

Lebenszyklusbewertung für Ingenieurbauwerke des Eisenbahnbaues – Strategien und Methoden

Stahlbetontragwerke Stahltragwerke

*Alfred STRAUSS, Anja VIDOVIC und Ivan ZAMBON,
Univ. of Natural Resources and Life Sciences, Peter Jordan Strasse 82, A-1190 Vienna, Austria*

STAHLBETONTRAGWERKE

1. Zielsetzung / Motivation
2. Maßgebenden Degradationsprozesse
3. Vorhersagemodelle vs. Neue und Historische Betone
4. Life-Cycle-Nomogramme
5. LeCIE Life-Cycle-Management-Tool

STAHLTRAGWERKE

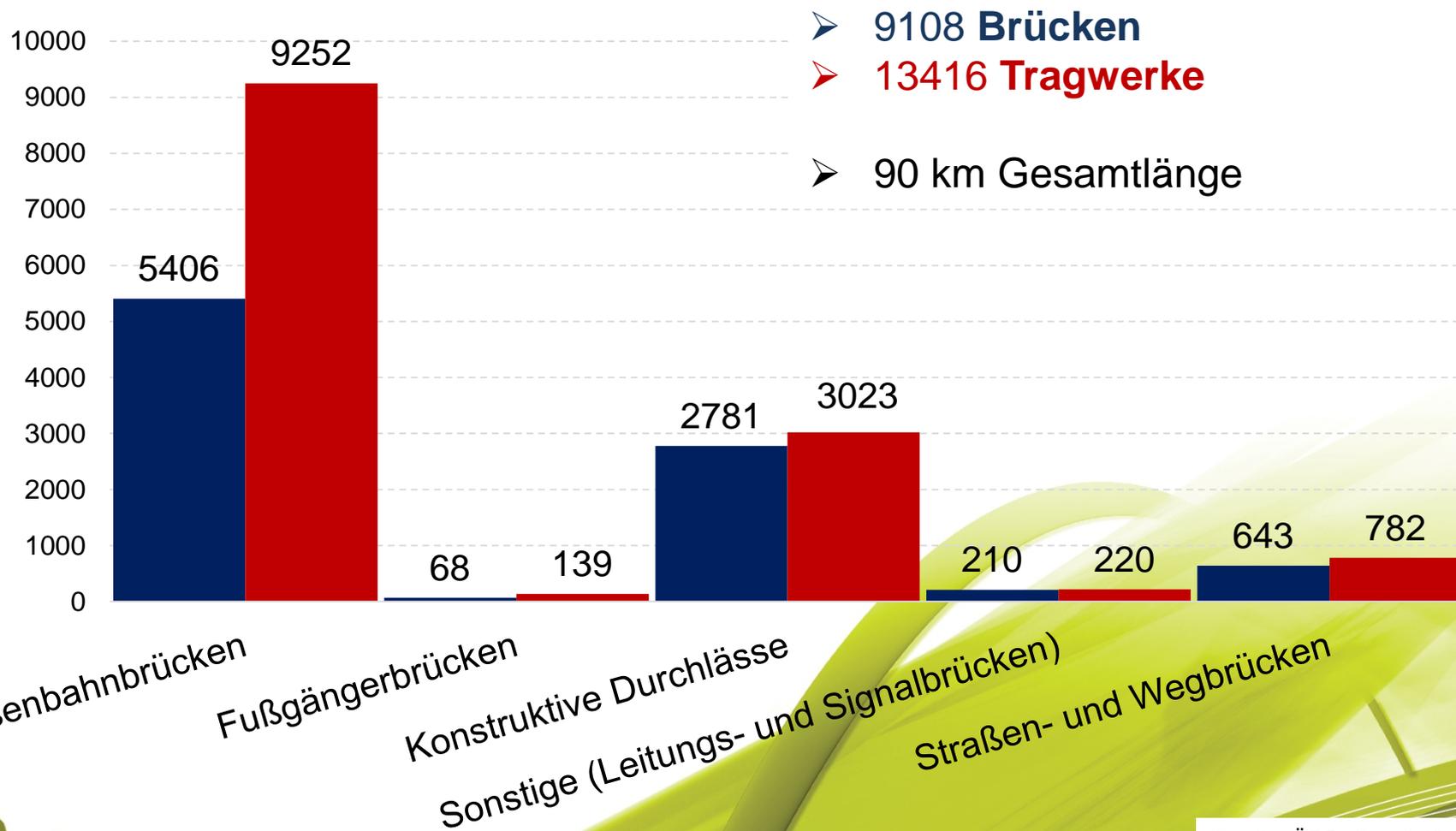
Ziel des LeCIE Projektes

Im Zuge des Projektes *LeCIE* „Lebenszyklusbewertung für Ingenieurbauwerke des Eisenbahnbaues – Strategien und Methoden“ sind die theoretischen Grundlagen der Degradationsfunktionen in Abhängigkeit verschiedener Instandhaltungsstrategien für Eisenbahnbrücken zu schaffen.

Diese Grundlagen sollen dem Management aller technischen Maßnahmen dienen, um die Funktionalität von Eisenbahnbrücken über deren gesamte Lebensdauer aufrecht zu erhalten.

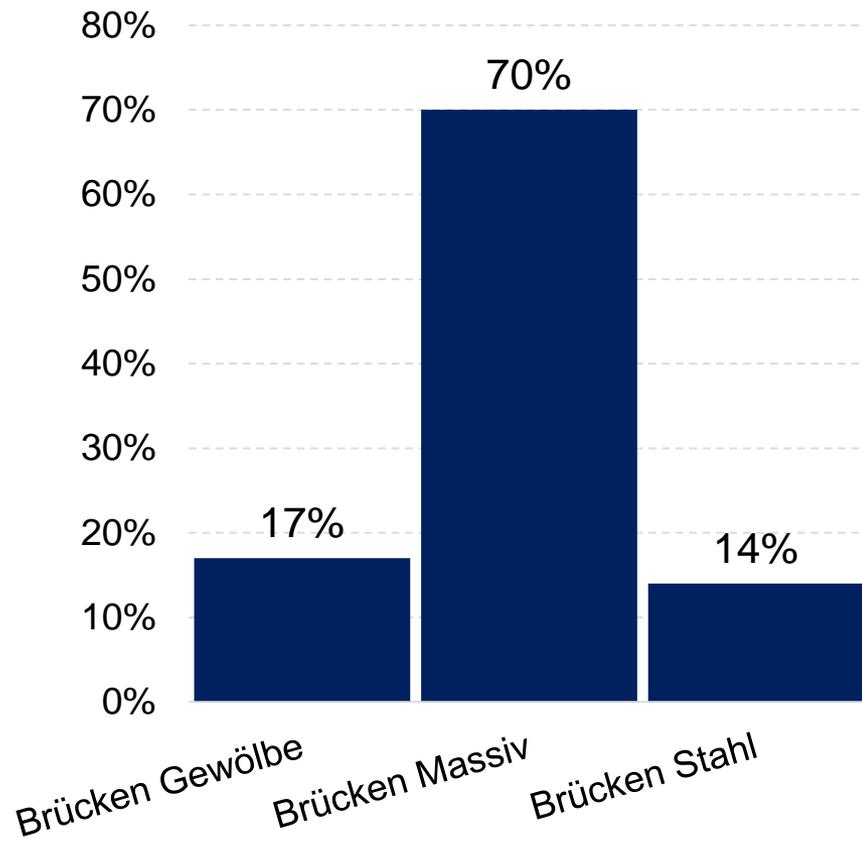
Aufbauend auf den Ergebnissen soll die Umsetzung in einem kurzfristig anwendbaren Werkzeug für den Fachbereich Bautechnik, Abteilung Brückenbau erfolgen..

Brücken und Tragwerke im Bestand



Quelle: ÖBB (Stand Jänner 2016)

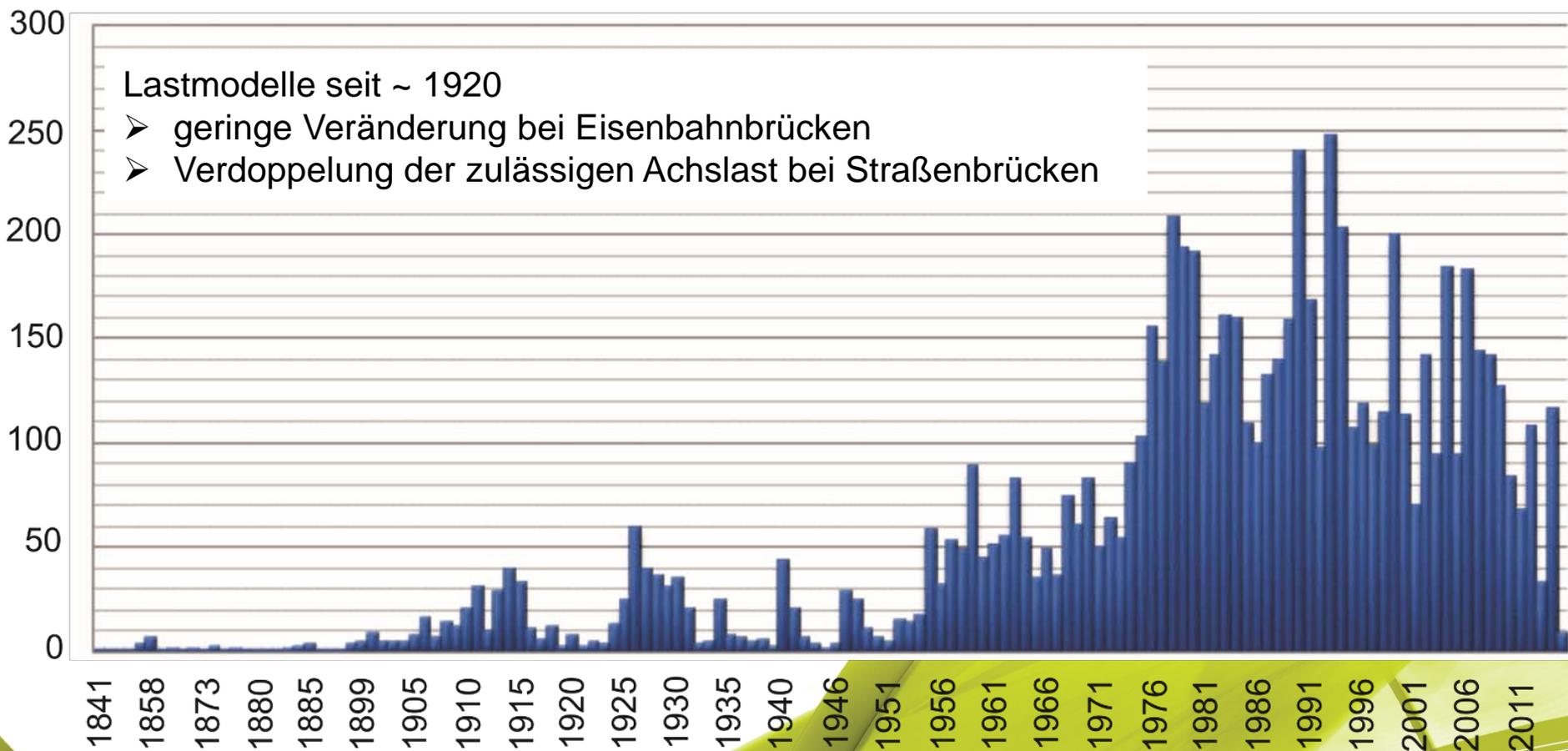
Brücken im Bestand



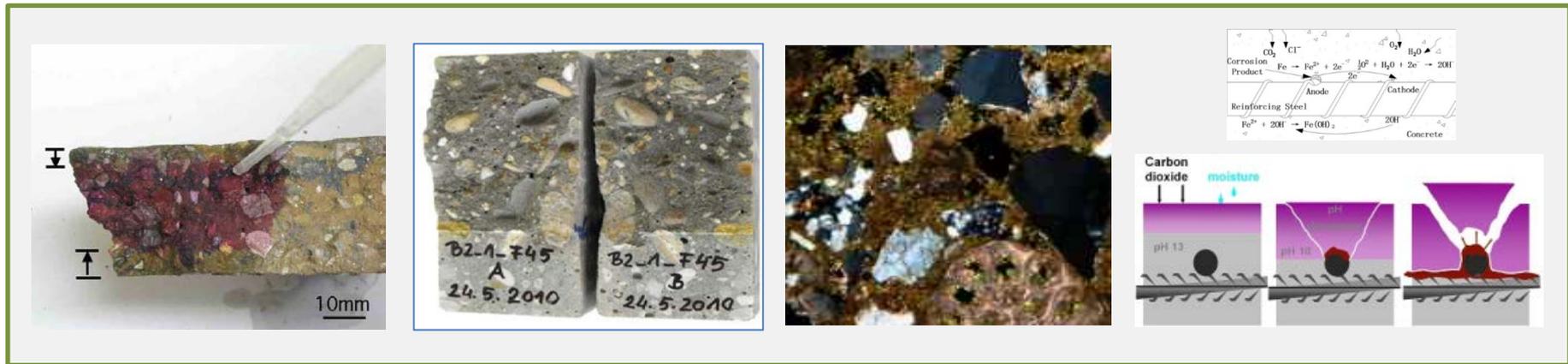
- 1548 **Brücken Gewölbe**
- 6375 **Brücken Massiv**
- 1275 **Brücken Stahl**

