

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Zuverlässigkeit versus Instandsetzungskosten: Wann zu welchem Preis?

Juan Lozano, M. Sc.

**DAfStb-Fachkolloquium „Dauerhaftigkeit von Beton nach dem Performance-Prinzip“  
21. Mai 2025**

Technische Universität München  
Centrum Baustoffe und Materialprüfung  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen  
Dr.-Ing. Thomas Kränkel  
Juan Lozano, M. Sc.



Helmut-Schmidt Universität/  
Universität der Bundeswehr Hamburg  
Professur für Konstruktionswerkstoffe  
und Bauwerkserhaltung  
Univ.-Prof'in Dr.-Ing Sylvia Keßler  
Juan Daniel Cassiani, M. Sc.

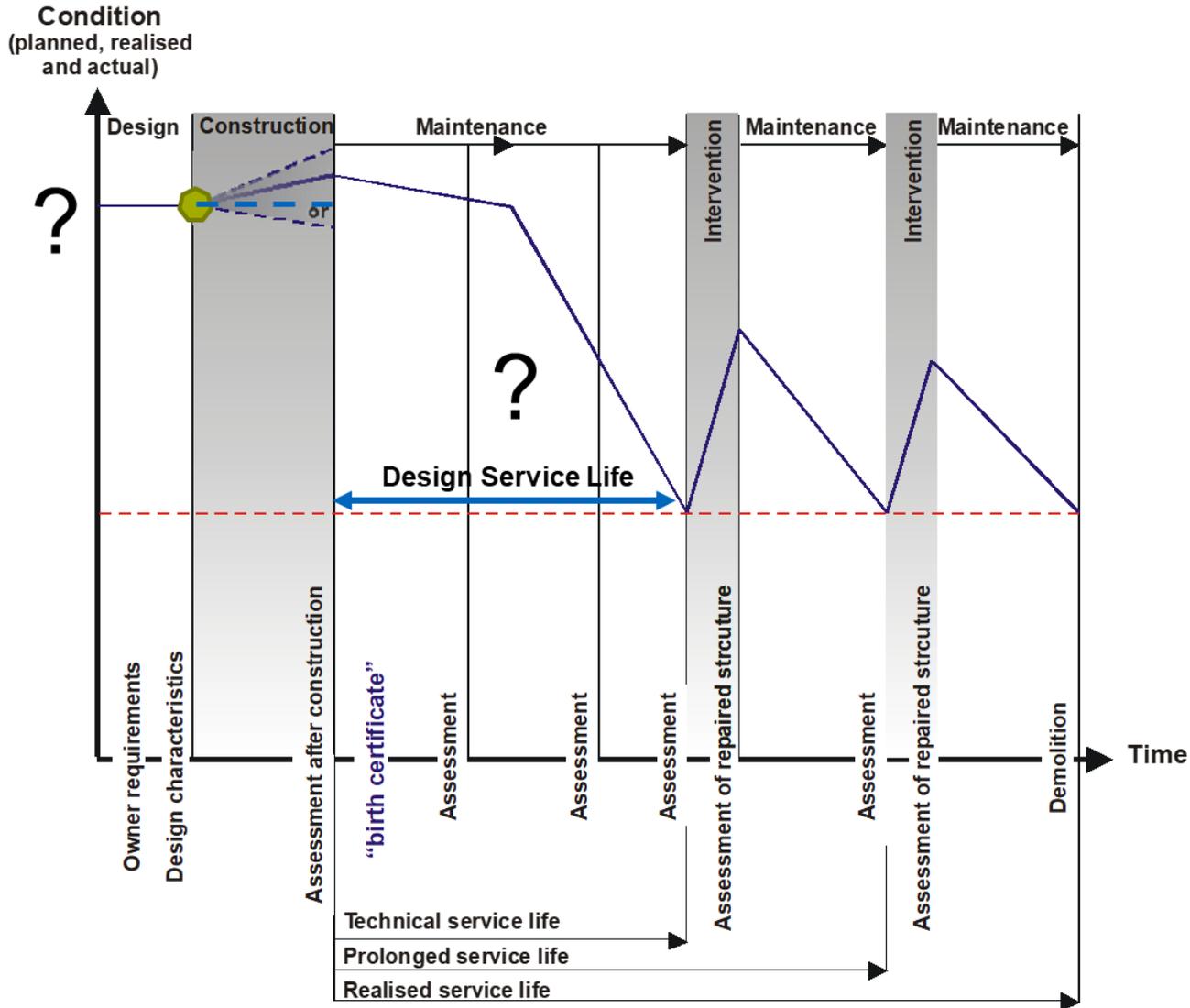


Forschungsvereinigung der deutschen Beton- und  
Fertigteilindustrie e.V.  
Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau e.V.  
Elisabeth Hierlein  
Alice Becke



