

# Dauerhaftigkeit Beton nach dem Performance-Prinzip – Wissenschaftliche Grundlagen

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

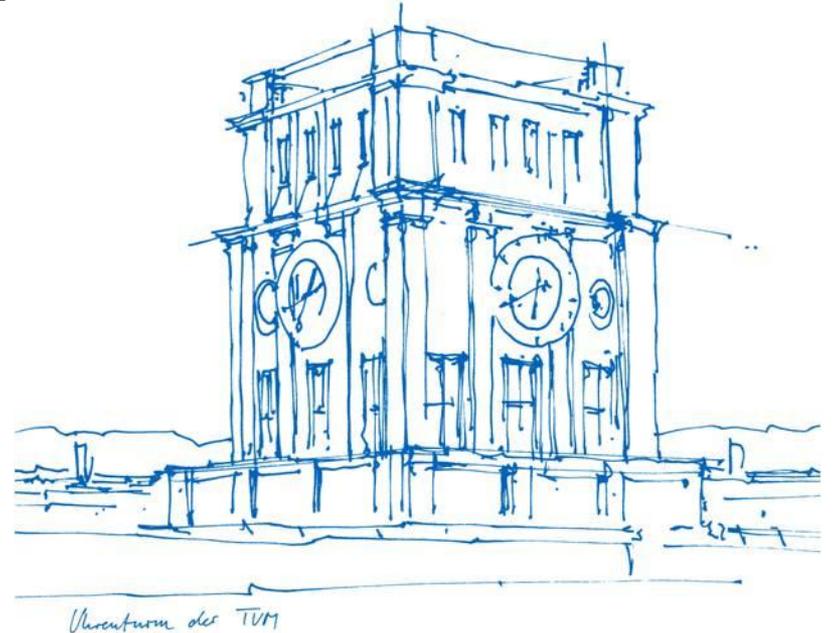
Technische Universität München

TUM School of Engineering and Design

Centrum Baustoffe und Materialprüfung

Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung

DAfStb-Fachkolloquium, Berlin, 21. Mai 2025



# Dauerhaftigkeit 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.“

# Flowchart for service life design, ISO 16204

Strategy 1: Design to resist deterioration

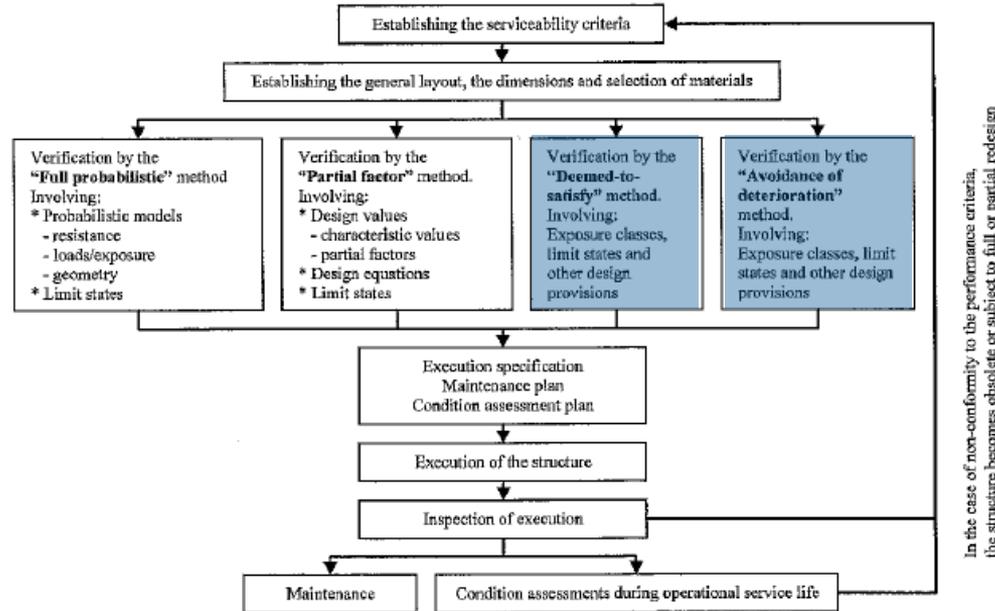
Level 1 Full probabilistic method (option 1)

Level 2 Partial factor method (option 2)

Level 3 Deemed-to-satisfy method (option 3)

Strategy 2: Avoidance-of-deterioration method, (option 4)

**Verification!**



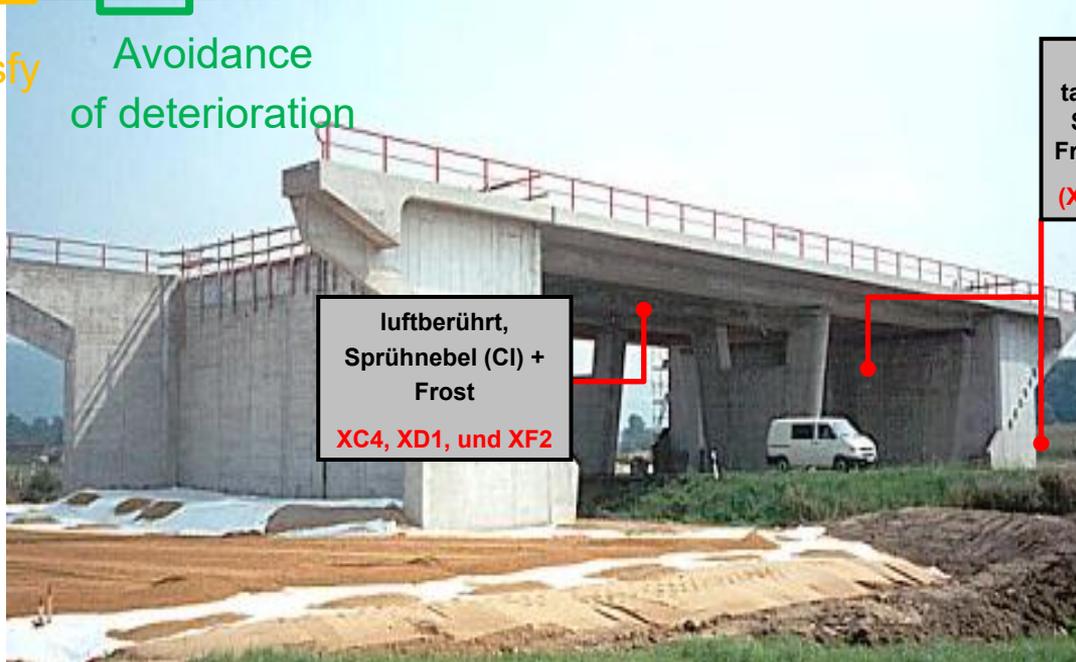
# Beispiel unterfahrene Brücke

XC, XD/XS: Betondeckung nach DIN 1045-1

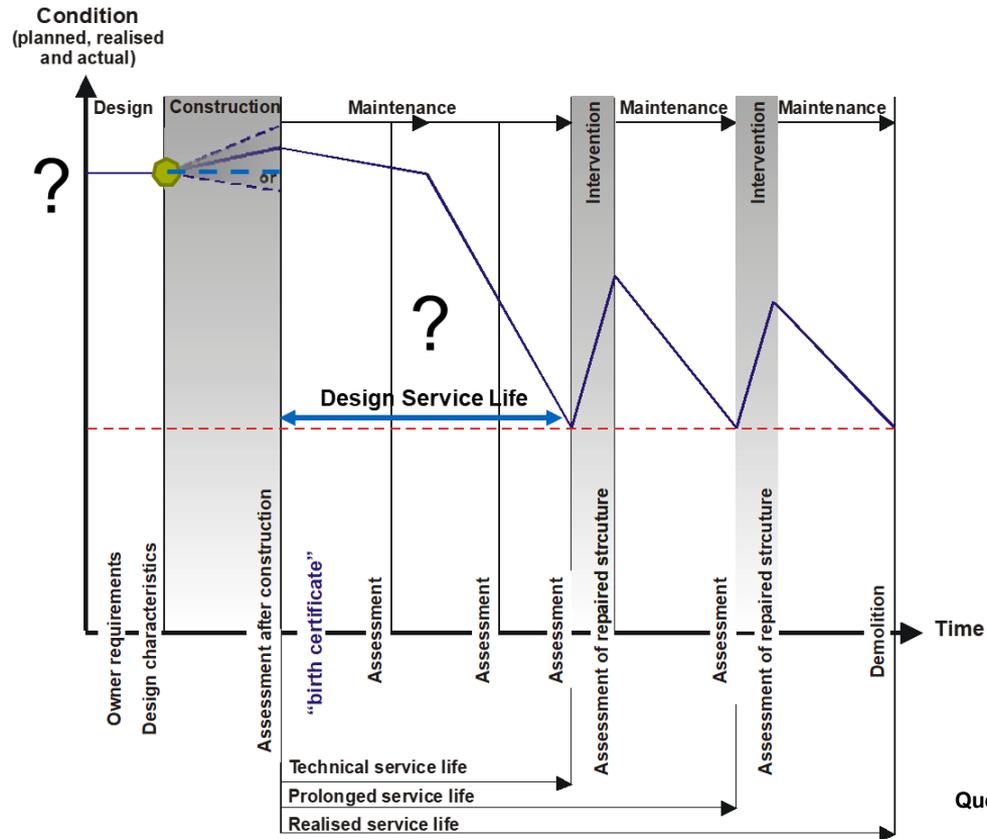
XC, XD/XS und XF: Betontechnische Maßnahmen nach DIN 1045-2