Quelle: ÖBB (Stand Jänner 2016)

Brücken im Bestand



Quelle: ÖBB (Stand Jänner 2016)



Karbonatisierung

- ⇒ zeitabhängig
- ⇒ Einfluss CO_2 -Gehalt Atmosphäre
- ⇒ Einfluss Wetter
- ⇒ Einfluss Betonqualität
- ⇒ Einfluss Ausführungsqualität

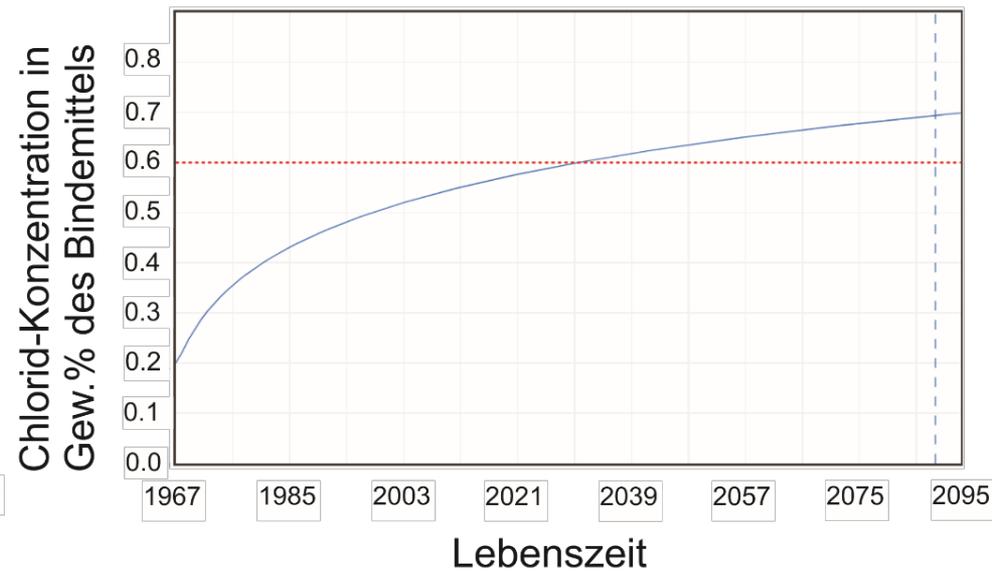
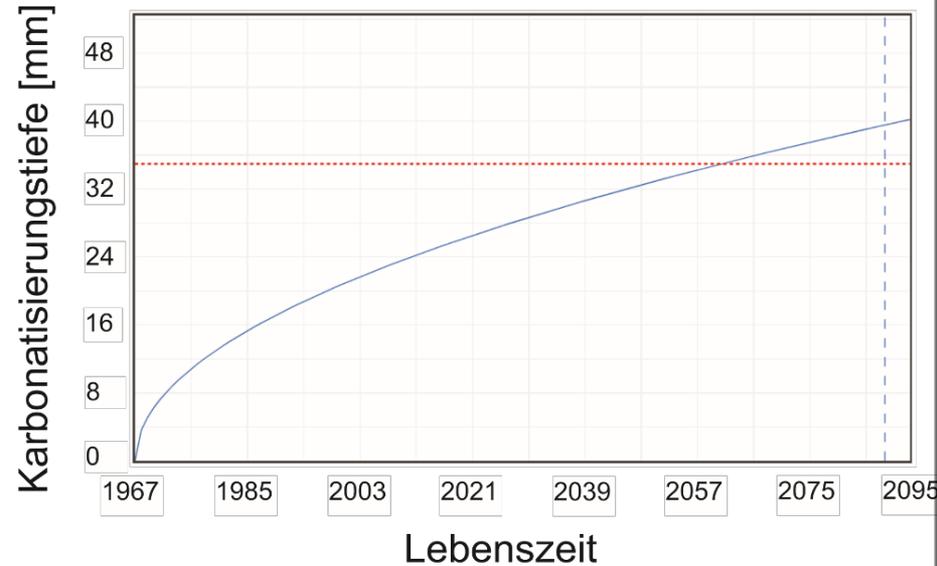
Chlorideindringung

- ⇒ zeitabhängig
- ⇒ Einfluss Beaufschlagung durch Chloride
- ⇒ Einfluss Wetter
- ⇒ Einfluss Betonqualität
- ⇒ Einfluss Ausführungsqualität

Korrosion der Bewehrung zur Folge!

fib Karbon- Chloridmodell

aus ca. 35 Modellen für LeCIE gewählte Modelle



$$x_c(t) = k_{NAC} \cdot \sqrt{k_e \cdot k_c \cdot k_a} \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)$$

$$C_x(x, t) = C_0 + (C_{S, \Delta x} - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t) \cdot t}} \right]$$

Parameter - fib Karbon- Chloridmodell

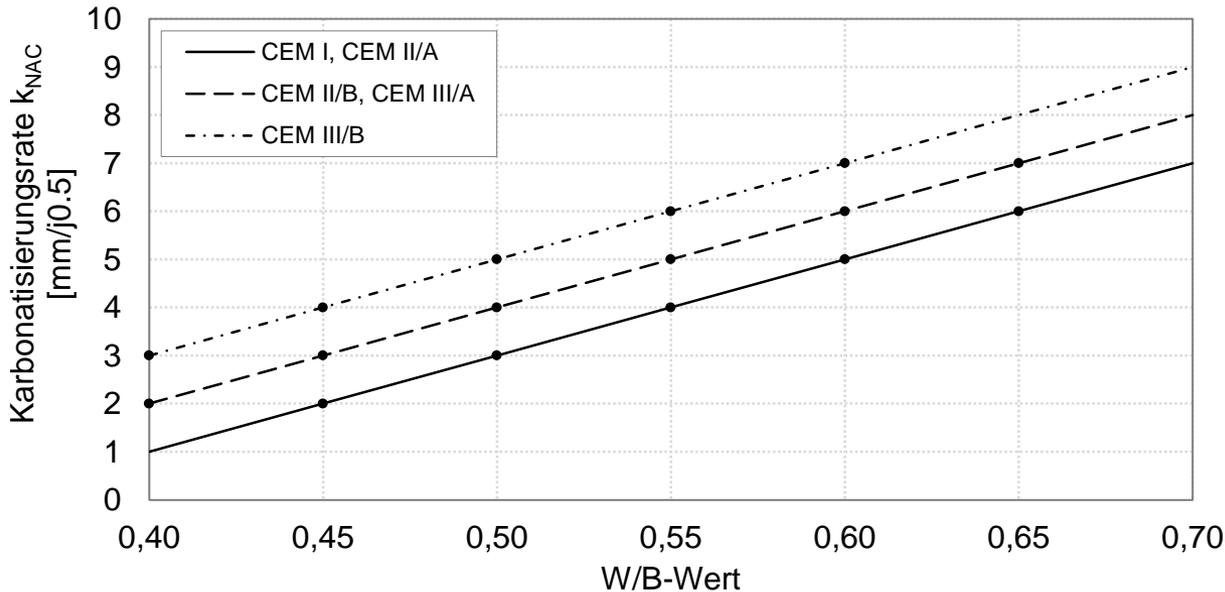
Variable	Symbol	Einheit	Mittelwert μ	Standabw. σ
CHLORIDEINDRIGUNG				
Alterungsexponent	α	-	0.652	0.12
Referenztemperatur	T_{ref}	K	293 (20 C)	-
Temperatur	T_{real}	K	282 (9 C)	3
Temperaturkoeffizient	b_e	K	4800	700
Chloridgehalt der vorherrschenden Umweltbelastung	C_{sx_dx}			
Tiefe der Konvektionszone	Δx			
Tiefe mit dem entsprechenden Chlorid Gehalt	x			
Referenz Zeitpunkt	t_0			
KARBONATISIERUNG				
Relative Feuchte der karbonatisierten Schicht	RH_{real}			
Periode der Wiederherstellung	t_c			
Regressionsparameter	b_c	-	-0.567	0.25
Regenwahrscheinlichkeit	p_{dr}	-	0	0
Feuchtezeitraum	ToW	-	0	0
Regressionsparameter	b_w	Tag	0.446	0.163
CO ₂ in der Luft	Ca	kg/m ³	0.036 / 0.040 / 0.046	0.005
CO ₂ -Konzentration während der Betonprüfung	Cl	kg/m ³	0.040	-

- 30 Zementarten
- Betonsorten B1 bis B7
...XC, XD, XF...Umwelt
- Neue und historische Betone

k_{NAC} Parameter - fib Karbonmodell

$$x_c(t) = k_{NAC} \cdot \sqrt{k_e \cdot k_c \cdot k_a} \cdot \sqrt{t} \cdot W(t);$$

		w/c ratio								
		0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
cement type	CEM I, CEM II/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	CEM II/A	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	CEM II/B, CEM II	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	CEM III/A	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	CEM III/B	3	4	5	6	7	8	9	10	11