# DAUPERF-Projekt 2

## Motivation



Quelle: IB-SGS

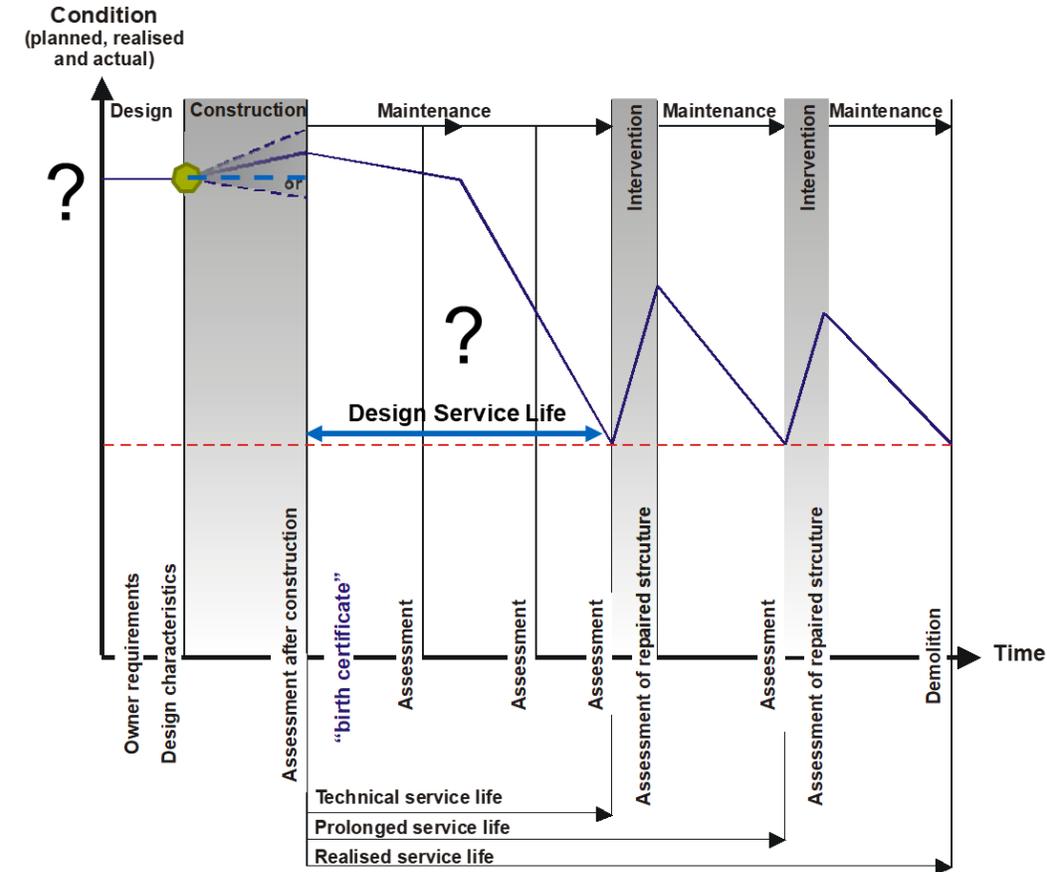
Quelle: www.parkplatztarife.de

Quelle: IB-SGS

# DAUPERF-Projekt 2

## Fragestellung

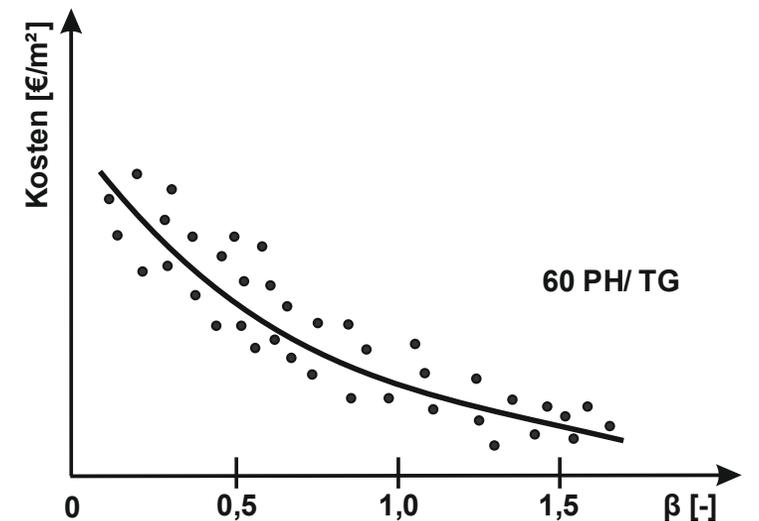
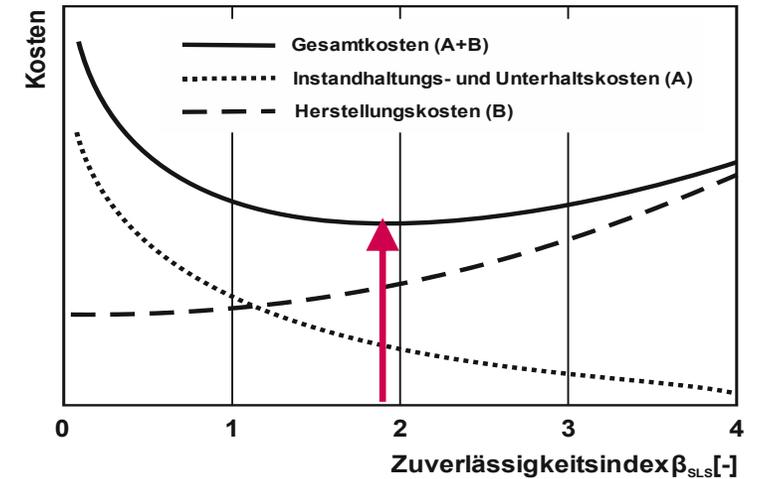
- Was sind relevante Grenzzustände?
- Wie hoch sind die mit einer Grenzzustandsüberschreitung verbundenen Konsequenzen (Kosten)?
- Welche Zuverlässigkeitsniveaus sind für die identifizierten, relevanten Grenzzustände wirtschaftlich angemessen?
- Welche Modellierung kann im Rahmen der Bemessung verwendet werden?



# DAUPERF-Projekt 2

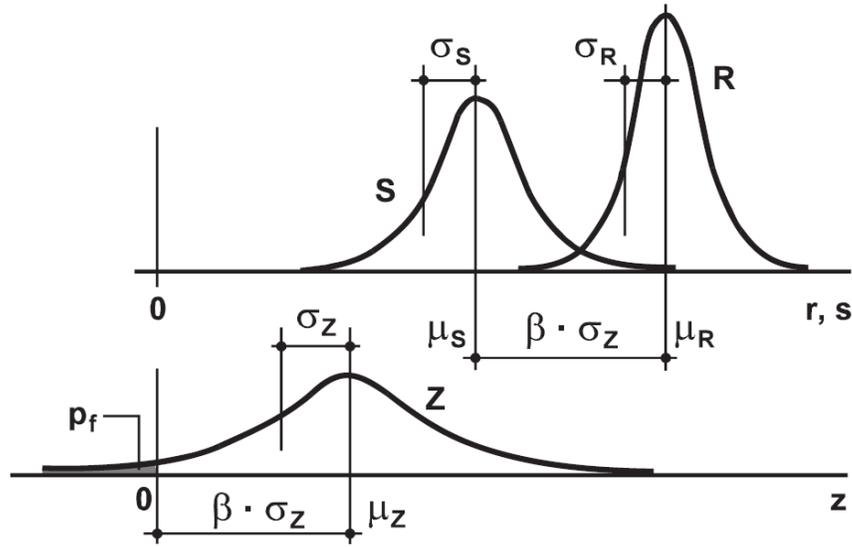
## Fragestellung

- Was sind relevante Grenzzustände?
- Wie hoch sind die mit einer Grenzzustandsüberschreitung verbundenen Konsequenzen (Kosten)?
- Welche Zuverlässigkeitsniveaus sind für die identifizierten, relevanten Grenzzustände wirtschaftlich angemessen?
- Welche Modellierung kann im Rahmen der Bemessung verwendet werden?



# Zuverlässigkeit / Vollprobabilistische Bemessung

## Wie wird Zuverlässigkeit quantifiziert?



Quelle: Gehlen, C. et. al. (2008)

$R$ : Widerstand  $p_f = p(R - S \leq 0)$

$S$ : Einwirkung

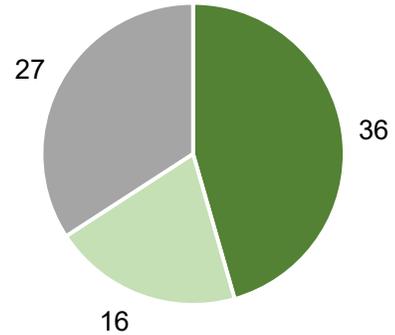
$$p_f = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi(-\beta)$$

$\Phi$ : Std. Normalverteilung

| Bemessungsfall                        | Dokument                        | Anforderung / Empfehlung                      |
|---------------------------------------|---------------------------------|---|
| Grenzzustände der Tragfähigkeit (ULS) | DIN EN 1990:2021                | $\beta \geq 4,7$<br>( $P_f \approx 10^{-6}$ ) |
|                                       |                                 | $\beta \geq 3,8$<br>( $P_f \approx 10^{-4}$ ) |
|                                       | fib Bulletin 34 (MC SLD)        | $\beta \geq 4,2$<br>( $P_f \approx 10^{-5}$ ) |
| Gebrauchstauglichkeit (SLS)           | DIN EN 1990:2021                | $\beta \geq 1,5$<br>( $P_f \approx 0,07$ )    |
| Depassivierung der Bewehrung (SLS*)   | fib Bulletin 34 (MC SLD)        | $\beta \geq 1,3$<br>( $P_f \approx 0,10$ )    |
|                                       |                                 | $\beta \geq 1,5$<br>( $P_f \approx 0,07$ )    |
|                                       | Positionspapier des DAfStb 2008 | $\beta \geq 0,5$<br>( $P_f \approx 0,30$ )    |

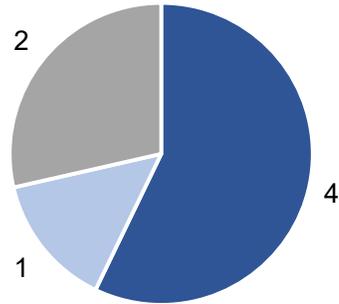
# Analysierte Projekte: Statistische Auswertung

Projektanzahl (Chlorid)



■ 1. Stufe ■ 2. Stufe ■ 3. Stufe

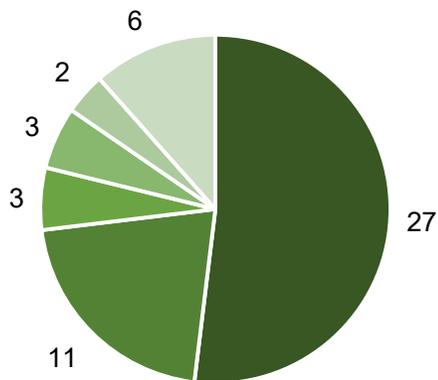
Projektanzahl (Karbo)



■ 1. Stufe ■ 2. Stufe ■ 3. Stufe

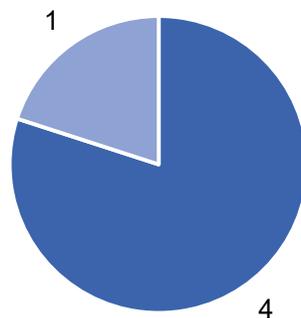
**Fokus auf chloridinduzierte Korrosion  
(52 Projekte mit ausreichender Information)**

Landkreis (Chlorid)



■ LHS München  
 ■ LK München  
 ■ LK Starnberg  
 ■ LK Fürstenfeldbruck  
 ■ LK Weilheim-Schongau  
 ■ Andere LK

Landkreis (Karbo)