Deemed-to-satisfy

Avoidance  
of deterioration



# Bauwerkszustand vs. Zeit



Quelle: fib bulletin 59 (2011)

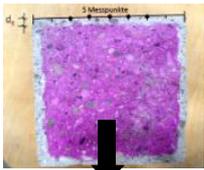
# Leistungsbezogener Dauerhaftigkeitsnachweis

## Durability design

## Structural design

**Carbonation resistance class**  
(material resistance class)

**Strength class**



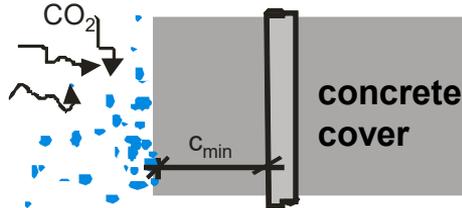
classification:  
Material testing

RC ?

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)

# Bemessung gegenüber Lasteinwirkungen

Nachweis des Bauteil-/Bauwerksverhaltens unter vorgegebenen Einwirkungen  
„Performance“ - Konzept

## Basis

- Sicherheitskonzept auf probabilistischer Grundlage,
- wirklichkeitsnahe Klassifizierung der Einwirkungen,
- Stoffgesetze, d. h., Bemessung (Nachweis des Verhaltens) unter Zugrundelegung von Modellen,
- Materialwiderstände quantifizierbar, Eingangsparemeter im Modell.

weitgehend abgesicherte Stoffgesetze

**mathematische Modelle**

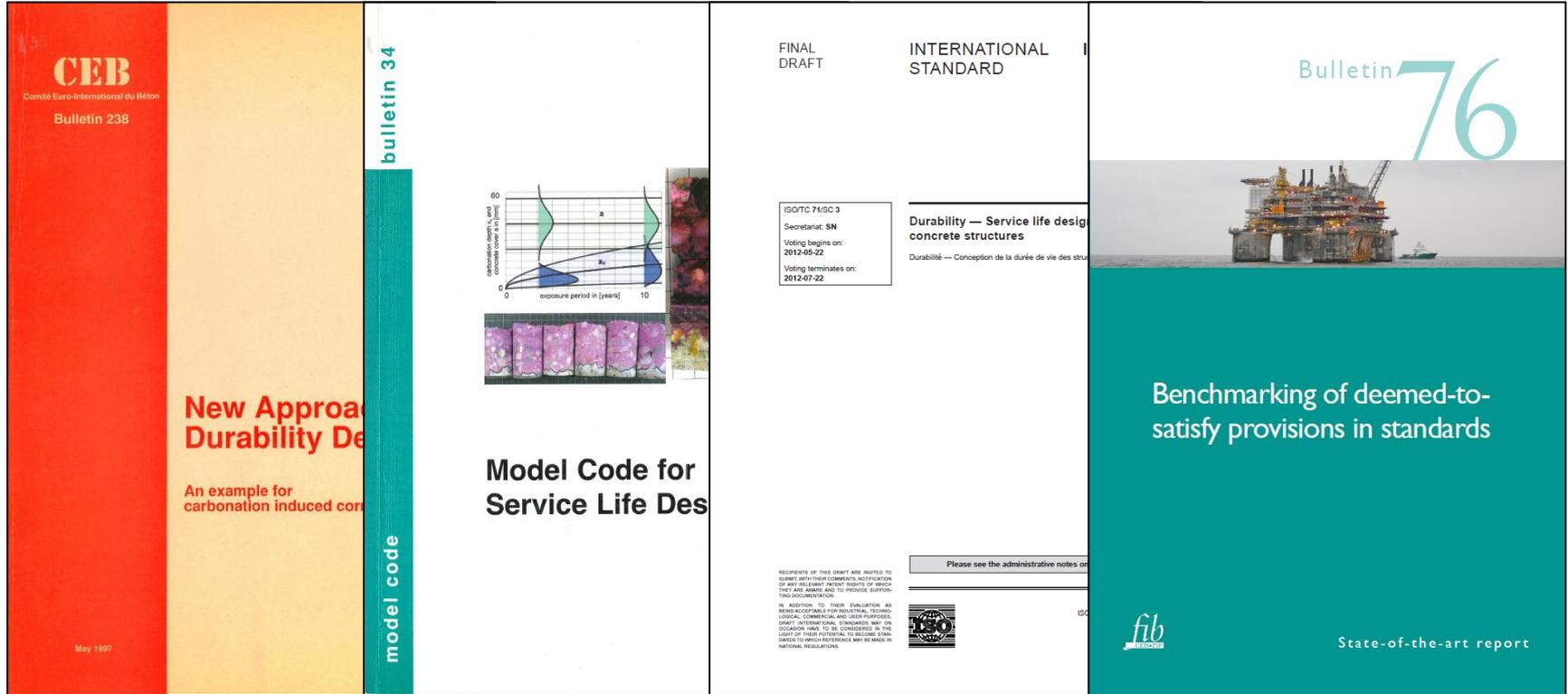
nachvollziehbar quantifizierte Bauteilbeanspruchungen und -widerstände

**Bemessungsregeln (Einwirkung) plus Prüfverfahren (Widerstand)**

Sicherheitskonzept auf probabilistischer Basis

**Bemessungsregeln (Zielzuverlässigkeiten)**

# Historische Entwicklung



1997 CEB bulletin

2006 fib Model Code SLD

2012, ISO 16204

2016 fib bulletin

# fib bulletin 76: Wie dauerhaft bauen wir mit unseren Bemessungsregeln in Europa?



Europaweit z. T. sehr unterschiedliche deskriptive Regeln, obwohl die regelnden Länder in unmittelbarer Nachbarschaft zueinander leben (z. B. Deutschland, Dänemark, Niederlande).

# Modell und Modelleingangswerte

Bemessungsregel Deutschland für XC4 (DIN 1045-2: 2008, DIN 1045-1: 2008)

Deutschland	$w/z_{\max}$	Mindestzementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{ck, \min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	(a=) $c_{\text{nom}}$ [mm]
XC4	0,60	280	C25/30	$c_{\min} + \Delta c = 40$

freie Bindemittelwahl

$$g(X, t) = k_{\text{NAC}} \cdot \sqrt{2 \cdot (k_e \cdot k_c \cdot k_a \cdot \sqrt{t})} \cdot W(t) \cdot a$$

relative Luftfeuchtigkeit, Beregnung

„günstiges Szenario“



CEM I 32,5 R,  
w/z = 0,60

$$k_{\text{NAC}, m} = 4,0 \text{ mm/a}^{0,5}$$

Material

„ungünstiges Szenario“



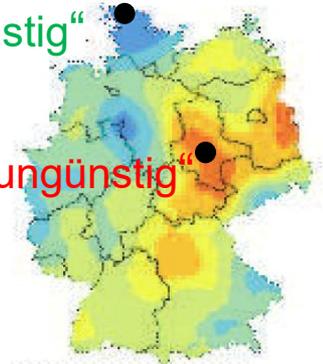
CEM III/B 32,5 R,  
w/z = 0,60

$$k_{\text{NAC}, m} = 7,0 \text{ mm/a}^{0,5}$$

Umweltbedingungen

„günstig“

„ungünstig“



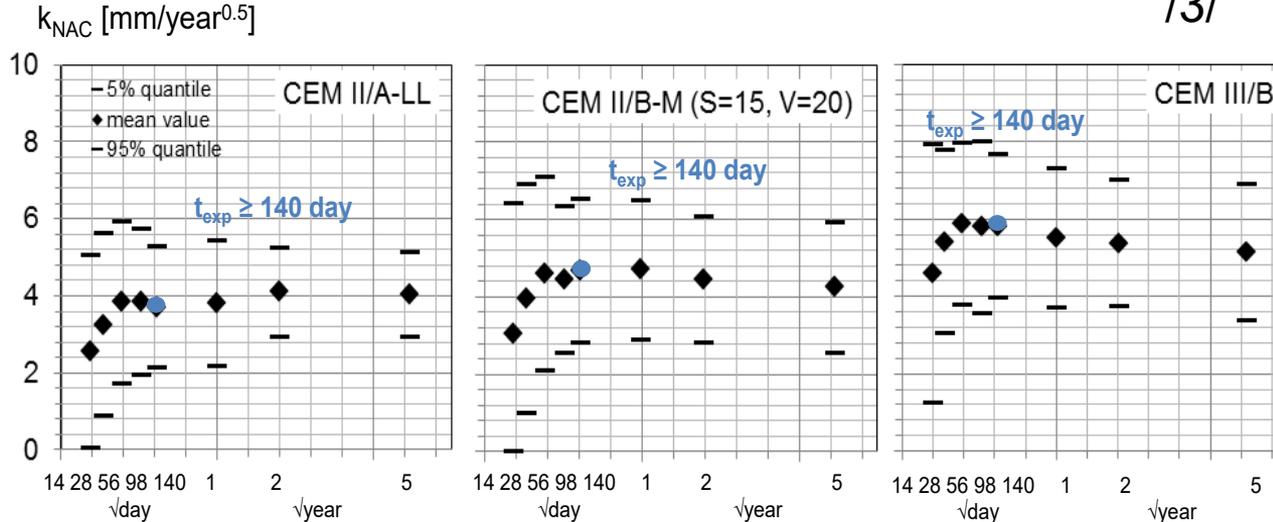
# Eingangswert „Karbonatisierungsrate“ ( $k_{NAC}$ )