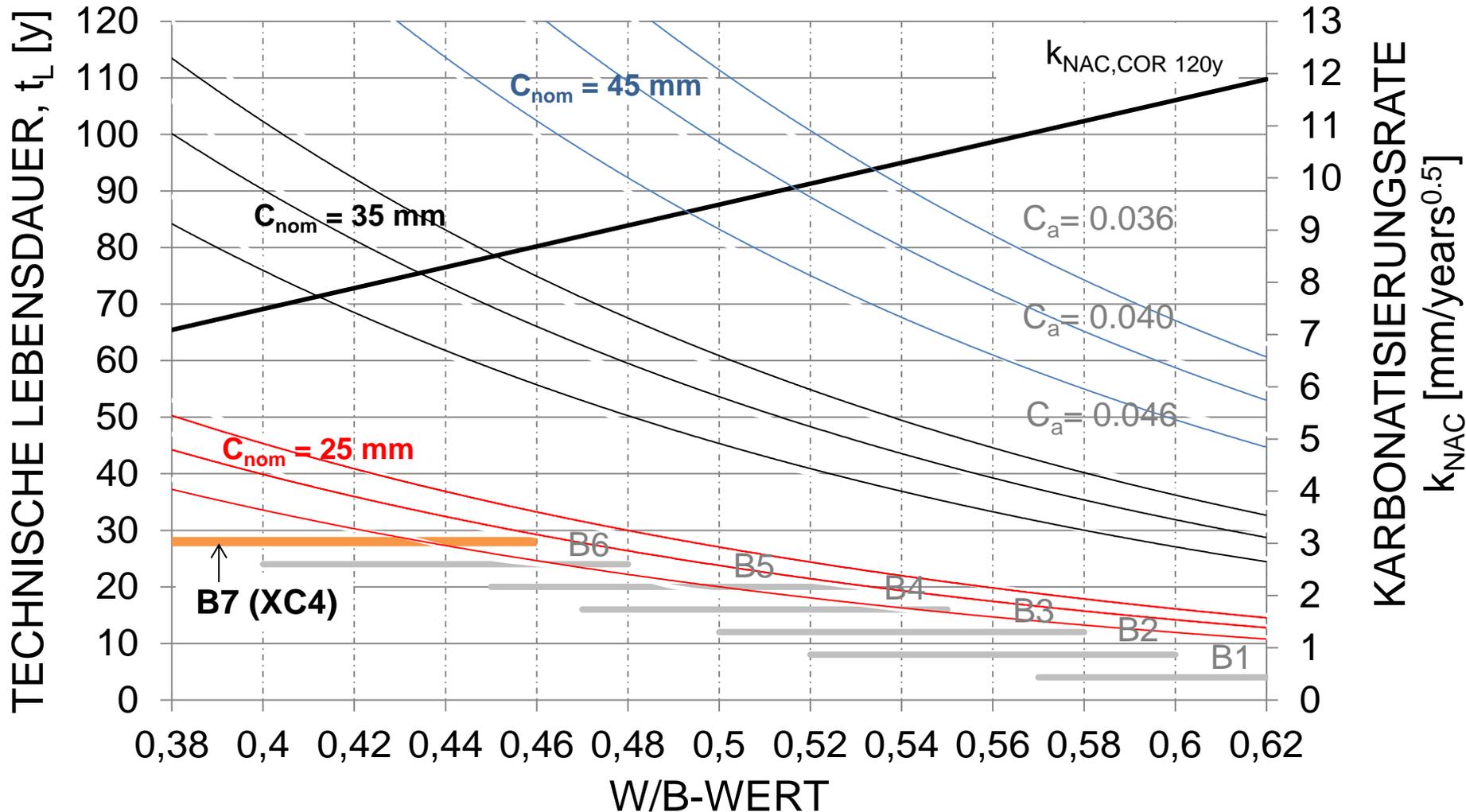
Beton:	Formel:	Jahr:
B7	$y = 20 \cdot wc - 0,51042$	120
B6		
B5	$y = 20 \cdot wc - 1,9104$	120
B4		
B3	$y = 20 \cdot wc - 6,2708$	120
B2	$y = 20 \cdot wc - 5,8327$	80
B1	$y = 20 \cdot wc - 6,8327$	80

Kalibrierung k_{NAC} in Bezug auf Normanforderungen $t_L = 120$ Jahre

Quelle: EN206 (2013) & EN197-1 (2014)

Lebensdauer-Nomogramme - fib Karbon

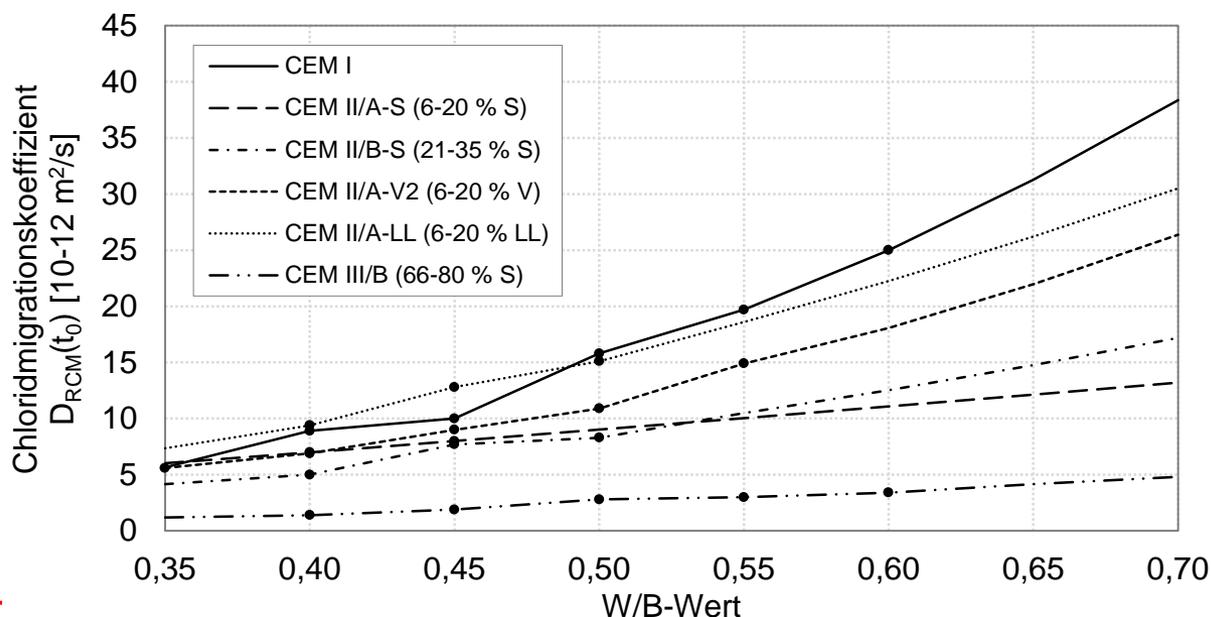
$RH_a = 80$ [%]; $p_{dr} = 0,1$ [%]; $ToW = 0,2$ [%];
 $t_0 = 0,1$ [y]; $t_c = 3$ [d];



D_{app} Parameter - fib Chloridmodell

$$C_x(x, t) = C_0 + (C_{S,\Delta x} - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t) \cdot t}} \right];$$

	$D_{RCM}(t_0)$ [10^{-12} m ² /s]						fitted values	
	ND (μ) and $\sigma=0,20 \cdot \mu$							
	w/b							
	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
CEM I	5,6	8,9	10,0	15,8	19,7	25,0	31,3	38,4
CEM II/A-S (6-20 % S)	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,1	12,1	13,2
CEM II/B-S (21-35 % S)	4,1	5,0	7,7	8,3	10,5	12,5	14,8	17,2
CEM II/A-V ² (6-20 % V)	5,6	6,9	9,0	10,9	14,9	18,1	22,0	26,4
CEM II/A-LL (6-20 % LL)	7,4	9,4	12,8	15,1	18,6	22,2	26,2	30,5
CEM III/B (66-80 % S)	1,2	1,4	1,9	2,8	3,0	3,4	4,1	4,8

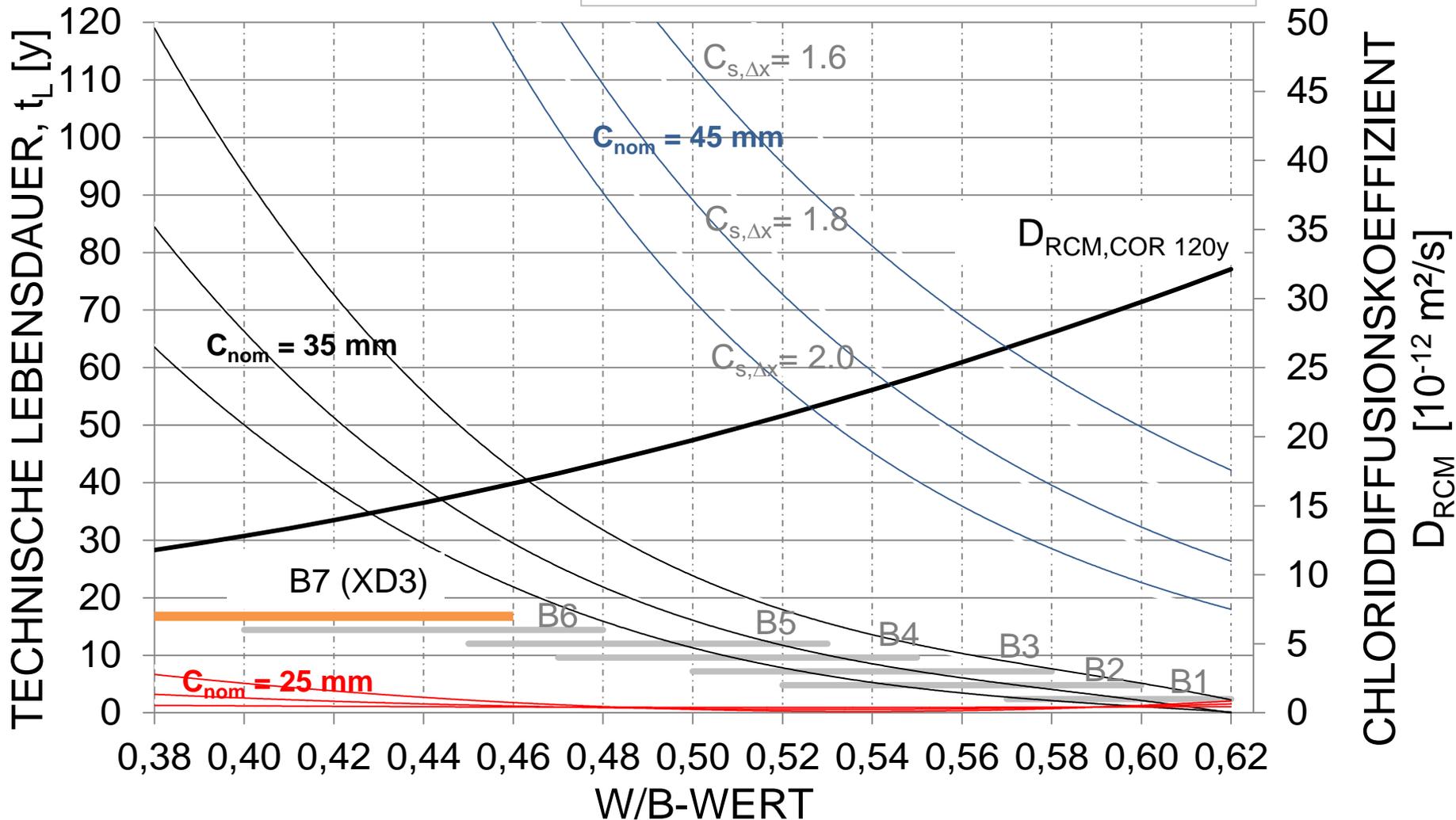


Beton:	Zement:	Formel:	Jahr:
CEM I	B7	$\gamma = 153,11x^2 - 68,333x + 15,64$	120
	B5	$\gamma = 153,11x^2 - 68,333x + 26,6$	120
	B3	$\gamma = 153,11x^2 - 68,333x + 26,65$	80
CEM II/A-S	B2	$\gamma = 153,11x^2 - 68,333x + 28$	60
	B7	$\gamma = 2,868x^2 + 17,543x + 4,7$	120
	B5	$\gamma = 2,868x^2 + 17,543x + 18,38$	120
CEM II/A-V	B3	$\gamma = 2,868x^2 + 17,543x + 21,35$	80
	B2	$\gamma = 2,868x^2 + 17,543x + 20,9$	60
	B7	$\gamma = 120,41x^2 - 64,014x + 18,7$	120
	B5	$\gamma = 120,41x^2 - 64,014x + 31,3$	120
	B3	$\gamma = 120,41x^2 - 64,014x + 32,7$	80
	B2	$\gamma = 120,41x^2 - 64,014x + 31,5$	60
	B7	$\gamma = 59,961x^2 + 2,6101x + 2,13$	120

Kalibrierung D_{app} in Bezug auf Normanforderungen $t_L = 120$ Jahre

Lebensdauer-Nomogramme - fib Chlorid

$C_0 = 0,4$ [wt.-%/c]; $C_{crit} = 0,6\%$; $\alpha = 0,652$ [-];
 $T_{real} = 9$ [°C]; $\Delta x = 5$ [mm]; $t_0 = 0,1$ [y]





