

Beiträge aus der Wissenschaft zur Steigerung der Nachhaltigkeit des Bauens

Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Christoph Gehlen

Technische Universität München

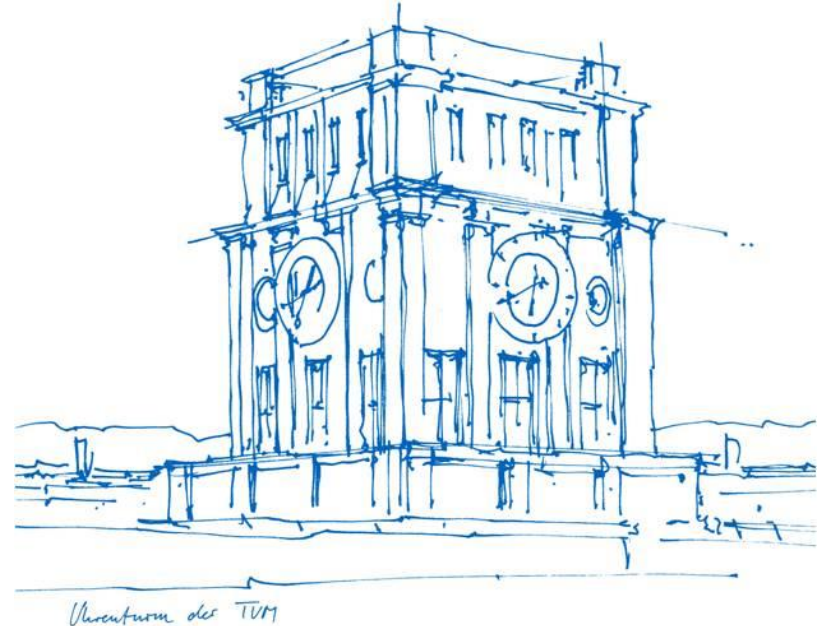
TUM-School of Engineering and Design

Department of Materials Engineering

Centrum Baustoffe und Materialprüfung

Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung

DAfStb-Forschungskolloquium, Berlin, 16. Oktober 2024



Nachhaltiges Bauen mit Beton



Fragensammlung zum Thema

„Nachhaltiges Bauen – Bedingungen und Bewertungsmethoden (Ökobilanzen, LCA Life Cycle Assessment)

1. Geben Sie eine Definition für „Nachhaltigkeit“ – nachhaltige Entwicklung!
2. Welche drei Bereiche sollte eine nachhaltige Entwicklung berücksichtigen?
3. Welche Motivation besteht zur Verfolgung von nachhaltigem Wirtschaften?
4. Welche wesentlichen Ziele verfolgt die Nachhaltigkeitsstrategie der deutschen Bundesregierung?
5. Was versteht man unter Ressourceneffizienz? Warum ist ihre Steigerung zur Erreichung verbesserter Nachhaltigkeit zwingend erforderlich?
6. Nennen Sie die Phasen des Lebenszyklus eines Bauwerks!
7. Welche Instrumente für Nachhaltigkeitsanalysen kennen Sie?
8. Aus welchen Teilschritten besteht eine Ökobilanz?
9. Was ist eine Sachbilanz?
10. Was versteht man unter „verknüpfter Input“?
11. Nennen Sie die wesentlichen Wirkungskategorien in Ökobilanzen. Geben Sie je zwei Beispiele für die zugeordneten Schadstoffe/Umweltwirkungen.
12. Was versteht man bei einer Ökobilanz unter einer „Vorkette“?
13. Woraus resultiert beim Vergleich Beton – Asphalt –Straßendecke der höhere Beitrag des Asphalts zum ODP Ozone Depletion Potential bei der Herstellung?
14. Warum schneidet die Betonbauweise im Vergleich zum Asphalt bei der Erhaltung günstiger ab?
15. Welche Ziele werden mit einer Gebäudezertifizierung z.B. nach DGNB-Standard verfolgt?
16. Welche Schutzziele sind Gegenstand der DGNB-Nachhaltigkeitszertifikate für Gebäude?

Was bedeutet nachhaltiges Bauen?

Die Ziele des nachhaltigen Bauens liegen in der Minimierung des Verbrauchs von Energie und Ressourcen.

Berücksichtigt werden dabei alle Lebenszyklusphasen eines Gebäudes.

Dabei wird die Optimierung sämtlicher Einflussfaktoren auf den Lebenszyklus angestrebt: von der Rohstoffgewinnung über die Errichtung bis zum Rückbau.

GRUNABAU

„Grundsätze des nachhaltigen Bauens mit Beton für Planung, Ausführung, Nutzung und Rückbau von Betonbauwerken“

Dekarbonisierung von Zement und Beton

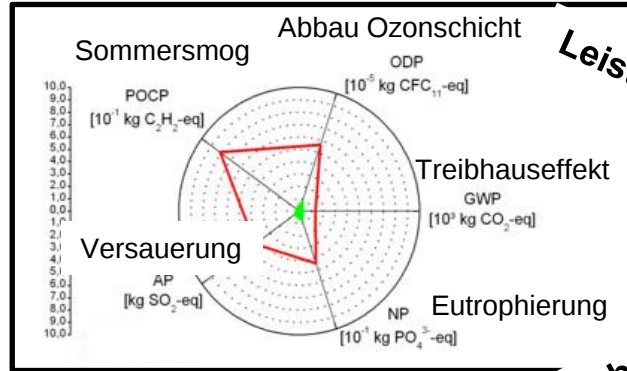
- Welche Technologien und Innovationen sind erforderlich?
-



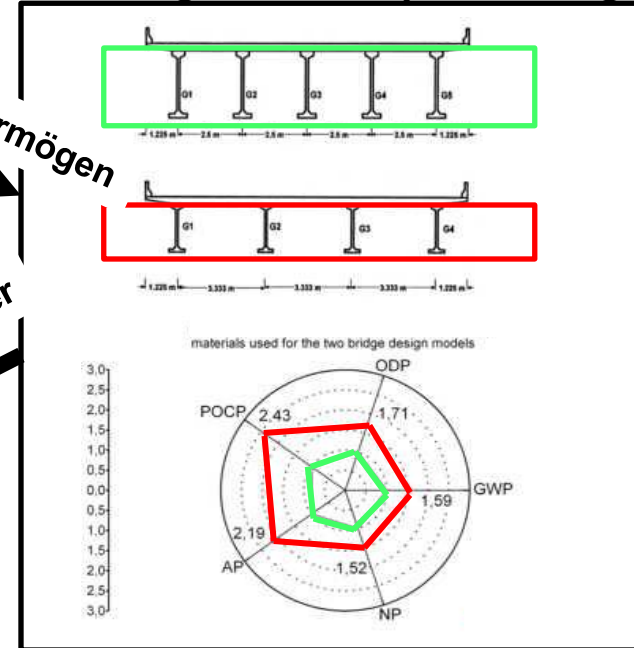
Ökobilanzierung

■ Normalbeton
■ UHPC

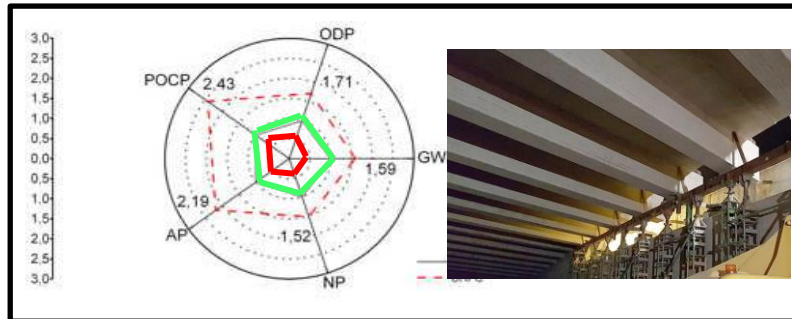
Herstellung 1 m³ Beton



Herstellung 1 Bauteil (z. B. I-Träger)



1 Brückenfunktion für einen Zeitraum X



Leistungvermögen
Lebensdauer

Planung, Ausführung

Lebensdauer von Stahlbeton

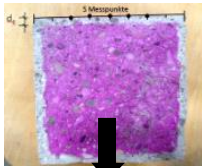
DIN EN 1990:

„Ein Tragwerk ist so zu **planen** und **auszuführen**, dass es ... in der vorgesehenen Nutzungszeit mit angemessener Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit den möglichen Einwirkungen und Einflüssen standhält und die geforderten Gebrauchseigenschaften behält.“



Durability design

Carbonation resistance class
(material resistance class)

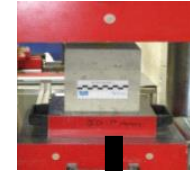


RC ?

