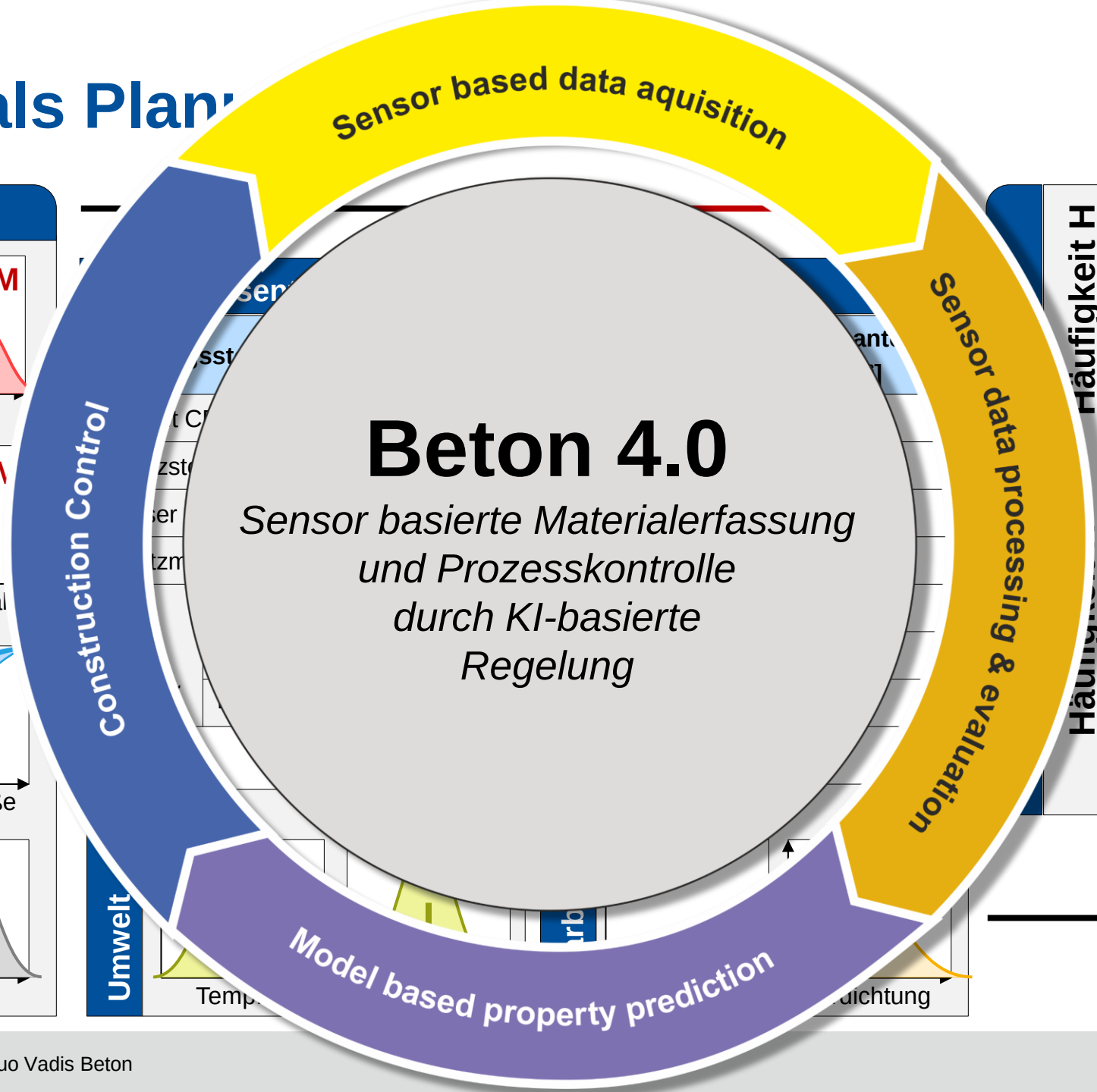


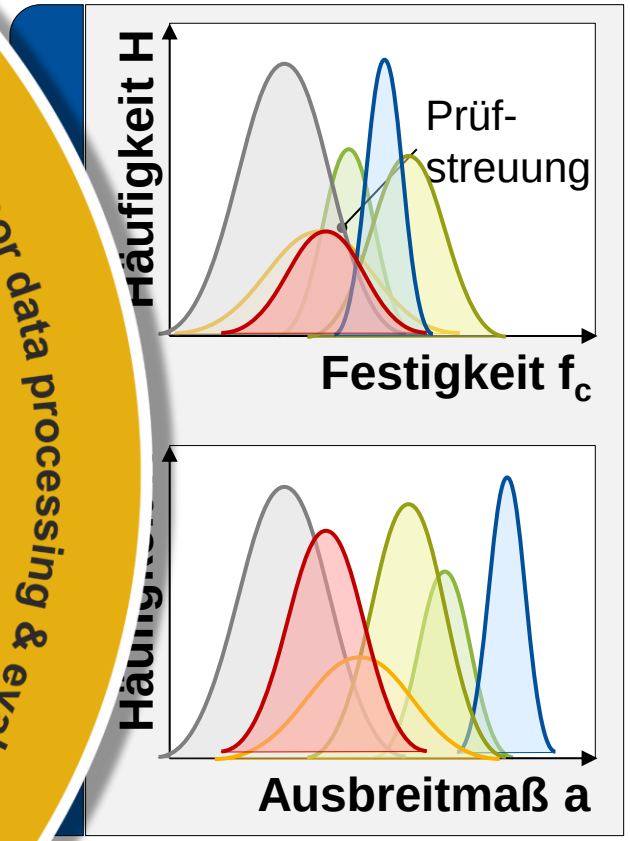




Robustheit als Plan





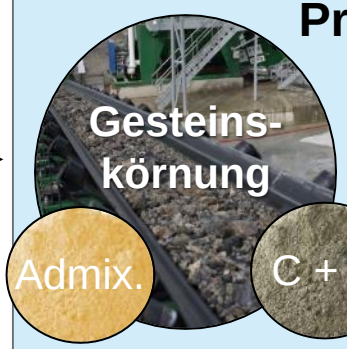


Beton 4.0 – Selbstlernende Betonherstellung

Digitale Prozesskontrolle
Intelligente Betonprozess-regelung

KI basierte ‚selbstlernene' Algorithmen

Produktion



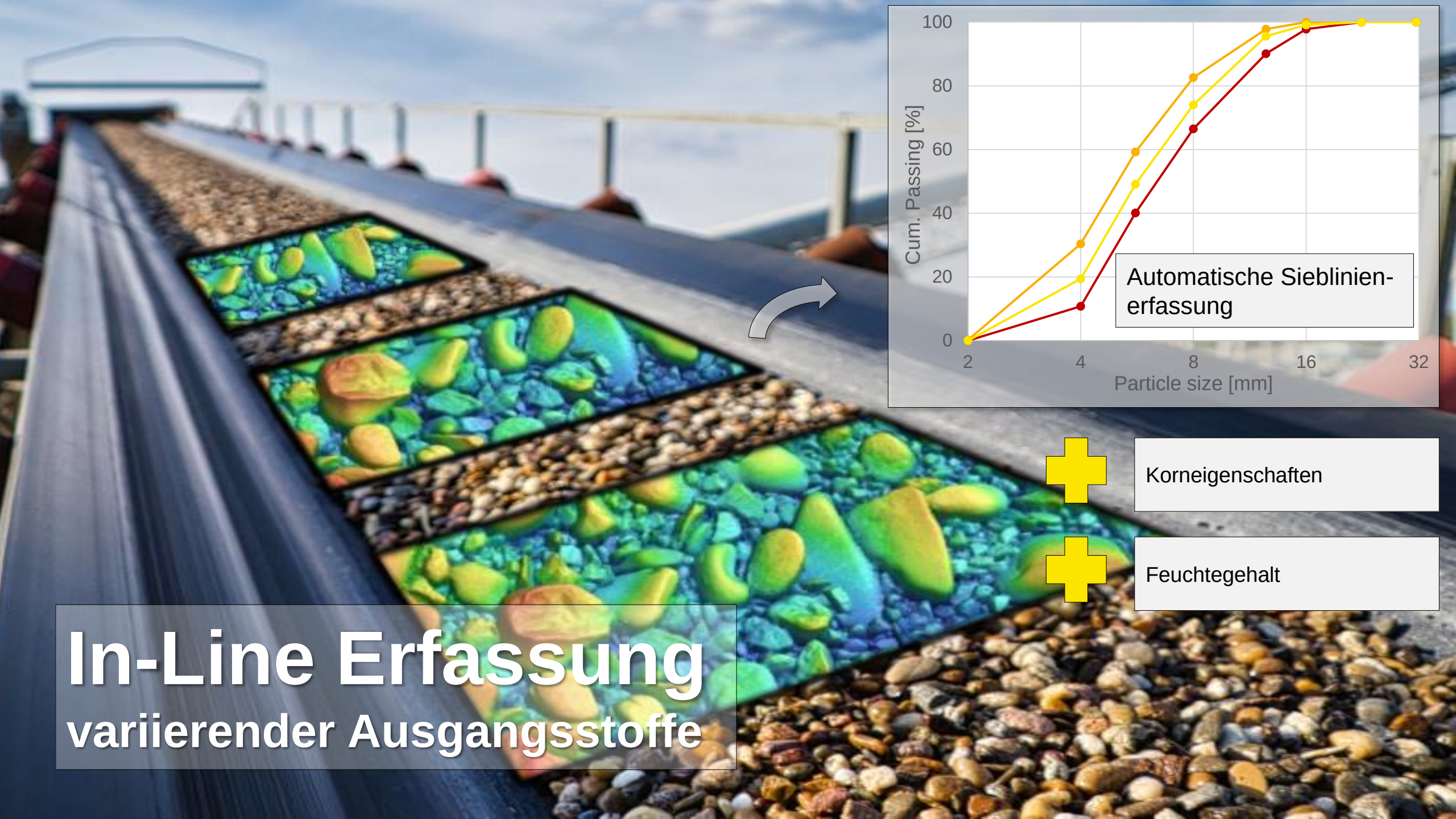
Transport

Sensor Daten
Sensor Daten
Prozess-regelung
Sensor Daten
Sensor Daten

Sensor Daten
Sensor Daten
Prozess-regelung
Sensor Daten
Sensor Daten

Festbeton

Förderung Einbau



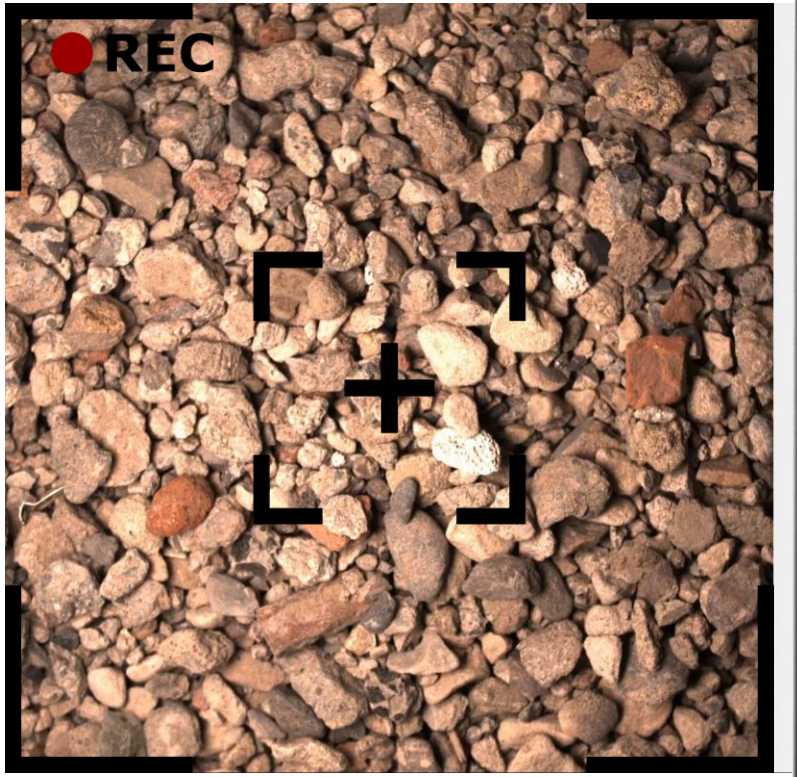
Korneigenschaften

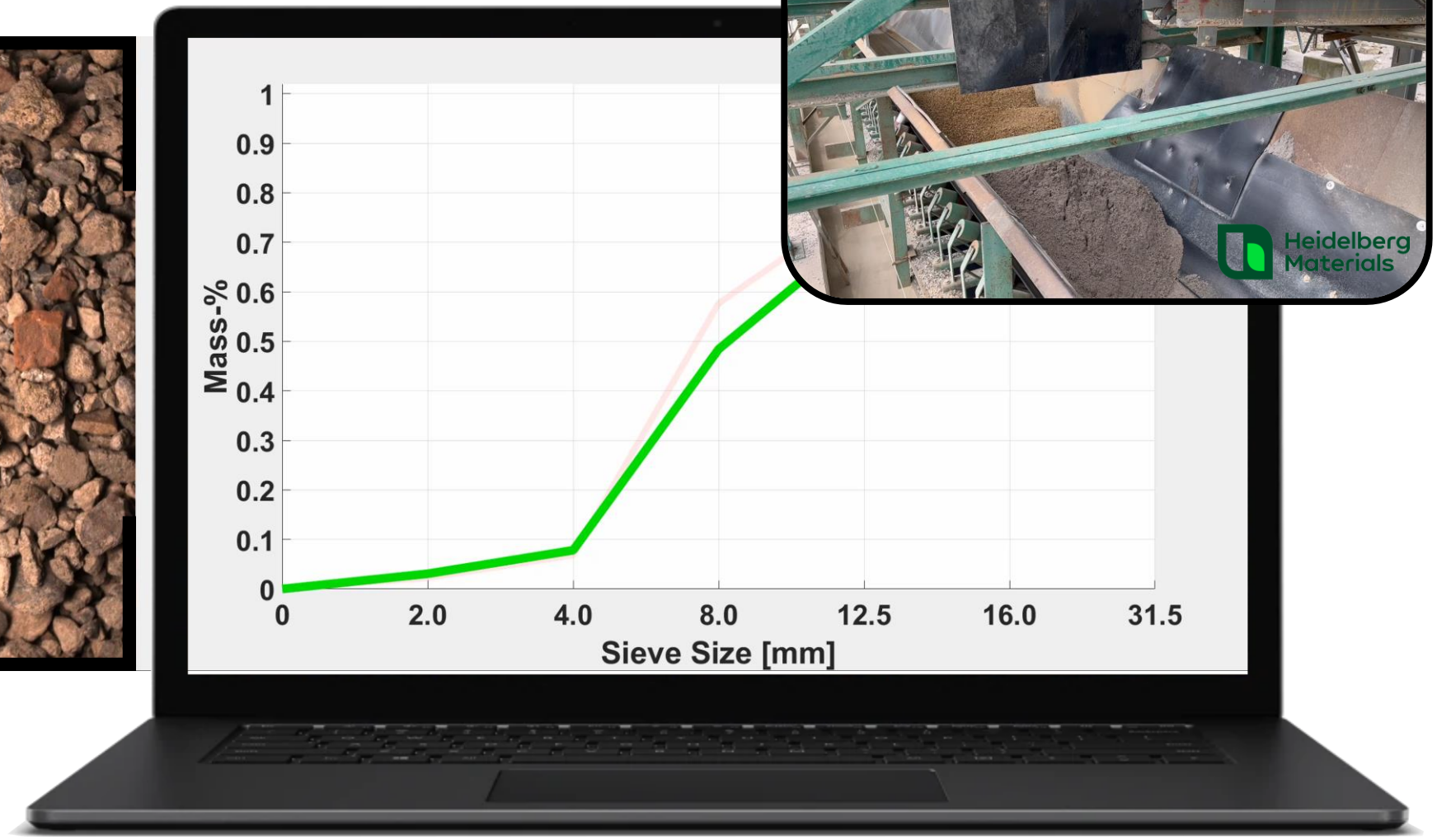
Feuchtegehalt

In-Line Erfassung
variierender Ausgangsstoffe

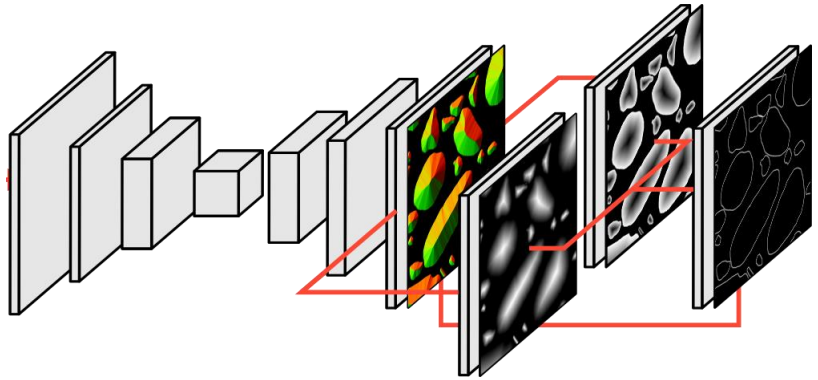
Beispiel: bildbasierte Bestimmung

- RC-Material

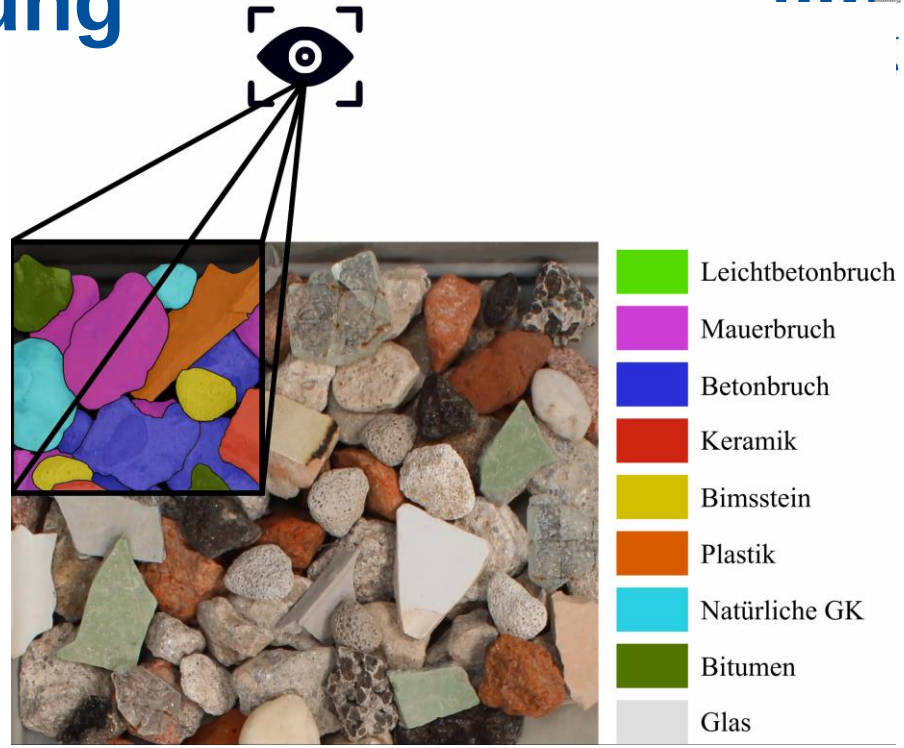




Identifikation der GK-Zusammensetzung



ConsInstancy: Learning Instance Representations for Semi-Supervised Panoptic Segmentation of Concrete Aggregate Particles (2022)
Max Coenen, Tobias Schack, Dries Beyer, Christian Heipke, and Michael Haist. In: *Machine Vision and Applications 33 (57)*