LECIE - TOOL

LECIE → STRECKEN → 1062 → 33.003_1062_TESTBRÜCKE_ → OBJEKTDATEN

- Karte
- Galerie
- Dokumente
- Literatur
- Datenbank Kosten
- Datenbank Instandsetzung (Flächen/Volumen)

```

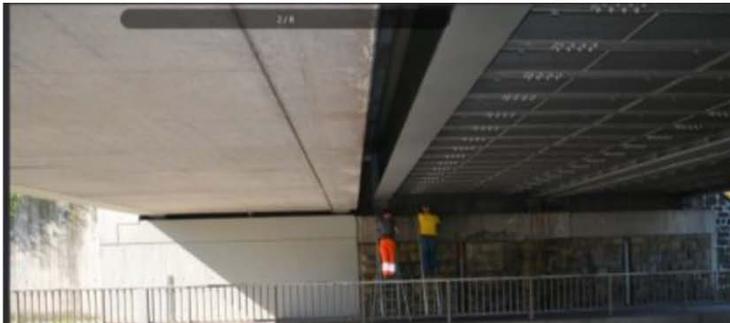
concretes_id INT(11)
concrete_name VARCHAR(100)
concrete_order INT(3)
timestamp TIMESTAMPT
Indexes

```

```

sections
sections_id INT(11)
section_name VARCHAR(100)
bridge_id INT(11)
lphi DOUBLE
lcrnt DOUBLE
construction TINYINT(1)
gam_mam_f DOUBLE
varksncurve DOUBLE
muev DOUBLE
muvar_k DOUBLE
lam_bdanorm DOUBLE
timestamp TIMESTAMPT
Indexes

```



LeCIE WEB-Tool

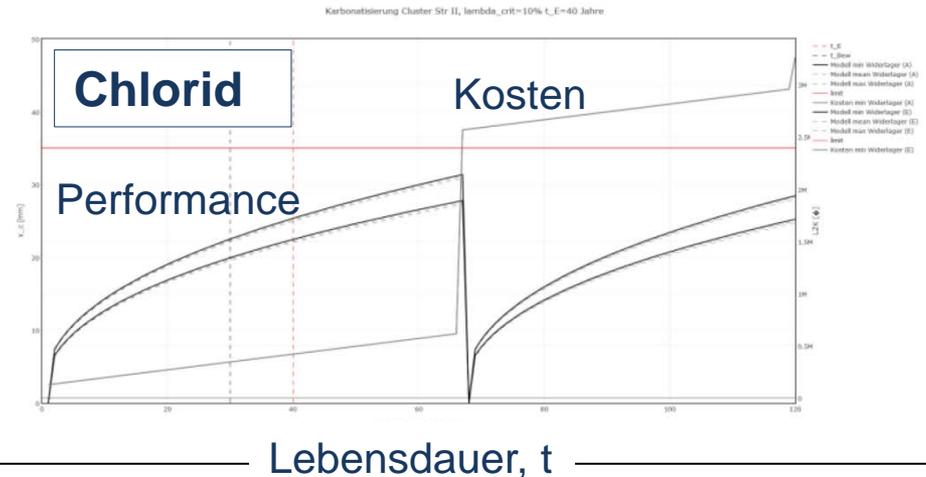
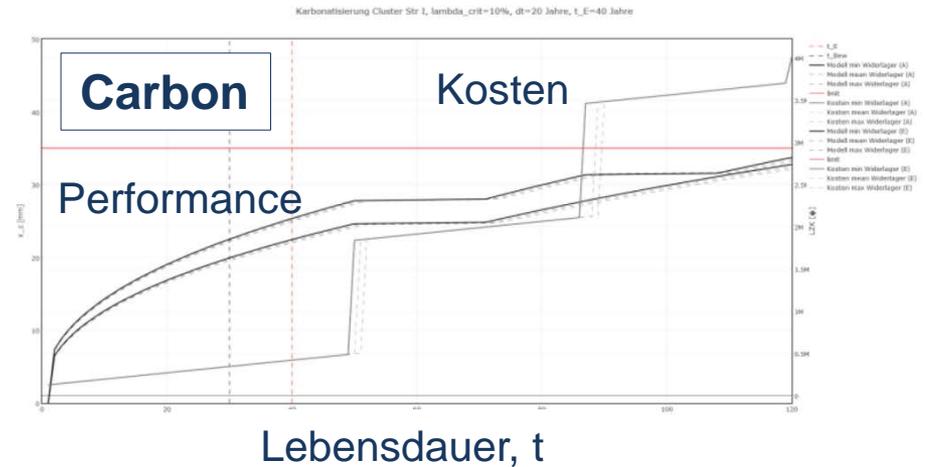
- Datenbank
- Bewertungsmodelle
- Prognosemodelle



LECIE - TOOL

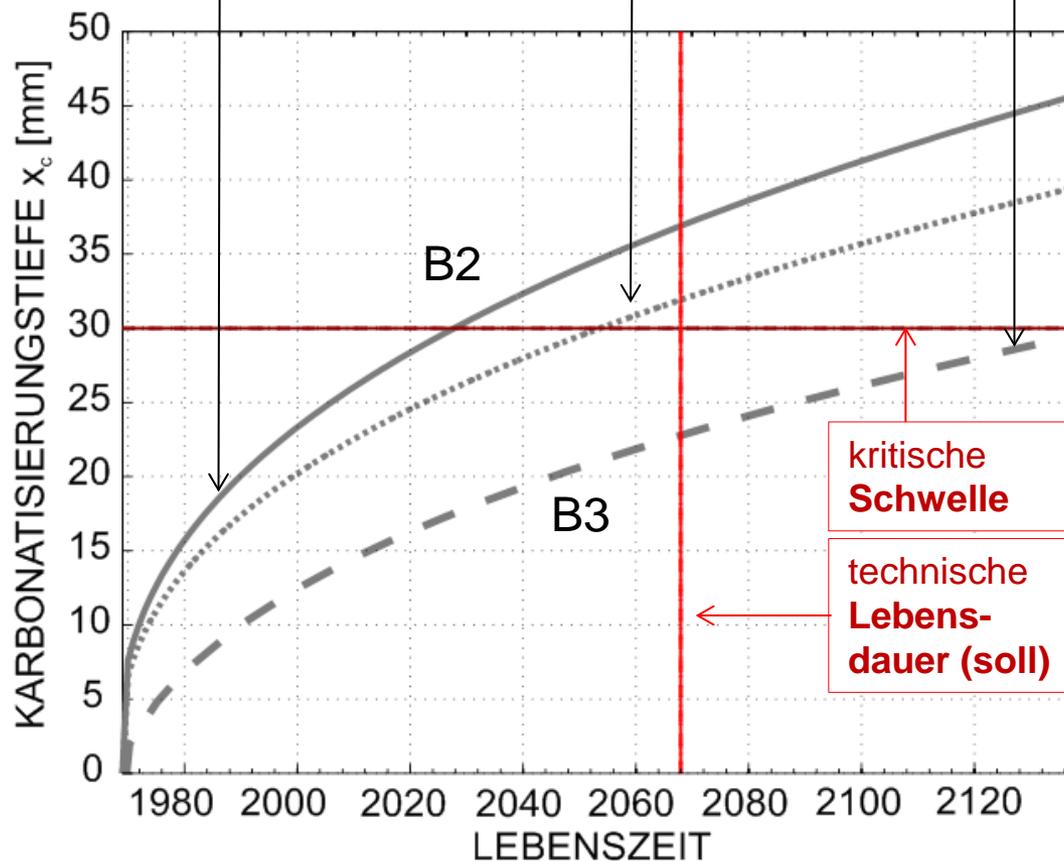
LECIE → STRECKEN → 1062 → 33.003_1062_TESTBRÜCKE MIT STAHLBAU_ → STAHLBETONBAU → FLÜGEL

- Gruppenbewertung ●
- Elementbewertung
- Betoneigenschaften
- Karbonmodell ●
- Chloridmodell ●
- RVS 13.03.51 Prüfung
- Performancemoedell
- Ermüdungsmodell Stahl
- Ermüdungsmodell Beton
- Abrasionsmodell Beton
- Rissmodell
- Frostmodell





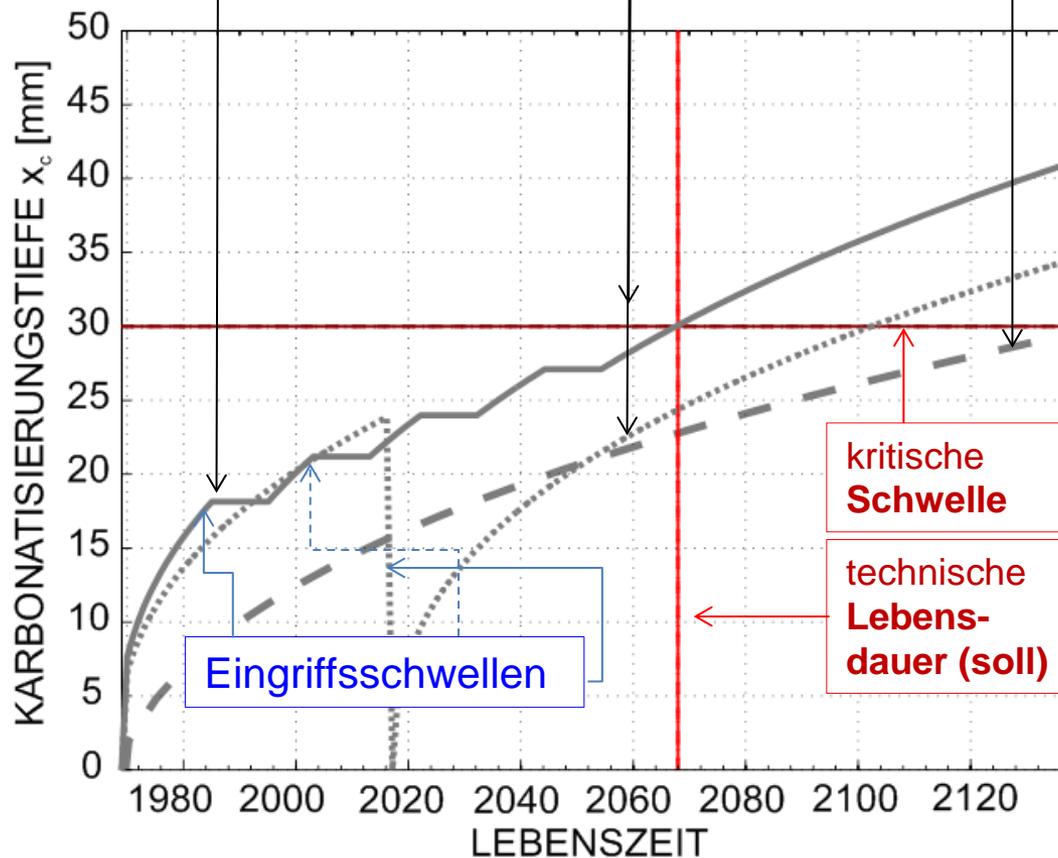
Elementbewertung
➤ ohne Interventionen



Widerlagerwand Interv. Strategie I verzögernd	Widerlagerbank Interv. Strategie II Betonersatz	Flügel 0 - Strategie
--	--	--------------------------------