Curing	7d
Climate chamber	Temperature at $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ; relative humidity at $65 \pm 5\%$ r. h.; $\text{CO}_2$ -concentration at $0.040 \text{ vol.-%} \pm 0.001 \text{ vol.-%}$ with no variation outside $0.040 \text{ vol.-%} \pm 0.005 \text{ vol.-%}$ .
Specimen	Concrete beams : h = 100 mm, b = 100 mm, l = 500 mm
Measurement	Carbonation depth at 40 measuring points, 5 on each face of each, excluding edges etc.
Indicator	1% phenolphthalein solution
Exposure time	$t_{exp} = 140 \text{ d}$ and at least 2 mm carbonation depth, extrapolation model Eq.(1)
Determination of carbonation rate $k_{NAC,i}$ [mm/year <sup>0.5</sup> ]	$k_{NAC,i} = \frac{d_{k,m}(t_{exp})}{\sqrt{t_{exp}}}$ <p><math>t_{exp}</math>: time to natural <math>\text{CO}_2</math>-exposure [years], <math>d_{k,m}</math>: average measured carbonation depth of tested mix at exposure time <math>t_{exp}</math> [mm]</p>

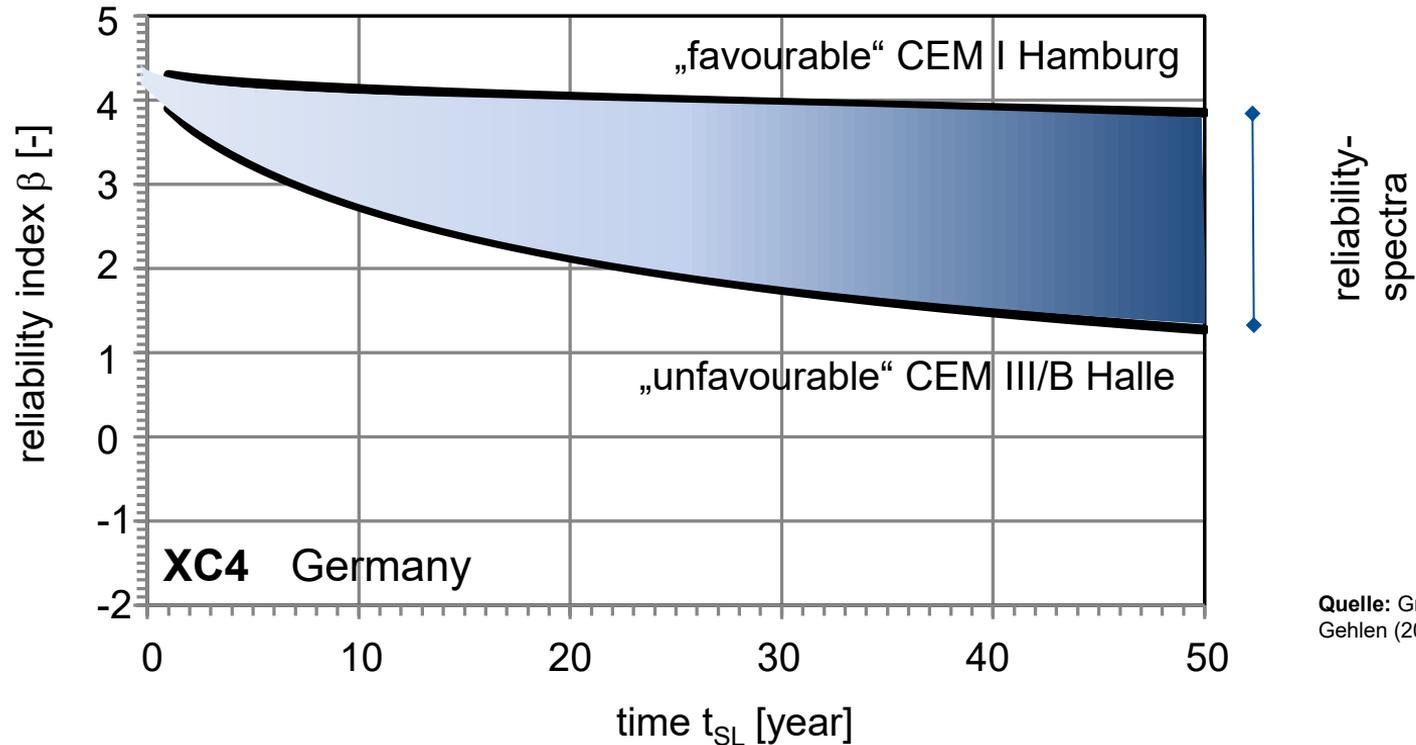
z.B.

$$k_{NAC} = \frac{3,4 \text{ mm}}{\sqrt{\frac{140 \text{ d}}{365 \text{ d}}}} = 5,5 \text{ mm}/\sqrt{\text{a}}$$

/3/

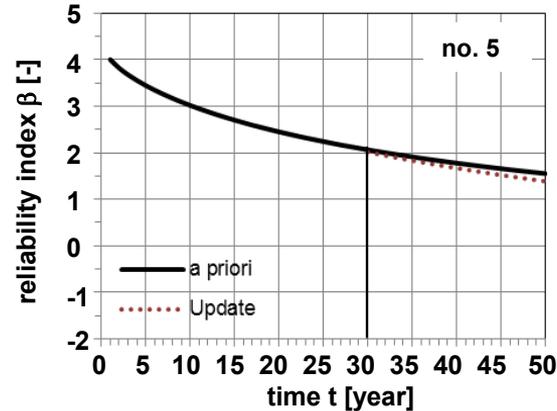
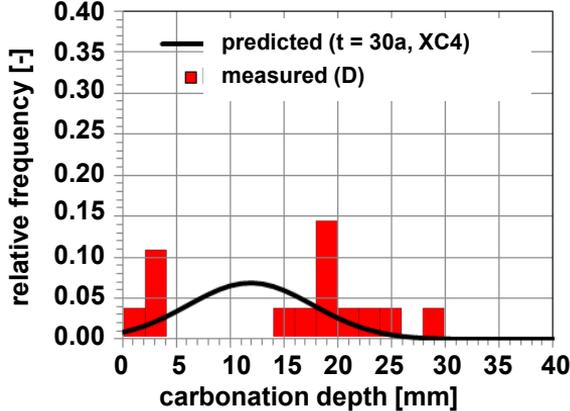
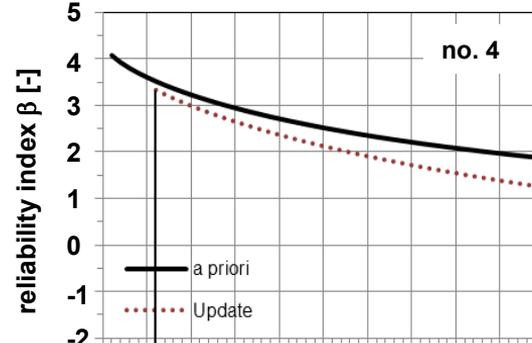
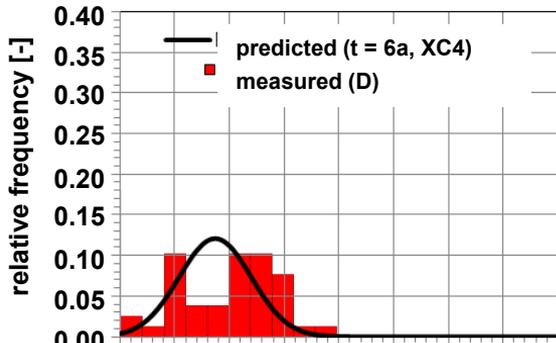


# Zuverlässigkeit vs. Zeit



Quelle: Greve-Dierfeld & Gehlen (2016)