classification:
Material testing

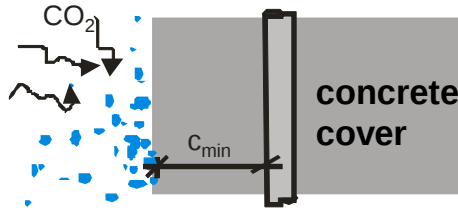
Structural design

Strength class



e.g. C35/45

Environmental load
Exposure class e.g. XC4



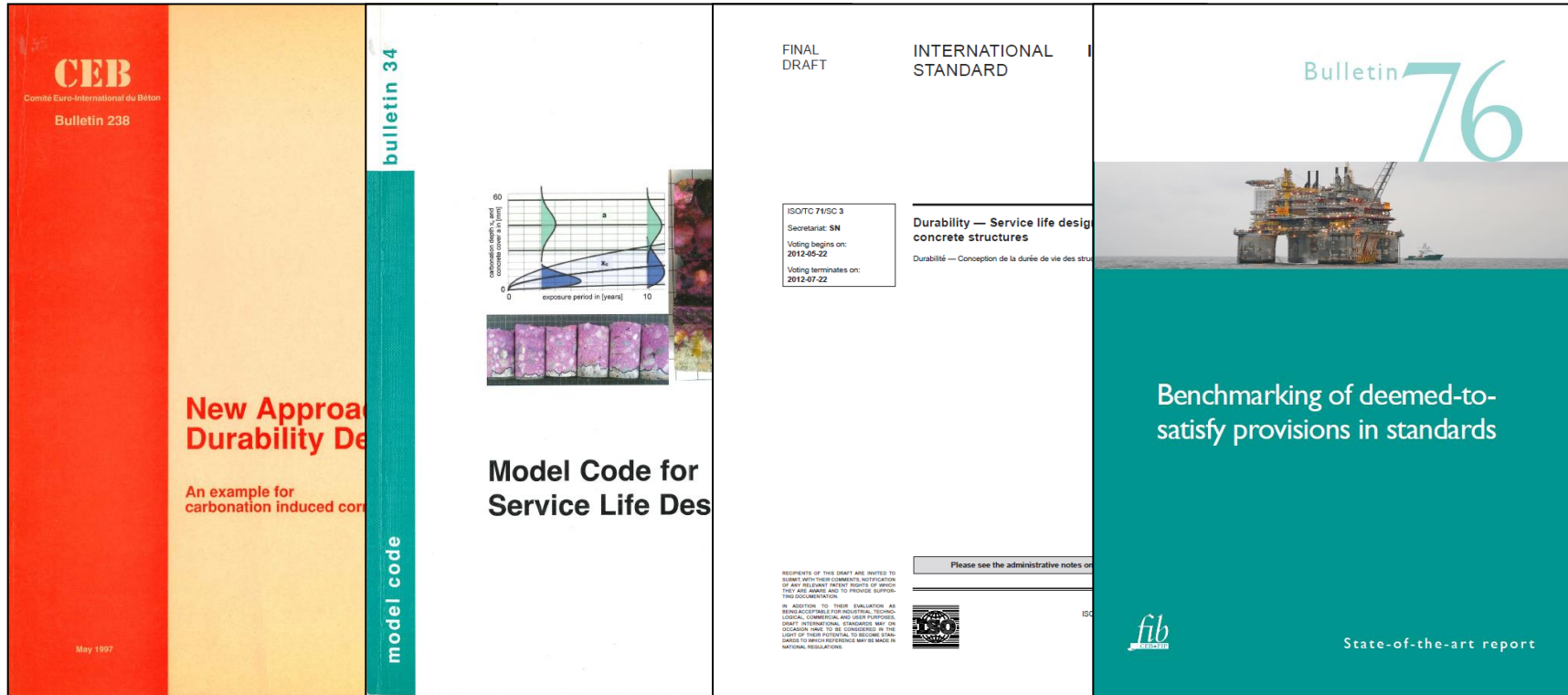
Load
e.g. dead load, life load

performance and reliability
based design



Quelle: Greve-Dierfeld & Gehlen (2016)

Historische Entwicklung



1997 CEB bulletin

2006 fib Model Code SLD

2012, ISO16204

2016 fib bulletin

DAfStb Verbundvorhaben „Dauerhaftigkeit von Beton nach dem Performance-Prinzip“



Projekt

Inhalt

AiF-FV

Forschungsstellen

- | | |
|----|--|
| P1 | <i>Objektsammlung, Zustandserfassung eines repräsentativen Bauwerksbestandes</i> |
| P2 | <i>Grenzzustände / erforderliche Zuverlässigkeiten</i> |
| P3 | <i>Bewertung von Laborprüfverfahren</i> |
| P4 | <i>Klassifikation Materialwiderstände, Produktionskontrolle, Konformitätskriterien und -kontrolle</i> |
| P5 | <i>Annahmeprüfungen auf der Baustelle / Abnahmeprüfungen am Bauwerk</i> |

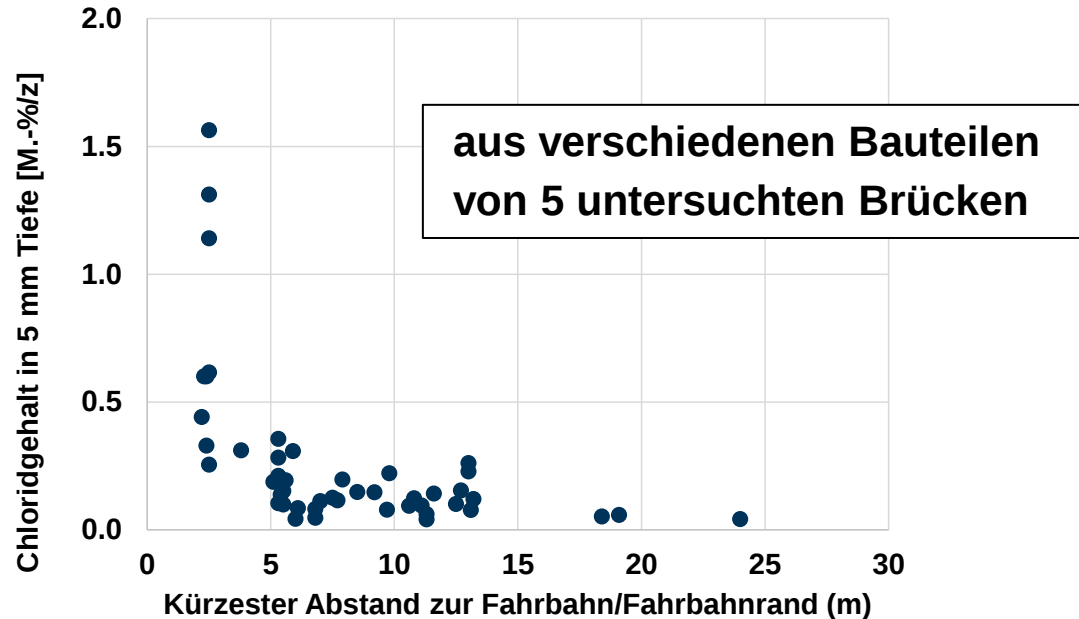


Ergebnisse sollen im Rahmen eines DAfStb-Fachkolloquiums vorgestellt werden

Fragestellung:

Stimmen die Berechnungen? Sind die Berechnungen wirklich repräsentativ, sprich, stimmen sie mit der Grundgesamtheit der Praxisbeobachtungen überein?