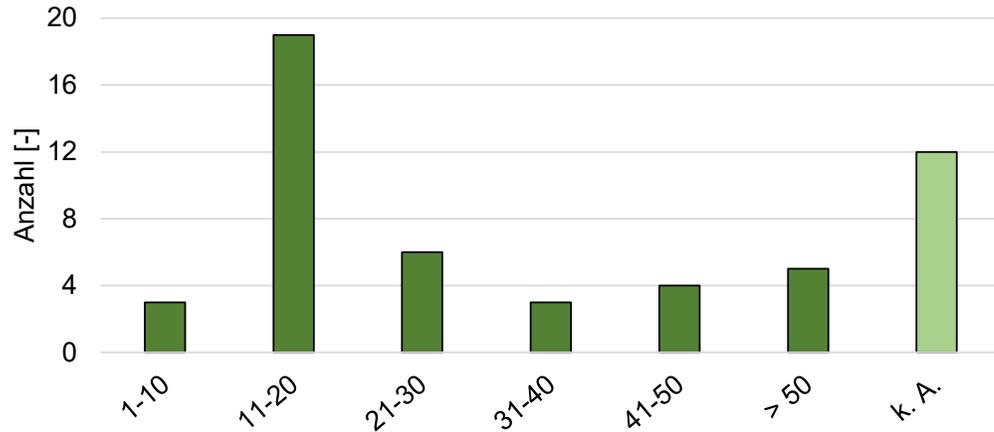


■ LHS München ■ LK Saalekreis

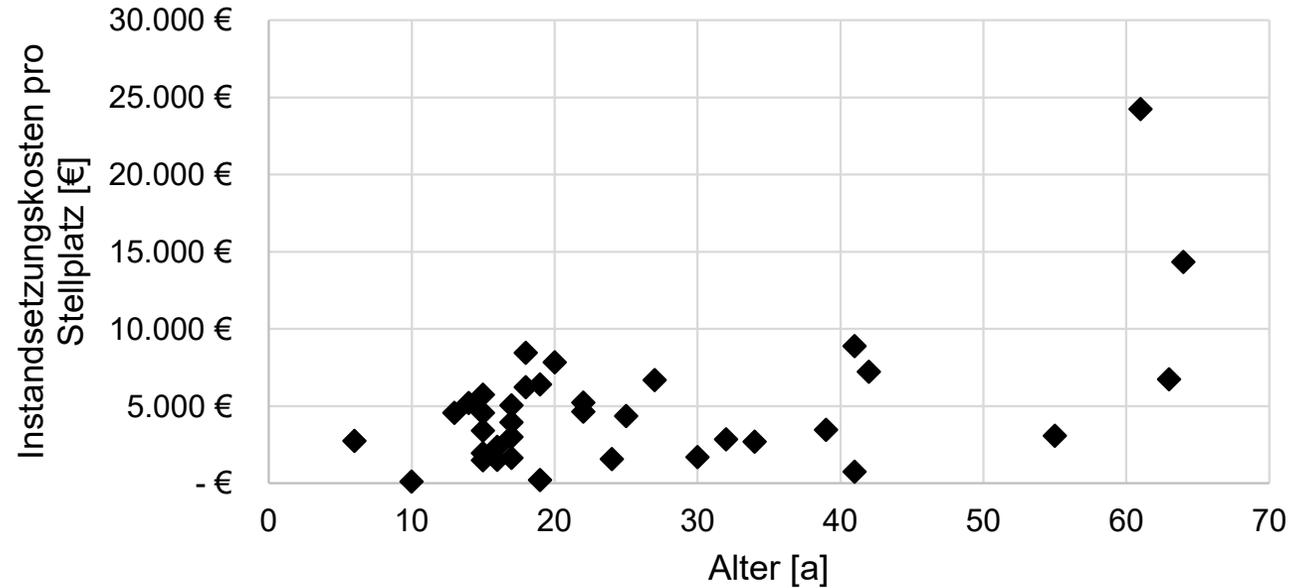
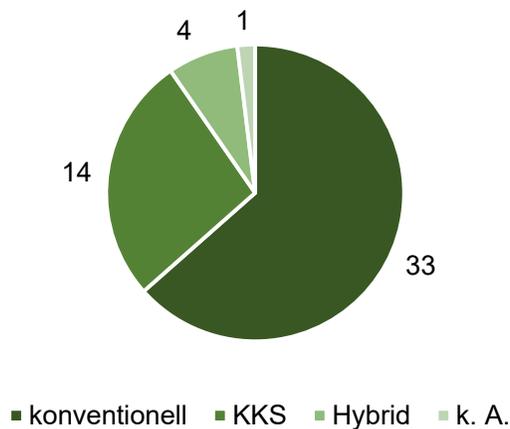
**Projekte überwiegend in München  
und Umgebung!**

# Analysierte Projekte: Statistische Auswertung

Alter bei Instandsetzung [a] (Chlorid)



Instandsetzungsmethode (Chlorid)