# Validierung der Ergebnisse an realen Bauwerken

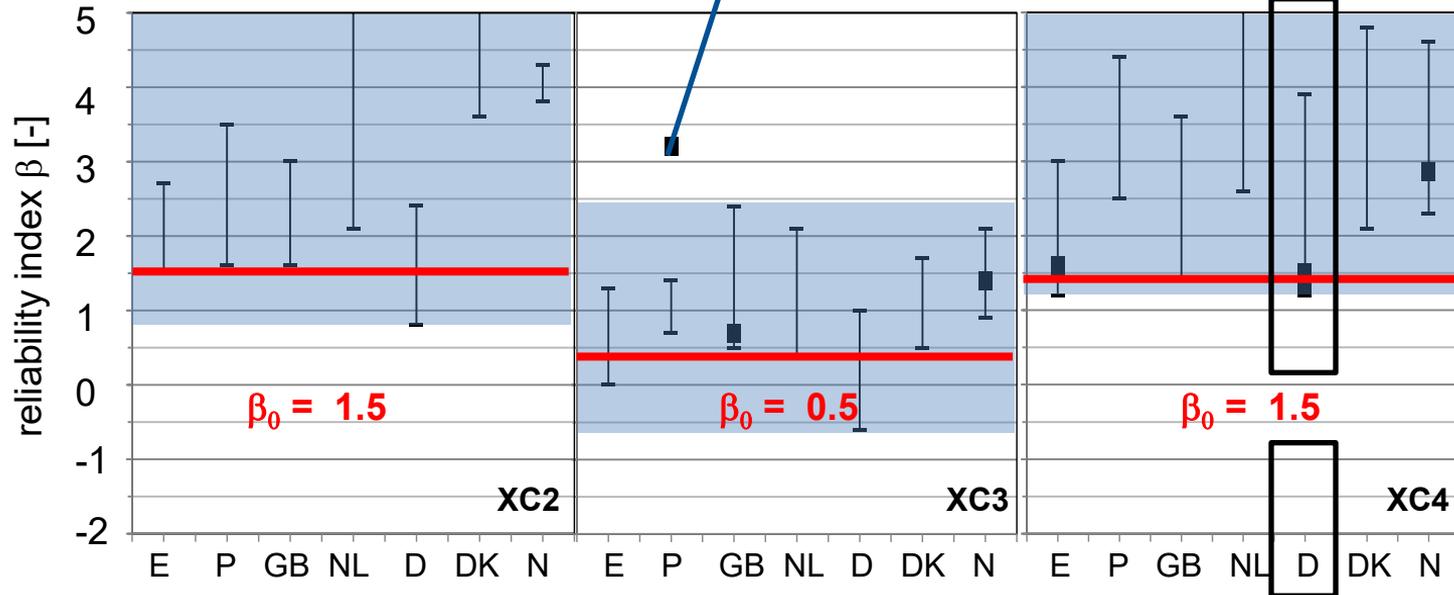


Quelle: Greve-Dierfeld, Dissertation (2015)

# Erreichbare bzw. erreichte Zuverlässigkeiten in XC

$t_{SL} = 50 \text{ y}$

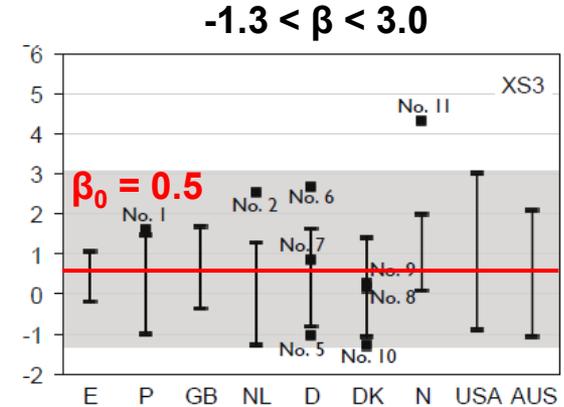
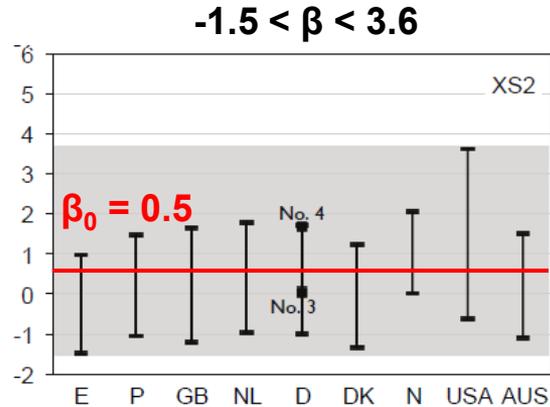
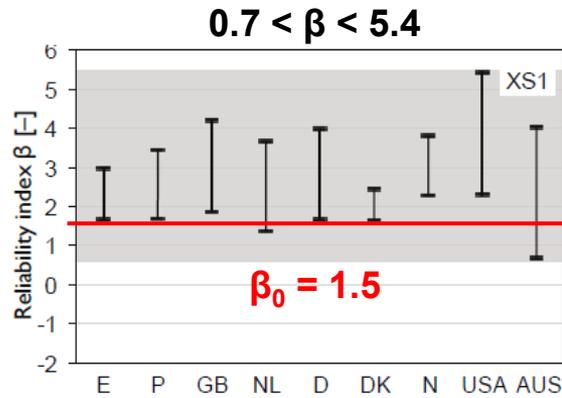
Brücke über einem Fluss in Portugal



Quelle: Gehlen & Greve-Dierfeld (2013)

# Erreichbare bzw. erreichte Zuverlässigkeiten in XS

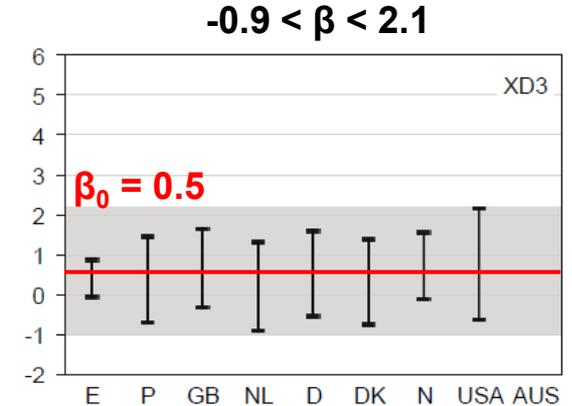
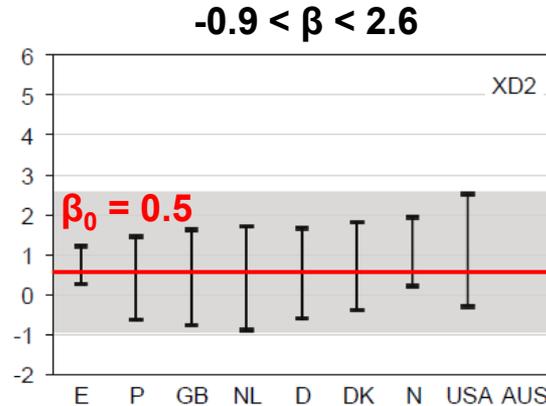
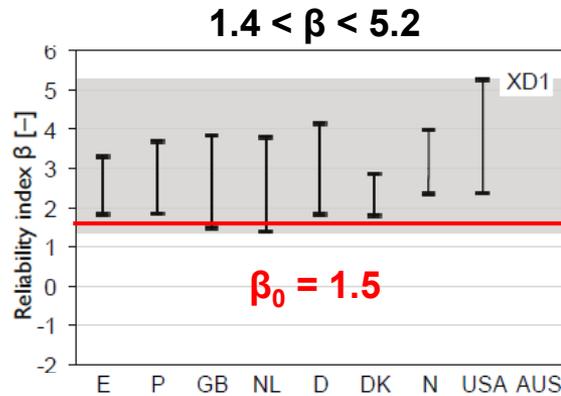
$t_{SL} = 50 \text{ y}$



Quelle: fib bulletin 76 (2015)

# Erreichbare bzw. erreichte Zuverlässigkeiten in XD

$t_{SL} = 50 \text{ y}$



Quelle: fib bulletin 76 (2015)

# Offene Fragen:

**Sind die Berechnungen wirklich repräsentativ?**

**Was sind geeignete Grenzzustände?**

**Welche Zielzuverlässigkeiten sind für die identifizierten, relevanten Grenzzustände angemessen?**

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

**Welche Verfahren zur Verifikation des Materialwiderstandes auf der Baustelle sind als „Annahmeprüfung“ geeignet?**

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

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



## Projekt

## Inhalt

## AiF-FV

## Forschungsstellen

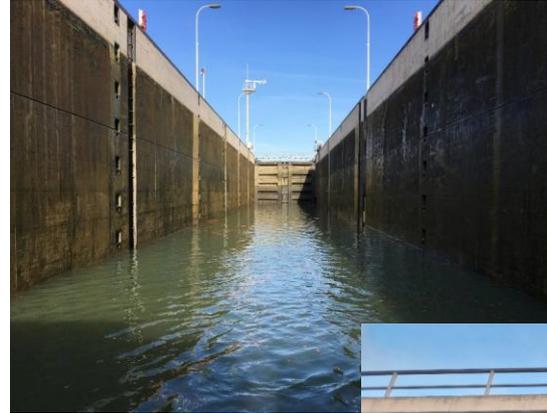
- |    |   |
|----|---|
| P1 | <i>Objektsammlung, Zustandserfassung eines repräsentativen Bauwerksbestandes</i>                      |
| P2 | <i>Grenzzustände / erforderliche Zuverlässigkeiten</i>  |
| P3 | <i>Bewertung von Laborprüfverfahren</i>   |
| P4 | <i>Klassifikation Materialwiderstände, Produktionskontrolle,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