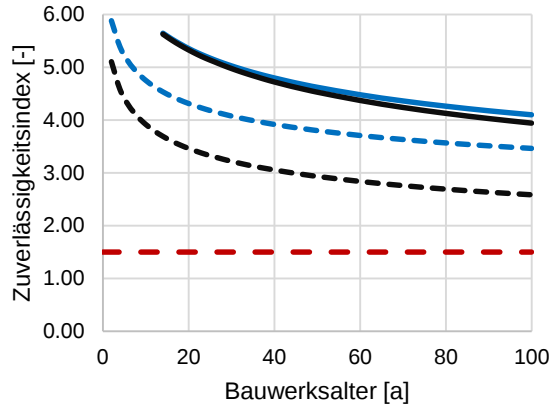
Brücken: Chloride vs. Entfernung von der Fahrbahn



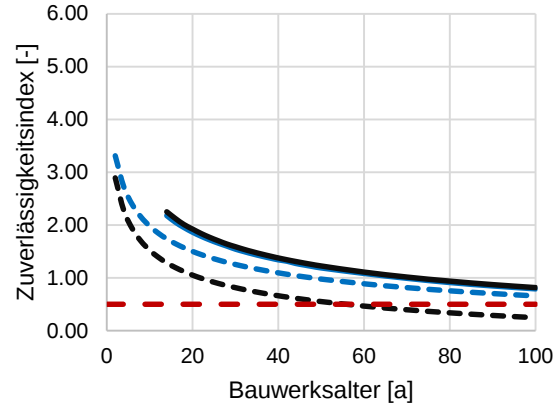
Dr.-Ing. Stefan Kubens (vdz)

Zuverlässigkeitsbetrachtungen „Depassivierung“

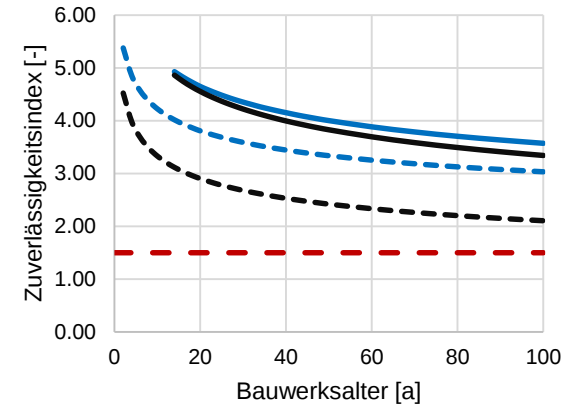
Brücke 2, Widerlager 1
(CEM III/A, XD1)



Brücke 2, Mittelpfeiler
(CEM III/A, XD3)



Brücke 4, Widerlager 2
(CEM II/A-S, XD1)



--- ME_Basis --- HE_Basis
— ME_Update — HE_Update
--- Kriterium ($\beta = 1,50$)

--- ME_Basis --- HE_Basis
— ME_Update — HE_Update
--- Kriterium ($\beta = 0,50$)

--- ME_Basis --- HE_Basis
— ME_Update — HE_Update
--- Kriterium ($\beta = 1,50$)

ME → mäßige Exposition
HE → scharfe Exposition

Fragestellung:

Was sind relevante Grenzzustände?

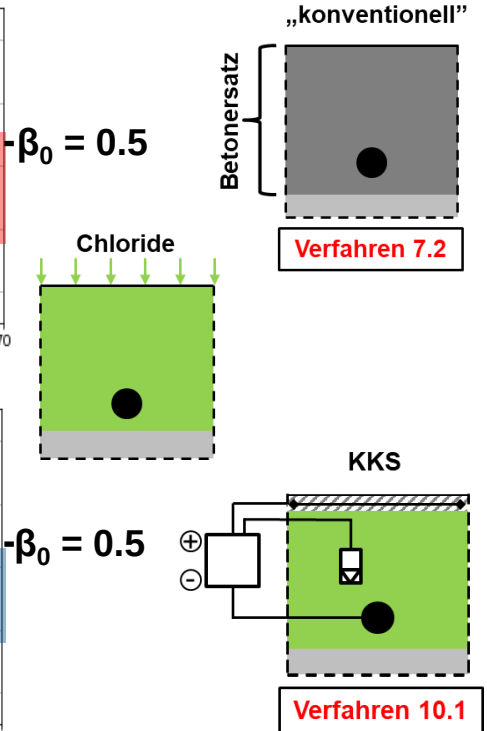
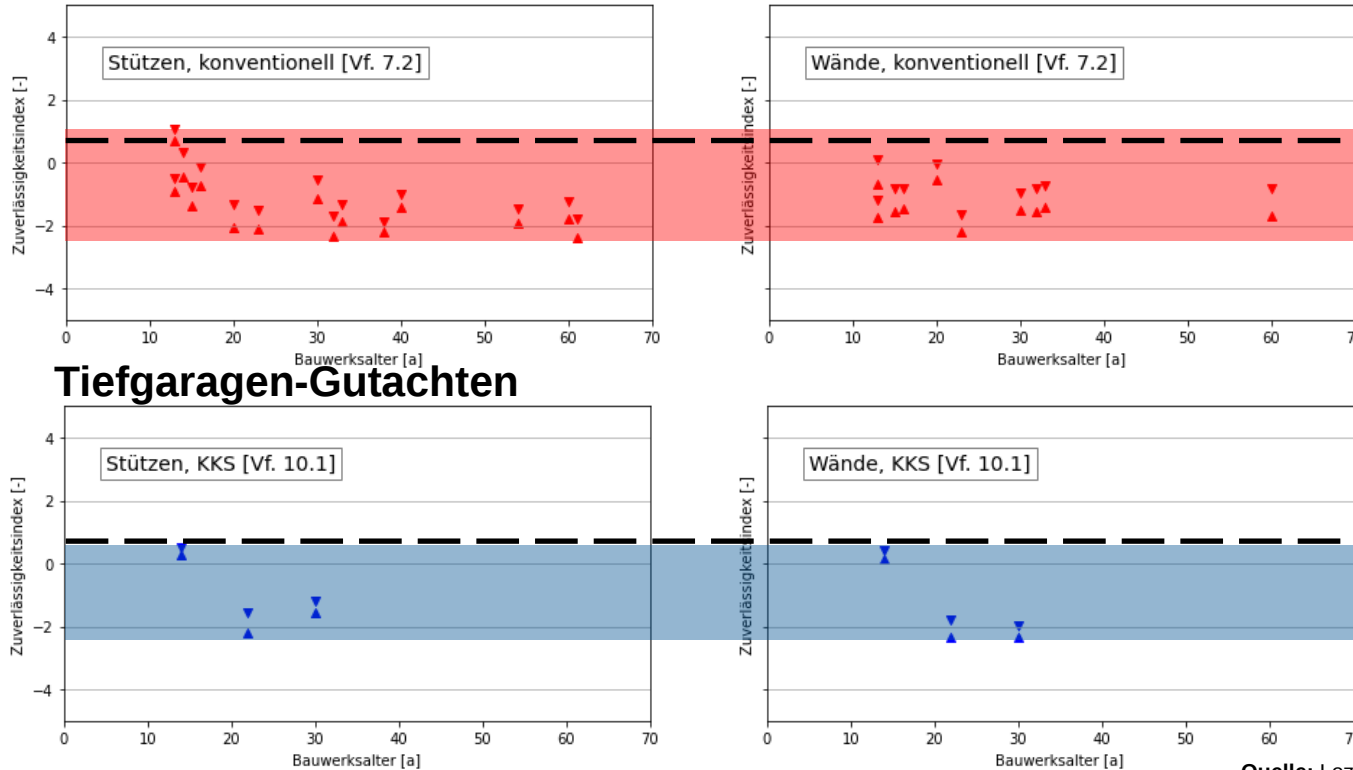
Wie hoch sind die mit einer Grenzzustandsüberschreitung verbundenen Konsequenzen (Kosten)?

Wie hoch ist der Aufwand, diese Konsequenzen durch höhere Materialwiderstände zu minimieren?

Welche Zuverlässigkeitsniveaus sind für die identifizierten, relevante Grenzzuständen angemessen?

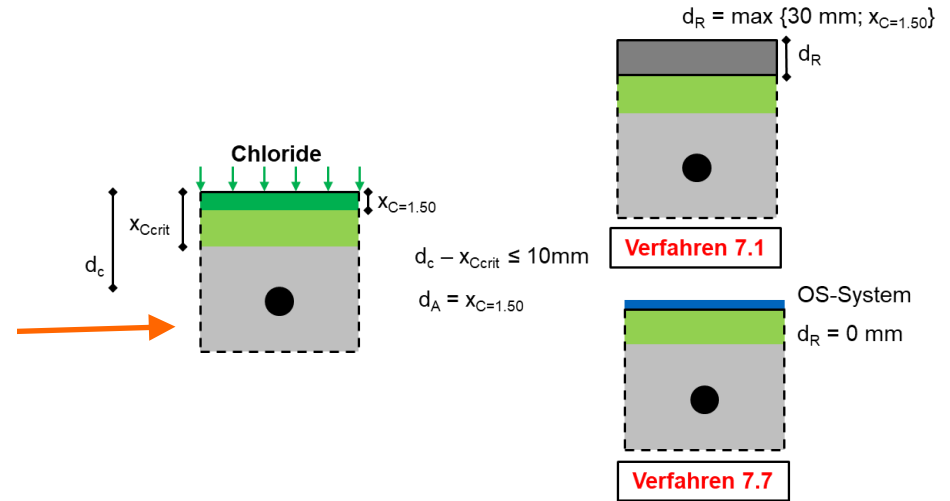
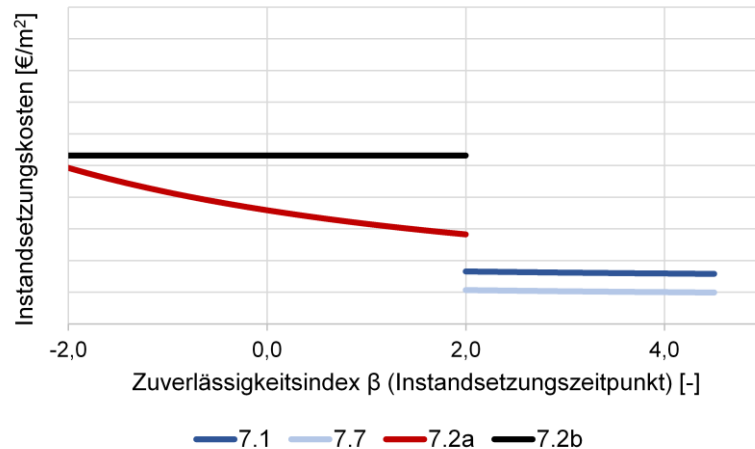


Bei welchen Zuverlässigkeiten wurden Bauwerke instandgesetzt? Mit welcher Methode?