Elementbewertung

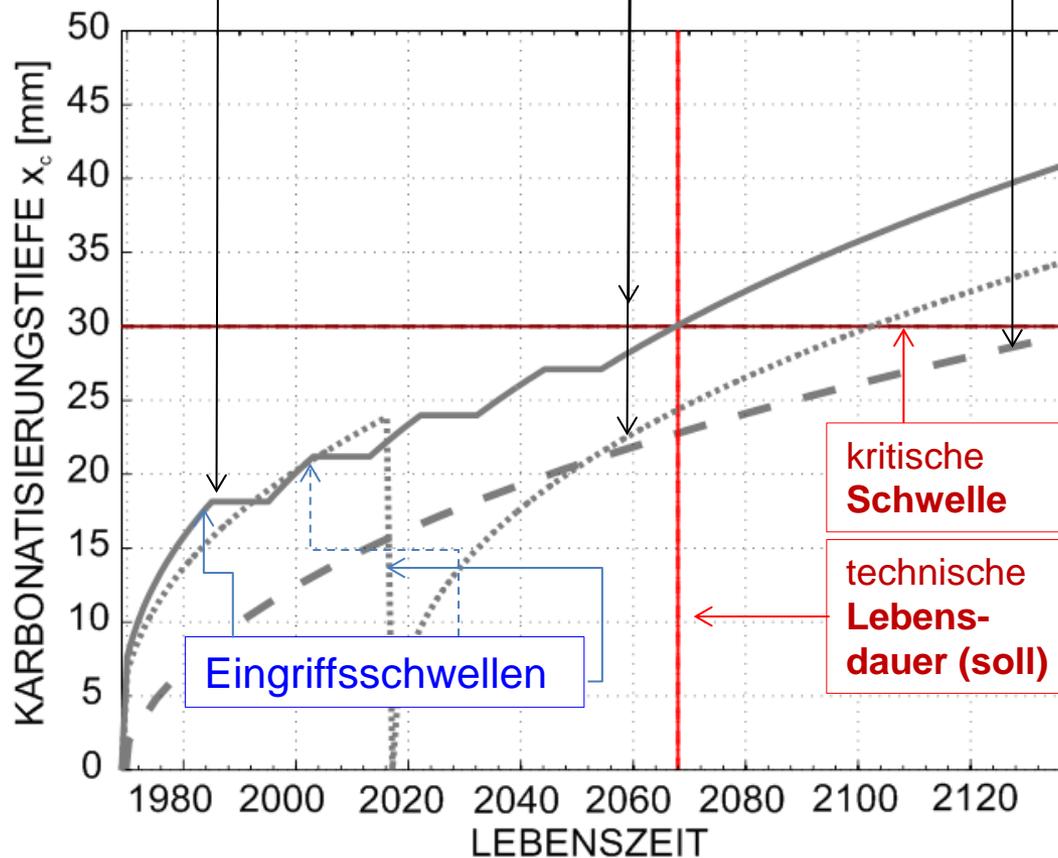
- ohne Interventionen
- performance optimiert



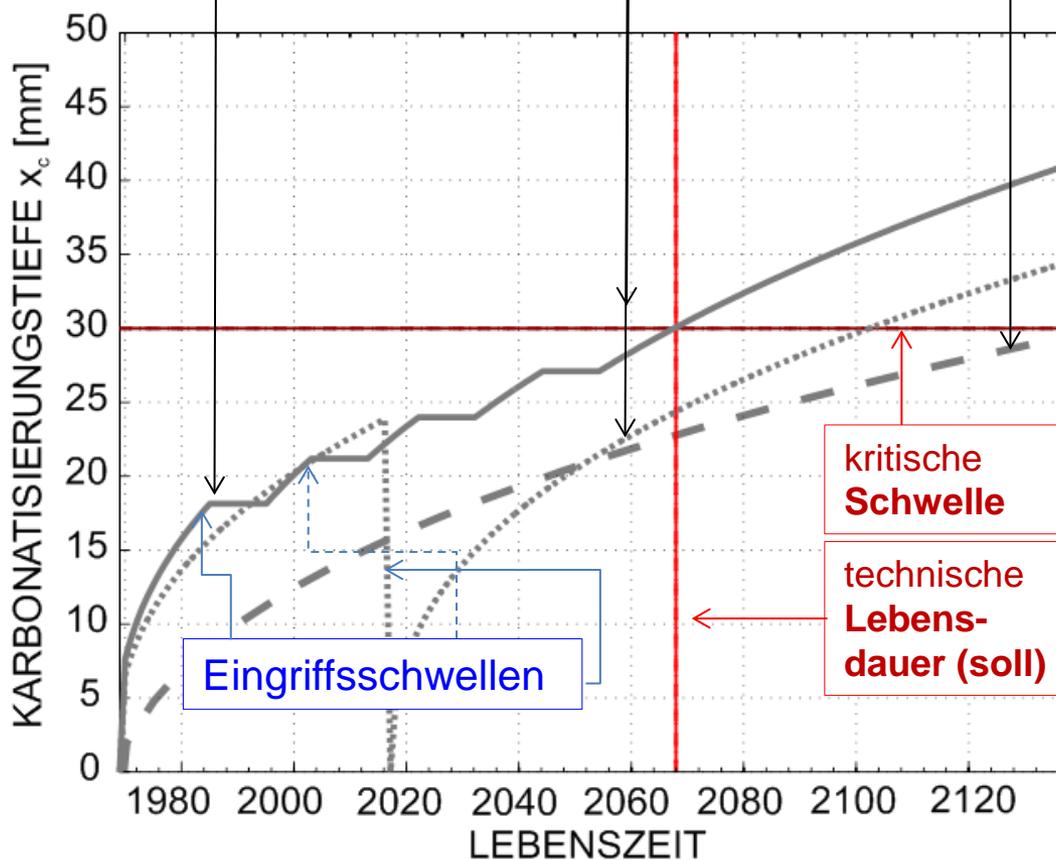
Widerlagerwand Interv. Strategie I verzögernd	Widerlagerbank Interv. Strategie II Betonersatz	Flügel 0 - Strategie
--	--	--------------------------------

Elementbewertung

- ohne Interventionen
- performance optimiert
- **kostenoptimiert**



Widerlagerwand Interv. Strategie I verzögernd	Widerlagerbank Interv. Strategie II Betonersatz	Flügel 0 - Strategie
--	--	--------------------------------



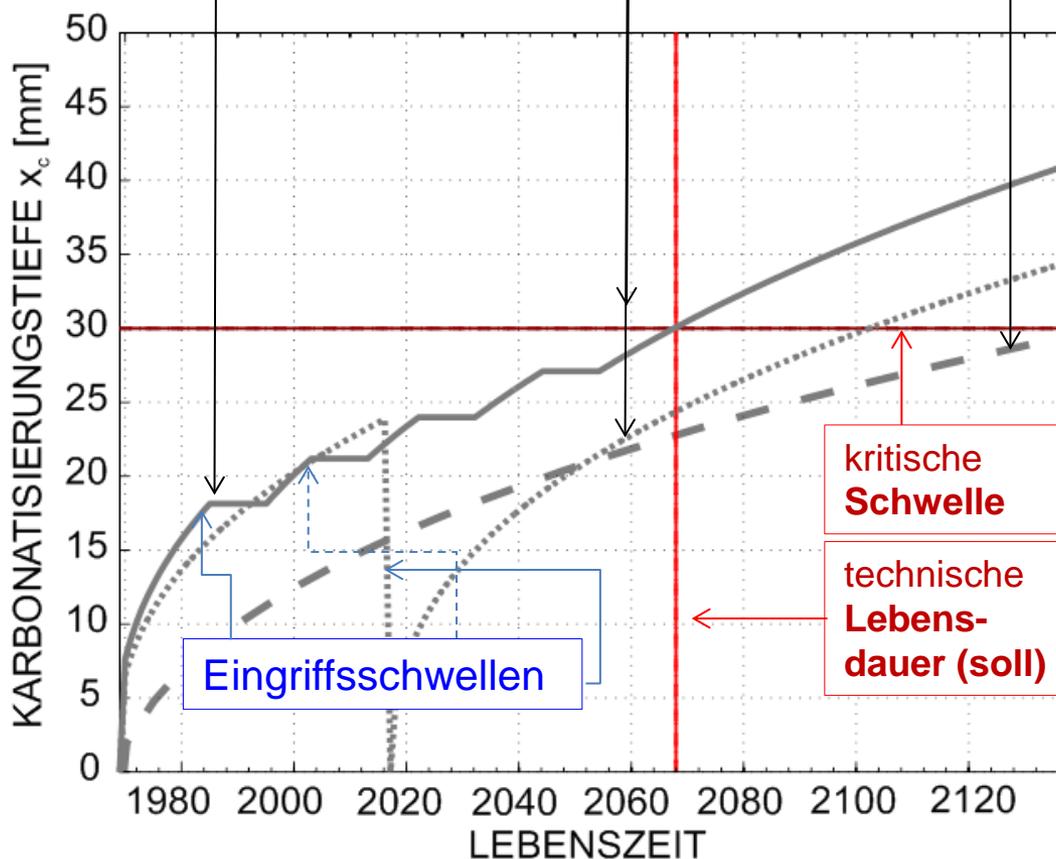
Elementbewertung

- ohne Interventionen
- performance optimiert
- **kostenoptimiert**

Gruppenbewertung

- performance optimiert
- **kostenoptimiert**

Widerlagerwand Interv. Strategie I verzögernd	Widerlagerbank Interv. Strategie II Betonersatz	Flügel 0 - Strategie
--	--	--------------------------------



Elementbewertung

- ohne Interventionen
- performance optimiert
- kostenoptimiert

Gruppenbewertung

- performance optimiert
- kostenoptimiert

Prozesskombinierte Bewertung

- Carbon + Chlorid

Es konnten die **theoretischen** und **praktischen Grundlagen** der **Degradationsfunktionen** in Abhängigkeit verschiedener Instandhaltungsstrategien für Eisenbahnbrücken **geschaffen** werden.

Die im **LeCIE WEB Tool** implementierten Funktionen können dem Management aller technischen Maßnahmen dienen, um die **Funktionalität von Eisenbahnbrücken** über deren gesamte **Lebensdauer** aufrecht zu erhalten.

Vielen Dank für die/Ihre Aufmerksamkeit
Alfred Strauss

Acknowledgment:

The support of the research project “*LeCIE*: Life-cycle assessment for railway constructions – strategies and methods” and the Austrian Federal Railways, particularly ÖBB-Infrastruktur AG, is appreciated. The invaluable contributions to the research made by many interdisciplinary colleagues at the Institute of Structural Engineering, Department of Natural Hazards and Life Sciences, BOKU, are acknowledged.



Lebenszyklusbewertung für Ingenieurbauwerke des Eisenbahnbaues – Strategien und Methoden **Stahltragwerke**

Gerhard LENER, Johannes SCHMID

1. Reale Brückenbelastungen

- Achslastmessdatenauswertung
- Schadensäquivalenzfaktor λ_1
- Schadensäquivalenzfaktoren λ_2 und λ_3
- Verkehrshistorie und Entwicklung

2. Zustandsverlauf des Korrosionsschutzes

3. Einfluss KO-Schutz auf die Ermüdung

4. Life-Cycle-Management-Tool

5. Beispiel Stahlbrücke – Baujahr 1955

- Die Lebensdauer von Stahltragwerken wird durch die **Materialermüdung** bestimmt
- Diese kann durch die **Schädigung D** ausgedrückt werden

$$D = \left(\frac{\Delta\sigma_E}{\Delta\sigma_C} \right)^3 \quad \Delta\sigma_E = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_{71}$$