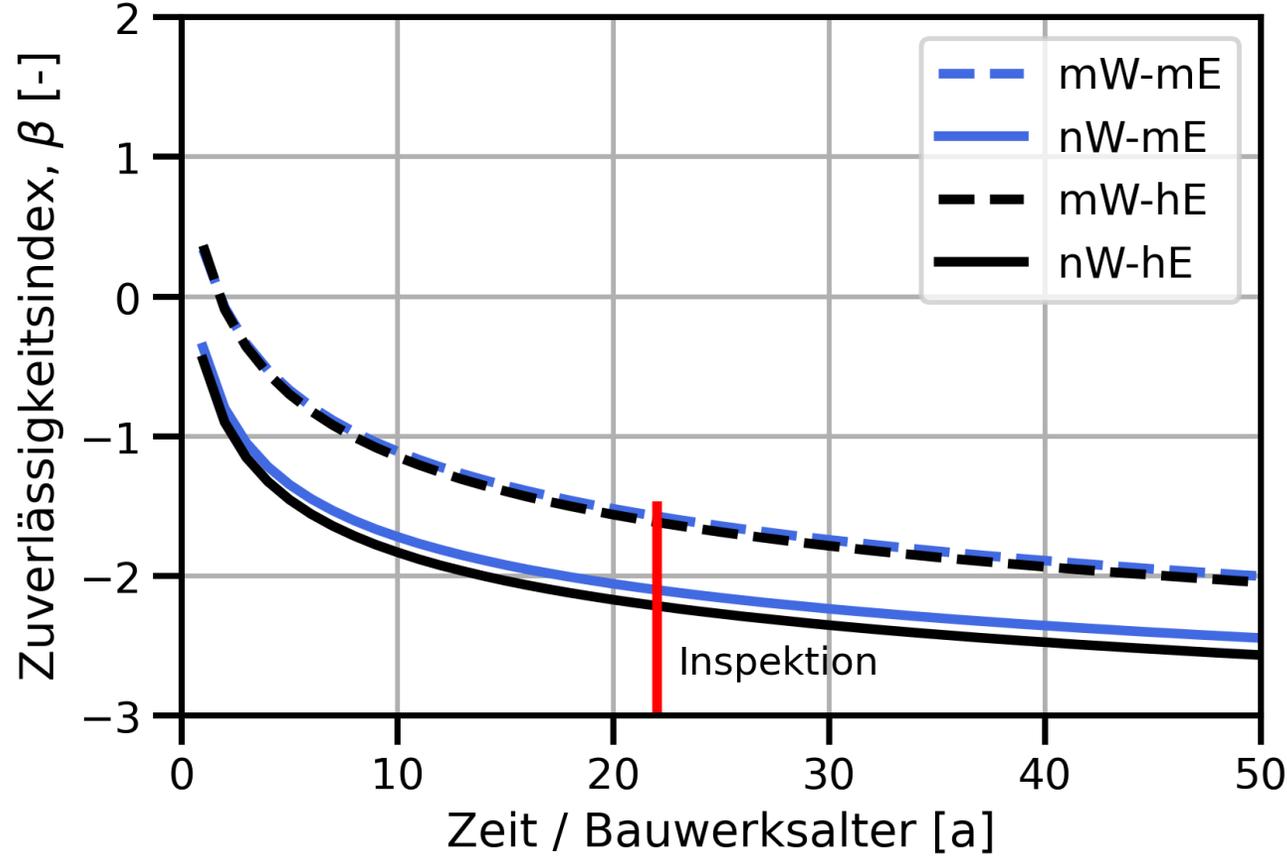
◆ Tiefgaragen

**I. d. R. zwischen 5.000 und 15.000 € pro Stellplatz!  
(ohne Berücksichtigung der Teuerungsrate !!)**



# Analyse auf Bauwerksebene

# Analyse auf Bauwerksebene: Berechnung des Zuverlässigkeitsindex



## Szenarien a-priori:

**mW:** Mittlerer Chlorideindringwiderstand

**nW:** Niedriger Chlorideindringwiderstand

**mE:** Mäßige Chloridexposition

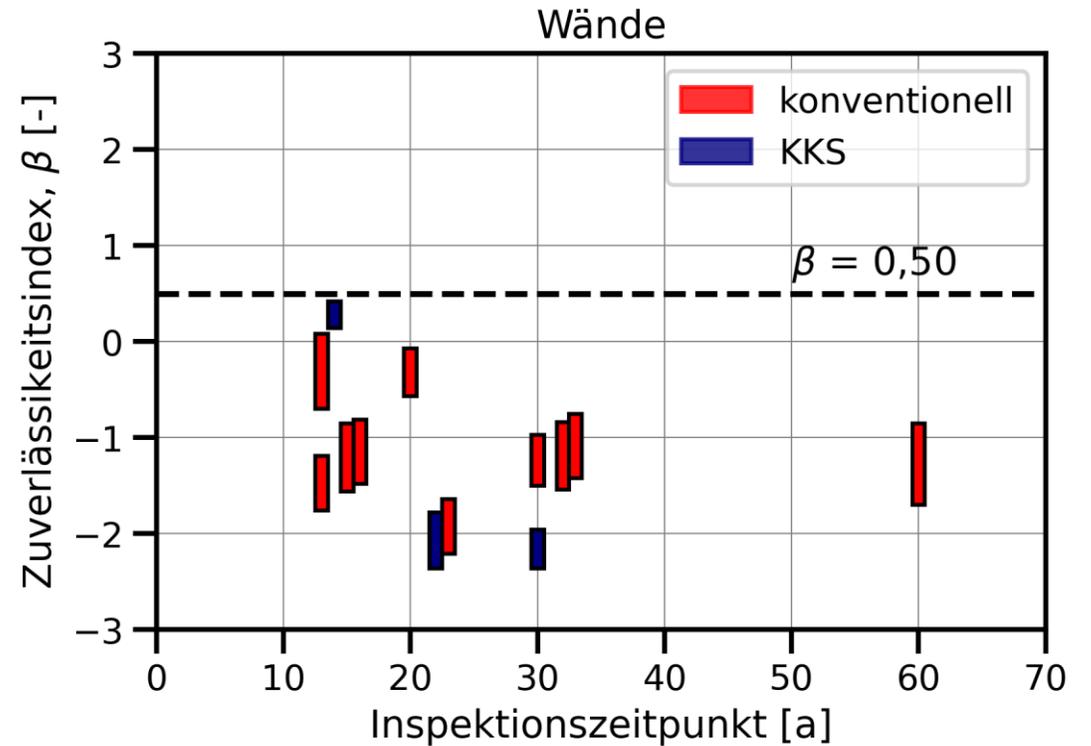
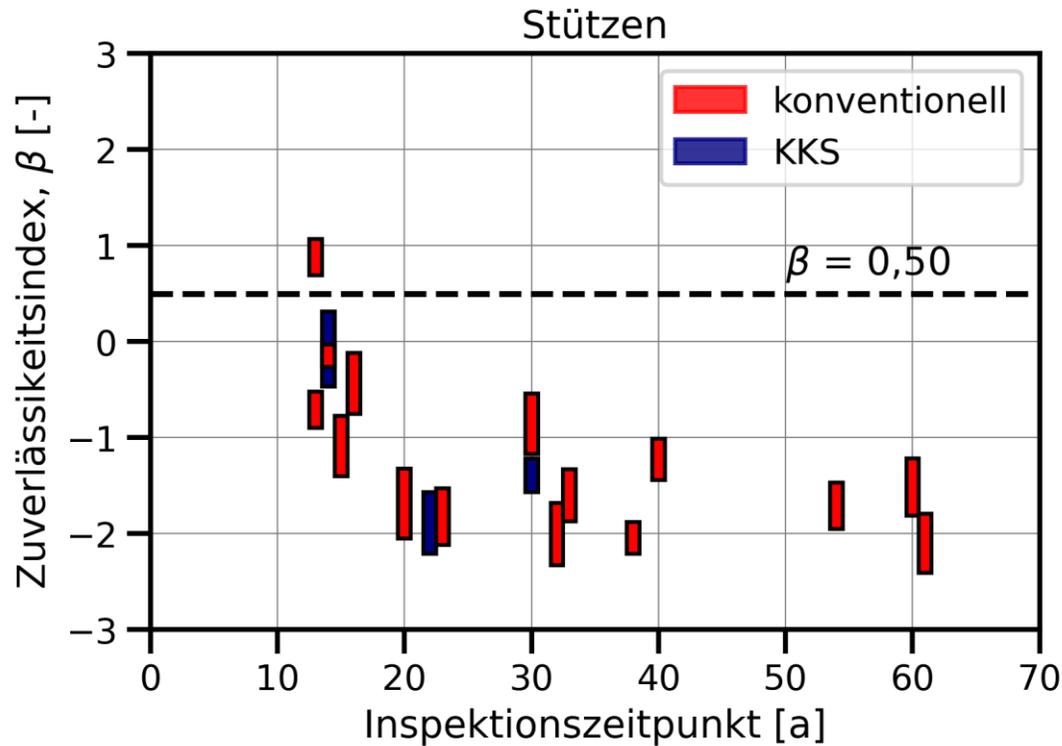
**hE:** Hohe Chloridexposition

## Aktualisierung des Zuverlässigkeitsindex

mit Hilfe des Bayes'schen Theorems

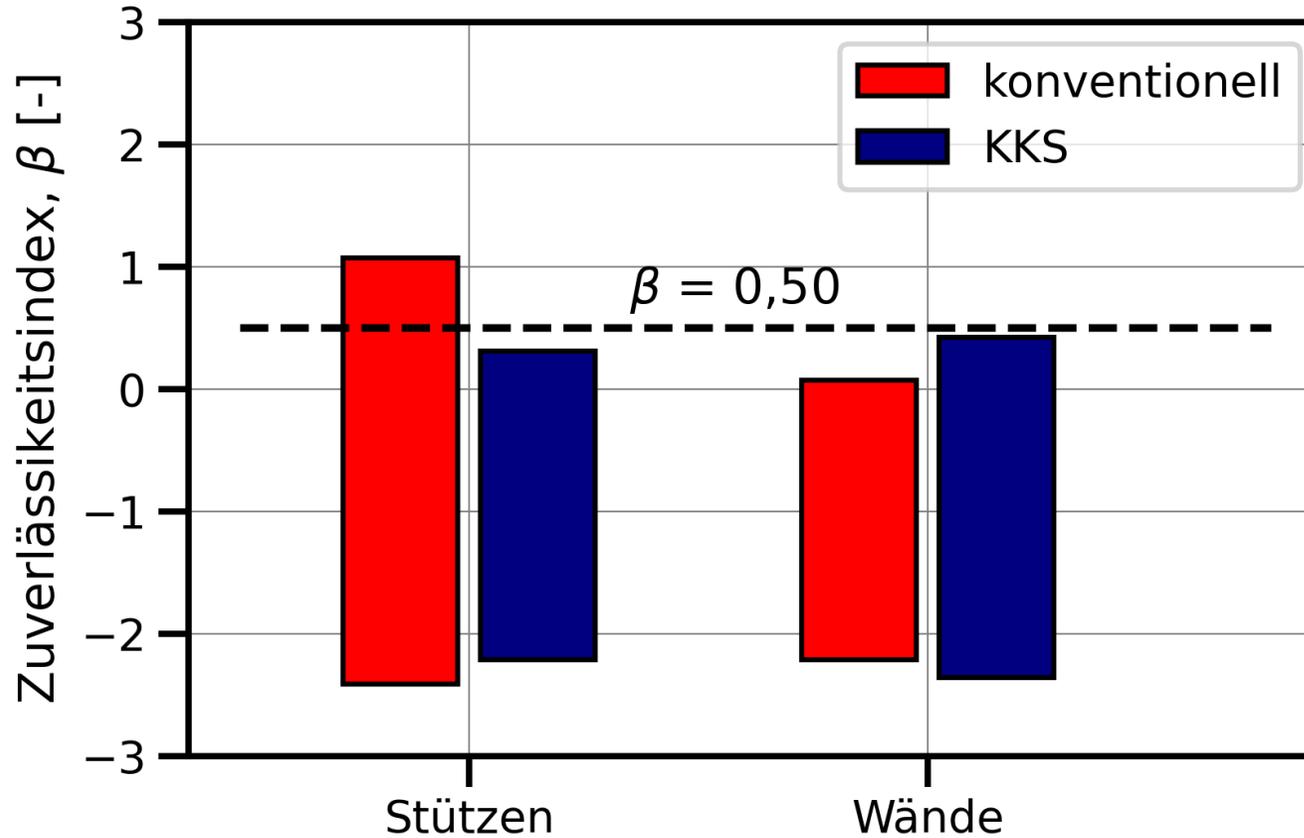
$$p_f = p(\text{Depass.} | \text{Inspektionsdaten})$$