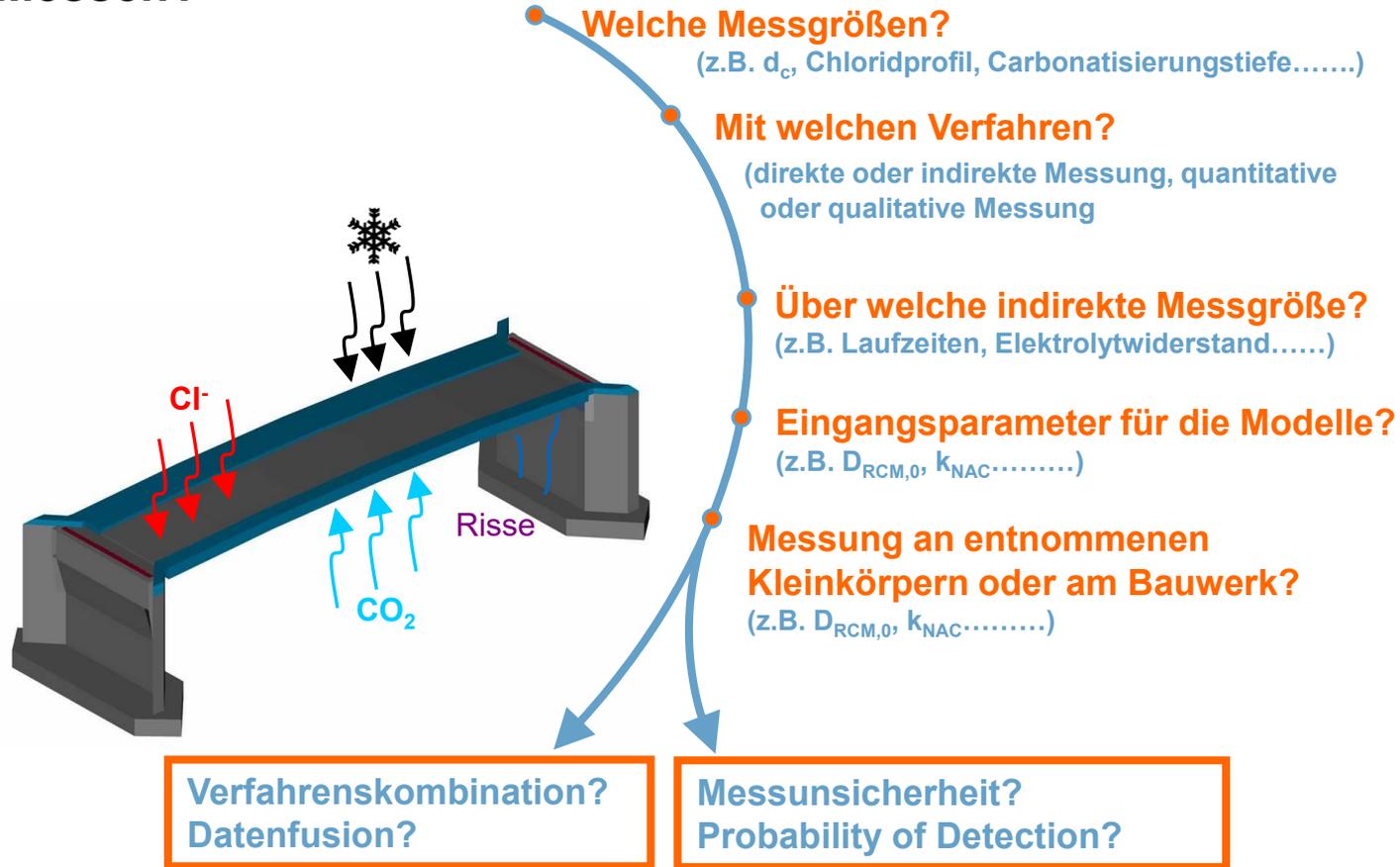
# TP 1: Objektsammlung, Zustandserfassung eines repräsentativen Bauwerksbestandes

## Fragestellung:

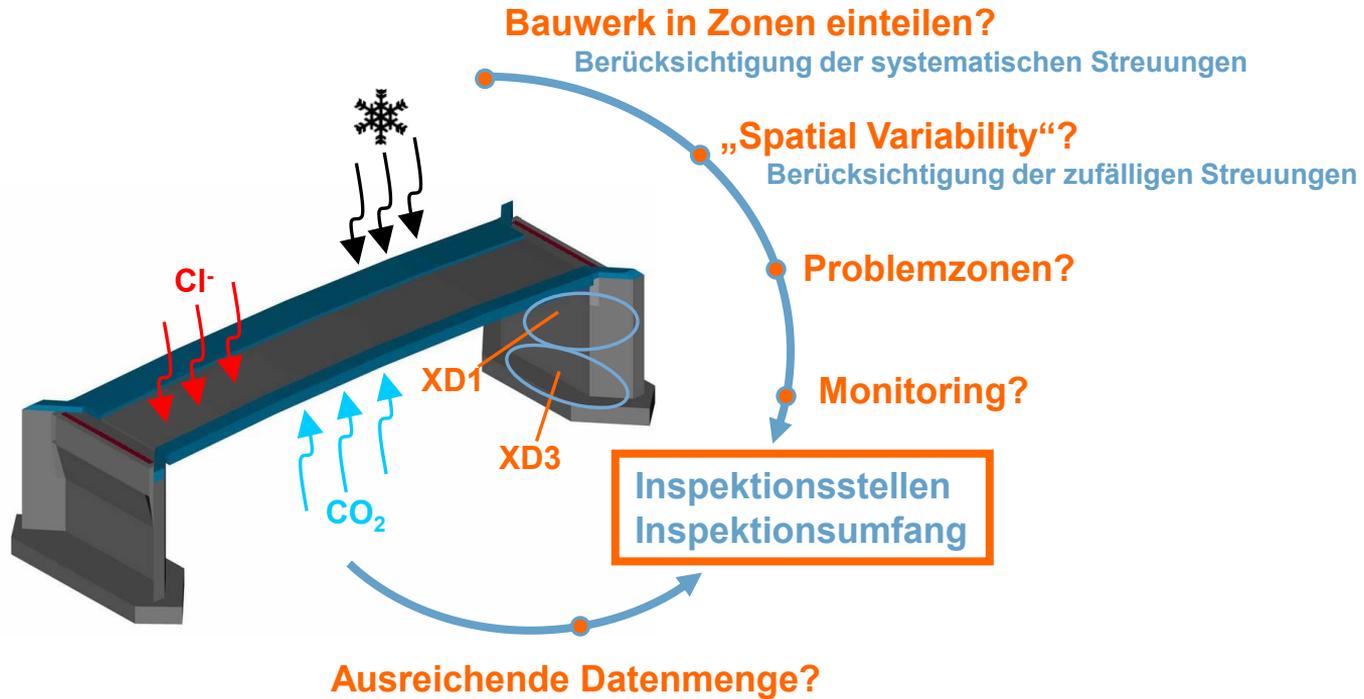
Wie hoch sind die erreichten Zuverlässigkeiten eines repräsentativen Bauwerksbestandes, geplant und erbaut auf Grundlage der DIN 1045:2001, hinsichtlich eines Grenzzustandes „Depassivierung der Bewehrung“?