Sensordaten liefern Kenntnisse zur stofflichen Zusammensetzung des Recyklats → **Koppelung mit Daten z.B. zum Saugverhalten einzelner Recyklat-bestandteile** → **Aussteuerung der Mischungszusammensetzung**

ReCyCONtrol

Leibniz Universität Hannover

Automatisierte Ermittlung der Frischbetoneigen-schaften in Echtzeit

KI-basierte Aussteuerung der Betoneigenschaften

Förderung:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

HEIDELBERGER BETON · MASTER BUILDERS SOLUTIONS · Pemat · BIKTRONIC · acemy · MoB · BAW Bundesanstalt für Wasserbau

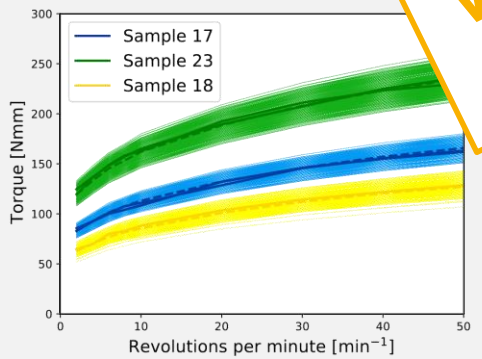
Regelung der Betoneigenschaften

Zieleigenschaften: Soll-Konsistenz auf Baustelle

Soll-Ausbreitmaß

z.B. 45 ± 1 cm

Gemessene Eigenschafte



Ist-‘Konsistenz‘ im Mischer z.B. 43 cm

Wie können Einflüsse aus Transport und Förderung berücksichtigt werden?

KI-Modelle

δ

zu weich

|δ| < zul. Toleranz

zu steif

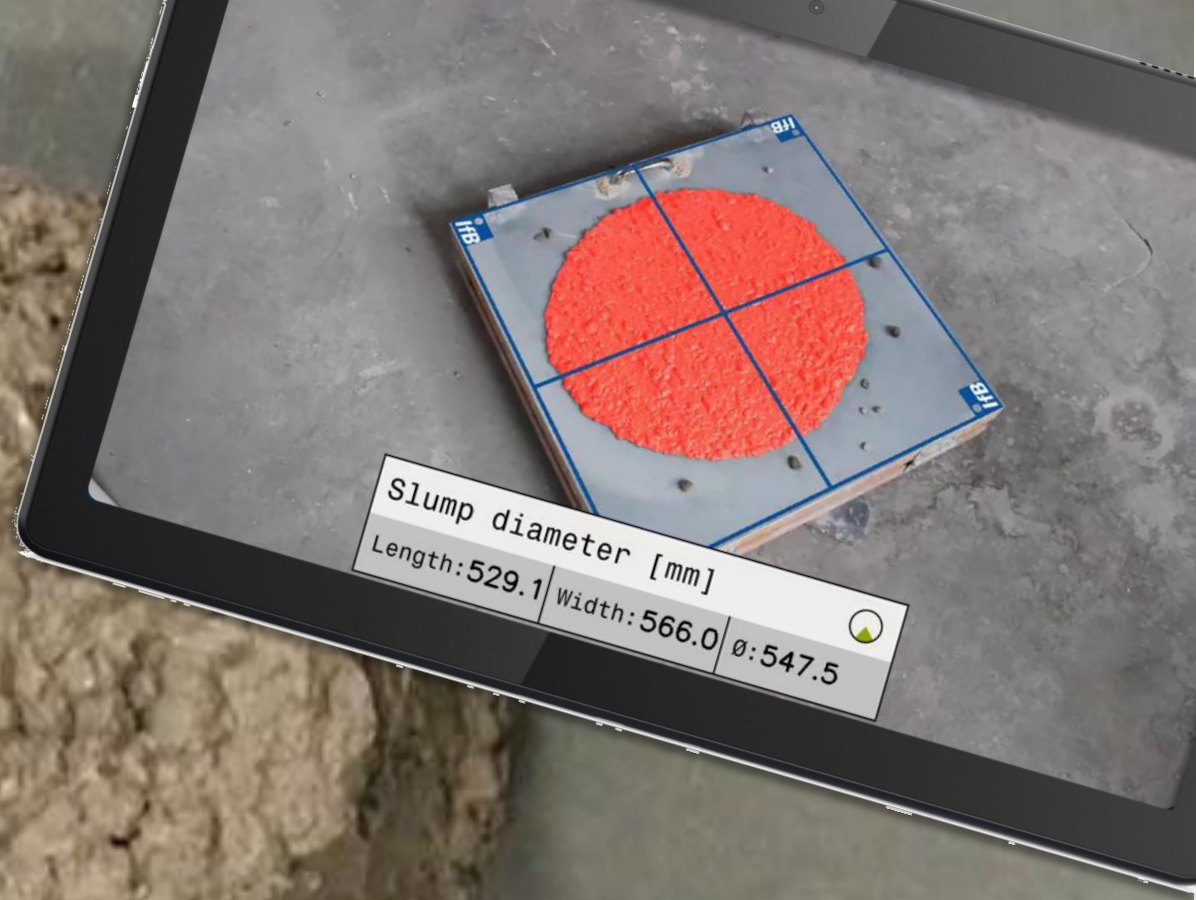
Frei-gabe

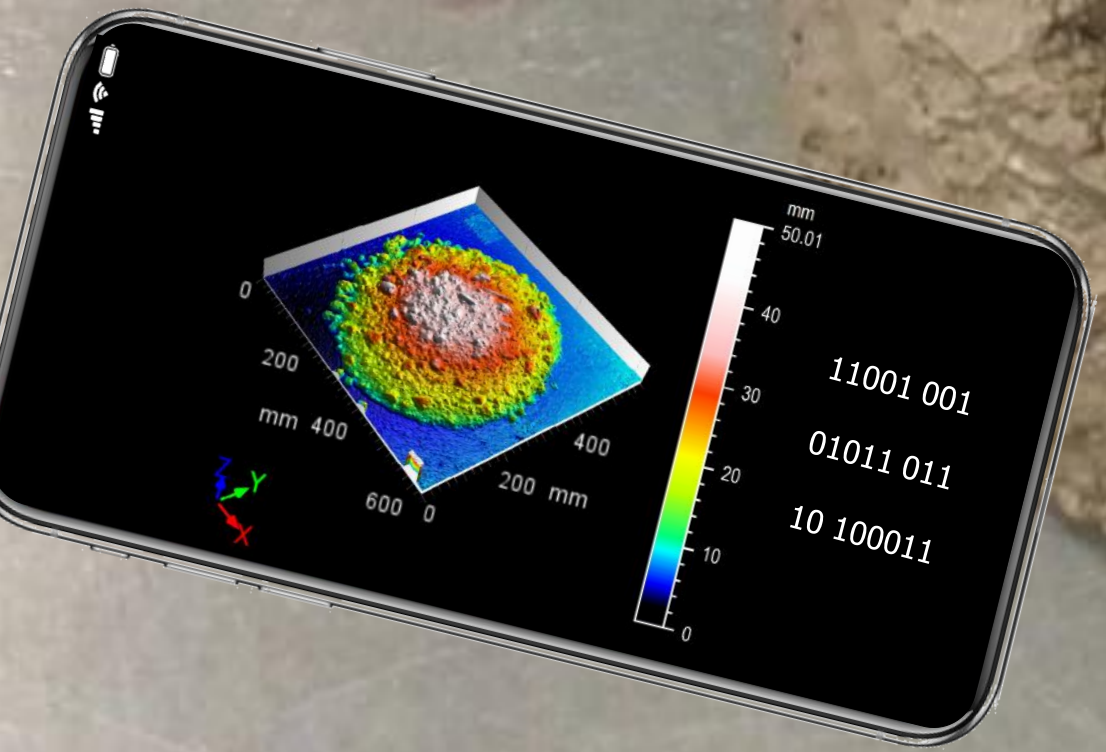
KI-Modelle

z. B. FM-Zugabe

Supported by DBV

Digitale Annahmeprüfung als Grundlage für die Betonaussteuerung

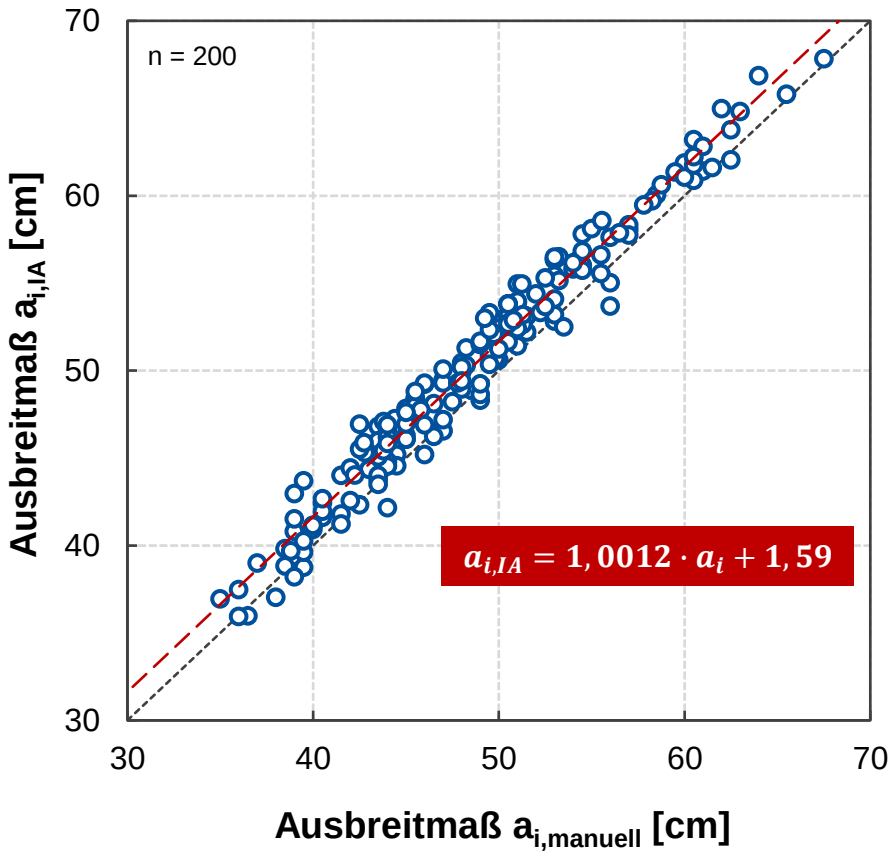




- Konsistenz
- Leimgehalt
- Korngrößenverteilung
- Größtkorn und Kornform
- Homogenität
- (Wassergehalt und w/z-Wert)

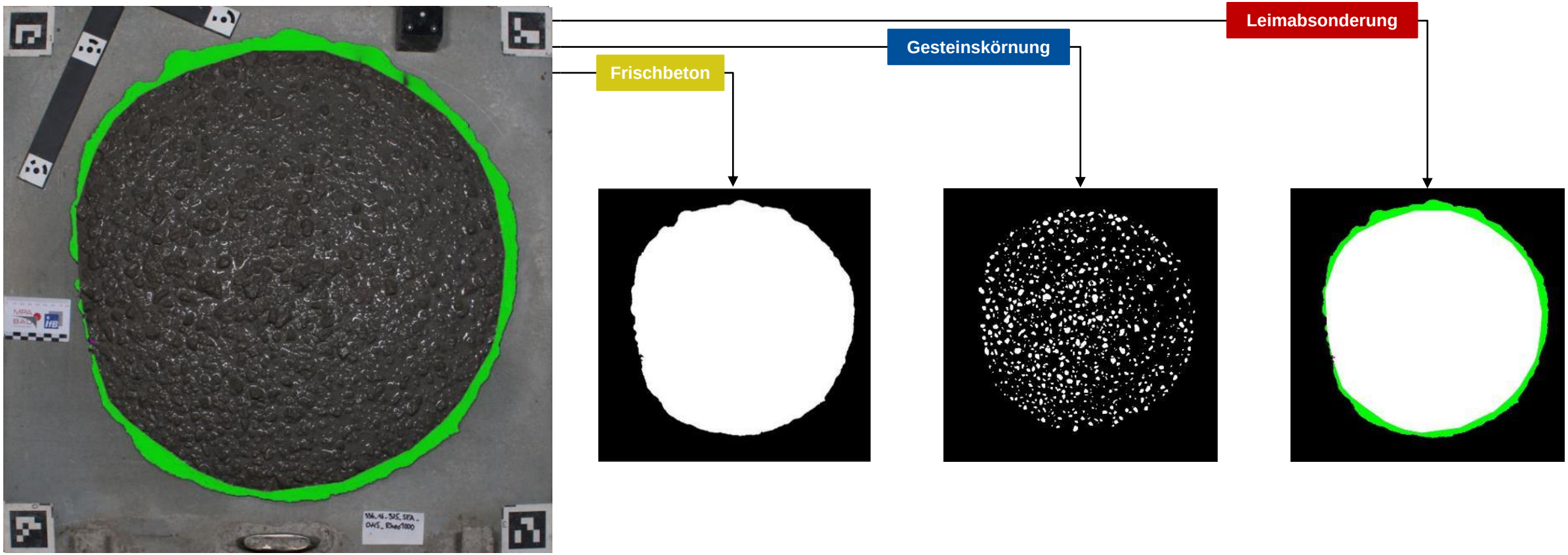
- Schack, T.: Doctoral Thesis, Uni Hannover, 2022
- Schack, T., Coenen, M., Haist, M.: Beton- und Stahlbetonbau 118 (4), 118 (8), 118 (10)

Ermittlung der Konsistenz



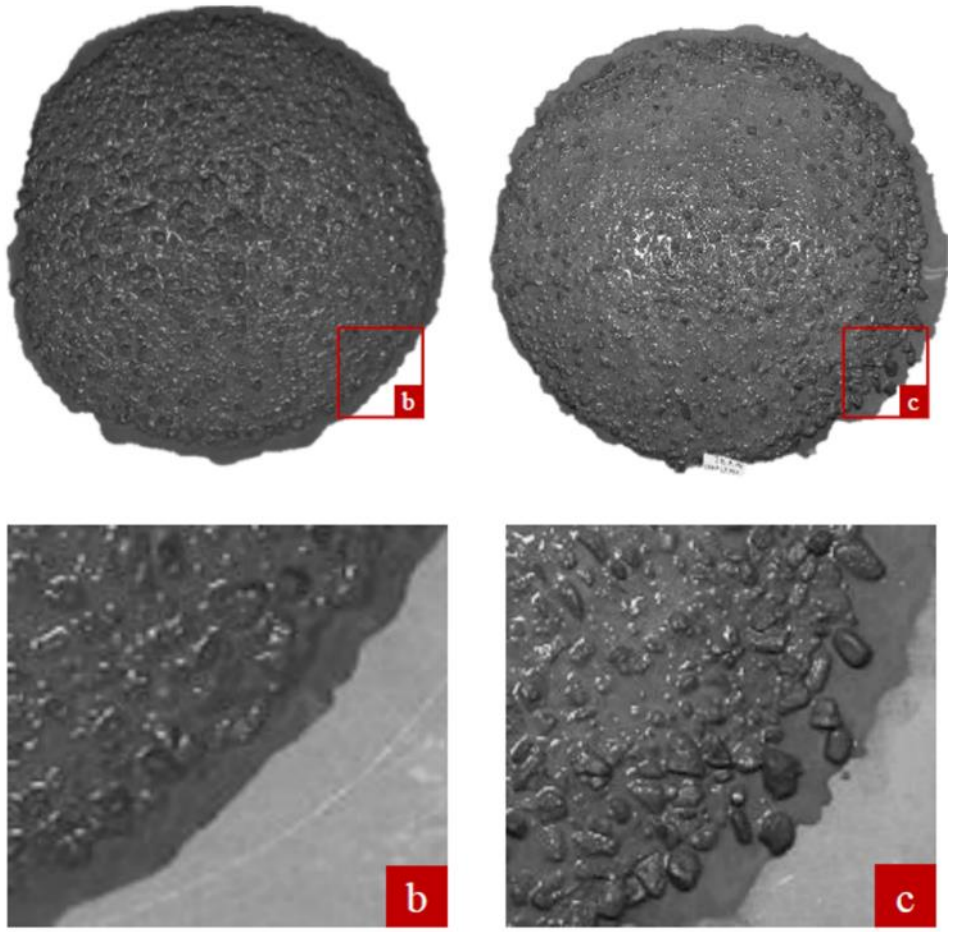
Bildbasierte Ermittlung von Merkmalen

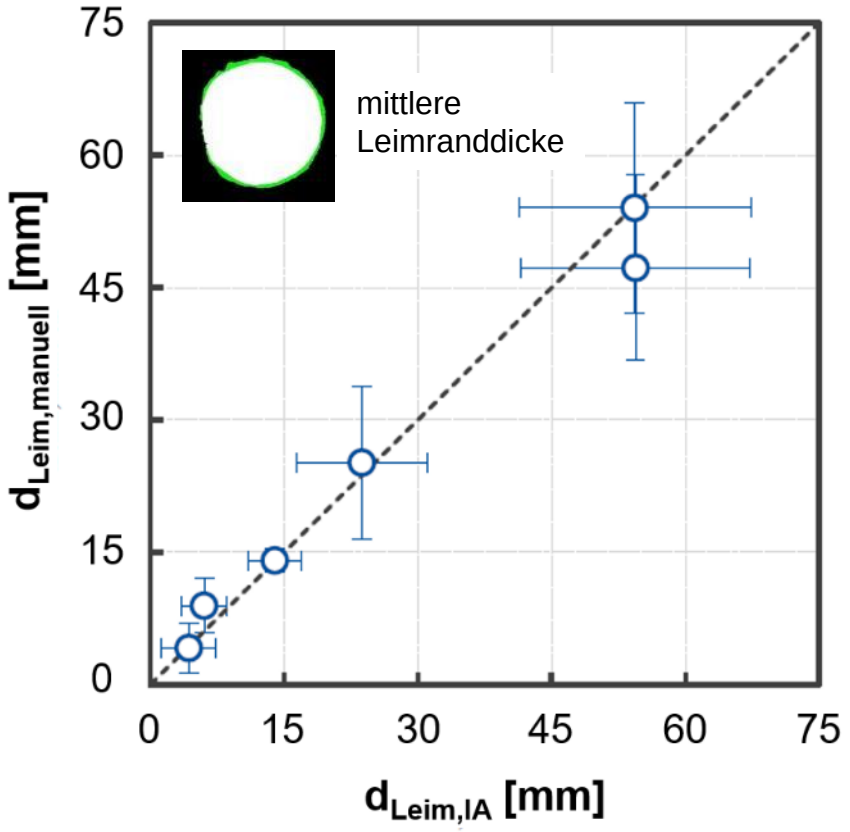
Ein Foto - viele Merkmale in der Betonoberfläche