Quelle: Lozano et al. (2023)

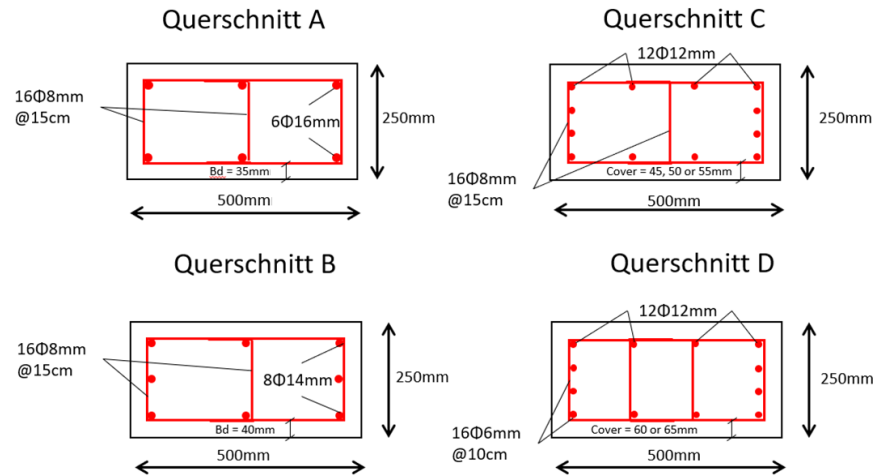
Instandsetzungskosten vs. Zuverlässigkeit auf Bauteilniveau (Fallstudie)



Höhere Zuverlässigkeit durch mehr Aufwand bei der Herstellung

- Die TG-Stützen mussten bereits nach 14 Jahren instandgesetzt werden ($-1,21 < \beta_{IS} < -0,79$).
- Betondeckung betrug rd. 30 mm,
- Betonrezept wahrscheinlich mit CEM I oder CEM II/A-LL,
- Fallstudie: **Hätte man mit einer anderen Rezeptur oder höheren Betondeckung die Instandsetzung vermieden?**
 - 7 verschiedene Rezepturen,
 - 7 verschiedene nominelle Betondeckungen,
 - bei gleichem Querschnitt und „statischer Leistung“ (Interaktionsdiagramm).

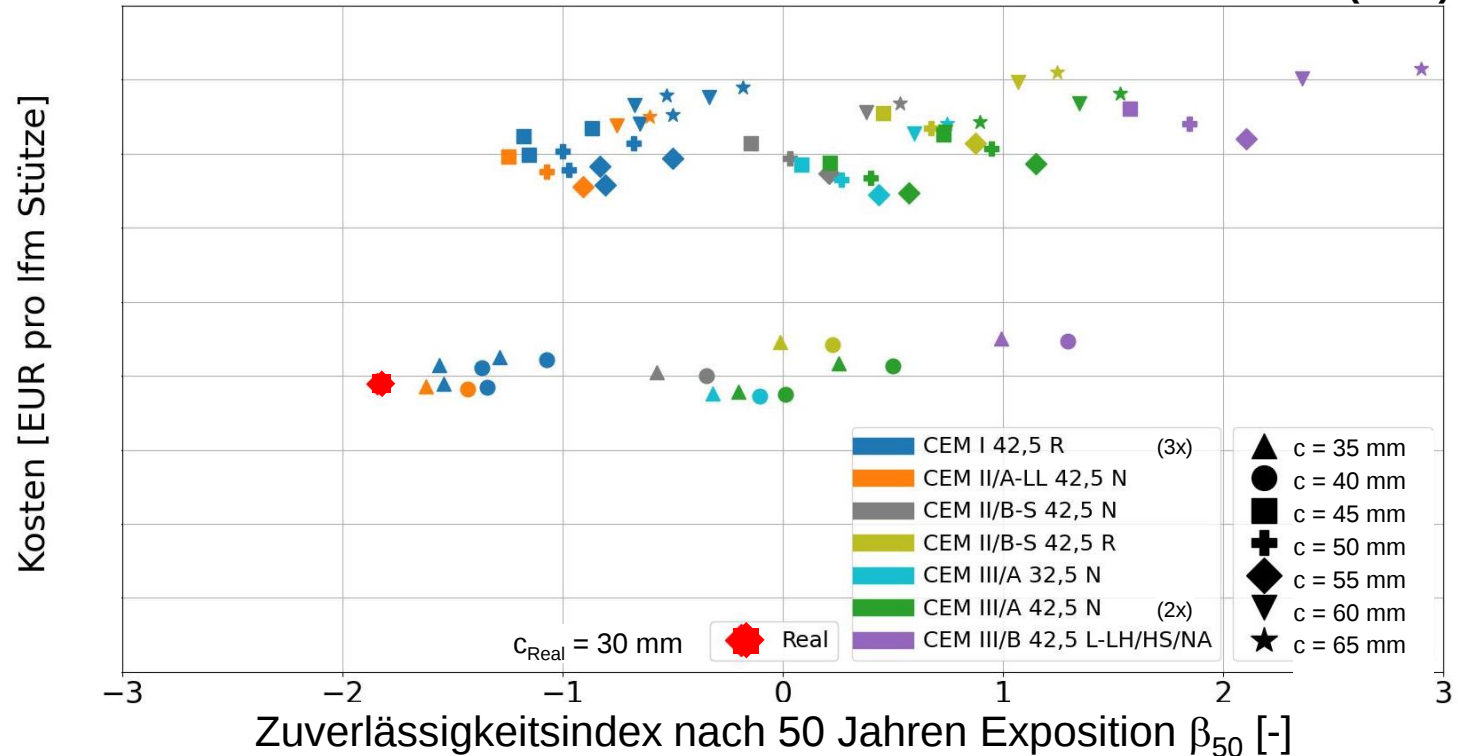
Juan D. Cassiani (HSU)



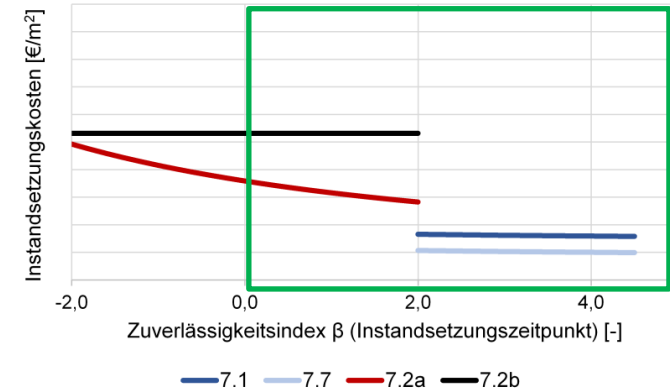
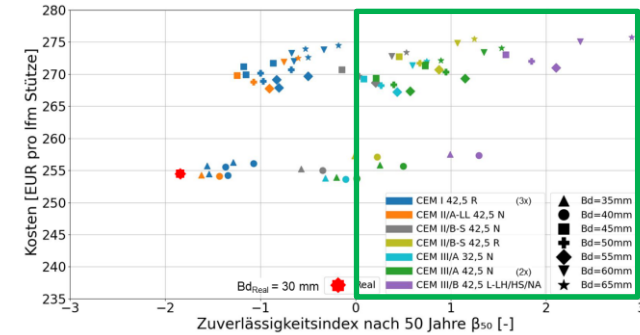
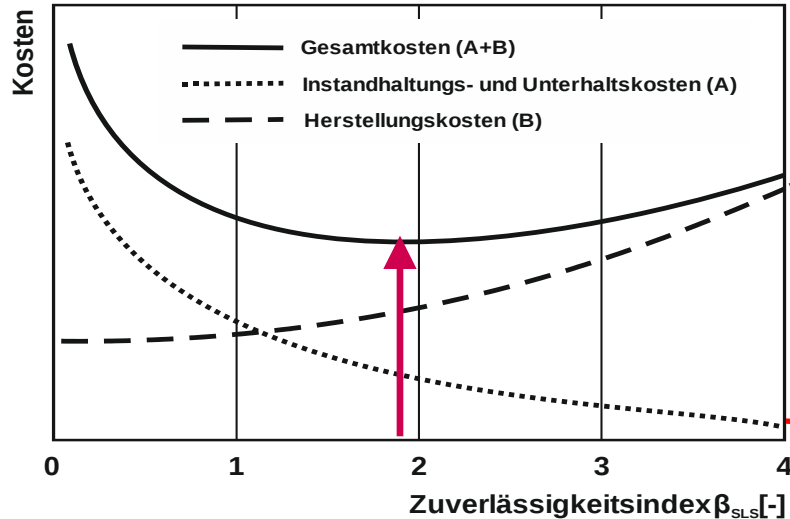
Querschnitt	Betondeckung [mm]
A	35
B	40
C	45,50 and 55
D	60 or 65*