# Analyse auf Bauwerksebene: Zuverlässigkeitsindex und Bauteiltyp

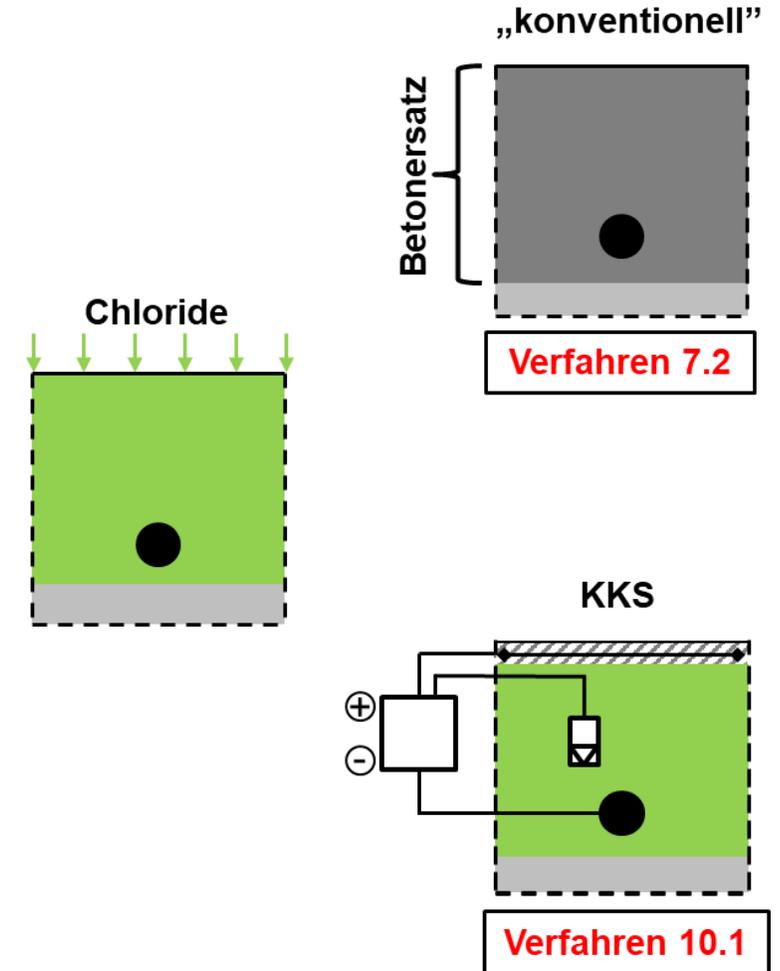


**Stützen und Wände wurden bei vergleichbaren Zuverlässigkeiten Instandgesetzt**

# Analyse auf Bauwerksebene: Zuverlässigkeitsindex und Instandsetzungsmethode



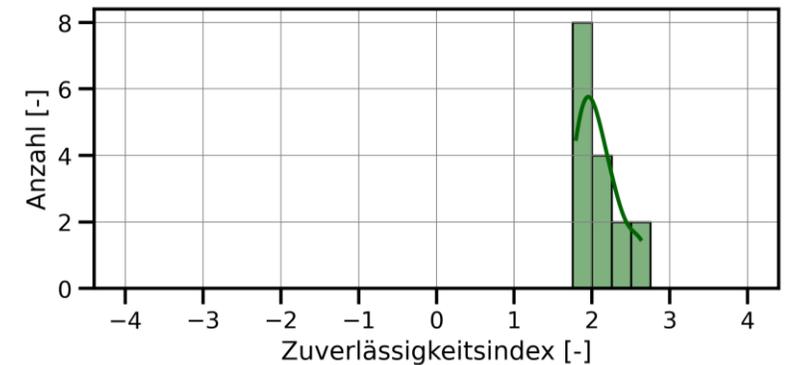
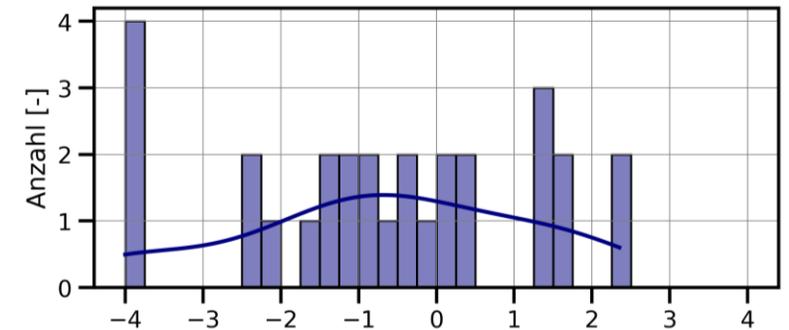
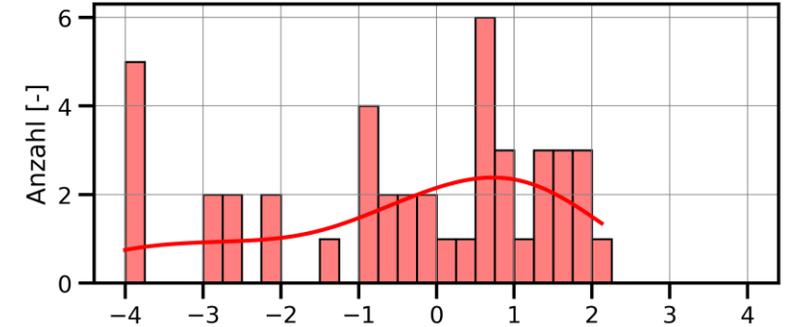
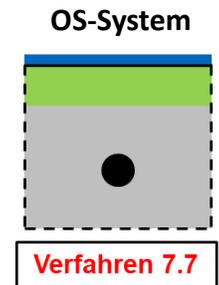
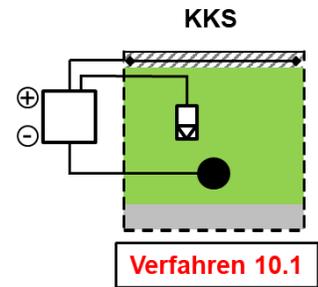
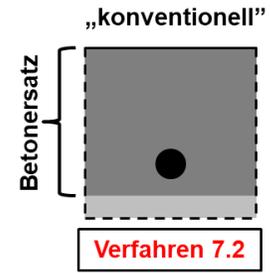
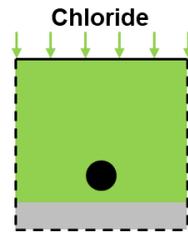
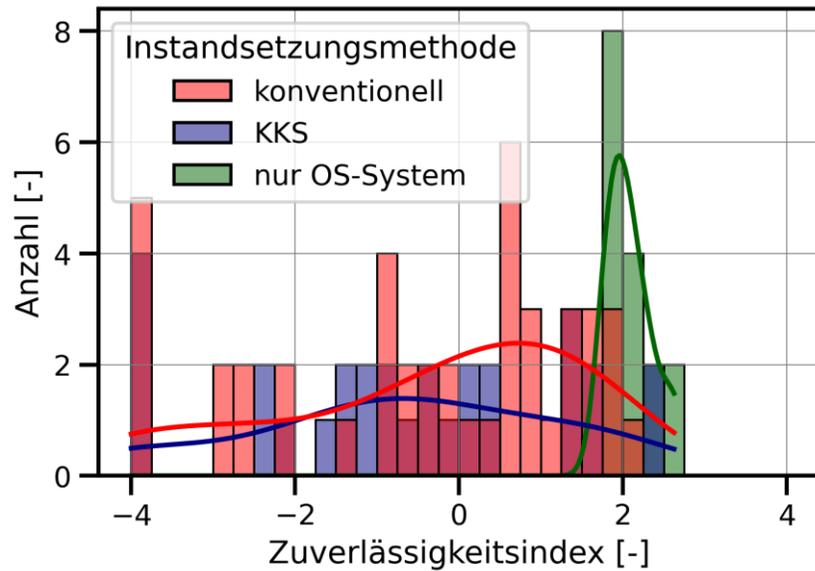
**Kein wesentlicher Unterschied in den Zuverlässigkeitsintervallen**





# Analyse auf Bauteilebene

# Analyse auf Bauteilebene: Zuverlässigkeitsindex und Instandsetzungsmethode (89 Stützen, 6 TG)

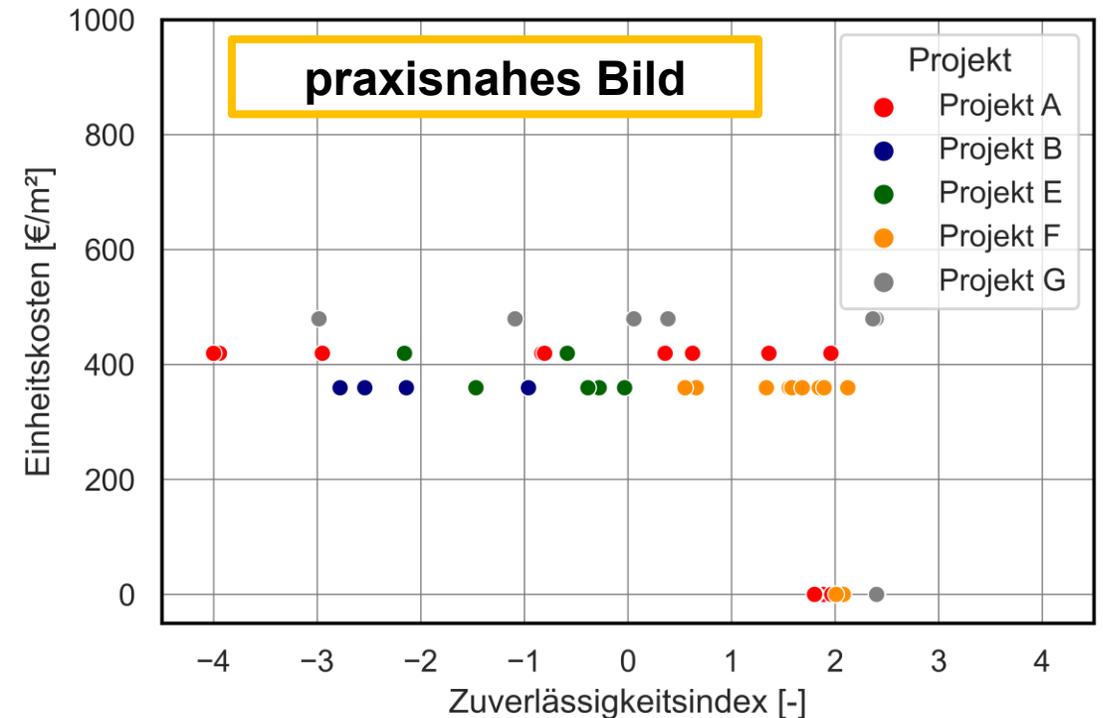
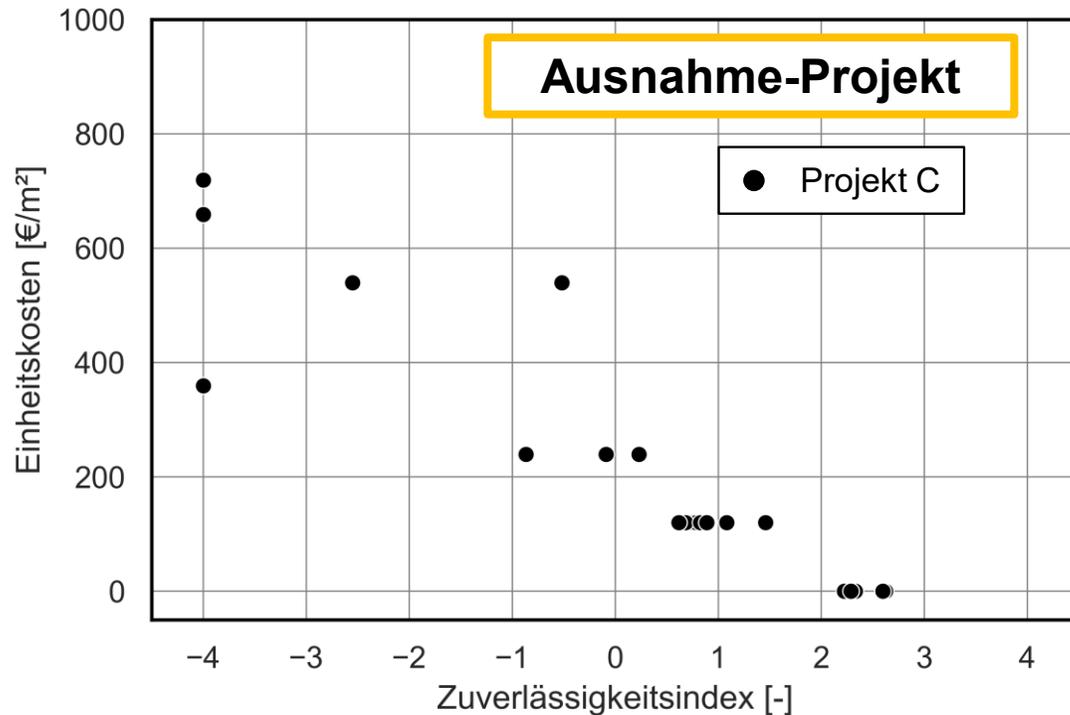