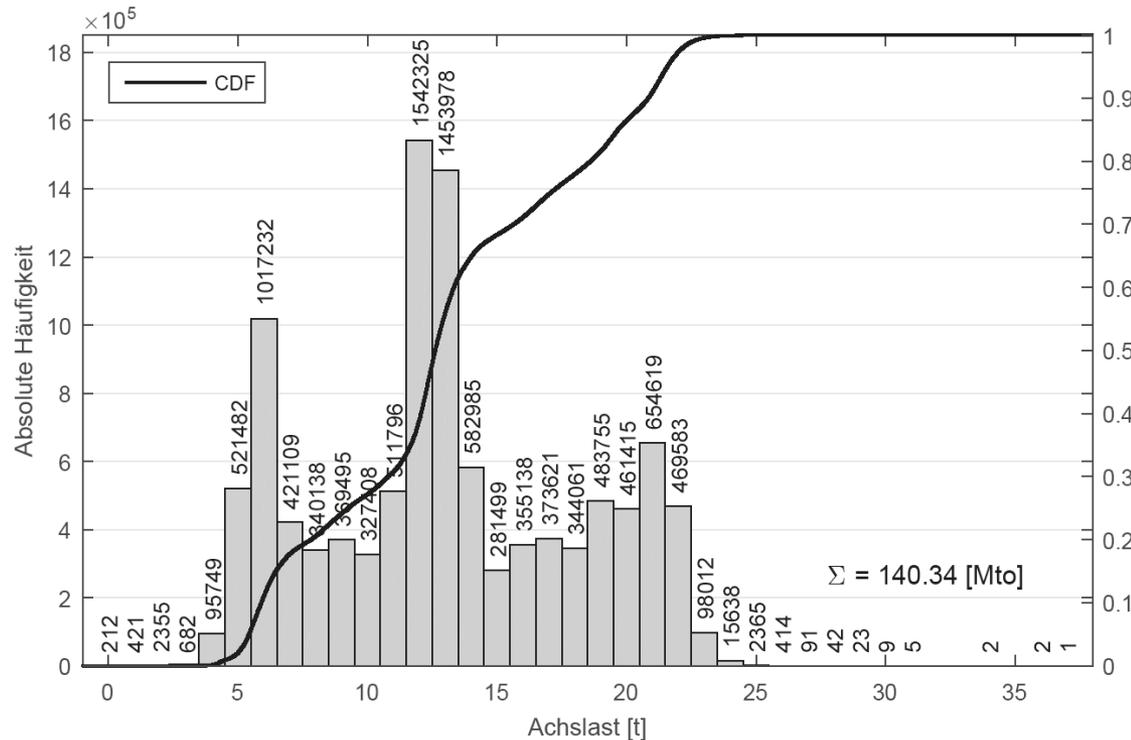
$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \quad \text{laut EN 1993-2} \\ \text{(hier abgeleitet aus realen Verkehr)}$$

anstatt

$$\Delta\sigma_E = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_{71} = \left[\sum (\Delta\sigma_i^3 \cdot n_i / N_E) + \frac{1}{\Delta\sigma_D^2} \cdot \sum (\Delta\sigma_j^5 \cdot n_j / N_E) \right]^{1/3} \quad \text{für } \Delta\sigma_E \geq \Delta\sigma_D$$

$$\Delta\sigma_E = \lambda \cdot \Phi_2 \cdot \Delta\sigma_{71} = \left[\Delta\sigma_D^2 \cdot \sum (\Delta\sigma_i^3 \cdot n_i / N_E) + \sum (\Delta\sigma_j^5 \cdot n_j / N_E) \right]^{1/5} \quad \text{für } \Delta\sigma_E < \Delta\sigma_D$$

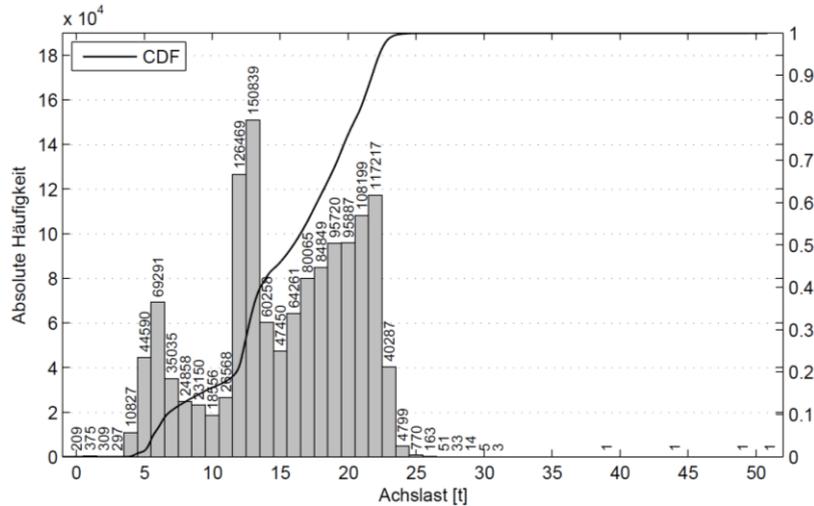
➤ Histogramme und Eckdaten aller 9 Messstellen (2014)



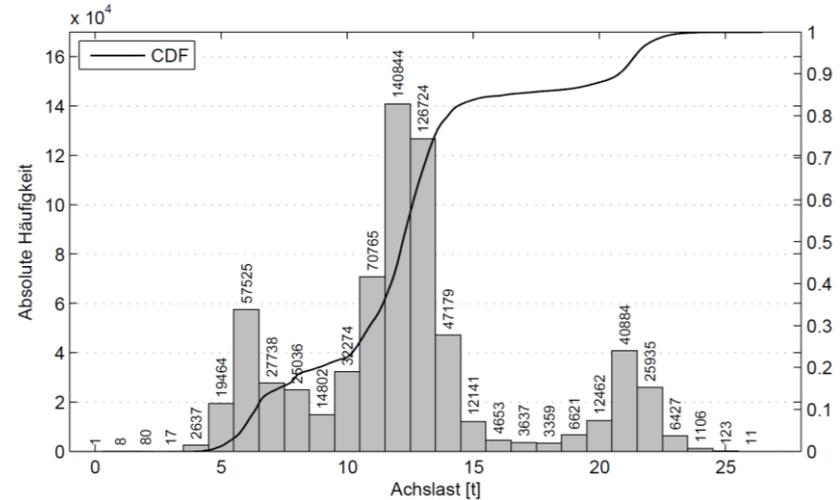
M_m : 140,34 Mio t
 N_{achs} : 10.727.666 Stk
 F_{mean} : 13,08 t
 $P(X > 22,5 t) = 1,09 \cdot 10^{-2}$
 $P(X > 25,0 t) = 1,18 \cdot 10^{-4}$
 $P(X > 30,2 t) = 1,49 \cdot 10^{-6}$

➤ Histogramme und Eckdaten ausgewählter Messstellen

Breitenstein - Semmering Gleis 1

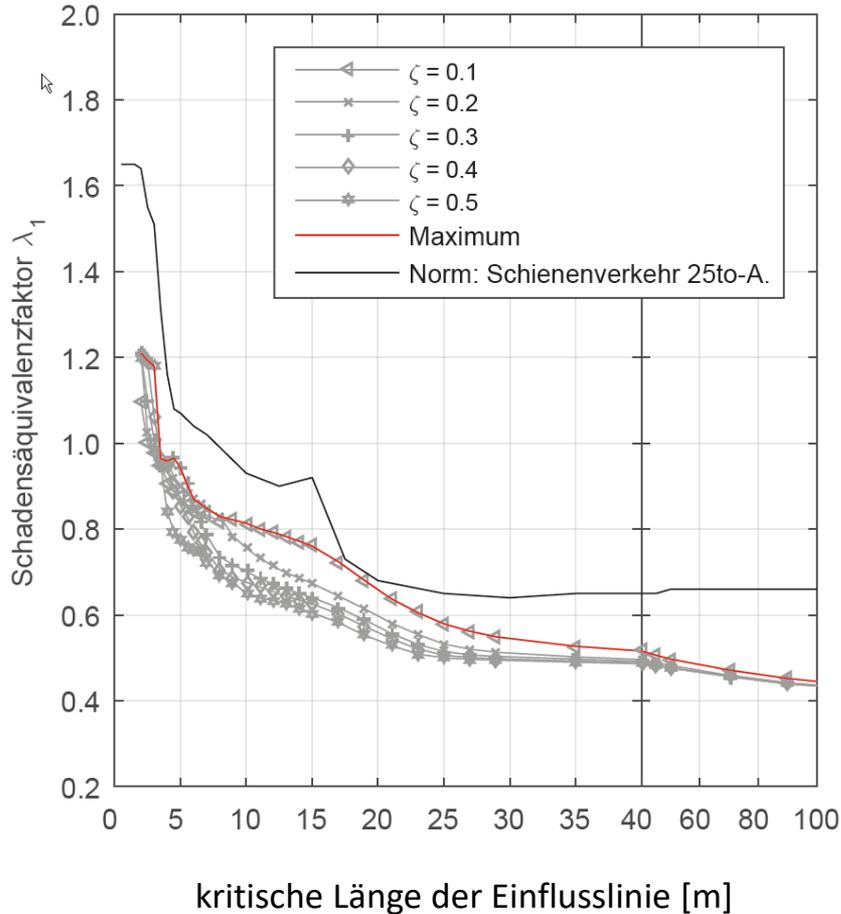


Nenzing Gleis 1



M_m : 20,43 Mio t $P (X > 22,5 \text{ t}) = 3,46 \cdot 10^{-2}$
 N_{achs} : 1.331.408 Stk $P (X > 25,0 \text{ t}) = 3,74 \cdot 10^{-4}$
 F_{mean} : 15,35 t $P (X > 30,2 \text{ t}) = 6,76 \cdot 10^{-6}$

M_m : 8,45 Mio t $P (X > 22,5 \text{ t}) = 1,12 \cdot 10^{-2}$
 N_{achs} : 682.453 Stk $P (X > 25,0 \text{ t}) = 4,69 \cdot 10^{-5}$
 F_{mean} : 12,38 t $P (X > 30,2 \text{ t}) = 0$



Ableitung von λ_1 (Spannweitenbeiwert)
aus den Messdaten und dem Lastmodell
71 als Referenzmodell – EN 1993-2

$$D = \frac{\sum n_i \Delta \sigma_i^{m_1} + \sum n_j \Delta \sigma_j^{m_2} \left[\left(\frac{N_C}{N_D} \right)^{1/m_1} \cdot \lambda_1 \Phi_2 \Delta \sigma_{71} \right]^{m_1 - m_2}}{N_D \cdot \left[\left(\frac{N_C}{N_D} \right)^{1/m_1} \cdot \lambda_1 \Phi_2 \Delta \sigma_{71} \right]^{m_1}} \cdot \frac{25 \cdot 10^6}{M_m} \cdot \frac{100}{t_m} = 1$$

λ_2 ... Verkehrsstärkebeiwert

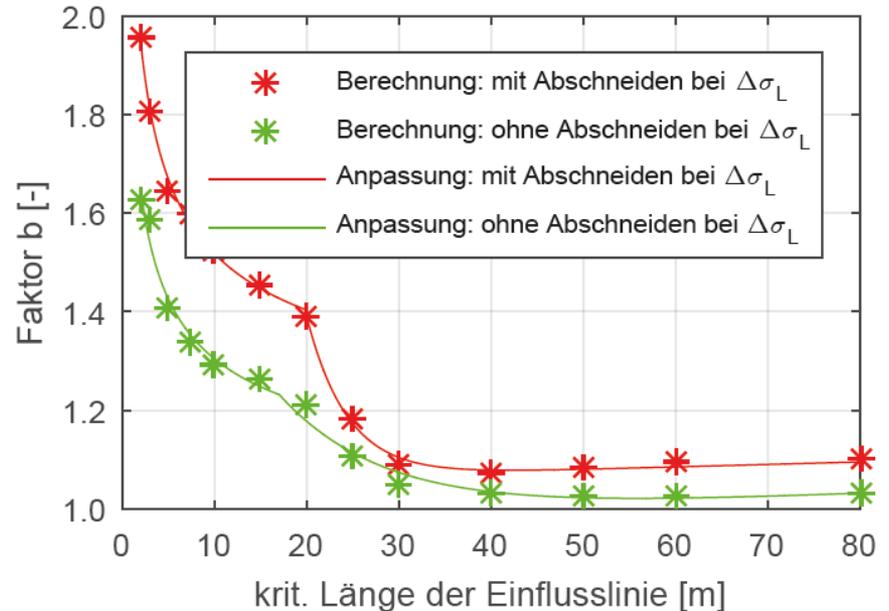
$$\lambda_2 = \left(\frac{M_q}{25 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{b \cdot m_1}}$$