Herstellungskosten vs. Zuverlässigkeitsindex nach 50 Jahren

Juan D. Cassiani (HSU)



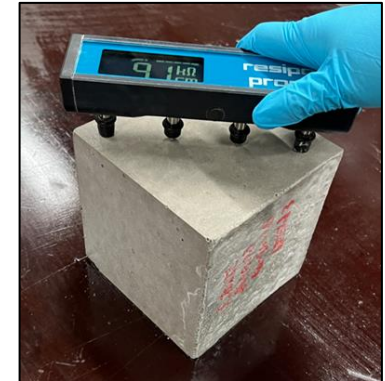
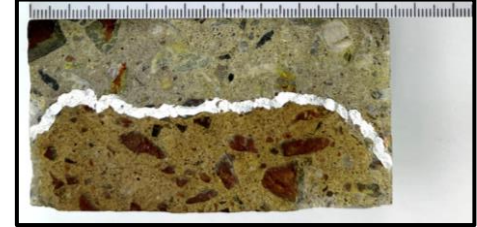
Optimierung: Gesamtkosten vs. Zuverlässigkeit



Fragestellung:

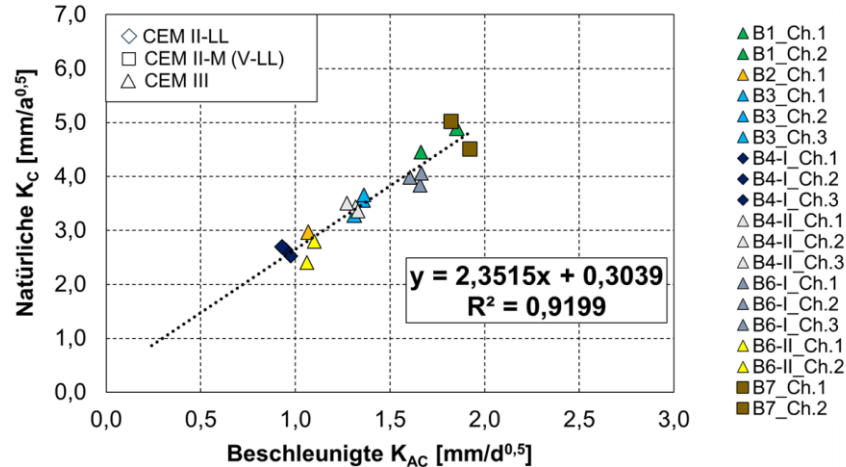
Welche Verfahren zur Verifikation des Materialwiderstandes auf der Baustelle sind als „Annahmeprüfung“ geeignet? (über die Druckfestigkeit und die Konsistenz hinausgehend, z. B. über direkte oder indirekte Prüfung des Carbonatisierungs- und Chlorideindringwiderstandes).

Welche Methoden zur nachträglichen Prüfung des bereits eingebauten Materialwiderstands am Bauteil sind verfügbar?



Welche Prüfverfahren eignen sich zur Verifizierung der dauerhaftigkeitsrelevanten Parameter?

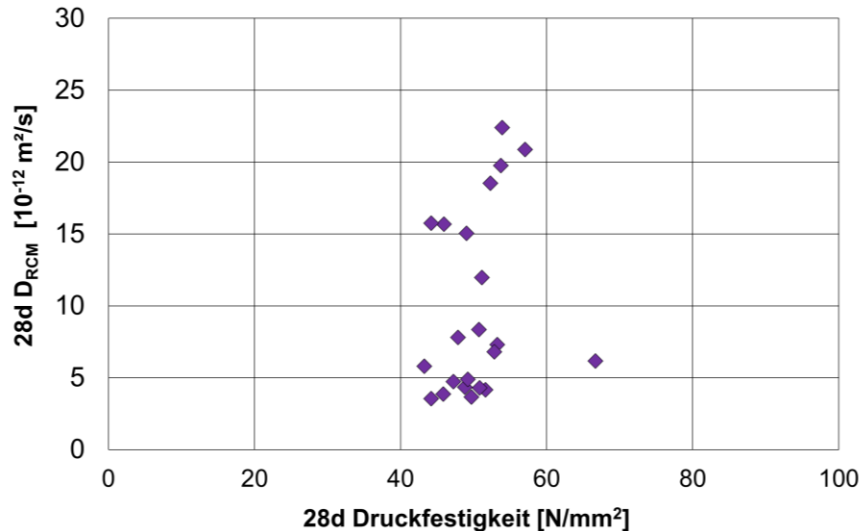
natürliche Karbonatisierung, K_C ↔ beschl. Karbonatisierung, K_{AC}



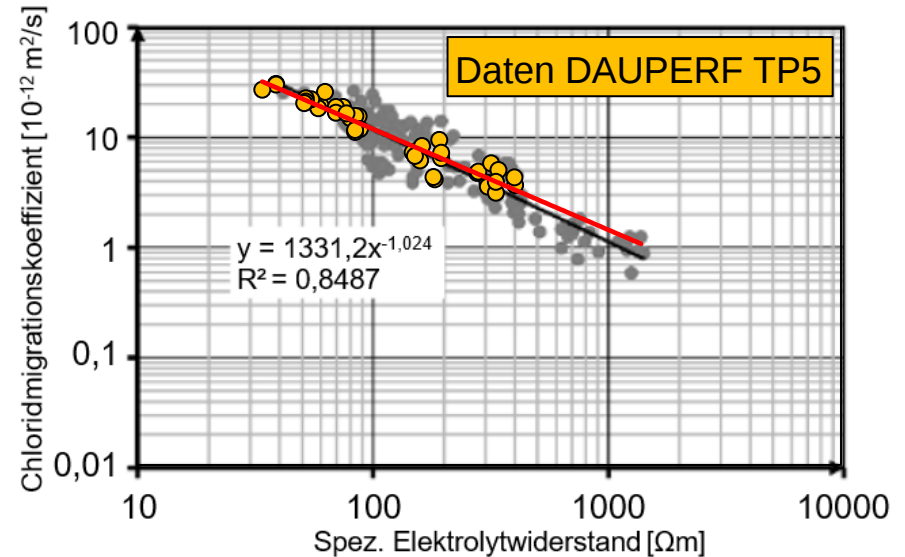
David Ov (RUB) & Juan Lozano (TUM)

Welche indirekte Verfahren eignen sich zur Verifizierung der dauerhaftigkeitsrelevante Parameter?

Chloridmigrationskoeff. $\leftrightarrow$ Druckfestigkeit



Chloridmigrationskoeff. $\leftrightarrow$ spez. Elektrolytwiderstand



David Ov (RUB) & Juan Lozano (TUM)

Quelle: Gehlen (2000)

Fazit „Lebensdauer“ (Planung, Ausführung)



- Mit deskriptiven Regeln in Deutschland erreichbare Zuverlässigkeitskorridore aus Modellrechnungen wurden durch Praxisbeobachtungen bestätigt! **Modellrechnungen in fib bulletin 76 damit repräsentativ!**
- Zuverlässigkeitskorridore sind breit!! **Material könnte wesentlich gezielter ausgewählt** und damit eine höhere Effektivität erreicht **werden!**
- **Grenzzustand Depassivierung sinnvoll** (weil darauf folgende Korrosionsmodellierung fehlt), darauf bezogene **Zuverlässigkeitsniveaus gut gewählt**, weil Instandsetzungen in der Praxis i.d.R. erst bei Zuverlässigkeiten $\beta < 0,5$ durchgeführt werden. Um Zuverlässigkeiten auf mindestens diesem Niveau für 50 Jahre sicherzustellen, ist die **Materialauswahl ein Stück weit einzuschränken** (deskriptive Regeln anpassen) .
- **Anwendbare Instandsetzungsmethoden abhängig vom Zustand, auch hier ein Zusammenhang zwischen Bauteilzuverlässigkeit und Instandsetzungskosten**
- **Abnahmeprüfungen** zur Bestätigung von erreichten Bauteilwiderständen **entweder nicht notwendig** (Zuverlässigkeitsniveau bei **Karbonatisierung** bereits sehr hoch), **oder für Chlorideindringwiderstände vorhanden** und praktikabel (in Grenzen trennscharf).