**Kein wesentlicher Unterschied zwischen den Zuverlässigkeitsintervallen von konventioneller Instandsetzung und KKS**

**Die alleinige Aufbringung eines OS-Systems wurde nur bei hoher Zuverlässigkeit angewandt**

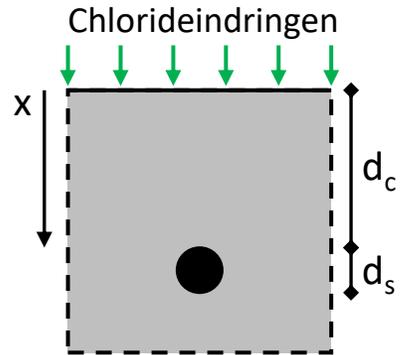
# Analyse auf Bauteilebene:

## Zuverlässigkeit gegenüber Instandsetzungskosten für konventionelle Instandsetzungen



# Analyse auf Bauteilebene: Validierung / Vergleich mit der TR-Instandhaltung

## Fallbeispiel



$x$  → Tiefe [mm]  
 $d_c$  → Betondeckung [mm]  
 $d_s$  → Stahldurchmesser [mm]

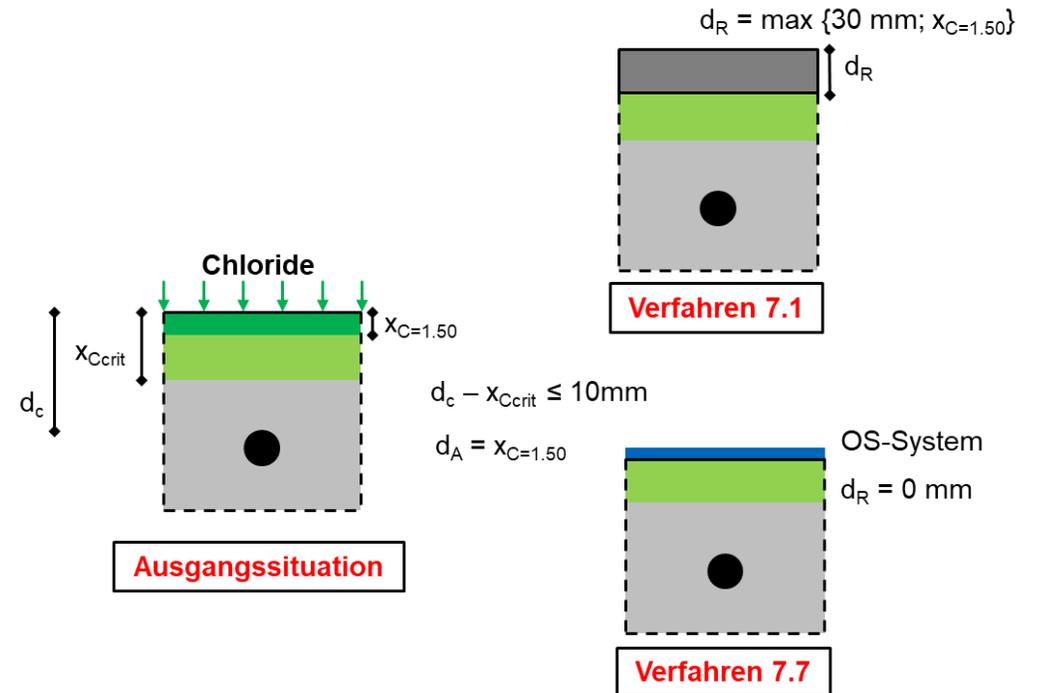
Verfahren 7.1

Verfahren 7.2 „a“

Verfahren 7.2 „b“

Verfahren 7.7

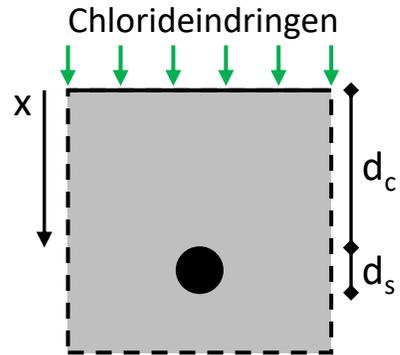
## Instandsetzungsverfahren



Quelle: DIBt (2020) TR Instandhaltung von  
Betonbauwerken

# Analyse auf Bauteilebene: Validierung / Vergleich mit der TR-Instandhaltung

## Fallbeispiel



$x$  → Tiefe [mm]  
 $d_c$  → Betondeckung [mm]  
 $d_s$  → Stahldurchmesser [mm]