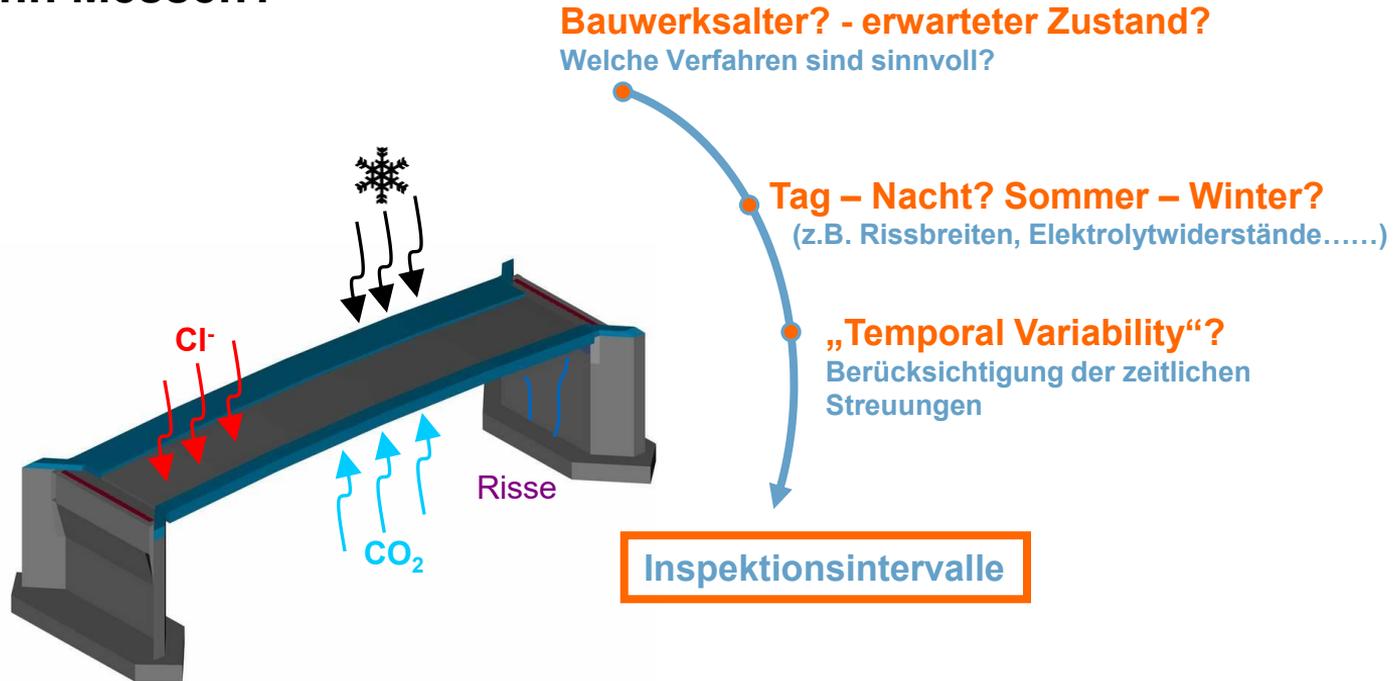
# Was Messen?



# Wo messen? – Wie oft messen?

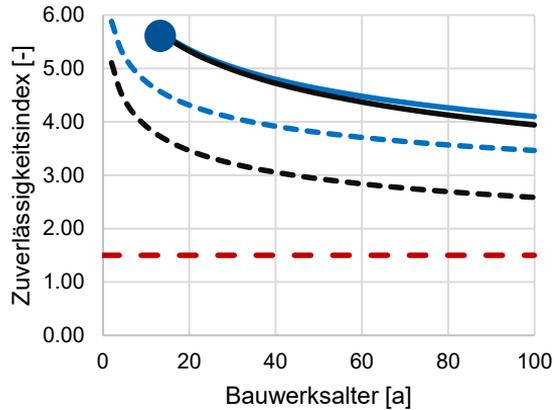


# Wann Messen?

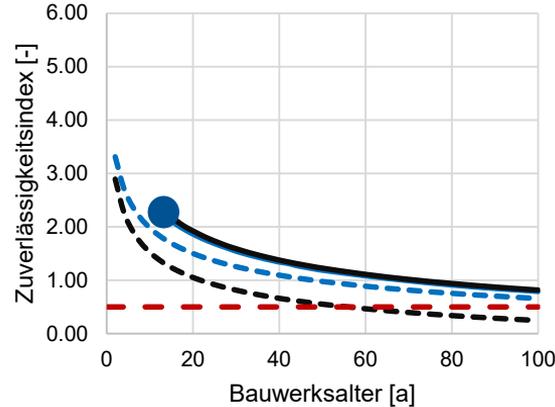


# Brücken: Ermittelte Zuverlässigkeiten Exp. XD1/ XD3

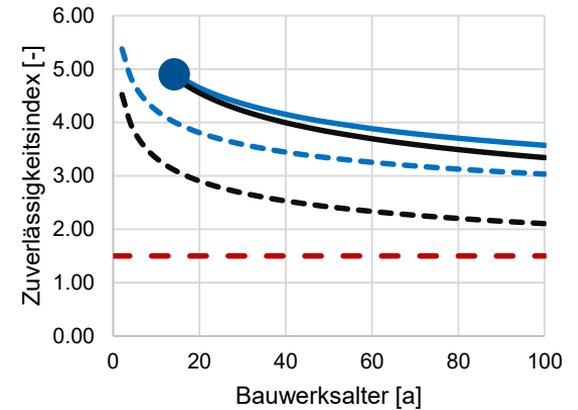
**Brücke 2, Widerlager 1  
(CEM III/A, XD1)**



**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 ( $\beta = 0,50$ )

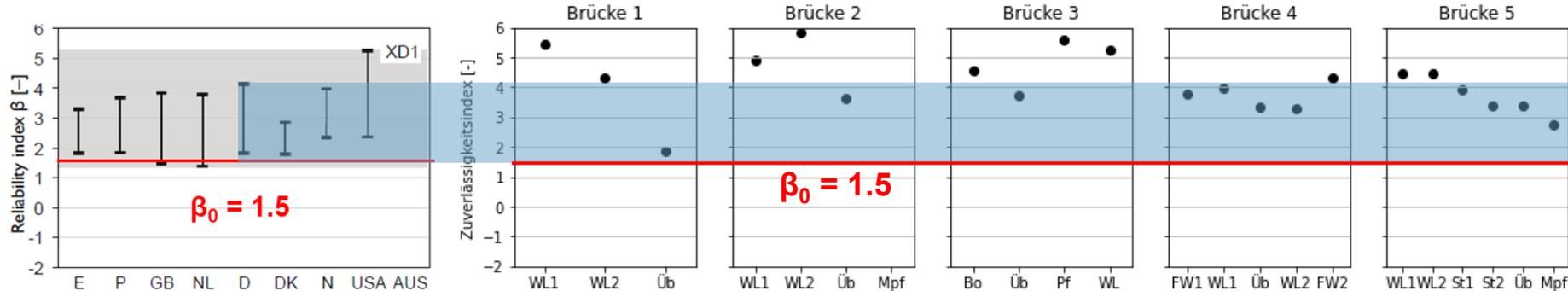
--- ME\_Basis      - - - HE\_Basis  
 — ME\_Update      — HE\_Update  
 - - - Kriterium ( $\beta = 1,50$ )

**ME** → mäßige Exposition  
**HE** → scharfe Exposition

# Brücken: Ermittelte Zuverlässigkeiten Exp. XD1/XD3

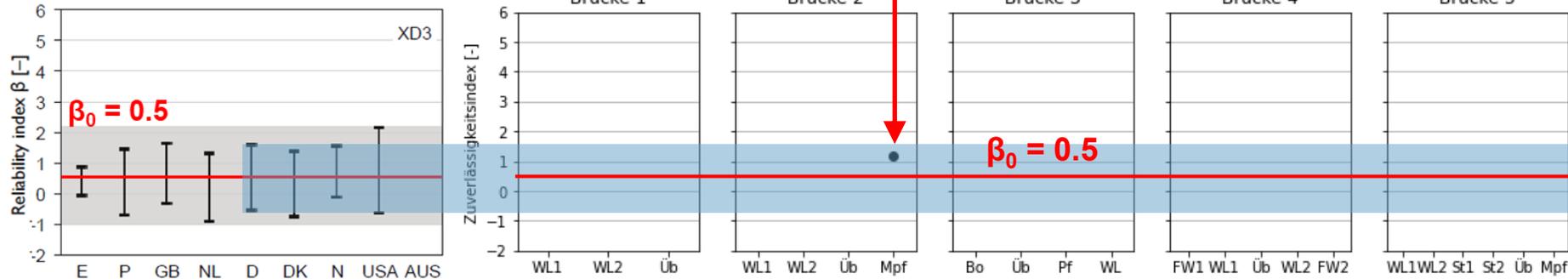
$t_{SL} = 50 \text{ y}$

Legende: WL: Widerlager; Üb: Überbau; Mpf: Mittelpfeiler, St: Stütze



a-priori fib bulletin 76

a-posteriori DAUPERF TP1



# TP 2: Grenzzustände / erforderliche Zuverlässigkeiten

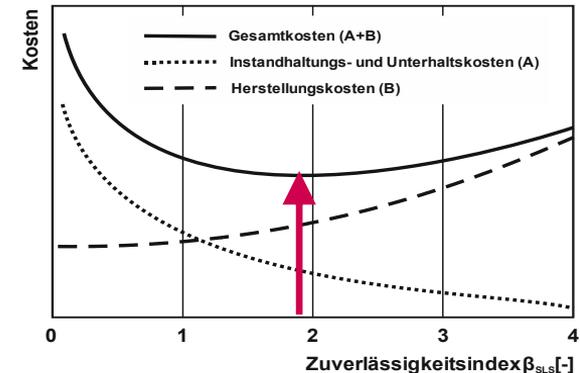
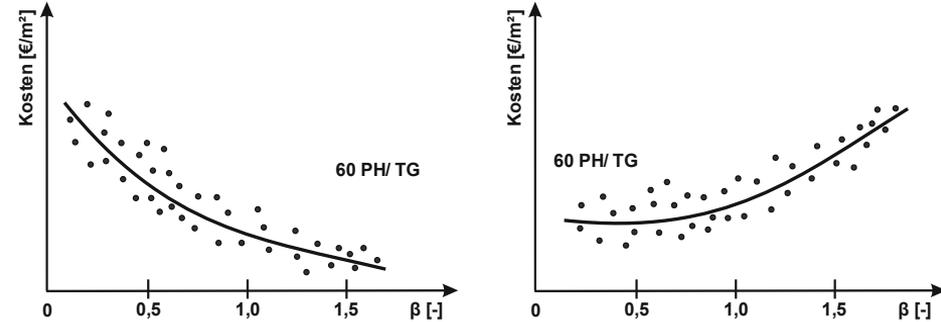
## Fragestellung:

Was sind geeignete Grenzzustände?