Ermittlung der Homogenität - Leimrandbildung

Geometrische 2D-Eigenschaften



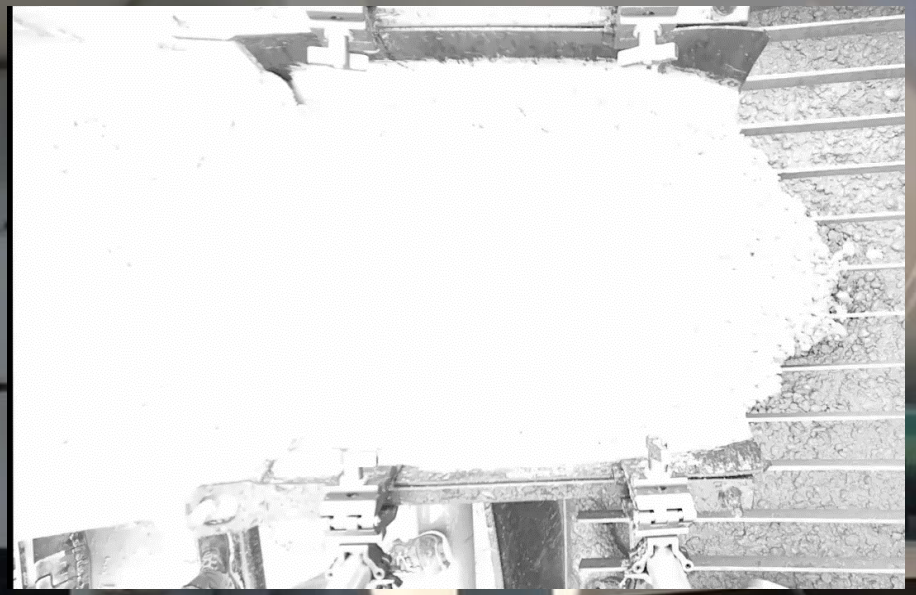


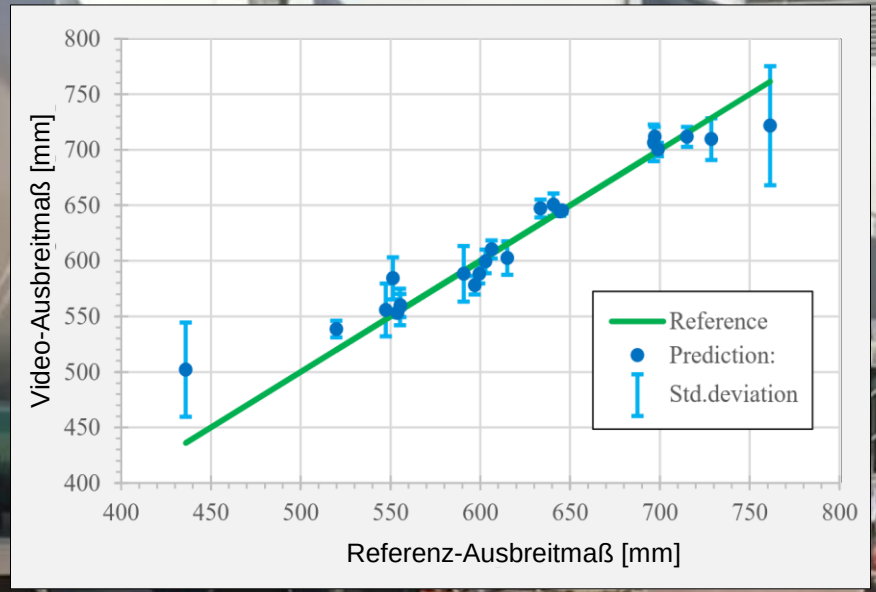
Beurteilung bzw. Abschätzung der Homogenität des Frischbetons möglich

RGB-Kamera

Stereo-Kamera

Digitale Frischbetonprüfung



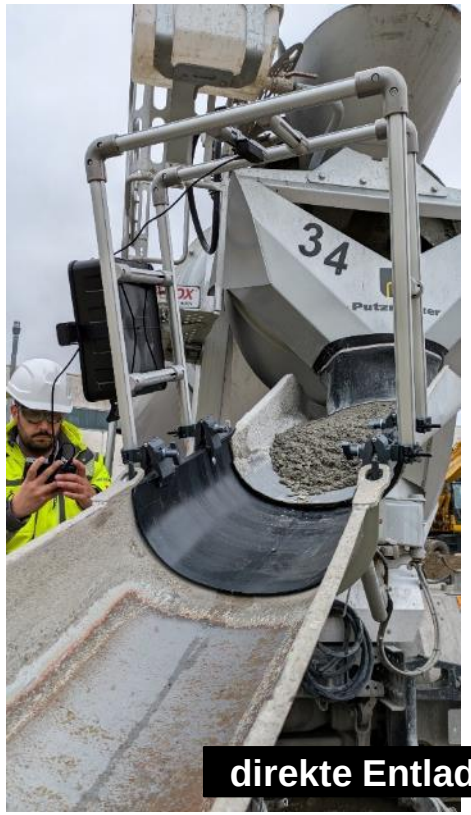


Rheologie, Volumen, (Zusammensetzung) können kontinuierlich erfasst und für Betonaussteuerung verwendet werden

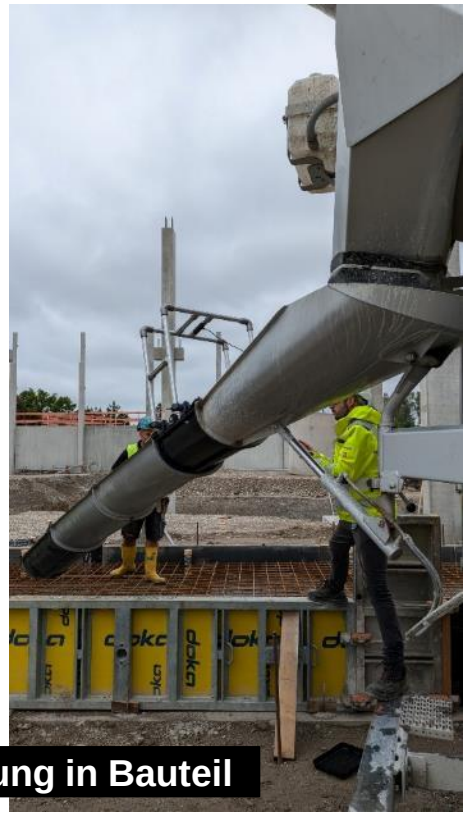
KI-basierte Qualitätsprüfung bei der Entladung

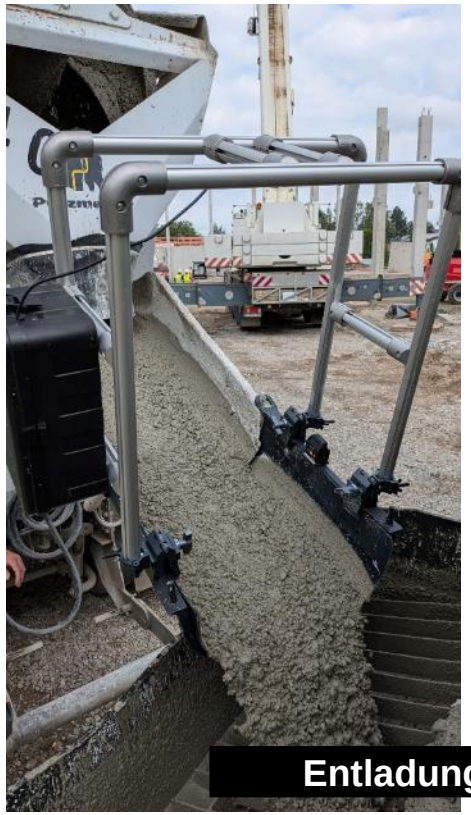
Bauvorhaben: Fundamente, Deckenbauteile und Bohrpfähle

Konsistenzklasse: F4-F6
Zementart: versch.
Größtkorn: 8-16 mm
Besonderheit: -



direkte Entladung in Bauteil





Entladung in Pumpe

Industriepartner:

DAfStb Unterausschuss Beton 4.0

dafstb

Ziele

- Erstellung eines Sachstandsberichts über die bereits am Markt verfügbaren sowie die derzeit in Entwicklung befindlichen Methoden
- Entwicklung von Benchmark-Kriterien zur Bewertung der normativen Gleichwertigkeit sensorbasierter Methoden im vergleich zu korrespondierenden (manuellen) Normprüfmethoden
- Entwicklung von Kriterien für einheitliche Datenübermittlungs- und Dokumentationsstandards (aufbauend z. B. auf DIN SPEC 91454) als Grundlage für die gewerkübergreifende Produktaussteuerung
- Erarbeitung von Standards für die Festlegung von Verantwortungsbereichen, Dokumentations- und Anzeigepflichten bei Nutzung digitaler Methoden sowie entsprechender digitaler Formate
- Erarbeitung von Vorschlägen für abgesenkte Vorhaltemaße z. B. in der Betonzusammensetzung oder der Betondeckung durch Nutzung der aus einer kontinuierlichen Überwachung und automatischen Produktaussteuerung resultierenden, verbesserten Qualitätsaussteuerung

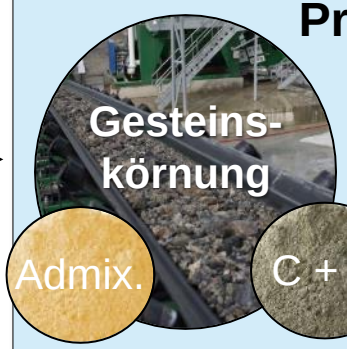
Interesse: info@dafstb.de

Beton 4.0 – Selbstlernende Betonherstellung

Digitale Prozesskontrolle
Intelligente Betonprozess-regelung

KI basierte ‚selbstlernene' Algorithmen

Produktion



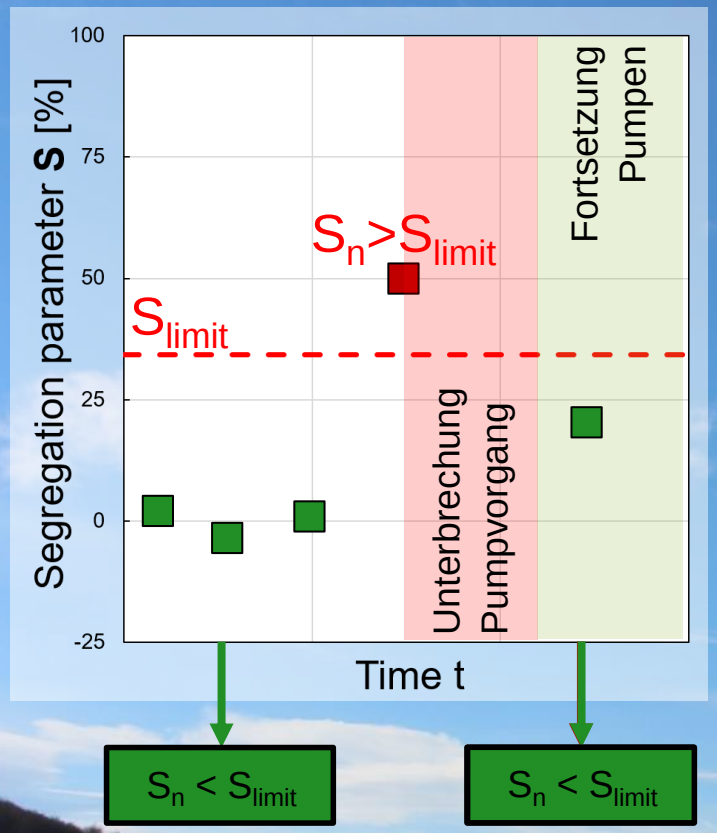
Transport

Sensor Daten
Sensor Daten
Prozess-regelung
Sensor Daten
Sensor Daten

Sensor Daten
Sensor Daten
Prozess-regelung
Sensor Daten
Sensor Daten

Festbeton

Förderung Einbau



Gefördert durch:

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

FTB
FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT TRANSPORTBETON e.V.

Forschungsnetzwerk Mittelstand

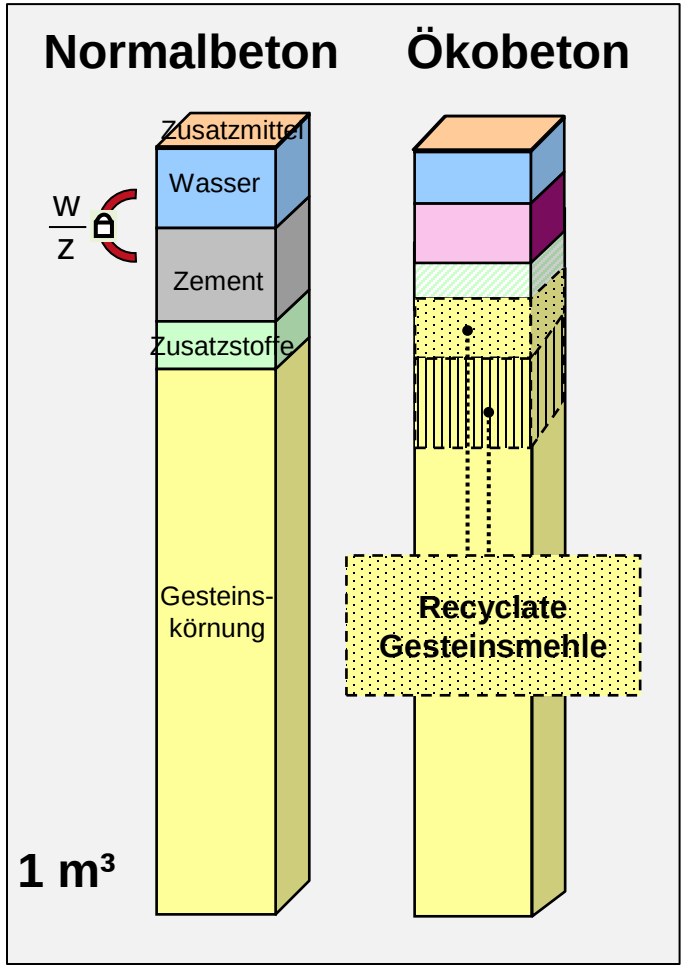
Leibniz Universität Hannover

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

In-Line Kontrolle des Pumprozesses

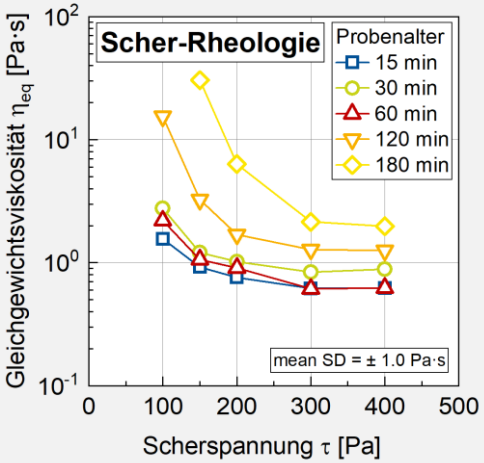
Algorithmus zur Steuerung der Betonpumpe zur Vermeidung von Stopferbildungen