Verfahren 7.1

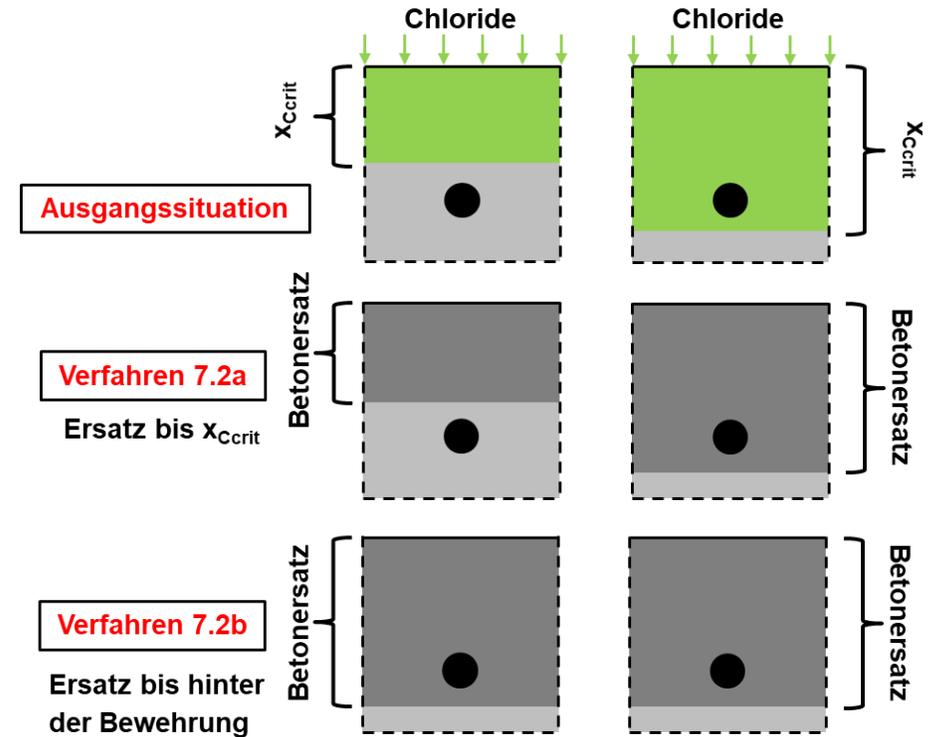
Verfahren 7.2 „a“

Verfahren 7.2 „b“

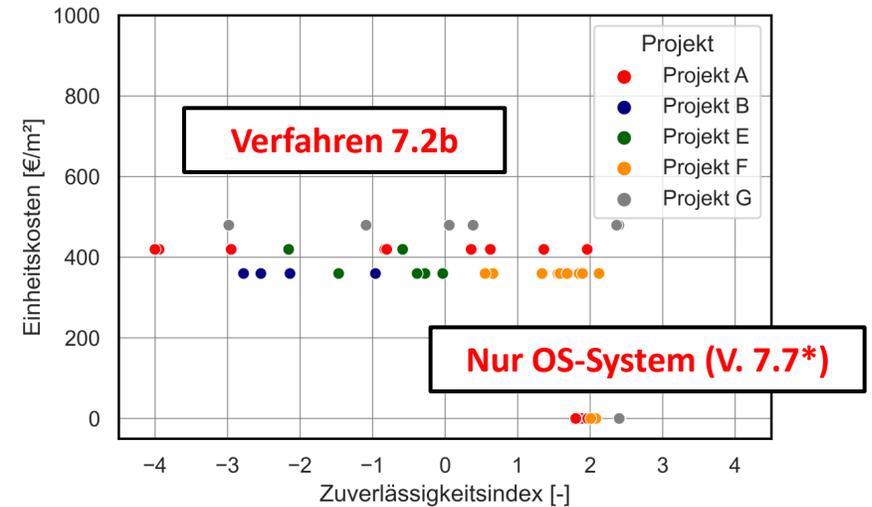
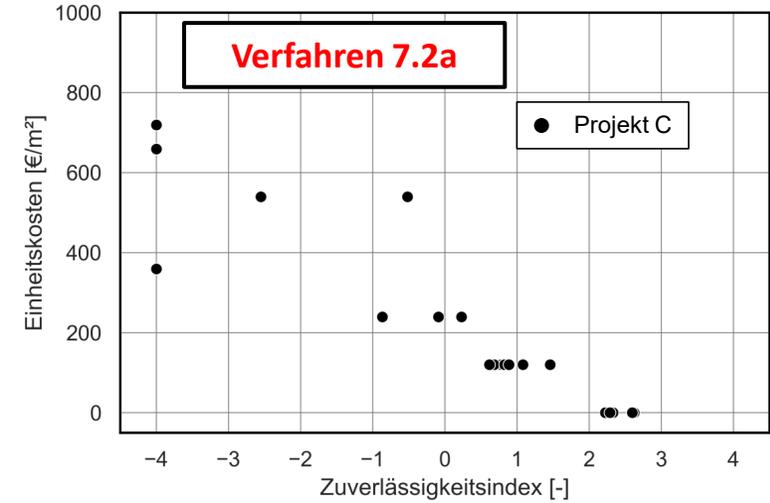
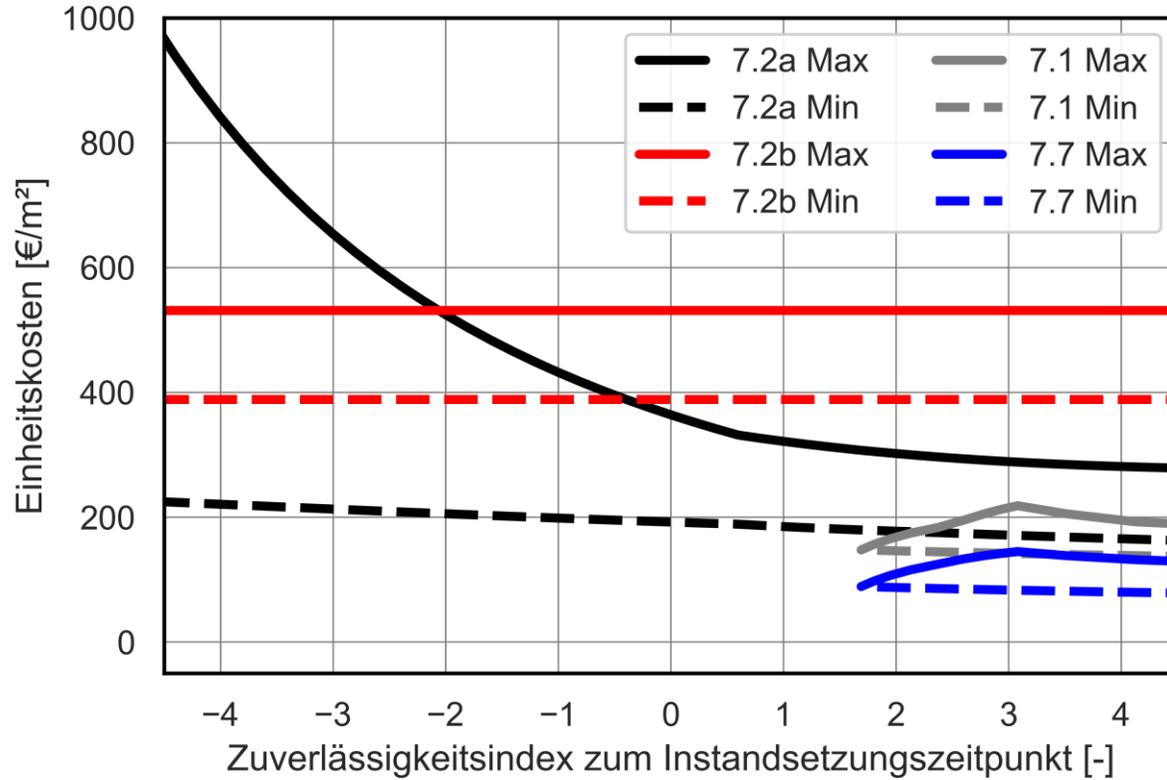
Verfahren 7.7

Quelle: DIBt (2020) TR Instandhaltung von  
Betonbauwerken

## Instandsetzungsverfahren



# Analyse auf Bauteilebene: Validierung / Vergleich mit der TR-Instandhaltung



# Teilprojekt 2

## Schlussfolgerungen und Empfehlungen für die Praxis

### 1. Was sind relevante Grenzzustände?

Depassivierung der Bewehrung, erste Rissbildung und Abplatzungen. Für die Depassivierung stehen bereits validierte empirische Modelle zur Verfügung. Für die Grenzzustände in der Schädigungsphase sind weitere Forschungsarbeiten über Korrosion erforderlich (Schlüssel: Korrosionsrate).

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

Die Instandsetzungskosten hängen von der Objektbedingungen ab. Die Kosten steigen jedoch mit zunehmender Instandsetzungsaufwand (hohe Betondeckungen, Erdarbeiten, Hilfsabstützungen, usw.) und können den Herstellungskosten nahe kommen.

# Teilprojekt 2

## Schlussfolgerungen und Empfehlungen für die Praxis

### 3. Welche Zuverlässigkeitsniveaus sind für die identifizierten, relevante Grenzzuständen angemessen?

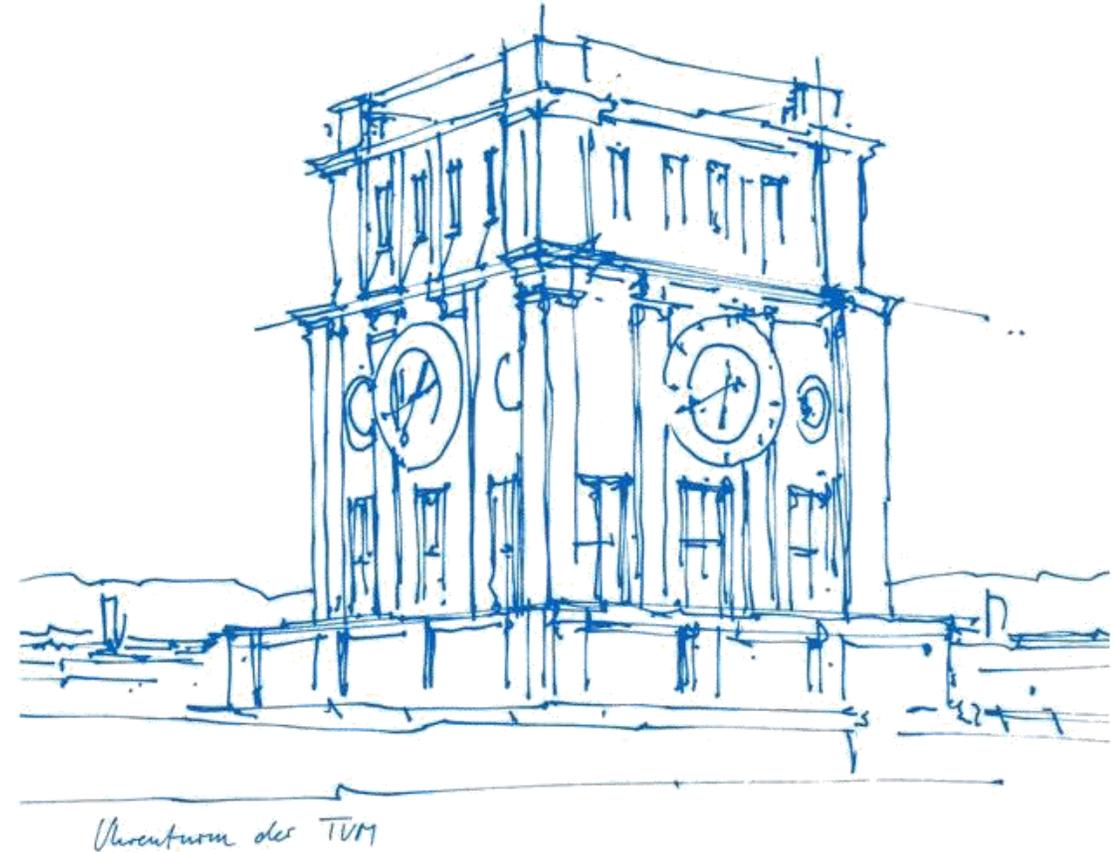
Für die Depassivierung der Bewehrung in der Expositionsklasse XD3 erscheint ein Zielzuverlässigkeitsindex von  $\beta_0 = 0,50$  angemessen. Dies konnte jedoch nur für Stützen- und Wandfüße verifiziert werden. Die Zuverlässigkeit auf Bauteilniveau kann jedoch innerhalb eines Bauwerks stark streuen (hohe Expositionsvariabilität). Unterschiedliche Bauherren haben unterschiedliche Risikoprofile.

### 4. Welche Modellierung kann im Rahmen der Bemessung verwendet werden?

Für die Modellierung können bereits in der Literatur veröffentlichte voll-probabilistische und semi-probabilistische Methoden verwendet werden.

# Wie können wir es besser machen?

# Gleich im nächsten Vortrag!



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Zuverlässigkeit versus Instandsetzungskosten: Wann zu welchem Preis?

Juan Lozano, M. Sc.