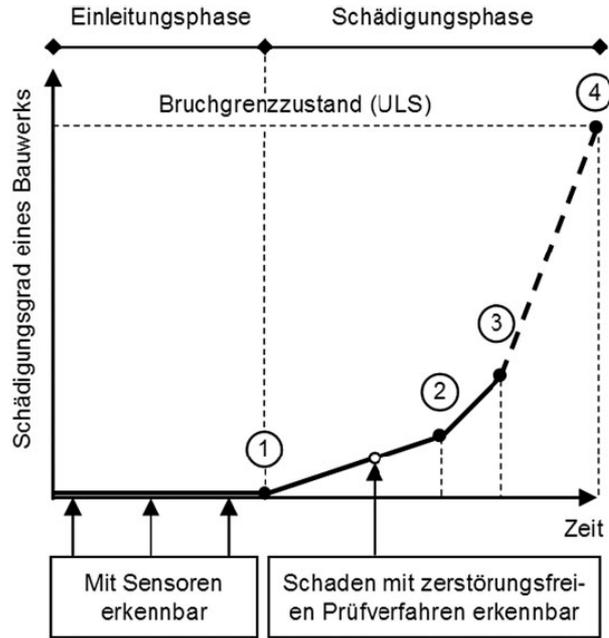
Wie hoch sind die mit einer Grenzzustandsüberschreitung verbundenen Konsequenzen (Kosten)?

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

Welche Zuverlässigkeitsniveaus sind für die identifizierten, relevante Grenzzuständen angemessen?

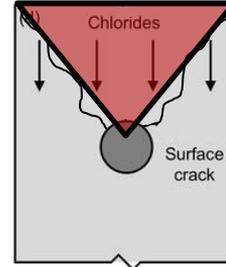
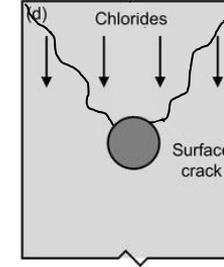
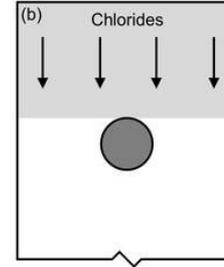
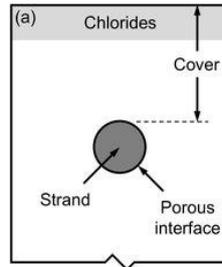


# Grenzzustände



Quelle: Gehlen (2000), basierend auf Tuutti.  
Diagramm aus DOI: 10.1002/best.201100077

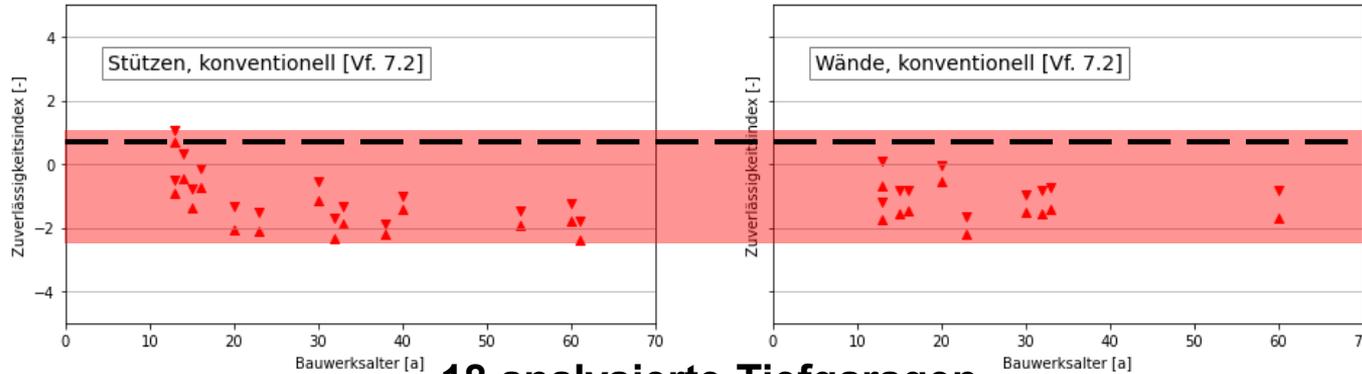
- 1  
 Depassivierung
- 2  
 Rissbildung
- 3  
 Abplatzung



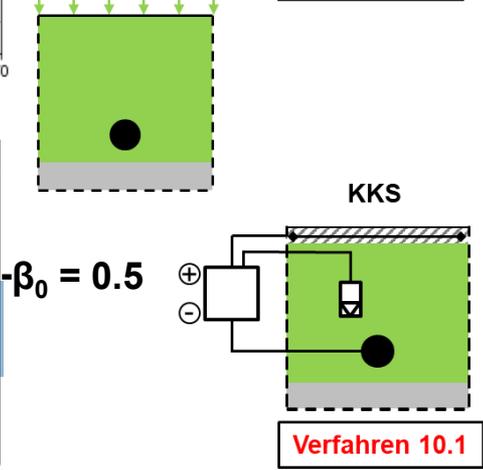
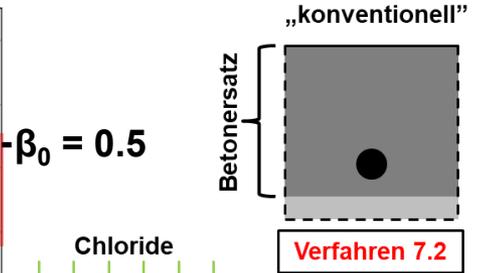
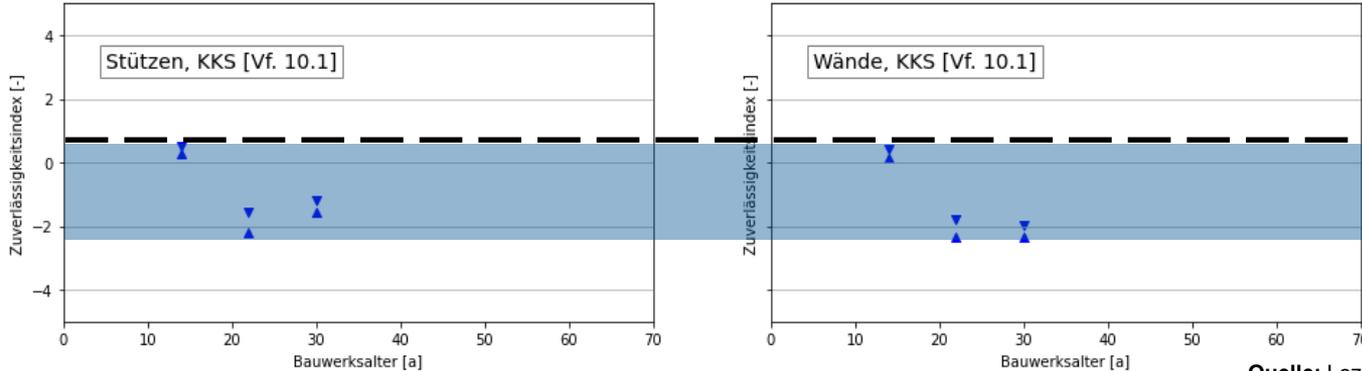
Quelle (angepasst aus): Dubuc et. al. (2019)

# Bei welchen Zuverlässigkeiten wurden Bauwerke instandgesetzt? Mit welcher Methode?

① Depassivierung



18 analysierte Tiefgaragen



Quelle: Lozano et al. (2023)

# TP 3: Bewertung von Laborprüfverfahren

## Fragestellung:

Welche Verfahren zur Prüfung dauerhaftigkeitsrelevanter Materialeigenschaften gibt es?

Welche Erfahrungen wurden mit den Verfahren gesammelt?