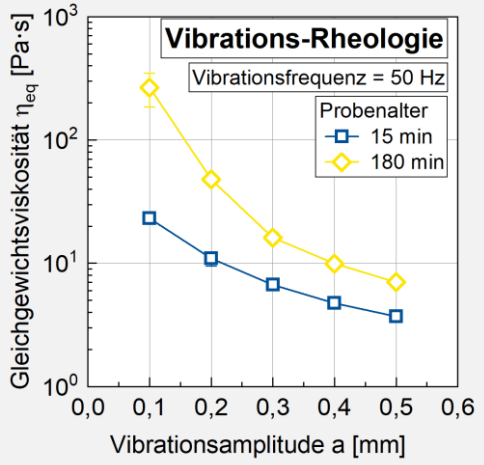
Betonverarbeitung sicher beherrschen



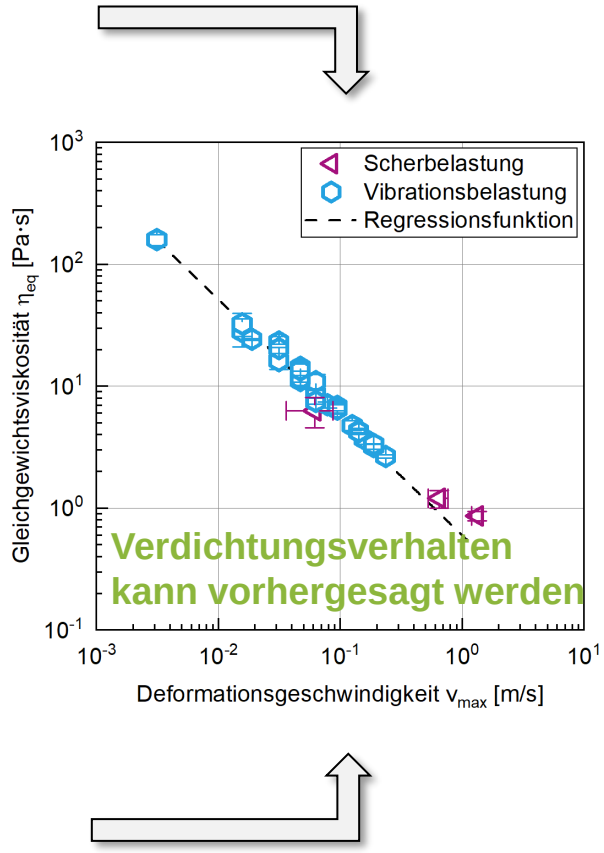
Ökobetone = wasserarme Betone

Einfluss Rütteleinwirkung auf die Leim-Rheologie

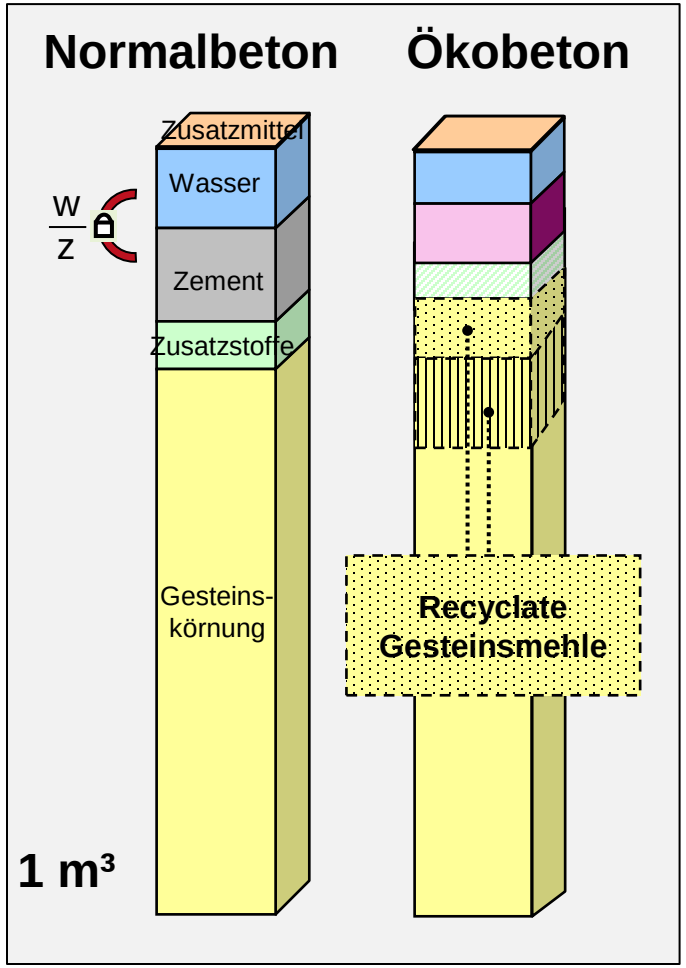




Link, Sowoidnich, Pfitzner, Gil-Diaz, Heberling, Lützenkirchen, Schäfer, Ludwig, Haist *Materials* 13 (2020) 1853;
Link, Haist et al. Influence of vibration and shear orientation on thixotropy of cement suspension (2024, submitted)

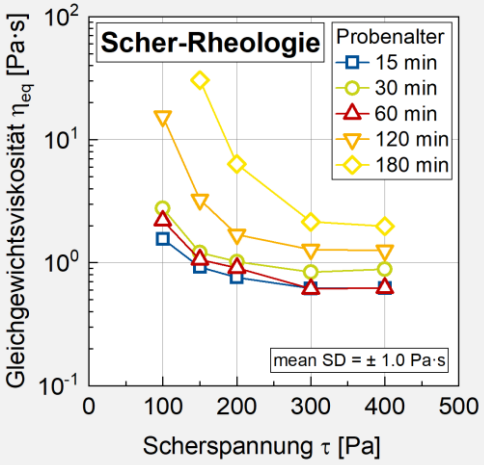


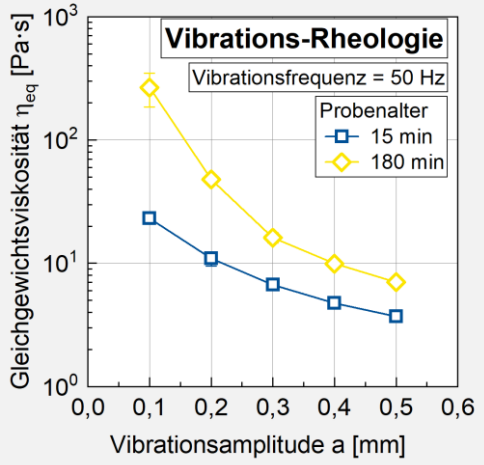
Betonverarbeitung sicher beherrschen



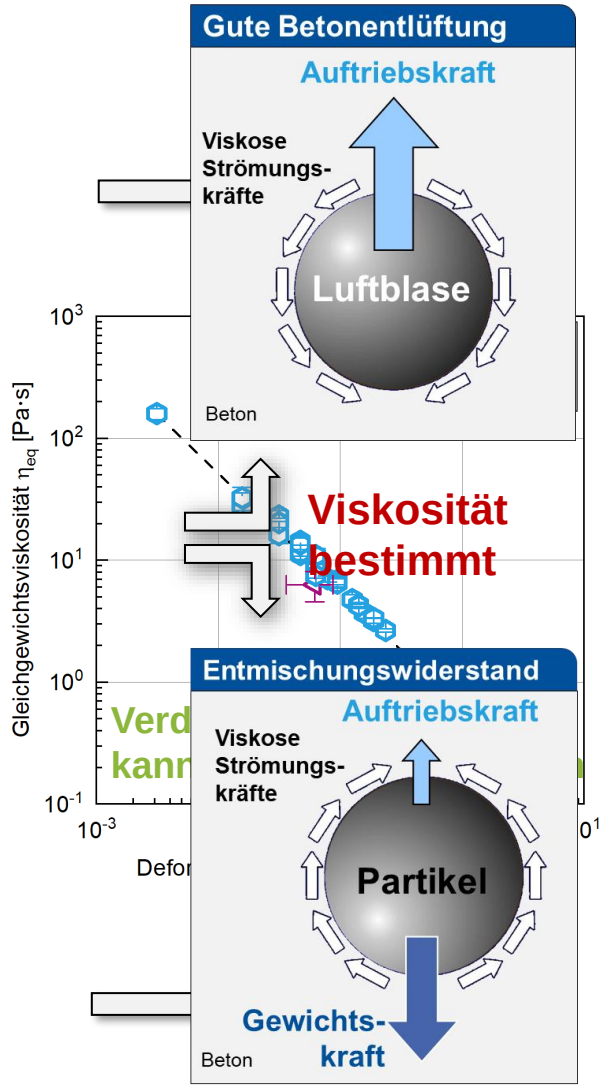
Ökobetone = wasserarme Betone

Einfluss Rütteleinwirkung auf die Leim-Rheologie



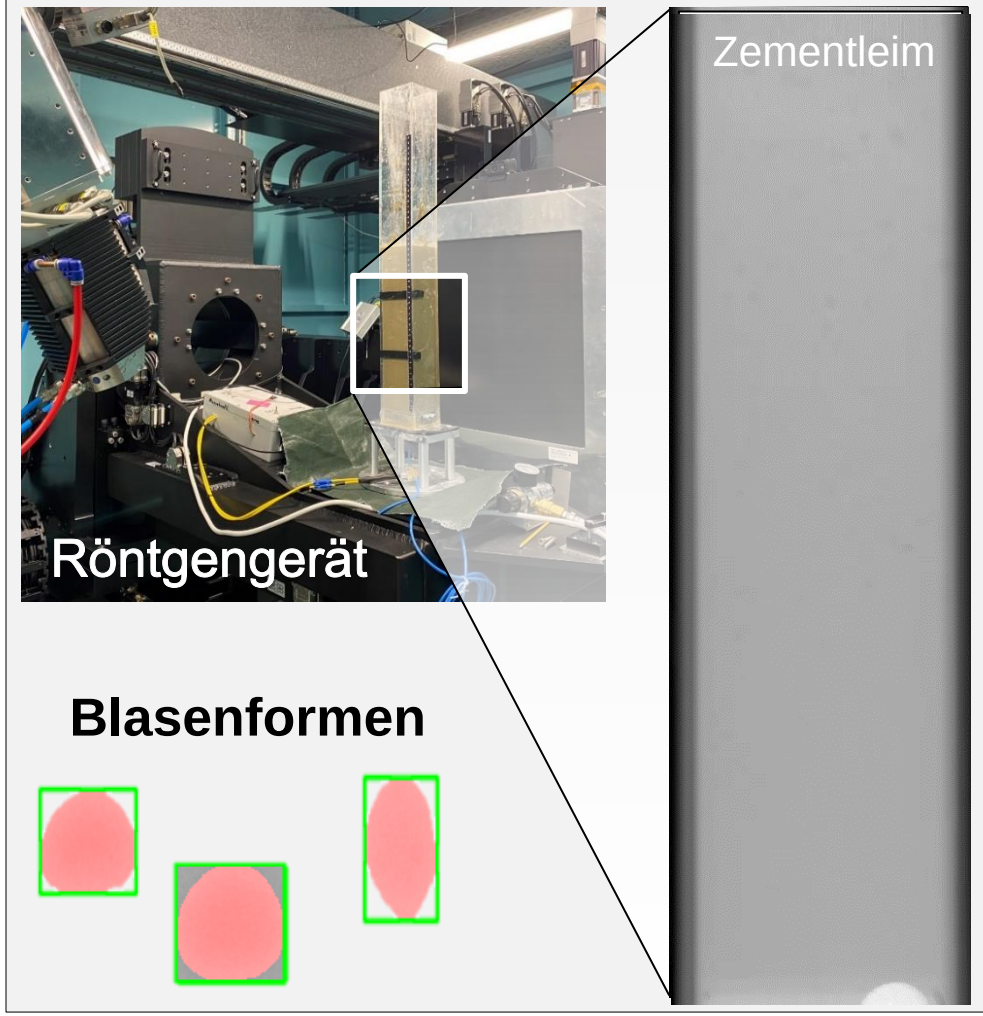


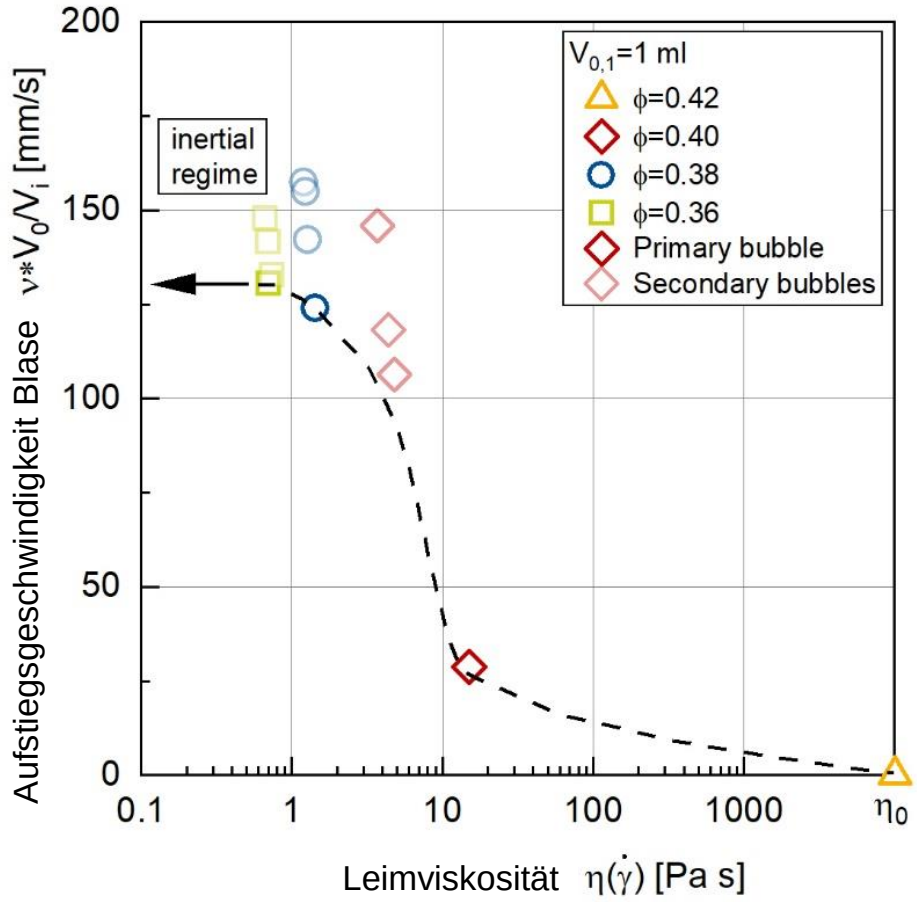
Link, Sowoidnich, Pfitzner, Gil-Diaz, Heberling, Lütznkirchen, Schäfer, Ludwig, Haist *Materials* 13 (2020) 1853;
Link, Haist et al. Influence of vibration and shear orientation on thixotropy of cement suspension (2024, submitted)



Betonverarbeitung sicher beherrschen

Einfluss der Leimrheologie auf den Luftaufstieg





Aufstiegsgeschwindigkeit
= Funktion der dynamischen Viskosität

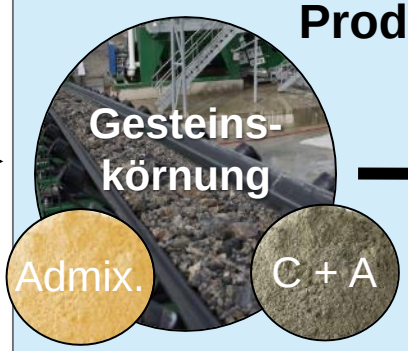
Strybny et al. X-ray analysis of air bubble rise in cement suspensions (2024; submitted)

Beton 4.0 – Selbstlernender Betonbau

Digitale Prozesskontrolle
Intelligente Betonprozess-regelung

KI basierte ‚selbstlernene' Algorithmen

Produktion



Sensor Daten
Sensor Daten
Prozess-regelung
Sensor Daten
Sensor Daten

Transport

Sensor Daten
Sensor Daten
Prozess-regelung
Sensor Daten
Sensor Daten

Förderung Einbau

Festbeton

selbstverständlich nachhaltig!

Klimawandelbeständig

Quo Vadis Beton?

Sicher durch digitale Prozesskontrolle!

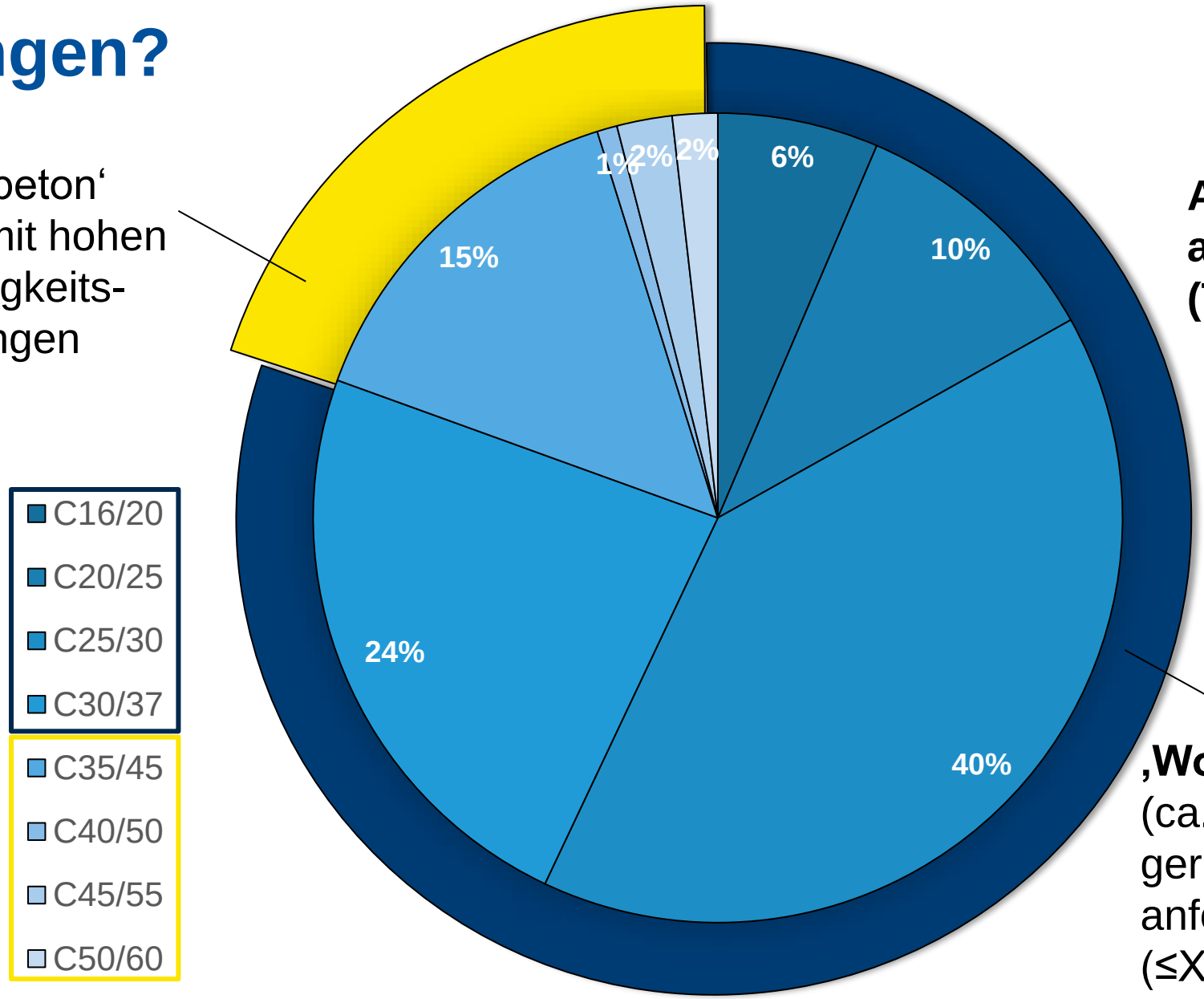
Vollständig Kreislauffähig!