**DAfStb-Fachkolloquium „Dauerhaftigkeit von Beton nach dem Performance-Prinzip“  
21. Mai 2025**

Technische Universität München  
Centrum Baustoffe und Materialprüfung  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen  
Dr.-Ing. Thomas Kränkel  
Juan Lozano, M. Sc.



Helmut-Schmidt Universität/  
Universität der Bundeswehr Hamburg  
Professur für Konstruktionswerkstoffe  
und Bauwerkserhaltung  
Univ.-Prof'in Dr.-Ing Sylvia Keßler  
Juan Daniel Cassiani, M. Sc.

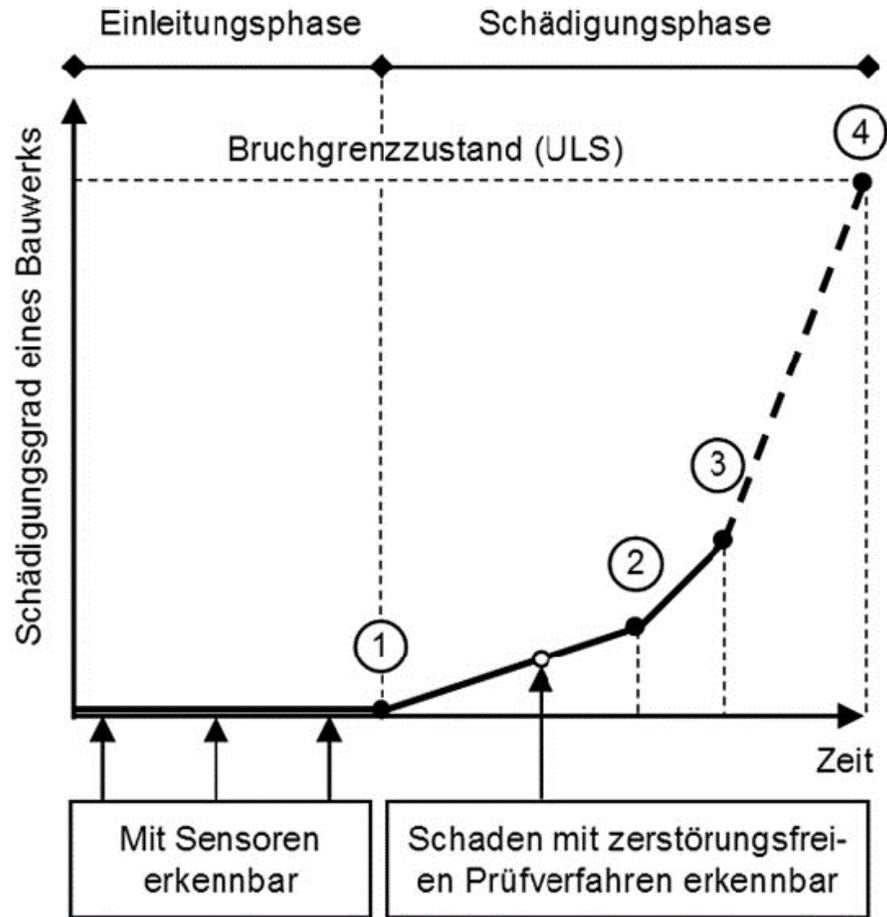


Forschungsvereinigung der deutschen Beton- und  
Fertigteilindustrie e.V.  
Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau e.V.  
Elisabeth Hierlein  
Alice Becke

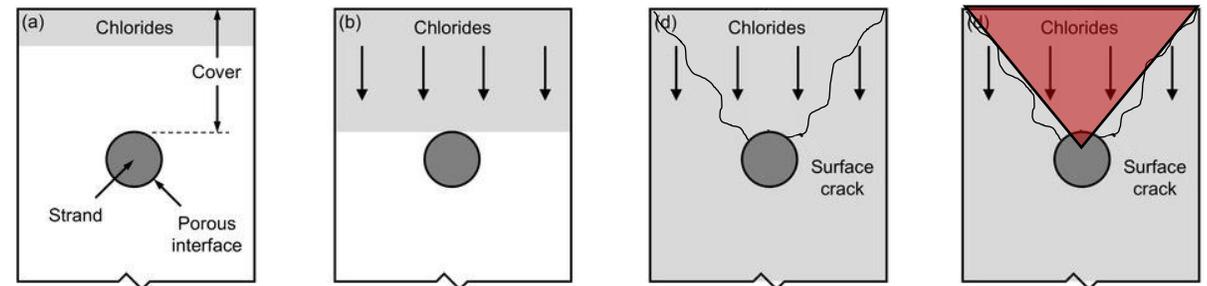


# Korrosion der Bewehrung

## Was sind relevante Grenzzustände?



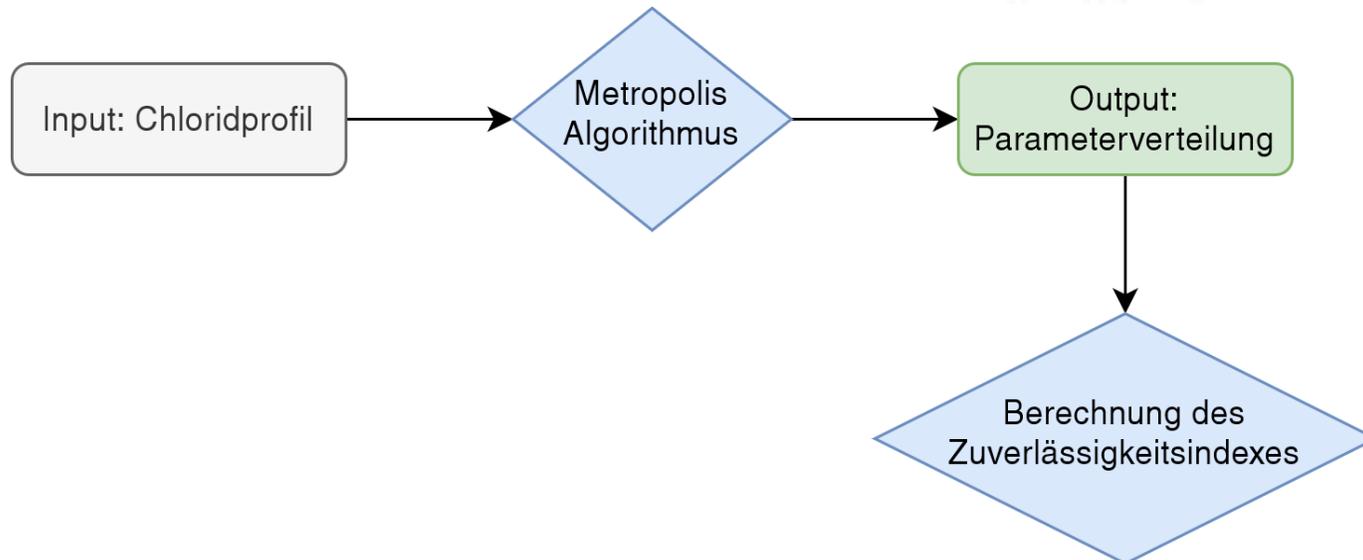
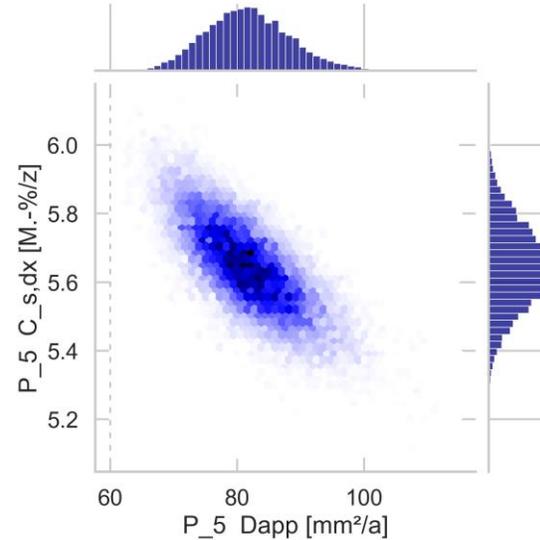
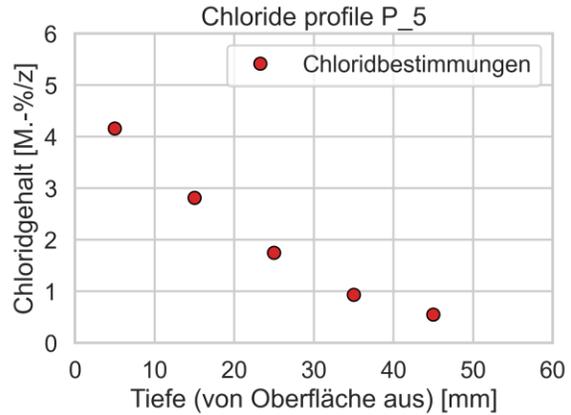
- 0 Eindringen von Chlorid
  - 1 Depassivierung
  - 2 Rissbildung
  - 3 Abplatzung
- betrachtete Grenzzustände**



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

angepasst aus: (Dubuc et. al., 2019): [https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-chloride-induced-corrosion-in-prestressed-concrete-crosssection-a-No\\_fig1\\_331664464](https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-chloride-induced-corrosion-in-prestressed-concrete-crosssection-a-No_fig1_331664464)

# Analyse auf Bauteilebene: Berechnung des Zuverlässigkeitsindex



**Quantifizierung der  
Modellparameter durch „inverse“  
Monte Carlo Simulation**