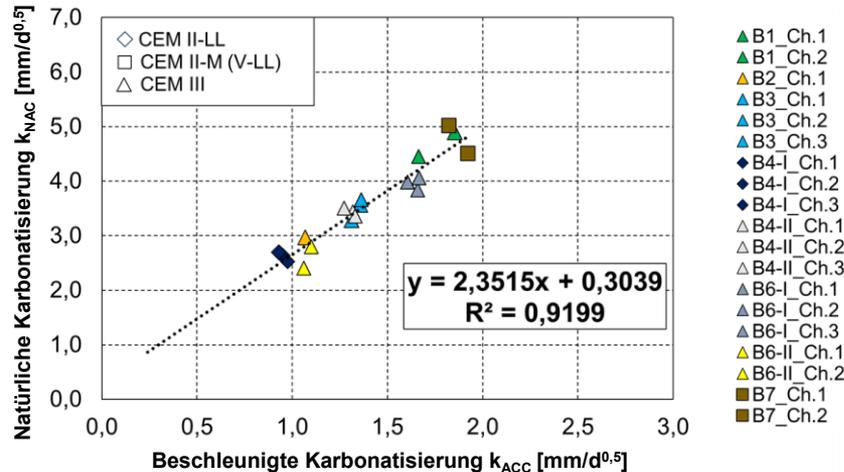
Sind die Verfahren trennscharf?  
Reproduzierbar? Vergleichbar?

Randbedingung	Langzeitversuche	Kurzzeitversuche		
Prüfvorschrift	DIN EN 12390-10	DIN EN 12390-12	DIN EN 13295	<i>fib</i> Model Code for Service Life Design
Probengeometrie	Prismen / Würfel	Prismen / Würfel / Zylinder	Prismen / Balken	Balken
Probenmaße [mm]	Länge: 350; Breite: (3 x D) / Seitenlänge: 3 x D	Länge: 280; Breite: (3 x D)	40 x 40 x 160 / 100 x 100 x 500	100 x 100 x 500
Prüftemperatur [°C] / Relative Luftfeuchte [%]	20 ± 2 / 65 ± 2	20 ± 2 / 57 ± 3	21 ± 2 / 60 ± 10	20 ± 2 / 65 ± 5
CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Luft [Vol.-%]	0,04 ± 0,001 0,04 ± 0,005	3,0 ± 0,5	1,0	2,0
Nachbehandlungs- dauer / Vorlagerung der Proben [d]	28 (Laborklima)	28 (im Wasser) min. 14 (Laborklima)	28 (im Wasser) min. 14 (Laborklima)	7 (im Wasser) / 21 (Laborklima)
Prüfdauer [d]	90 / 180 / 365	7 / 28 / 70	56	28
Prüfgröße [mm]	Karbonatisierungstiefe			

Quelle: DAUPERF TP3 KIT / fehs / RUB

# Welche Prüfverfahren eignen sich zur Verifizierung der dauerhaftigkeitsrelevanten Parameter?

natürliche Karbonatisierung,  $k_{NAC}$  ↔ beschl. Karbonatisierung,  $k_{ACC}$



David Ov (RUB) & Juan Lozano (TUM)

# TP 4: Klassifikation Materialwiderstände, Produktionskontrolle, Konformitätskriterien und -kontrolle

## Fragestellung:

Wie stark streuen die mit gleichen Zementsorten unterschiedlicher Herkunft hergestellten Betone?

Wie stark streuen sie über einen bestimmten Produktionszeitraum?

Sind Materialwiderstände systematisiert klassifizierbar?

Welche Instrumente stehen zur Verfügung, um die Gleichmäßigkeit der Produktion zu steuern und ihrer Konformität zu überprüfen?

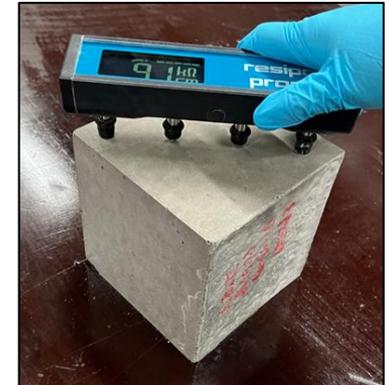
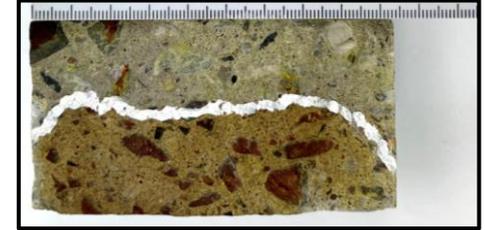


# TP 5: Annahmeprüfungen auf der Baustelle / Abnahmeprüfungen am Bauwerk

## Fragestellung:

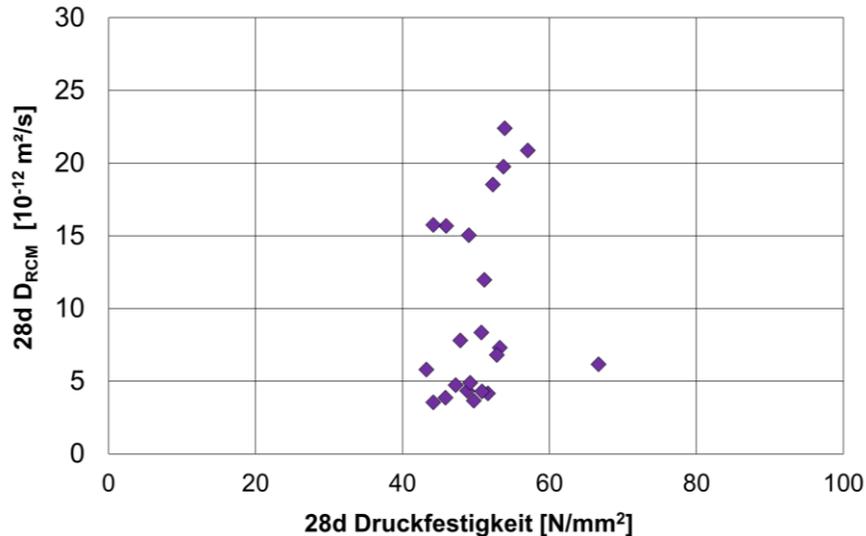
Welche Verfahren zur Verifikation des Materialwiderstandes auf der Baustelle sind als „Annahmeprüfung“ geeignet? (über die Druckfestigkeit und die Konsistenz hinausgehend, z. B. über direkte oder indirekte Prüfung des Carbonatisierungs- und Chlorideindringwiderstandes).

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

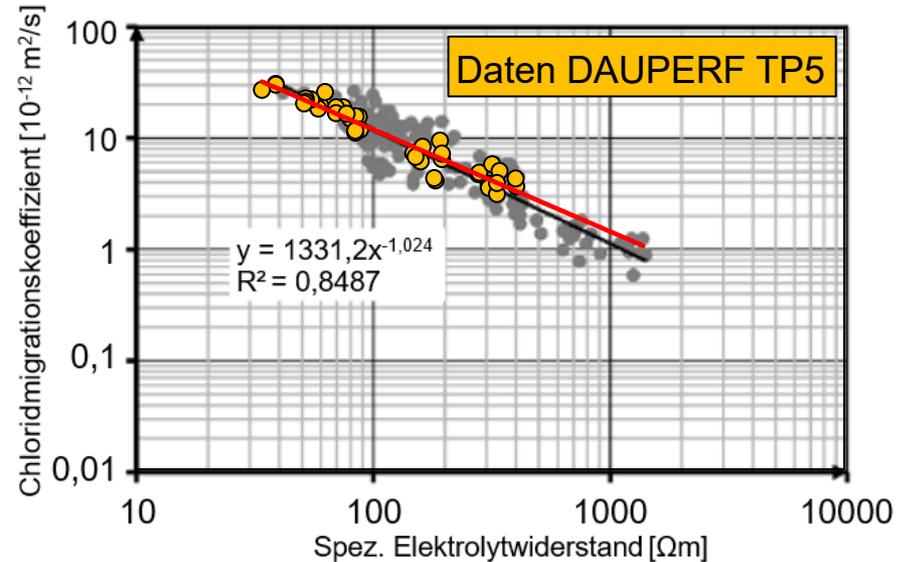


# Welche indirekten Verfahren eignen sich zur Verifizierung der dauerhaftigkeitsrelevanten Parameter?

Chloridmigrationskoeff. ↔ Druckfestigkeit



Chloridmigrationskoeff. ↔ spez. Elektrolytwiderstand



David Ov (RUB) & Juan Lozano (TUM)

Quelle: Gehlen (2000)

# Antworten auf die offenen Fragen.....

... sind die Berechnungen wirklich repräsentativ?

... was sind geeignete Grenzzustände?

... welche Zuverlässigkeitsniveaus sind für die identifizierten, relevanten Grenzzustände angemessen?

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

... welche Verfahren zur Verifikation des Materialwiderstandes auf der Baustelle sind als „Annahmeprüfung“ geeignet?

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

**.... werden in den nachfolgenden Präsentationen gegeben!!**

# Dauerhaftigkeit Beton nach dem Performance-Prinzip – Wissenschaftliche Grundlagen

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

Technische Universität München

TUM School of Engineering and Design

Centrum Baustoffe und Materialprüfung

Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung

DAfStb-Fachkolloquium, Berlin, 21. Mai 2025