Ästhetisch!

Baustoff der Zukunft!

Wo anfangen?

‚Ingenieurbeton‘
ca. 20 % mit hohen Dauerhaftigkeits-anforderungen

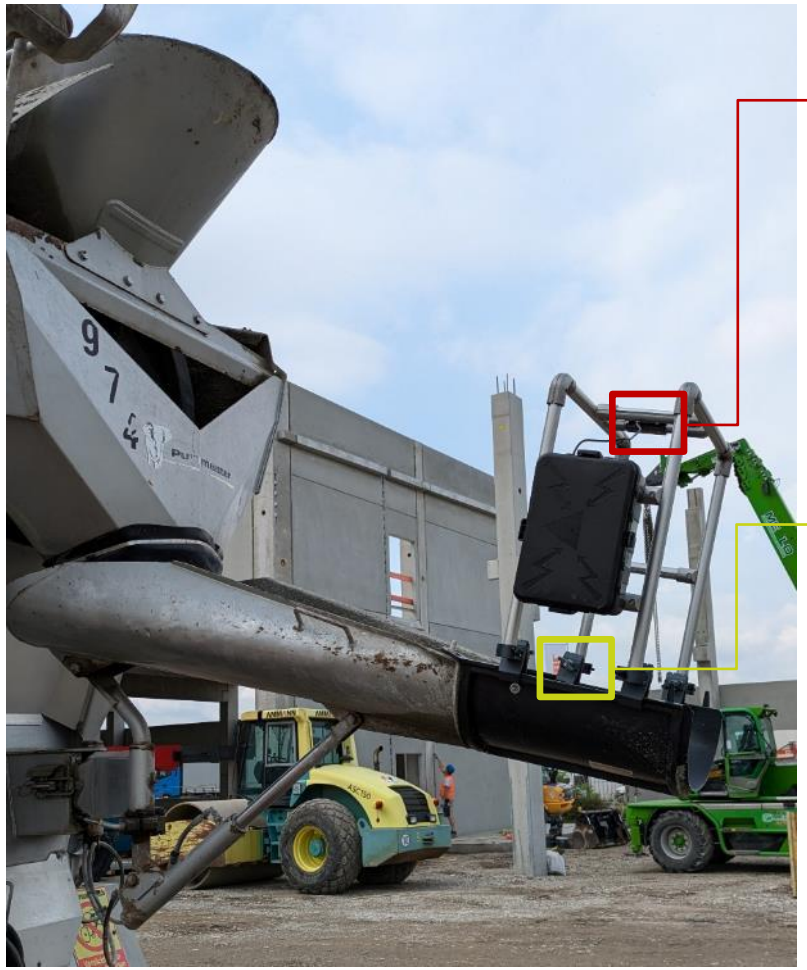


Anteil Betonsorten an CO_2-Emissionen (Transportbeton)

‚Wohnungsbau-Beton‘ (ca. 80 %) mit nur geringen Dauerhaftigkeits-anforderungen (≤XC4, ≤XF2, ≤XA1)

KI-basierte Qualitätsprüfung bei der Entladung

Aufbau und Integration in der Entladeprozess der „Digi-Schurre“ (Prototyp)



Stereokamera zur Bildaufnahme

- Fließgeschwindigkeit
- Fließhöhe
- 3D-Informationen der Oberfläche (Topographie)

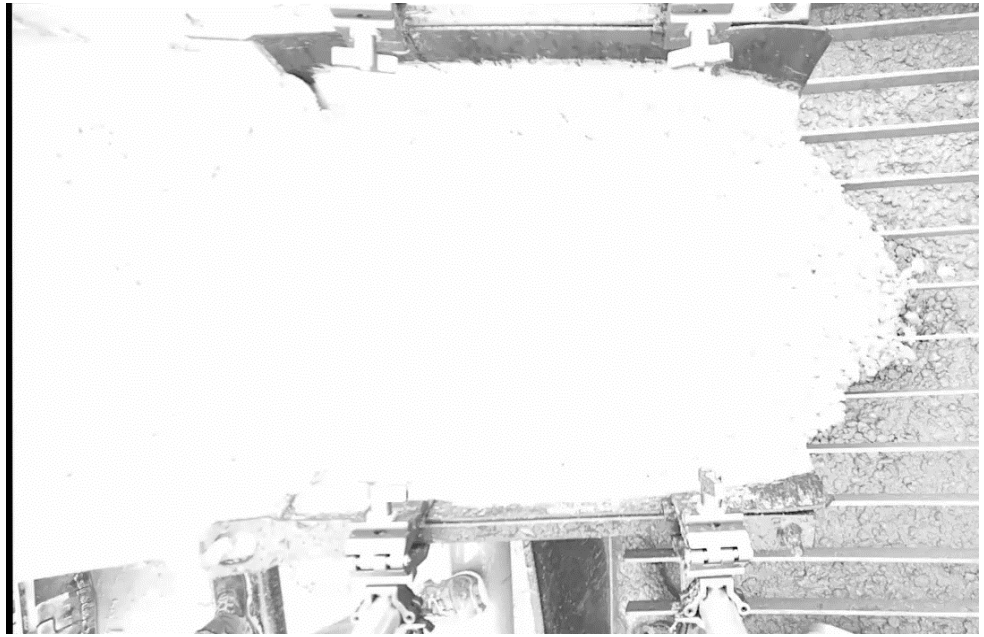
Neigungsmessgerät

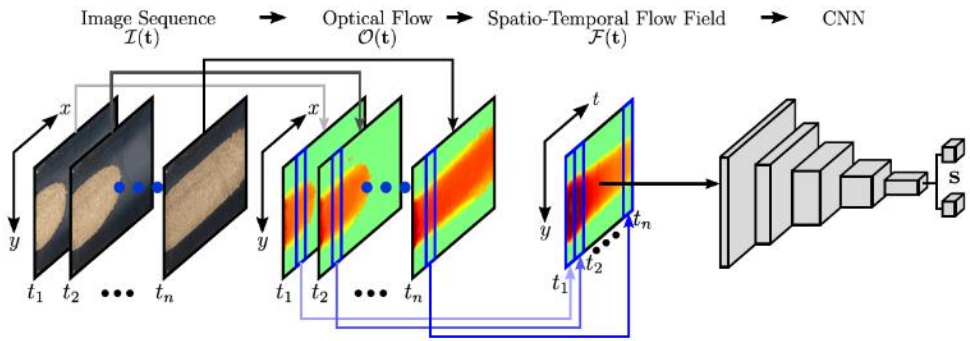
Industriepartner:

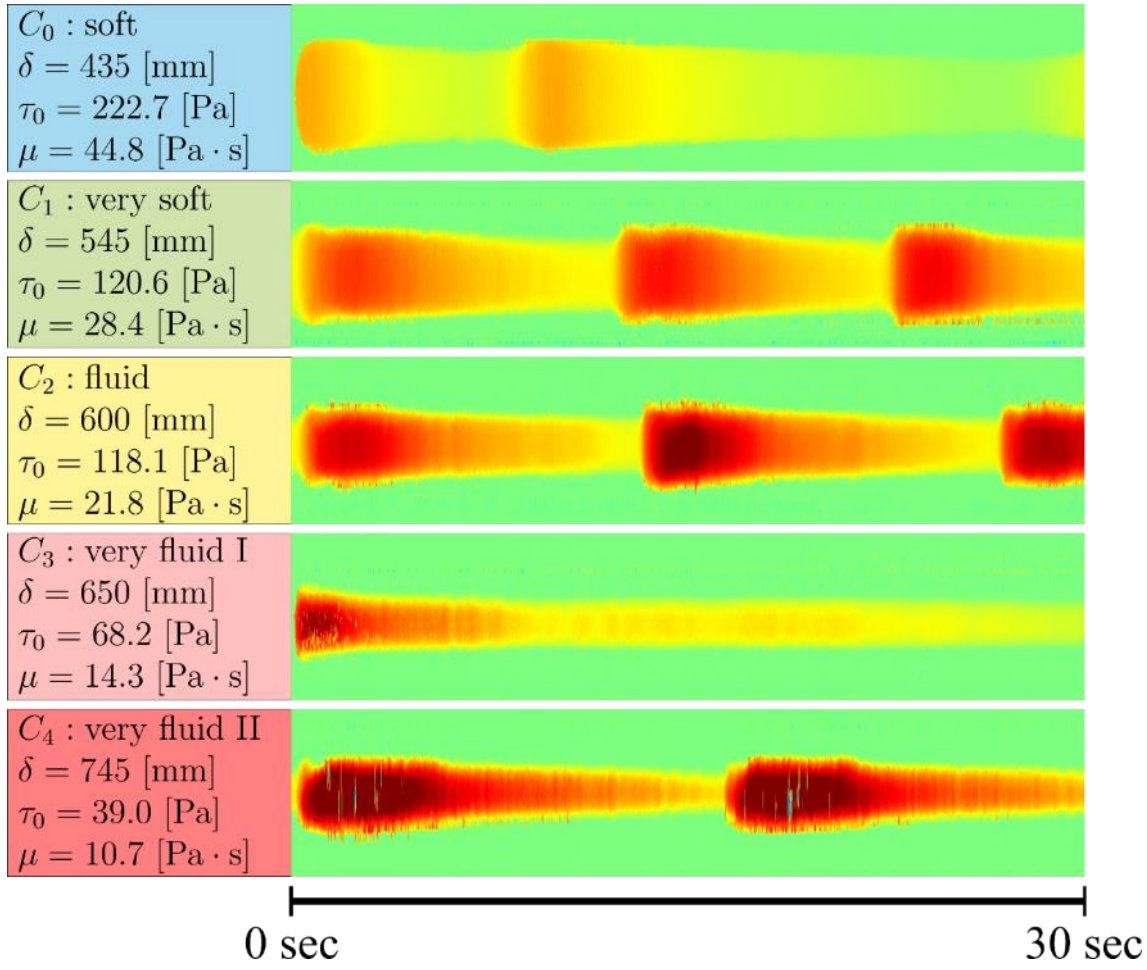
CEMEX

KI-basierte Qualitätsprüfung bei der Entladung

Prädiktion der Konsistenz und der rheologischen Eigenschaften

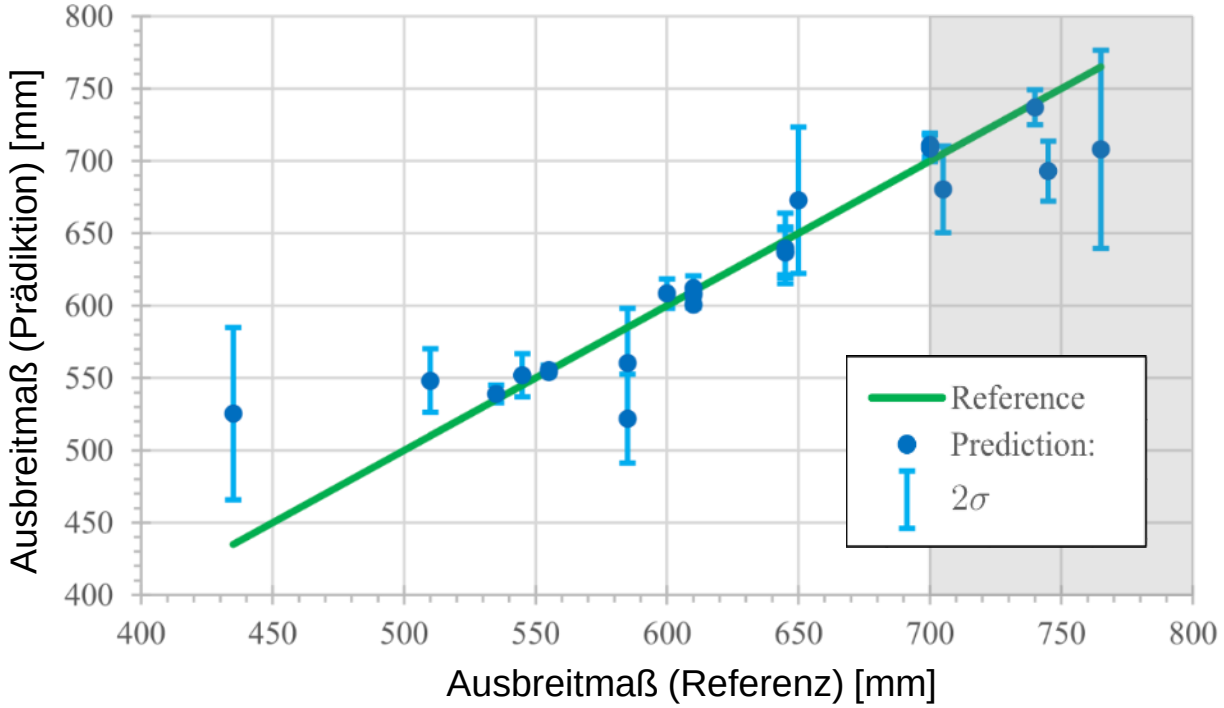


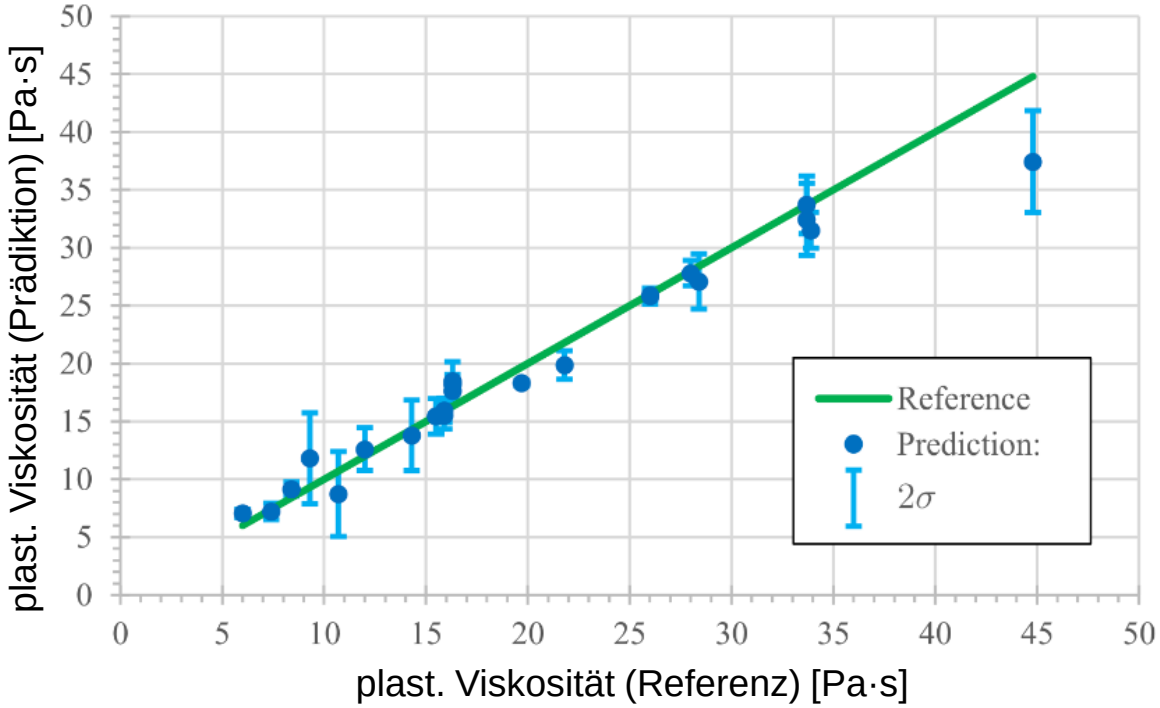




KI-basierte Qualitätsprüfung bei der Entladung

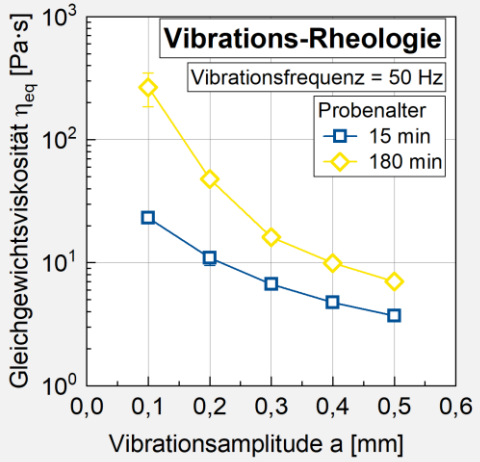
Prädiktion der Konsistenz und der rheologischen Eigenschaften