Nutzungsphase

Structural Health Monitoring, Research Unit CoDA (FOR 2825)

Genoa, 2018

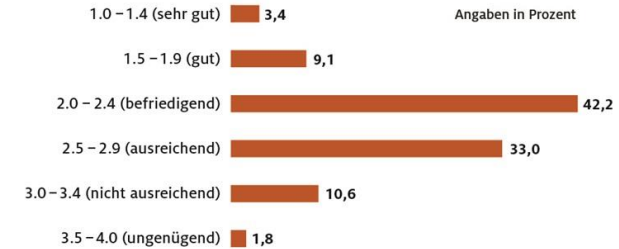


Dresden, 2024

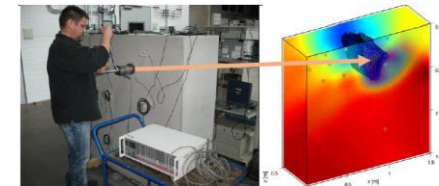


Germany, 11/2019

Inspection of
40,000 Bridges (BAST)

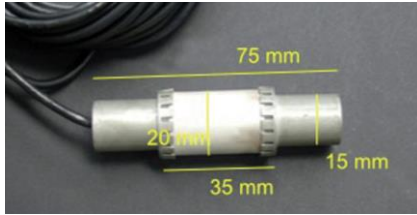


Visual Inspection
supported by...
Structural Monitoring
(CoDA)

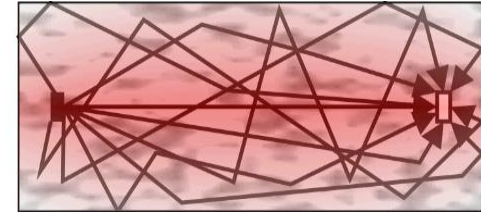
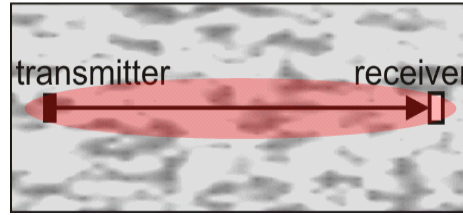


Coda Technology

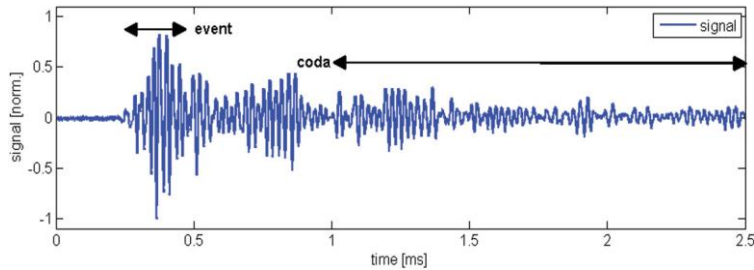
Ultrasound Transducer



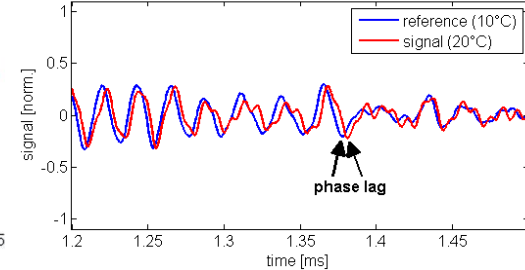
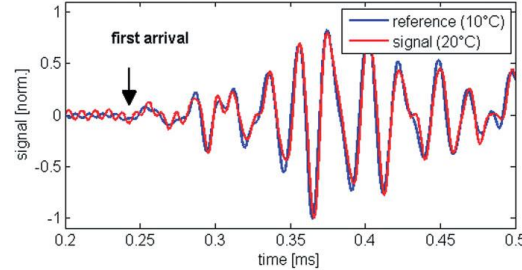
Wave Paths in a Heterogeneous Medium



Ultrasonic Signal



Phase Lag over Time



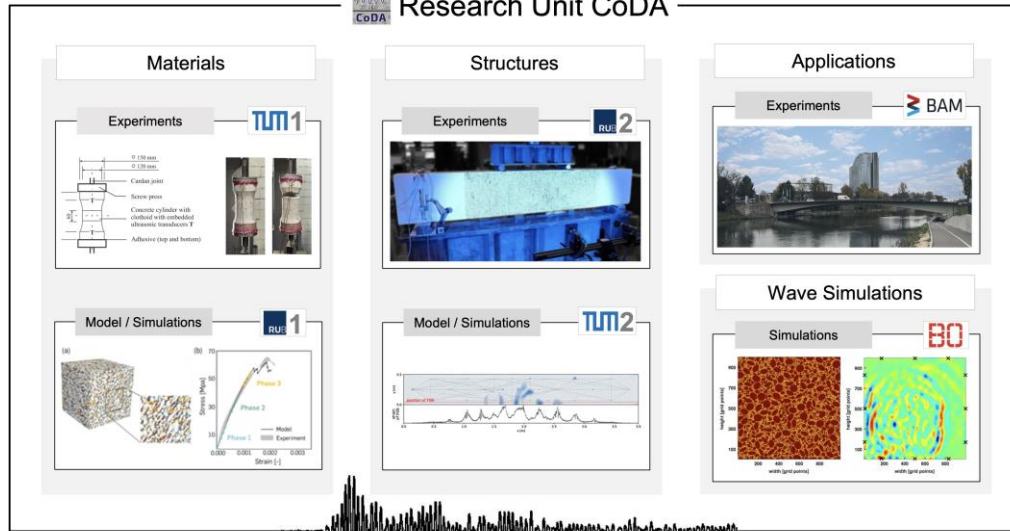
Fundamental Research since 2019 (CoDA, DFG)

1. Influence of Temperature and Moisture
2. Multiscale Materials Simulations
3. High-Performance wave propagation simulations
4. Structural scale experiments
5. Inversion and localisation using structural simulations
6. Deployment in Real Structures

The Research Unit CoDA and CoDA-AI



Research Unit CoDA



Core Competencies

- Material Scale Characterization (TU Munich)
- Multiscale Simulations (Ruhr Uni Bochum)
- CoDa Technology and application to real structures (BAM, Berlin)
- Wave Propagation Simulations (FH Bochum)
- Structural Scale Experiments (Ruhr Uni Bochum) and Simulations (TU Munich)
- Signal Processing and AI (TU Munich)

Spin-off Projects CoDA – AI

Chair for Signal Processing (TU Munich)

- ML for Signal Processing, Feature Extraction
- Generative Methods

Materials Science and Testing (TU Munich)

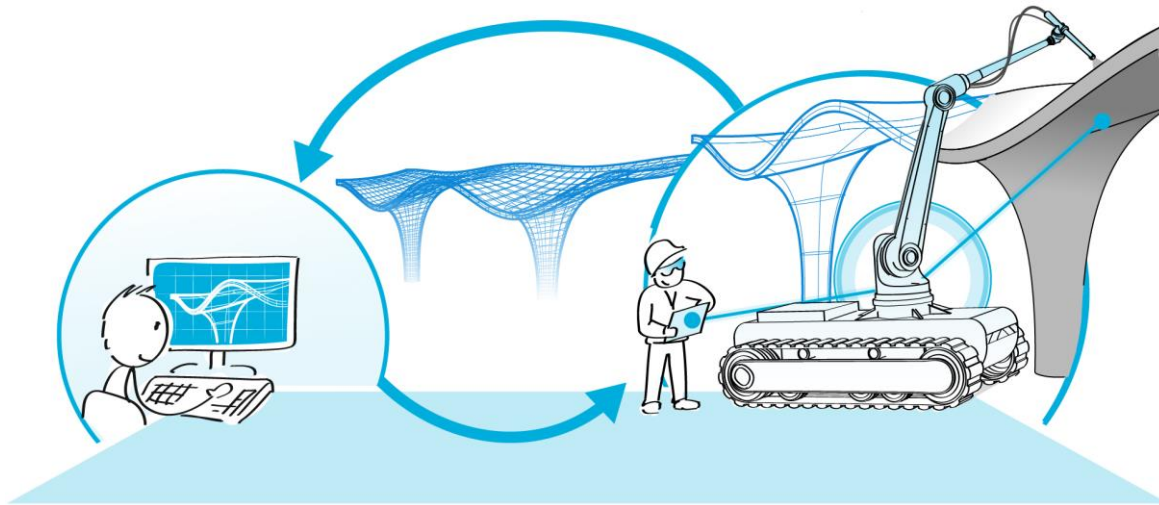
- Data generation
- Domain knowledge
- Application