M_q .. tatsächliche
Jahresbruttotonnagen

λ_3 ... Nutzungsdauerbeiwert

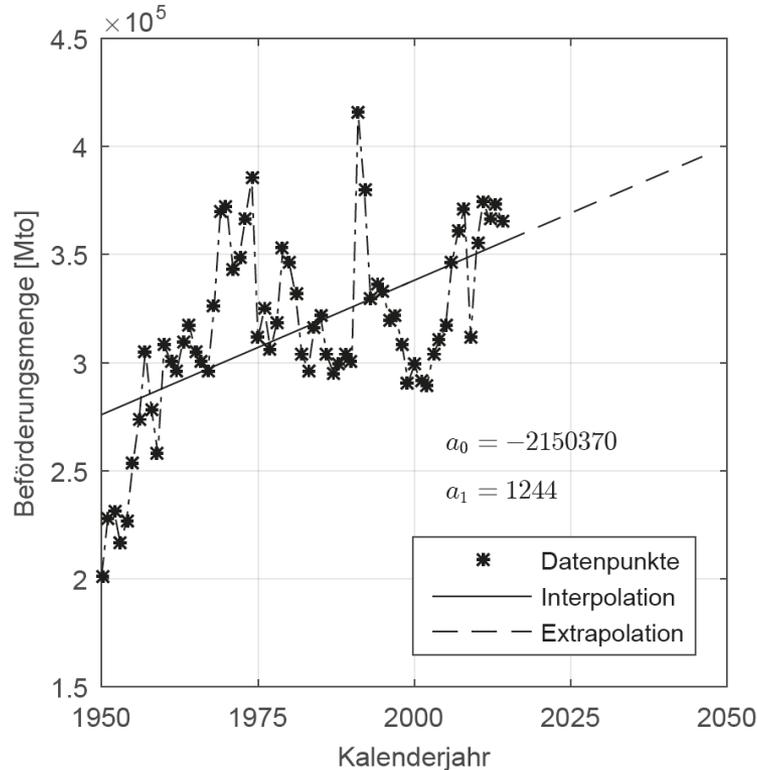
$$\lambda_3 = \left(\frac{t_s}{100} \right)^{\frac{1}{b \cdot m_1}}$$

t_s .. Nutzungsdauer in Jahren



$$b = f(L_{krit}) = (a_0 \cdot L_{krit}^{a_1} + a_2) \cdot (1 - H(L_{krit} - \bar{L})) + (a_3 \cdot \exp(a_4 \cdot L_{krit}) + a_5 \cdot \exp(a_6 \cdot L_{krit})) \cdot H(L_{krit} - \bar{L})$$

Defaultwerte für die angenommene Verkehrshistorie und zukünftige Verkehrsentwicklung



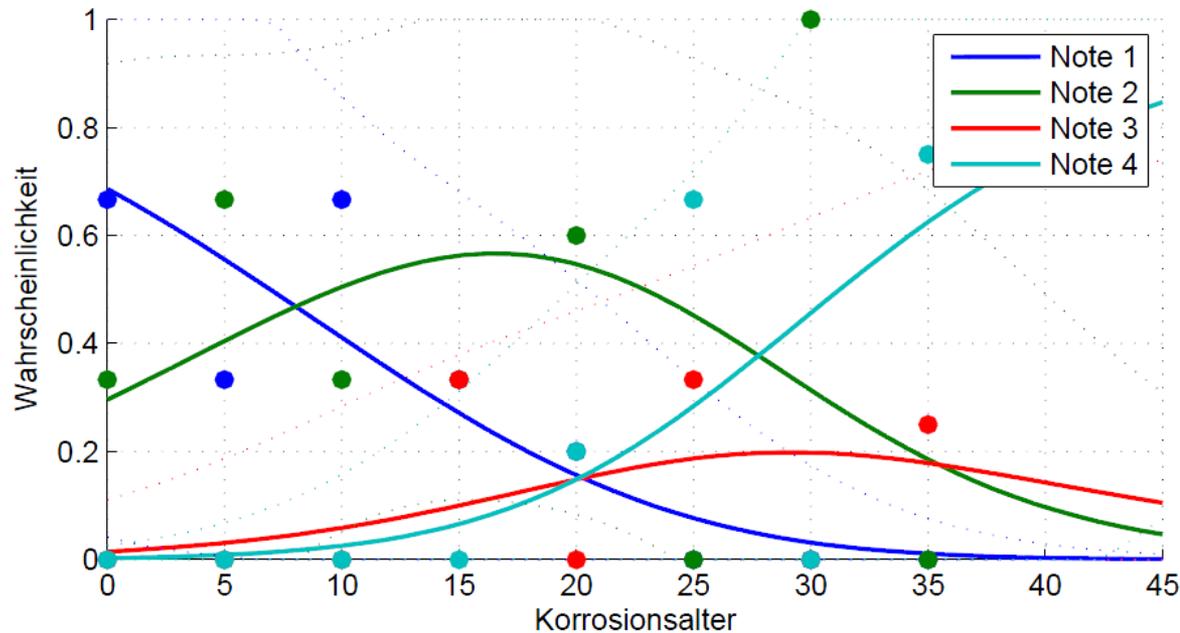
Daten aus: *Statistisches Bundesamt*: Güterbeförderung im Eisenbahnverkehr.

https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Gueterverkehr/Tabellen_/Eisenbahn.html

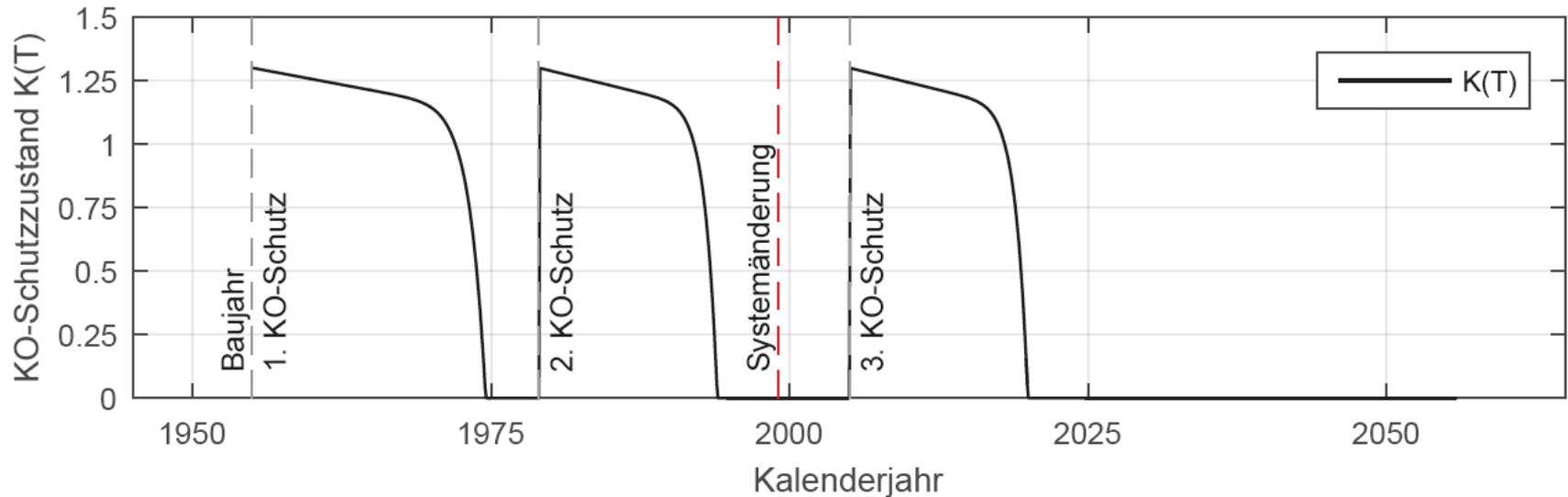
➤ Basierend auf der Auswertung von Fragebögen

Multinominales Logit-Modell (glob. Korrosion)

(Bewertung nach dem Schulnotensystem 1 bis 5)