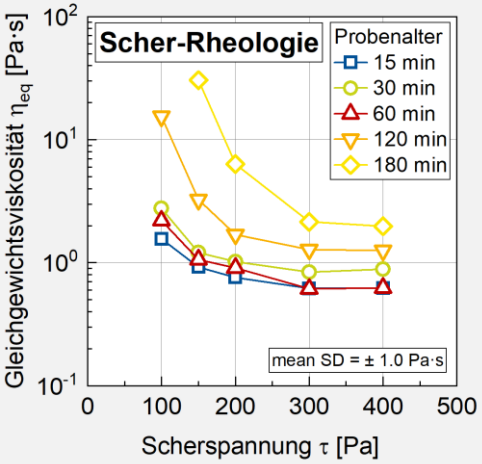




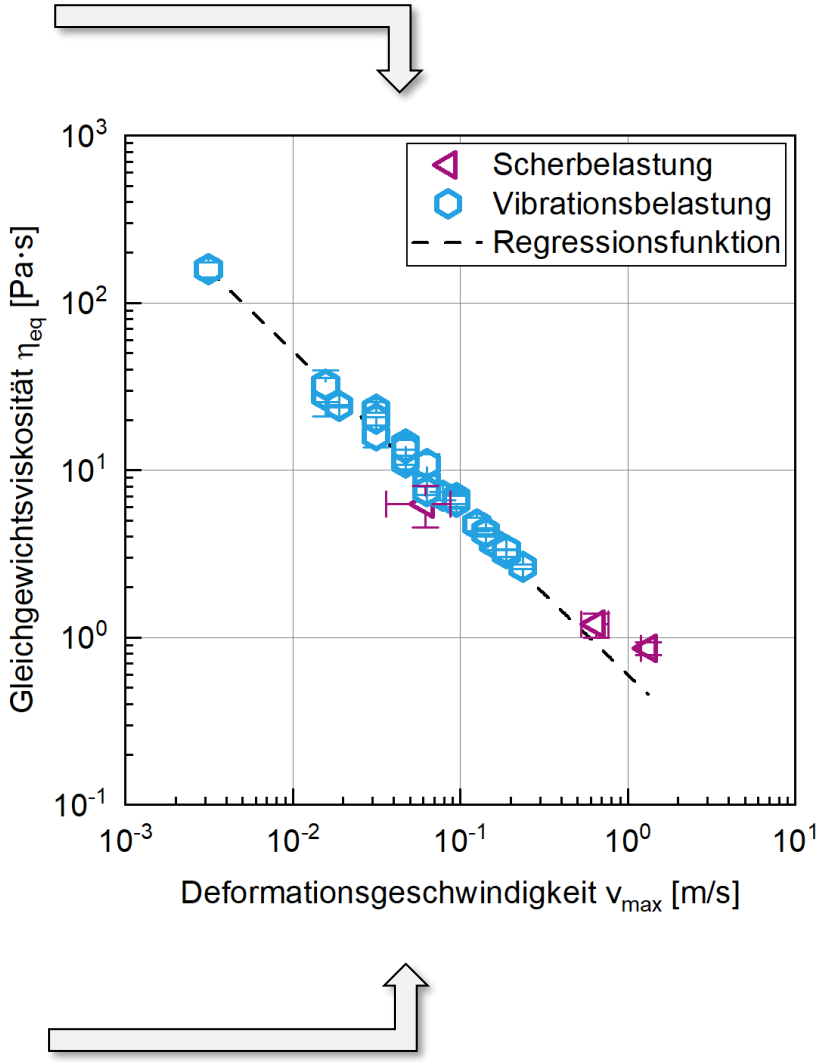
Sichtbeton: Frischbetonbeherrschung

Einfluss Rütteleinwirkung auf die Leim-Rheologie

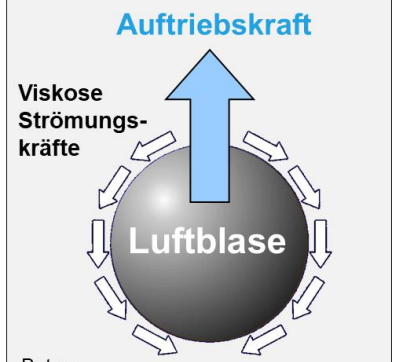




Link, Sowoidnich, Pfitzner, Gil-Diaz, Heberling, Lützenkirchen, Schäfer, Ludwig, Haist *Materials* 13 (2020) 1853;
Link, Haist et al. Influence of vibration and shear orientation on thixotropy of cement suspension (2024, submitted)

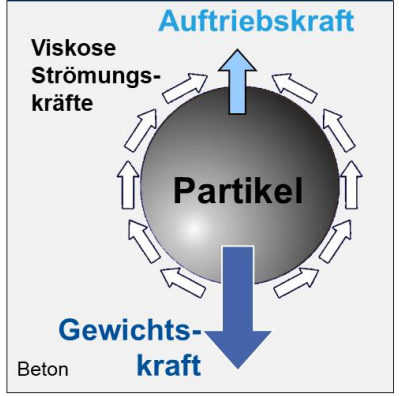


Gute Betonentlüftung



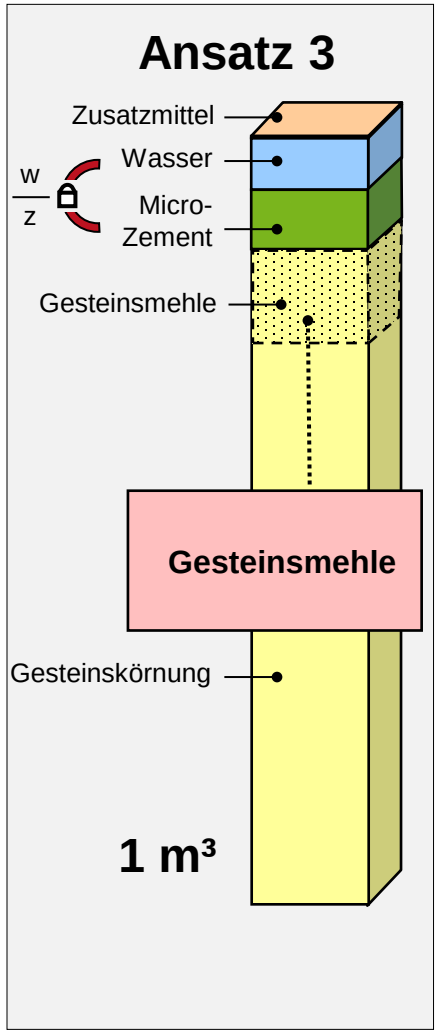
Viskosität bestimmt

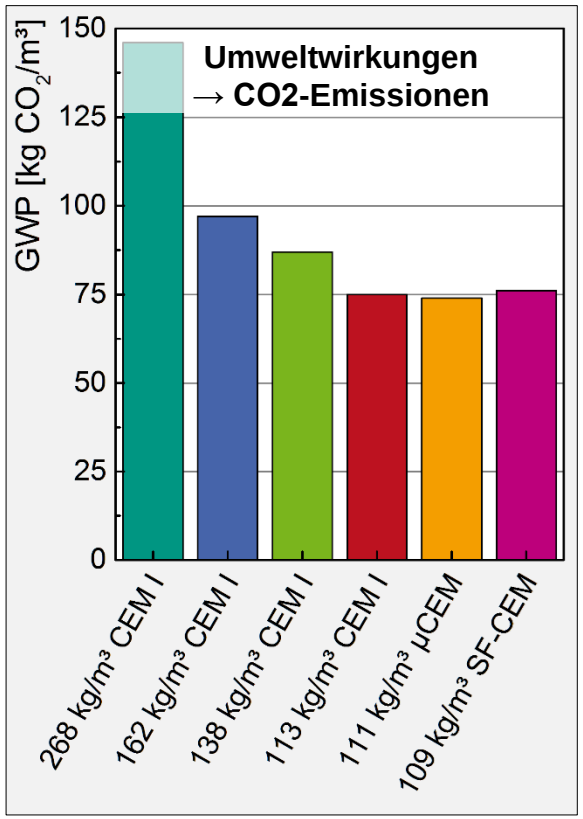
Entmischungswiderstand

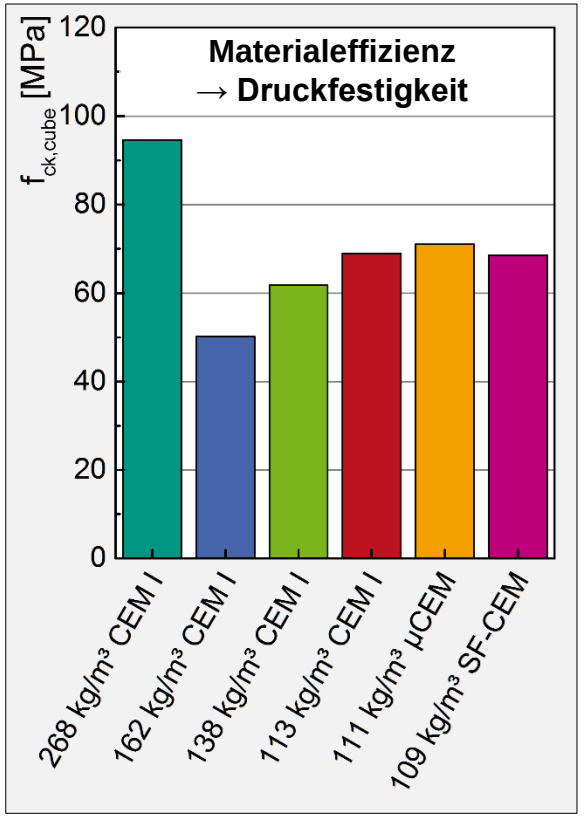


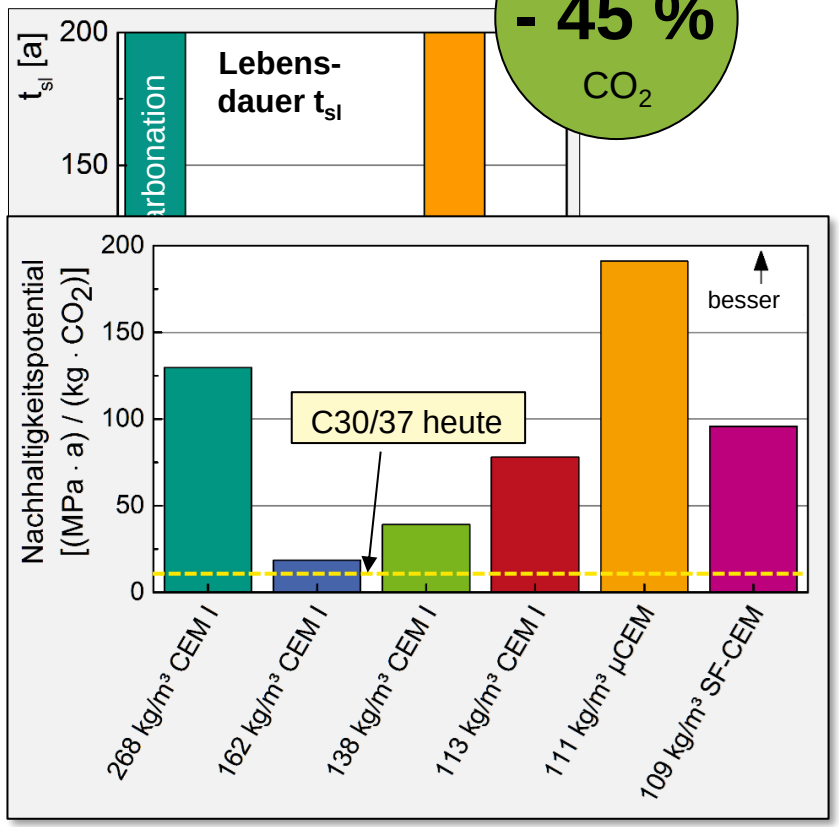
Ansatz 3: Zusatzstoff-freie Zemente

bis zu **- 45 %** CO_2









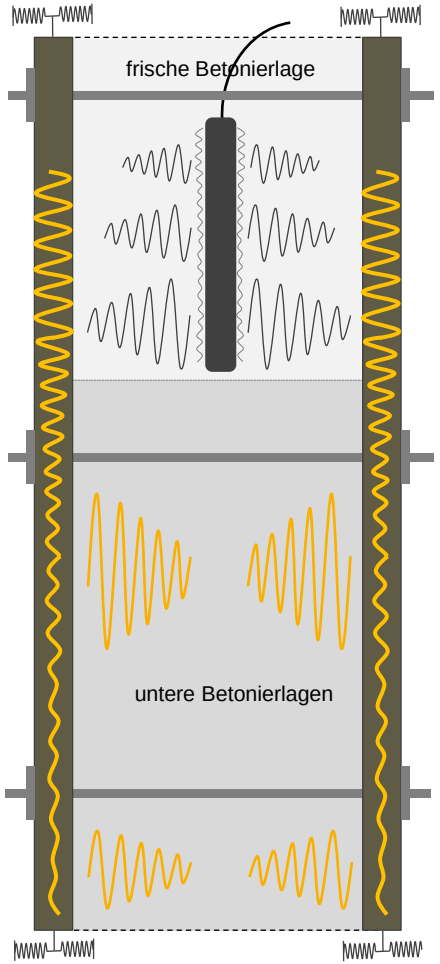
$$\text{Nachhaltigkeits-Potenzial } \Omega = \frac{\text{Druckfestigkeit } f_{ck} \cdot \text{Lebensdauer } t_{sl}}{\text{CO2−Emissionen (GWP)}}$$

Haist, Bergmeister, Curbach, et al.: Nachhaltig konstruieren und bauen mit Beton. In: Betonkalender 2022, 112 pages
Müller, Haist, Vogel: Construction and Building Materials 67 (2014) 321-337

Wunschvorstellung:
Vollkommen gleichmäßiger warmer Grauton

Sichtbeton: Herausforderung Farbtongleichmäßigkeit

Gebäude Uni Hannover (Bauphase)
Bauteil hergestellt und ausgeschalt im Sommer
(Umgebungstemperatur 18 °C)

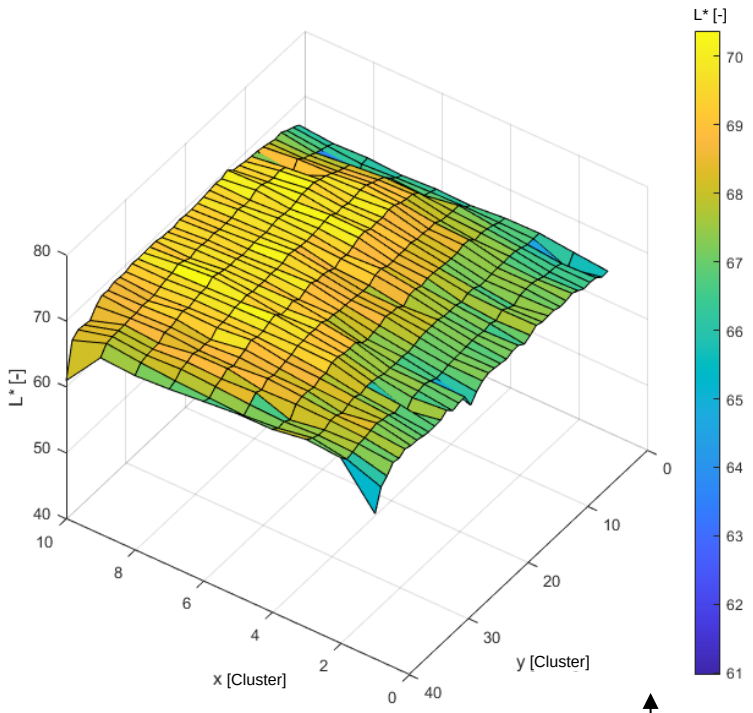


Schwingungen werden von frischen Betonierlagen in bereits rücksteifende Lagen weitergeleitet

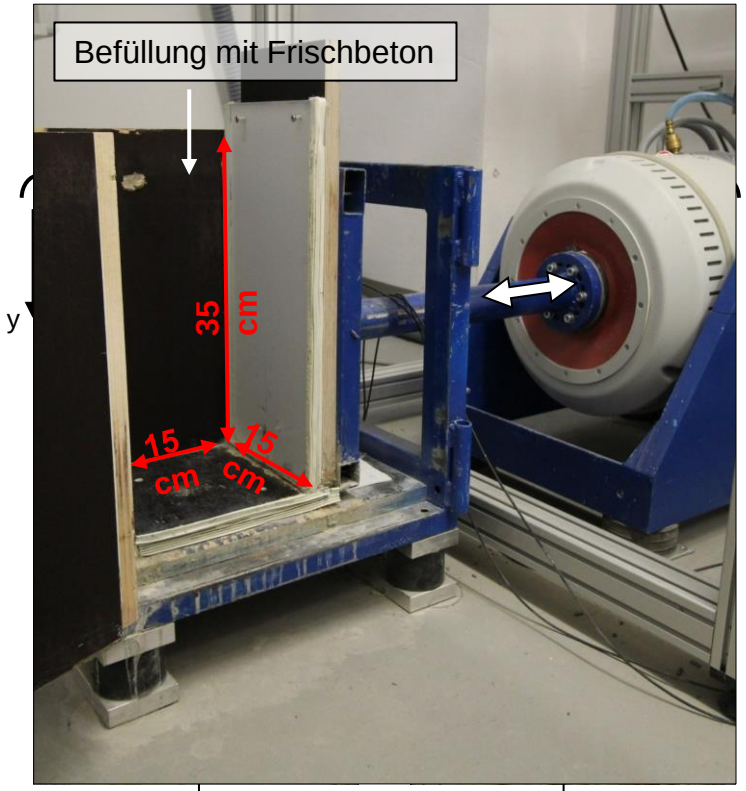
Sichtbeton
Ursachen von Farbtonschwankungen

In Zusammenarbeit mit DBV

IfB Institut für Baustoffe

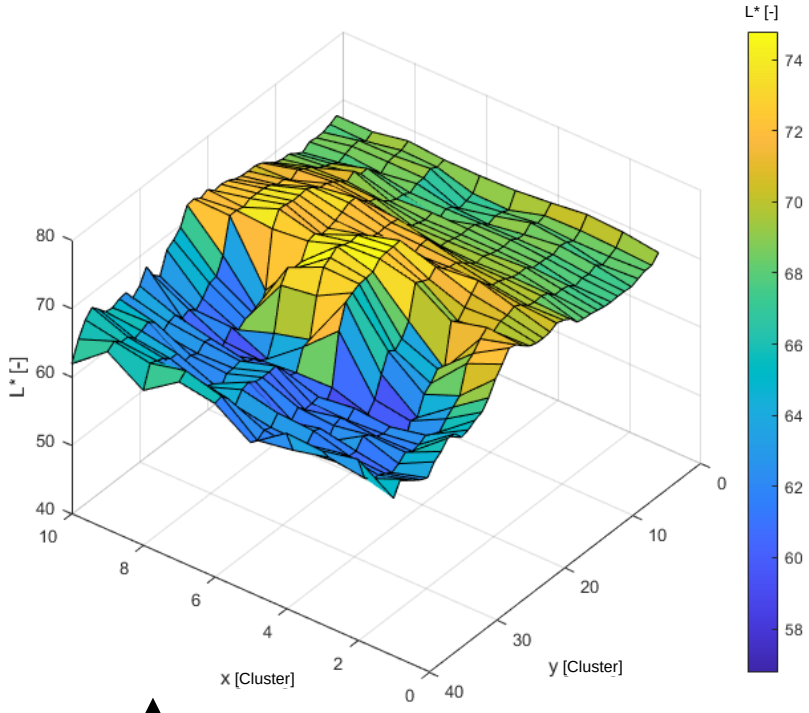


Homogene Verteilung über die PK-Oberfläche



L*-Wert Verteilung

L*-Wert Verteilung

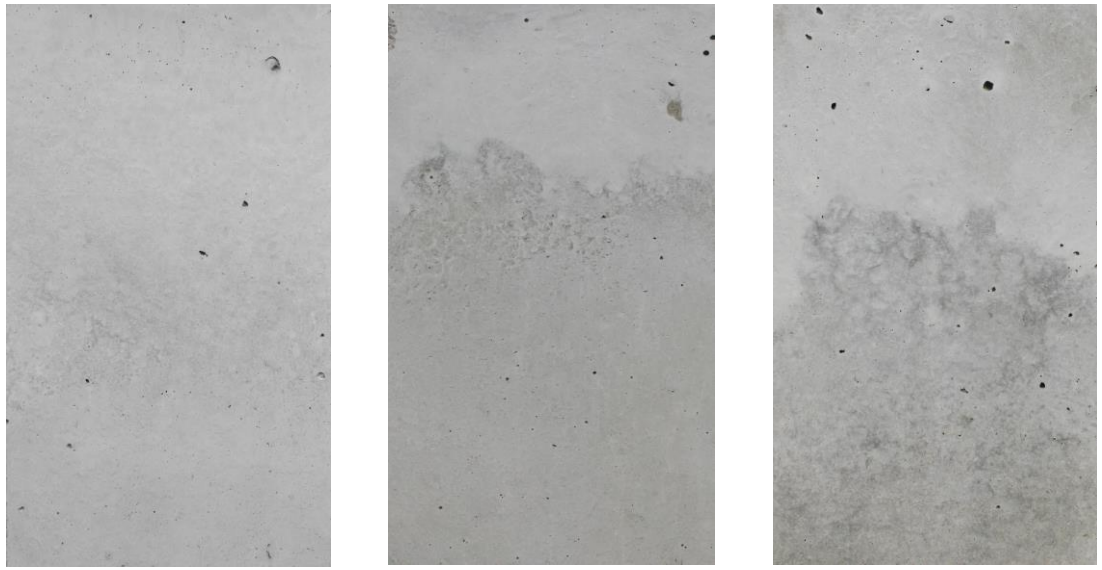


Inhomogene Verteilung über die PK-Oberfläche
→ Verfärbungen im unteren Bereich deutlich erkennbar