Application Projects

- Gänstorbrücke, Ulm
- U-Bahnstation, Scheidplatz, Munich

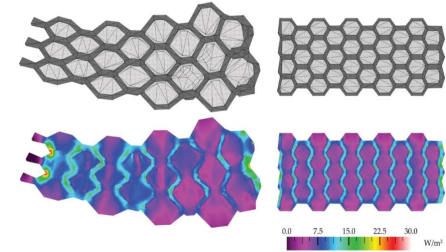
Technologien, Bauverfahren

zur Steigerung der Nachhaltigkeit des Bauen



/ Credit: TRR277

Funktionsintegration



Materialeffizienz



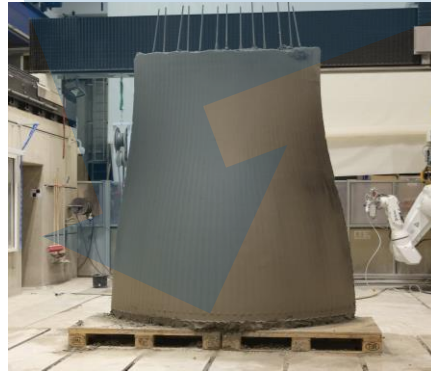


Bionically inspired column
(TU Munich 2017)

Meets

Deposition/Extrusion

Lab

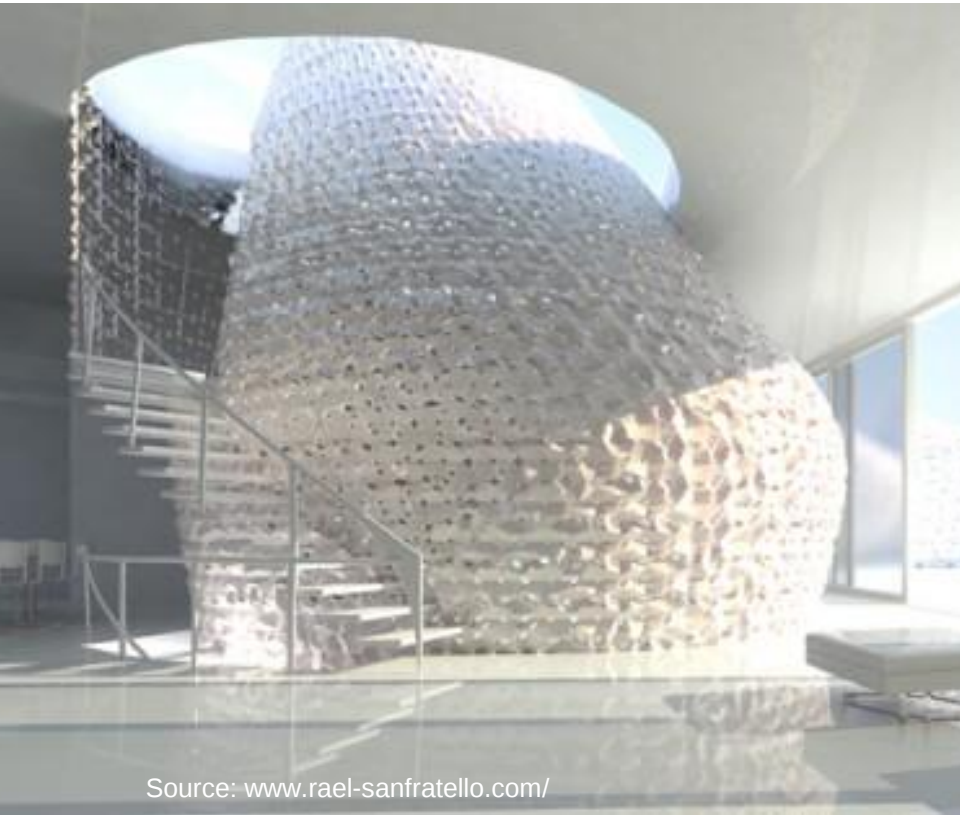


Curved wall element
(TU Braunschweig 2019)

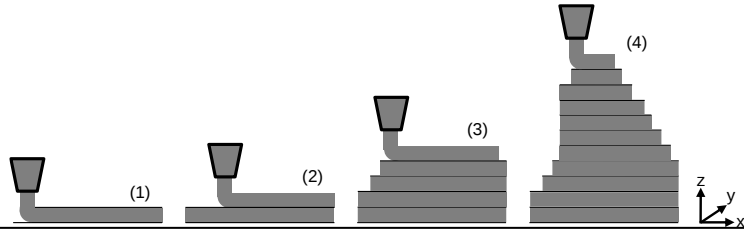
Field



Additive Manufacturing: The Challenge of Large Scale



AM of Concrete – Process Technology DEPOSITION



Deposition - Extrusion

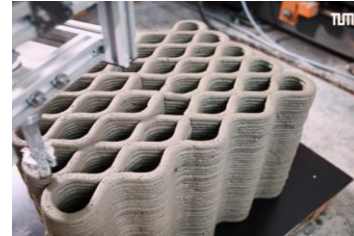


C. Matthäus



C. Matthäus

Requirements and relevant admixtures classes for extrusion



MIXING AND PUMPING

High fluidity, Mix stability,
Water retention

- PCEs,
- VMAs

DEPOSITION

Structural build-up,
Flocculation

- VMAs,
- Clays,
- Polymeric fibers,
- Entrained air

NEXT LAYERS

Green strength,
Shape accuracy,
Layer bonding

- PCEs,
- Retarders

BUILDING

Rapid strength gain,
Setting

- Clays,
- Accelerators,
e.g. C-S-H seeds,
inorganic salts, ...

HARDENING

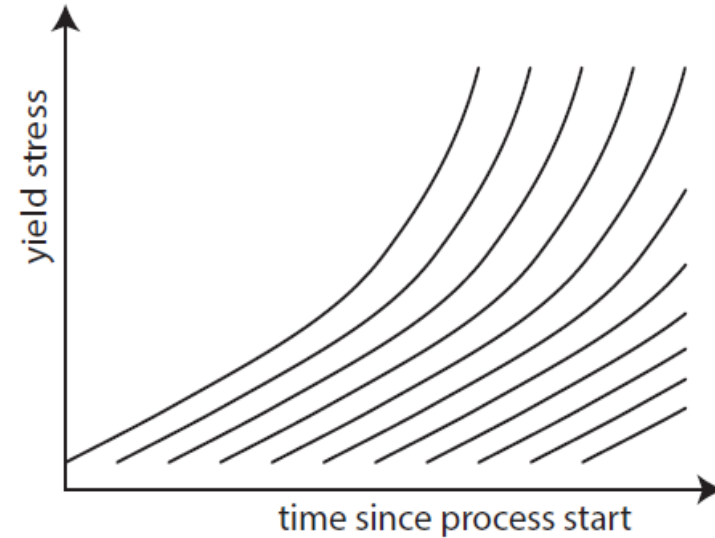
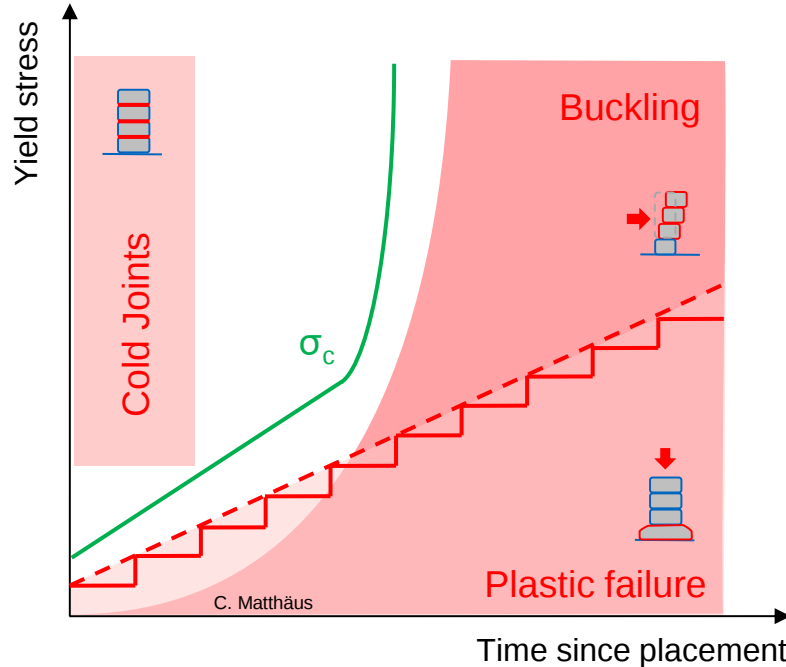
Curing, Strength,
Sustainability