➤ Basierend auf den Erfahrungen bei der ÖBB

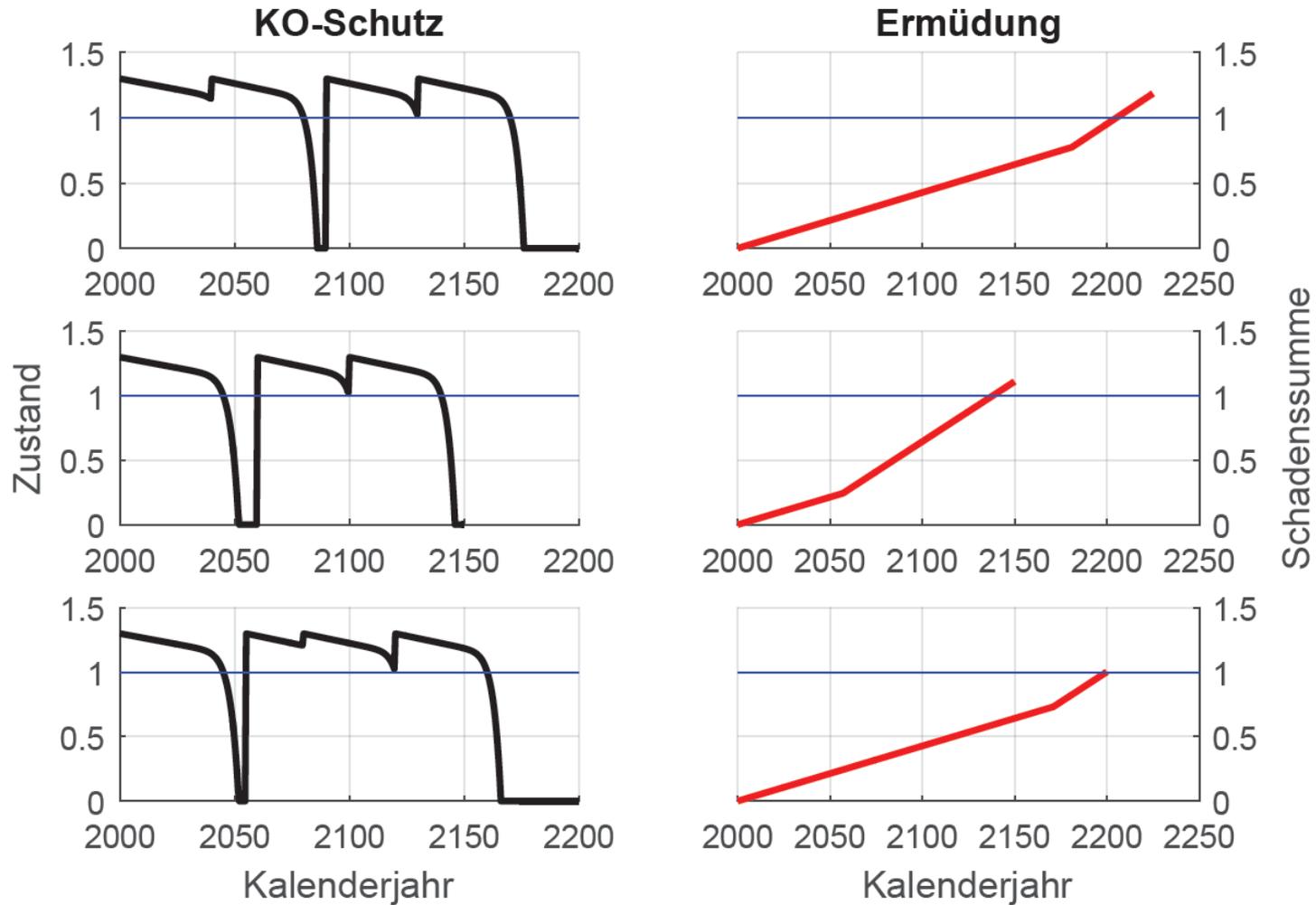


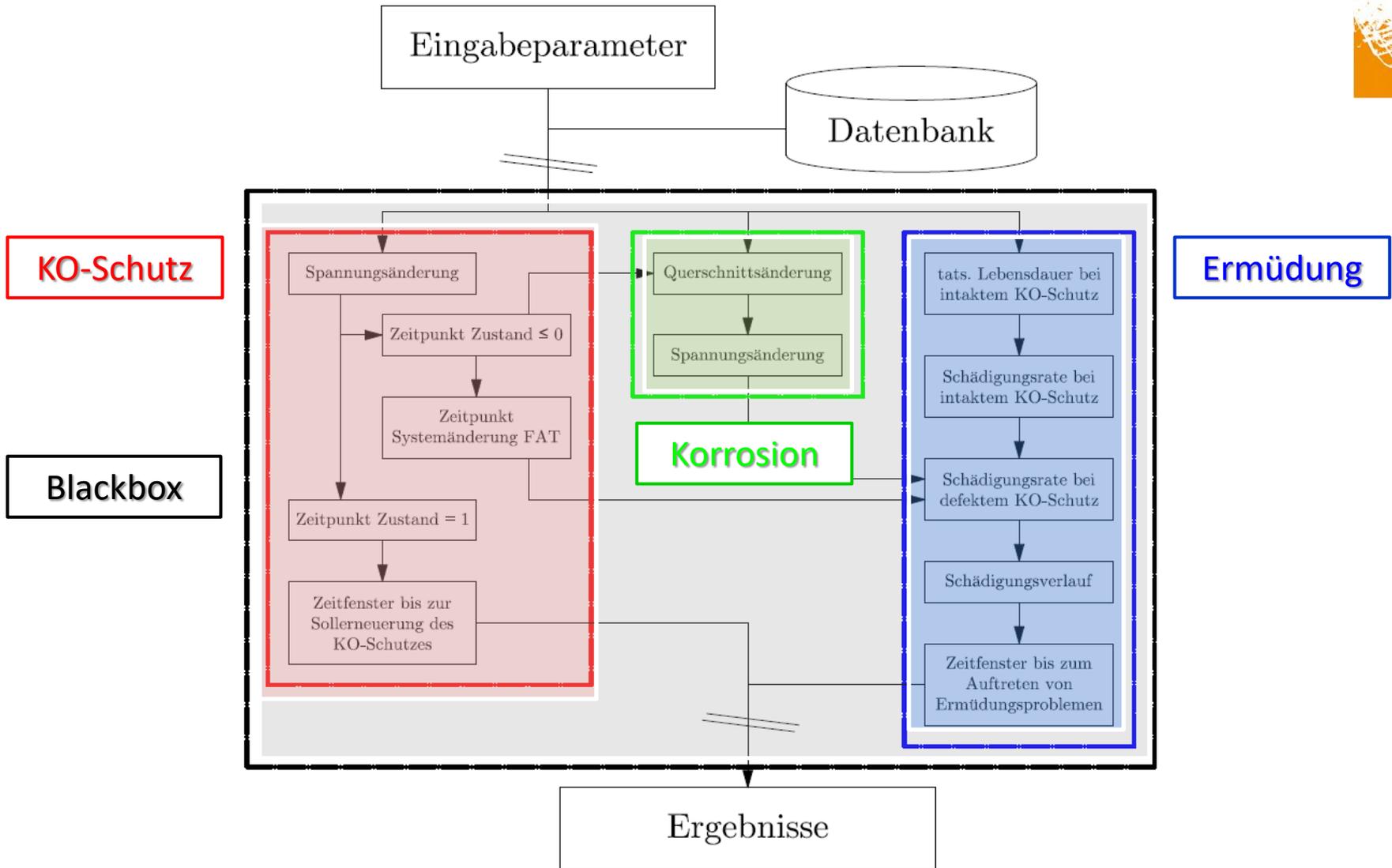
$K(T) = 1$... KO-Schutz mit 95% Wahrscheinlichkeit in allen Schichten gerade noch intakt

$1 > K(T) > 0$... rapide Verschlechterung des KO-Schutzes

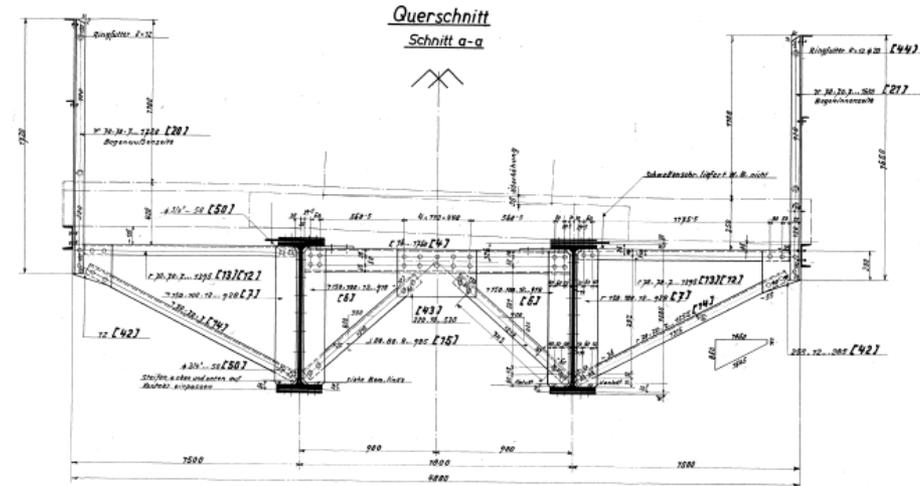
$K(T) = 0$... keine Schutzwirkung mehr vorhanden
(nach 5 Jahren Erhöhung der Schädigungsrate und Miner elementar)

Einfluss KO-Schutz auf die Ermüdung

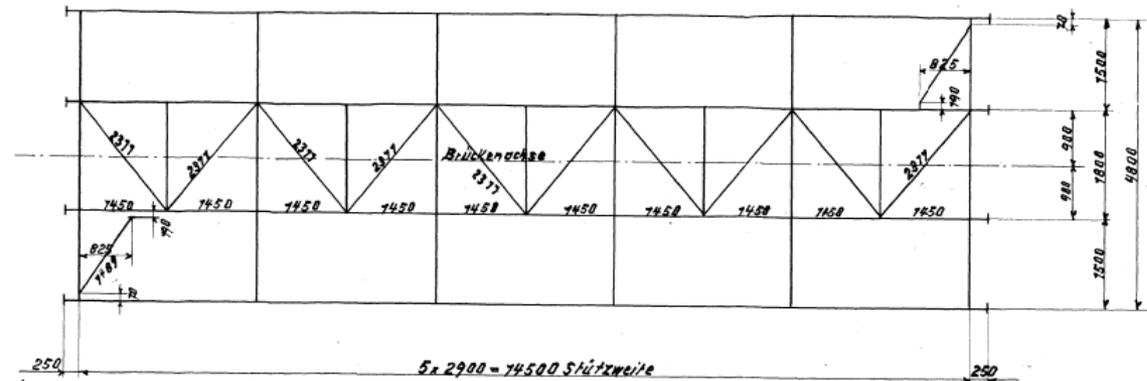




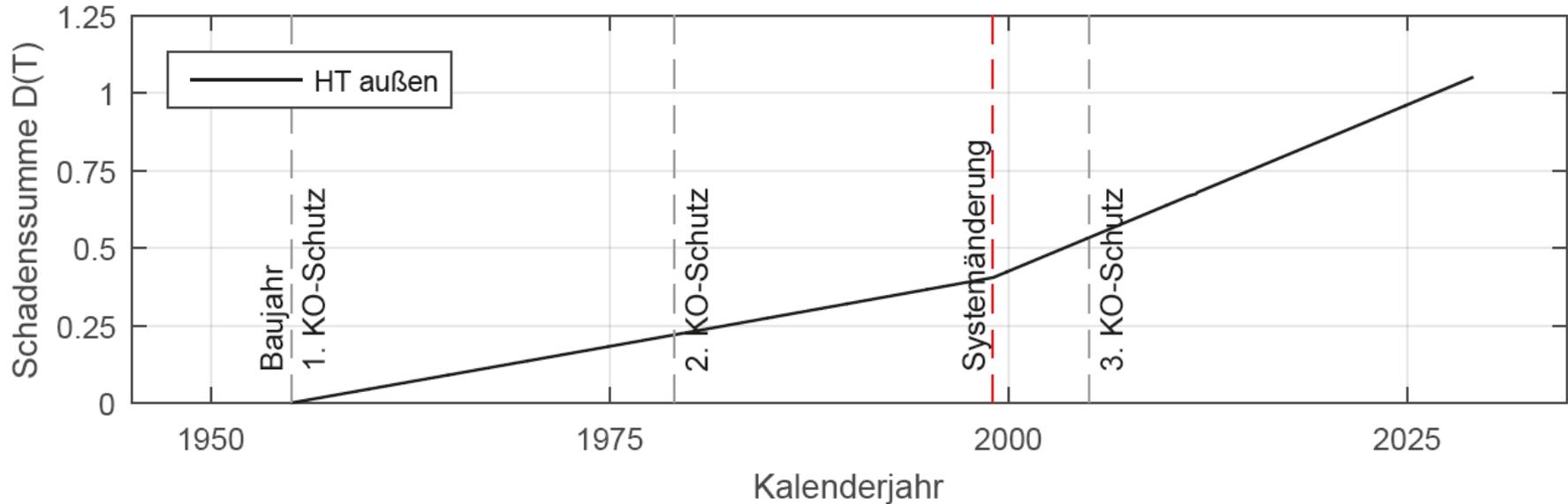
Beispiel Stahlbrücke – Baujahr 1955



Brücke „Taschlbach“
Spannweite 15m
Einfeldträger

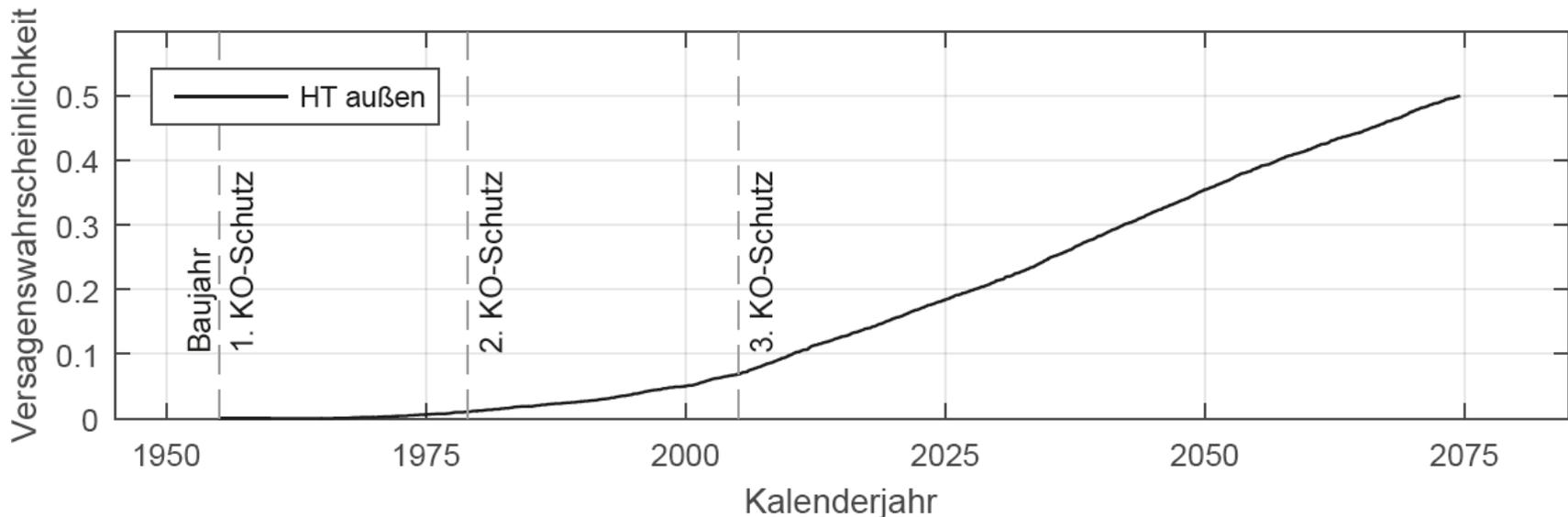


➤ Schadenssumme $D(T)$ des bogenäußeren Hauptträgers



$$D(T) = \int \dot{D}(T) dT = \int \left[\dot{D}(T - T_0) \cdot 1 + \kappa - 1 \cdot H(T - T_{ds}) \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_E(T)}{\Delta\sigma_E(T_0)} \right)^{m_1} \right] \cdot H(T - T_0) \cdot dT$$

- Wahrscheinlichkeit P_f eines technischen Anrisses am bogenäußeren Hauptträger



$$P_f = P(g(\mathbf{X}, t) \leq 0)$$

$$g(\mathbf{X}, t) = D_R(X_1) - D_S(X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, t) = 0$$

Genauigkeit des Verfahrens