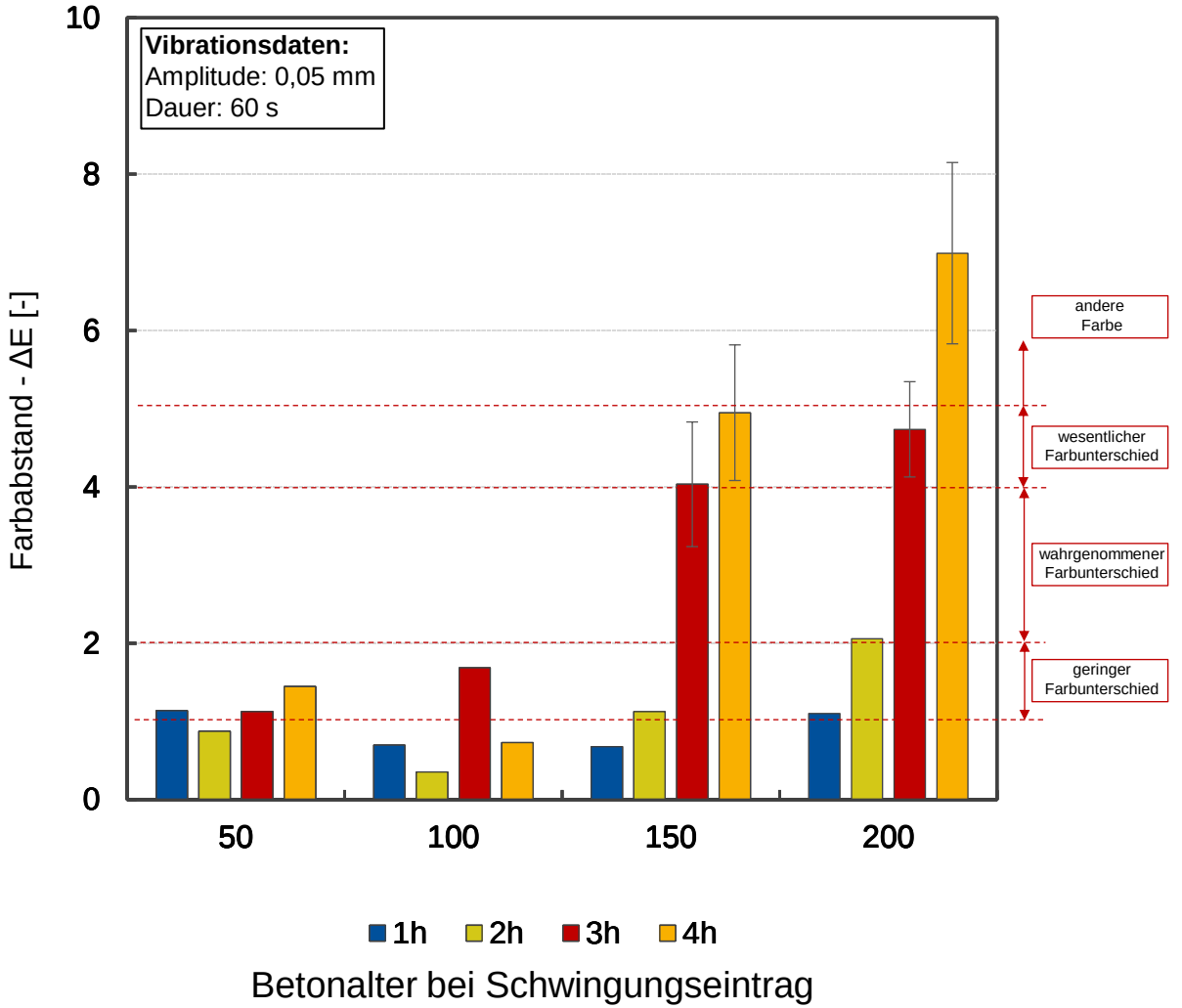
Sichtbeton
Beherrschung der Farbton-Gleichmäßigkeit

In Zusammen-
arbeit mit

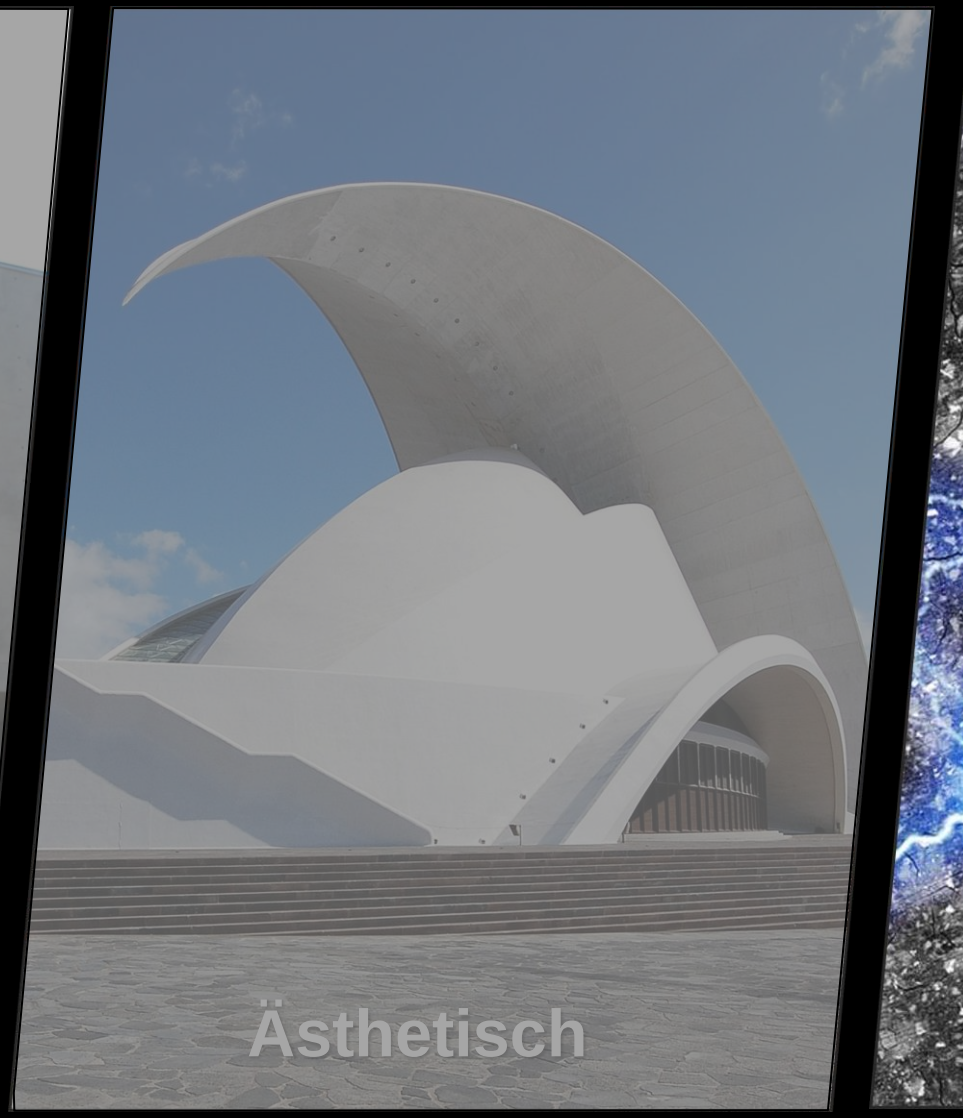
zunehmende Frequenz

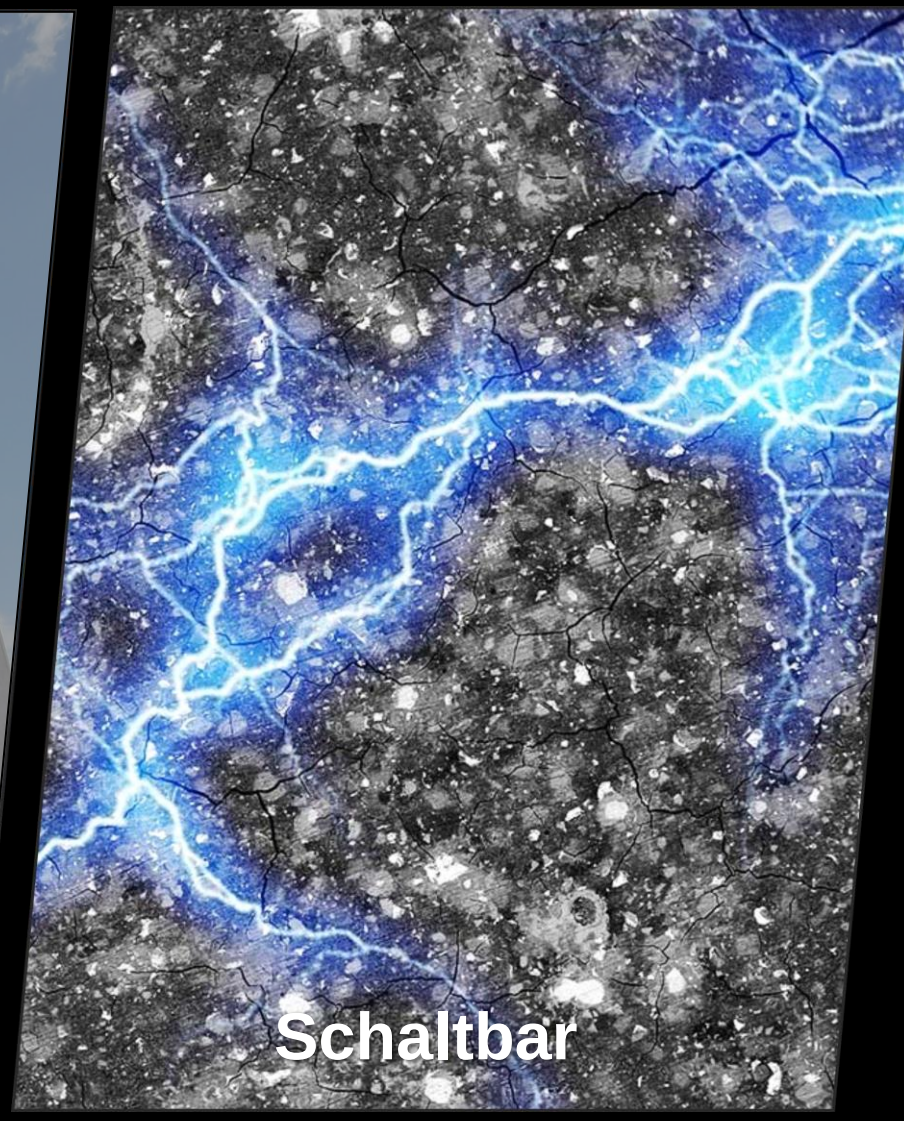


CEM I 4h – 50 Hz	CEM I 4h – 150 Hz	CEM I 4h – 200 Hz



Farbtonungleichmäßigkeiten können durch Wahl der Rüttelfrequenz stark reduziert werden





Multifunktionaler Beton

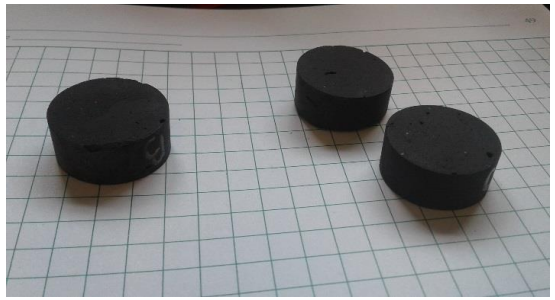
Multifunktional: Elektrisch leitfähig durch Rußpartikel

Rußpartikel CB)

CB-Suspension

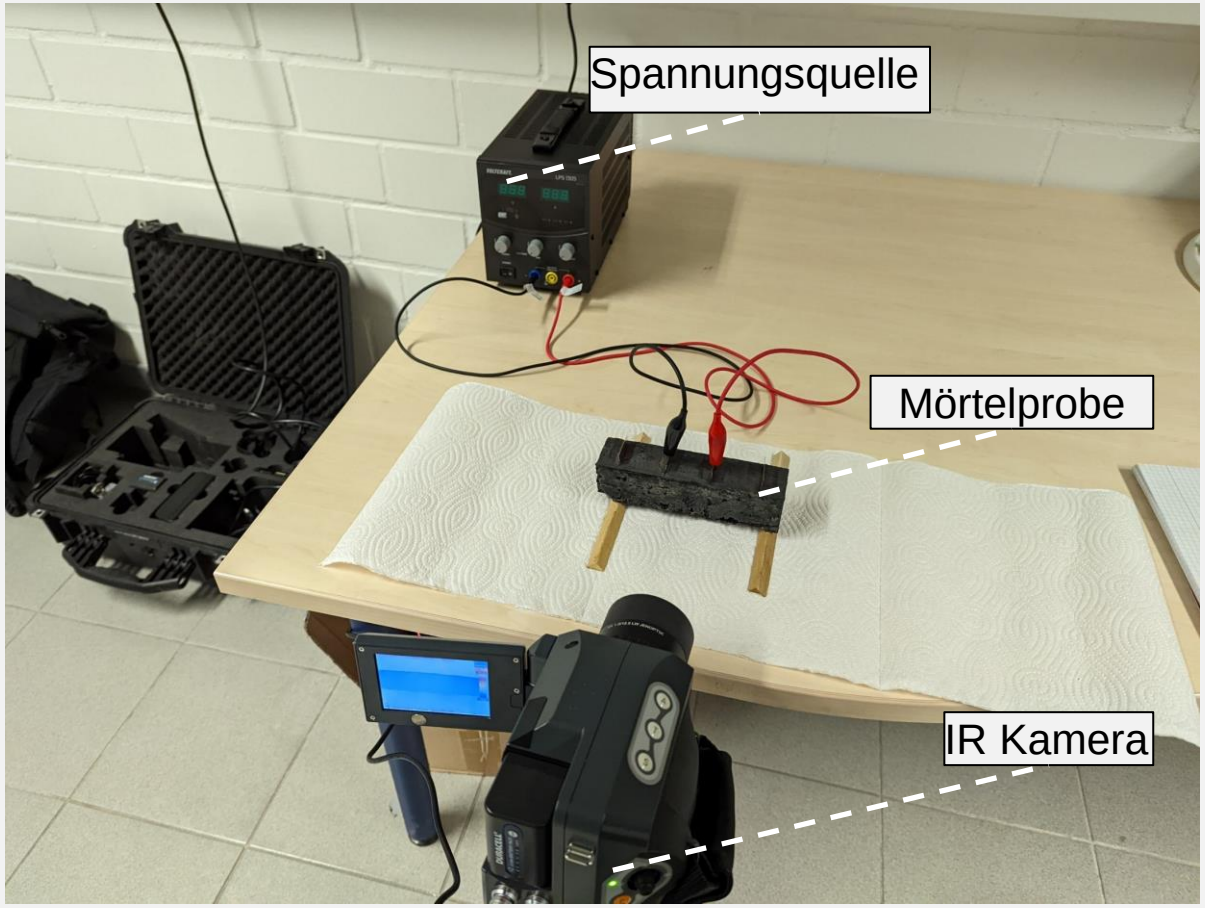
+

Zement



Final carbonaceous-cement nanocomposites

Versuchsaufbau



In Zusammenarbeit mit

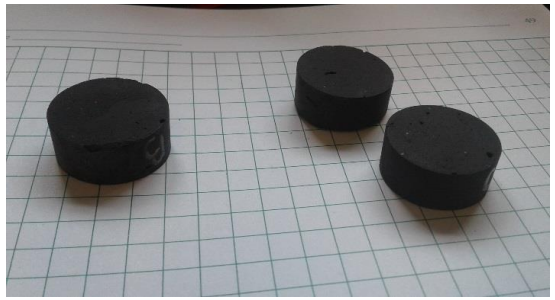
Multifunktional: Schaltbarer Beton

Rußpartikel CB)