- Saturated lightweight
aggregates,
- Shrinkage-reducing
admixtures

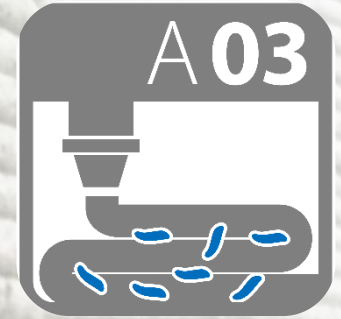
Failure mechanism – buckling failure



Needed: spatio-temporal control of visco-elastic properties



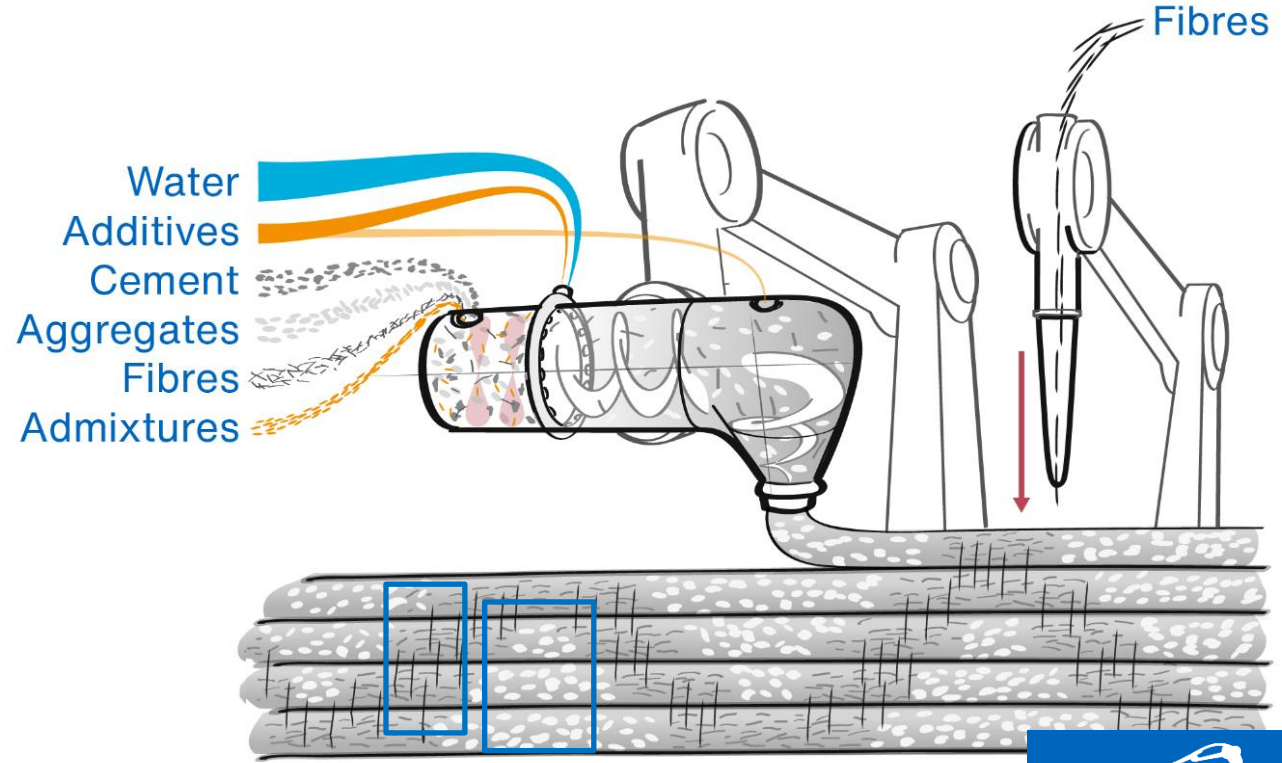
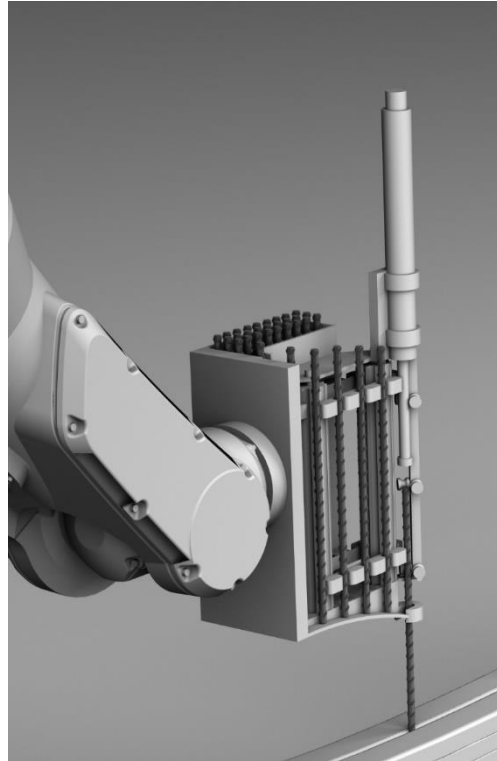
Reiter, 2019



Extrusion of nozzle-near mixed concrete – Individually graded in density and in rate of 3D fibre reinforcement

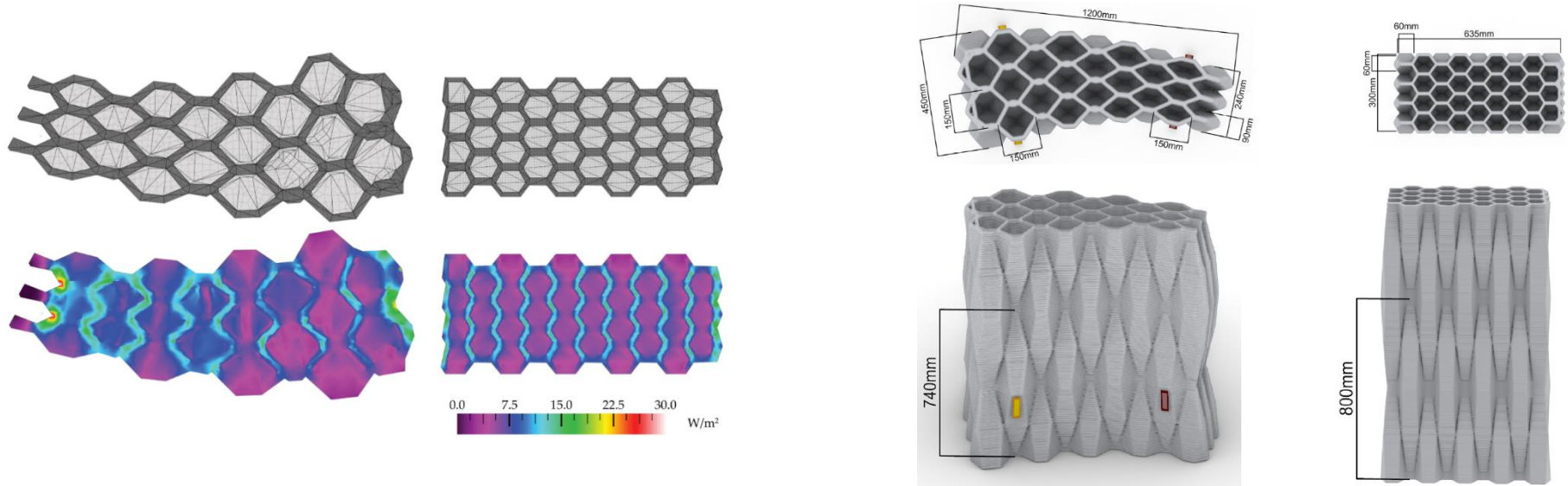
Chair of Materials Science and Testing, TUM
Chair of Materials Handling, Material Flow, Logistics, TUM

Basic research on gradation and reinforcement integration in extrusion



Concept near nozzle mixing / Credit: JRR277

Extrusion – Function integration with lightweight concrete



Figures of Paper “Thermal Optimization of Additively Manufactured Lightweight Concrete Wall Elements with Internal Cellular Structure through Simulations and Measurements”

David Briels, Stefan Kollmannsberger, Felicitas Leithner, Carla Matthäus, Ahmad Nouman, Oguz Oztoprak and Ernst Rank



Beiträge aus der Wissenschaft zur Steigerung der Nachhaltigkeit des Bauens

Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Christoph Gehlen

Technische Universität München

TUM-School of Engineering and Design

Department of Materials Engineering

Centrum Baustoffe und Materialprüfung

Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung

DAfStb-Forschungskolloquium, Berlin, 16. Oktober 2024