CB-Suspension

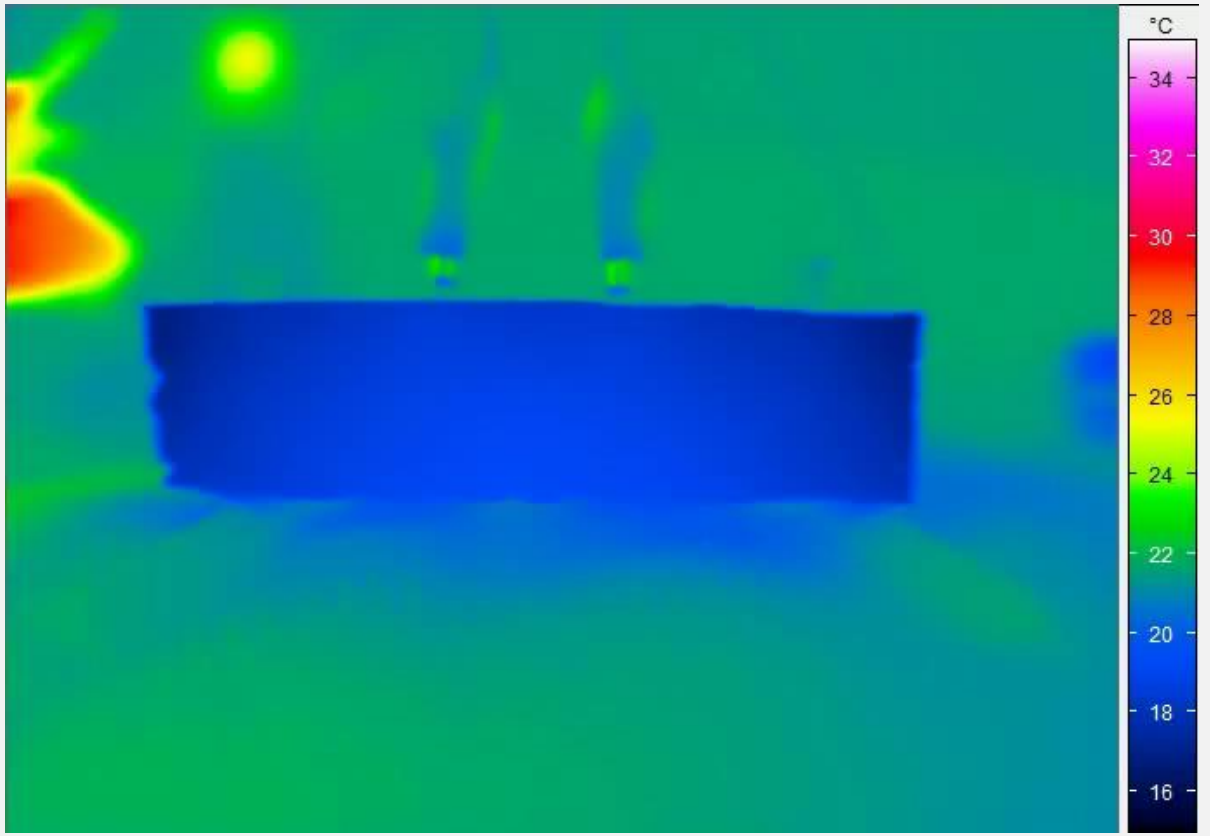
+

Zement



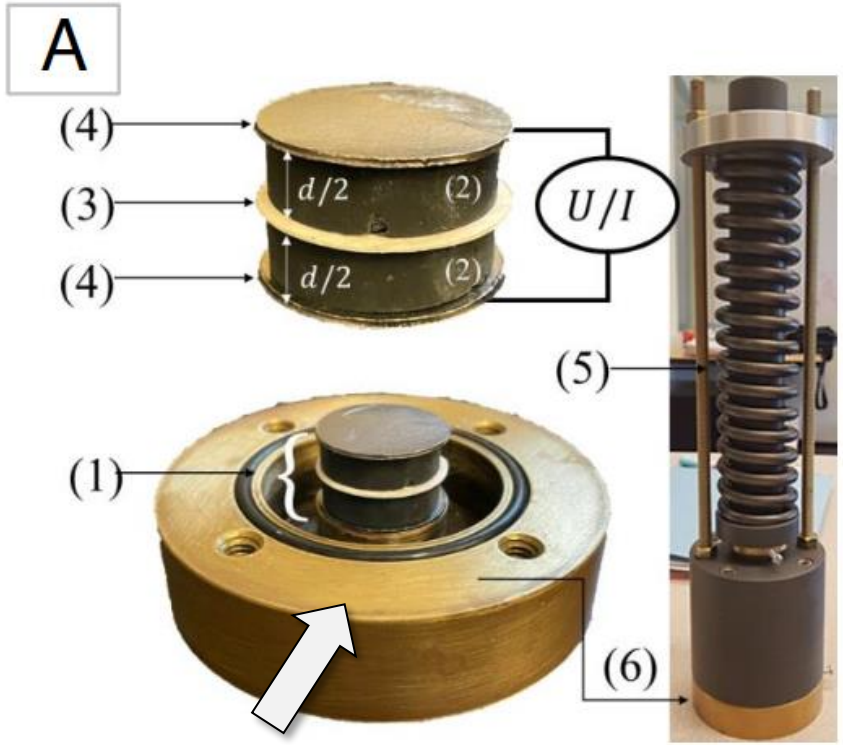
Final carbonaceous-cement nanocomposites

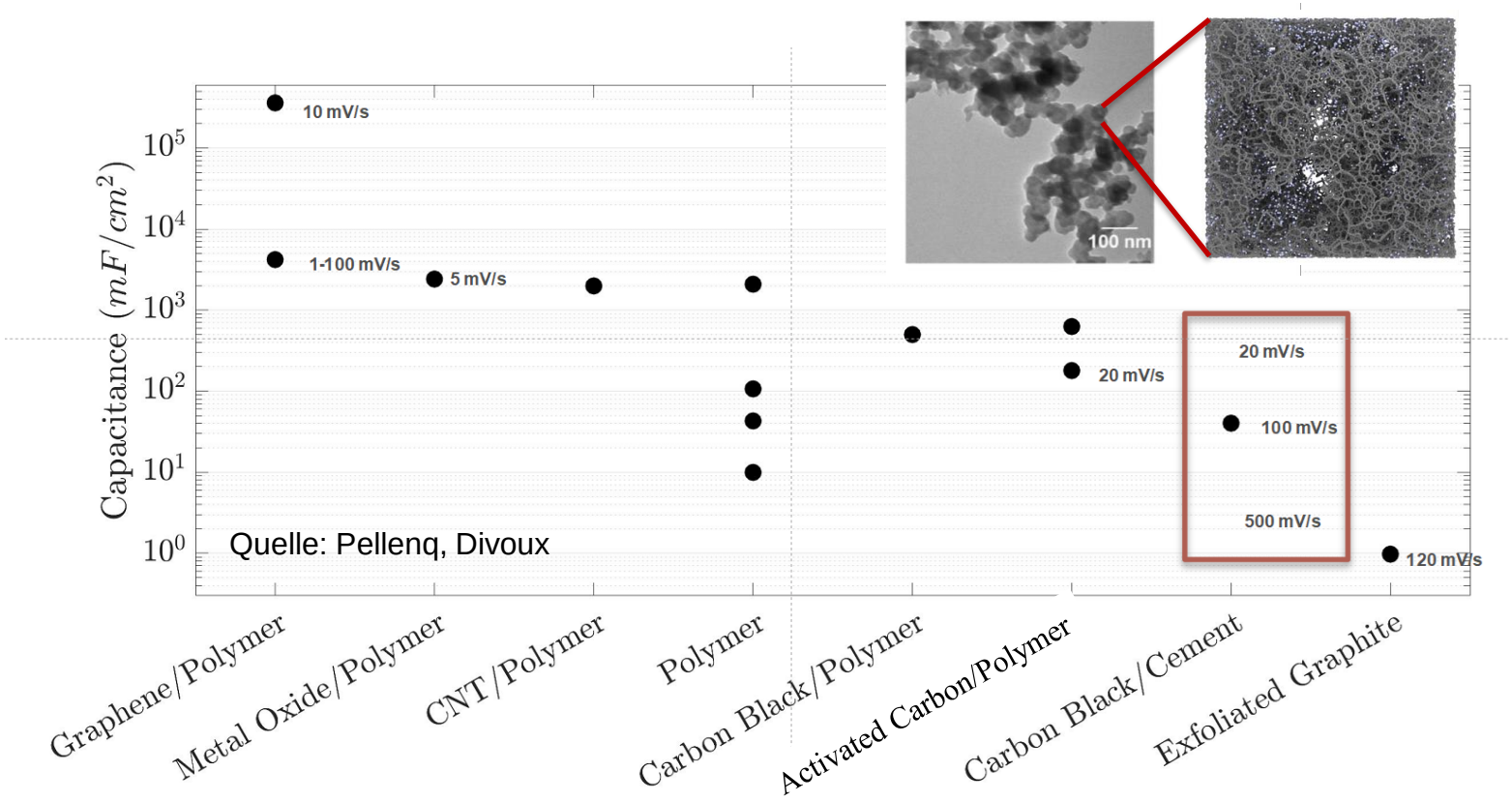
Elektrischer Joule-Heizeffekt

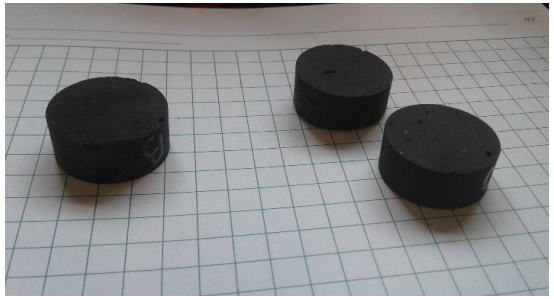


In Zusammenarbeit mit

Multifuktional: Beton als Superkondensator







Quelle: Chanut et al. PNAS 120 (2023) 32

Potenzial: Bodenplatte Einfamilienhaus speichert elektrischen Energiebedarf von ca. 2 Tagen

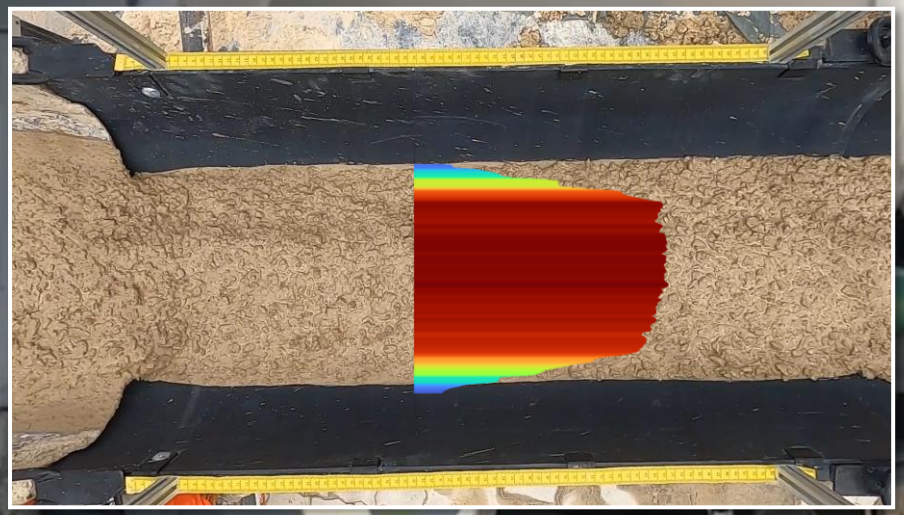
Herzlichen Glückwunsch!

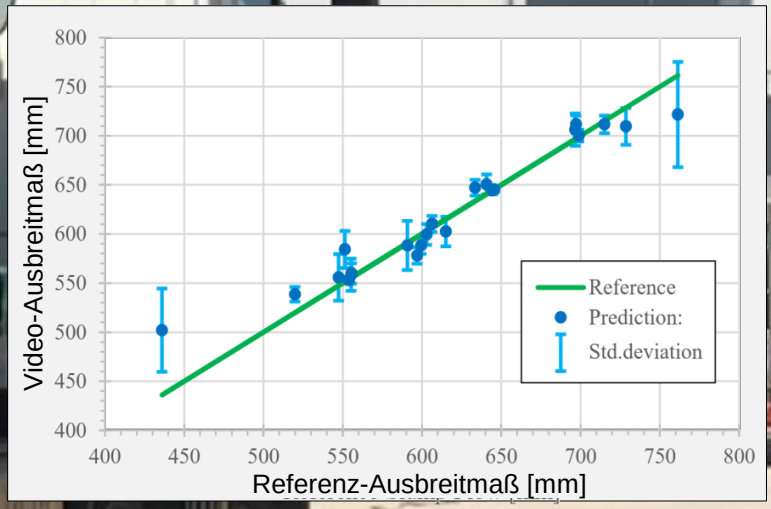
Auf weitere sehr erfolgreiche 50 Jahre!

RGB-Kamera

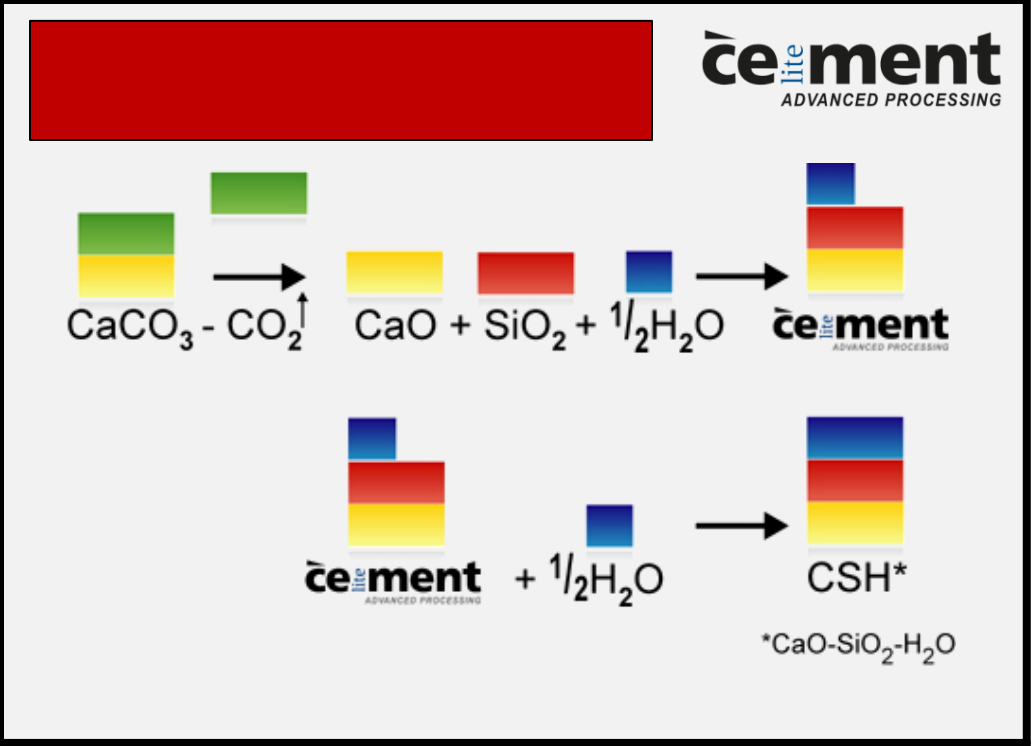
Stereo-Kamera

Digitale Frischbetonprüfung

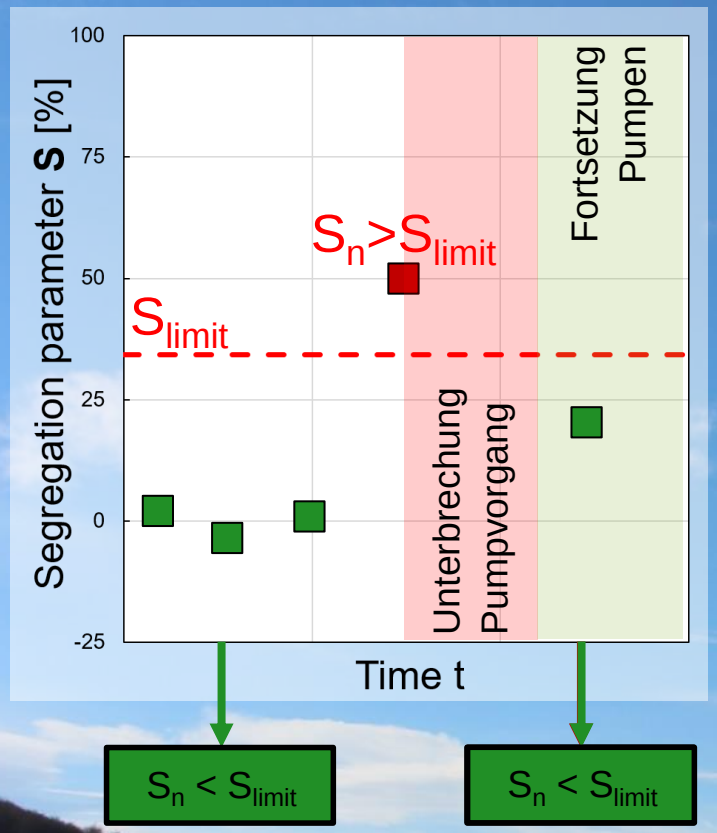




Rheologie, Zusammensetzung etc. können kontinuierlich erfasst und für Betonaussteuerung verwendet werden


ADVANCED PROCESSING
$CaCO_3 - CO_2$
$CaO + SiO_2 + 1/2H_2O$
$+ 1/2H_2O$
CSH*
*$CaO-SiO_2-H_2O$

MUCEM, Marseille, Frankreich
Ultrahochfester Beton



Gefördert durch:

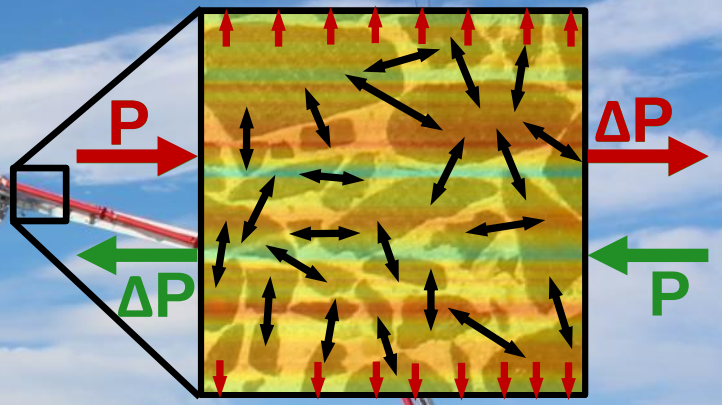
Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

FTB Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V.

AiF Forschungsnetzwerk Mittelstand

Leibniz Universität Hannover

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN



Lösen des Stopfers

In-Line Kontrolle des Pumprozesses

Algorithmus zur Steuerung der Betonpumpe zur Vermeidung von Stopferbildungen