



Monitoringsysteme zur Bewertung des Schädigungszustandes von Brückenbauwerken

Für quantifizierte Aussagen
zur Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer

Ursula Freundt / Carsten Könke / Michael Hölzer /
Sebastian Böning / Albrecht Schmidt

Bergisch-Gladbach

30.11.2015

Projekt gefördert durch die Bundesanstalt für Straßenwesen



Überblick

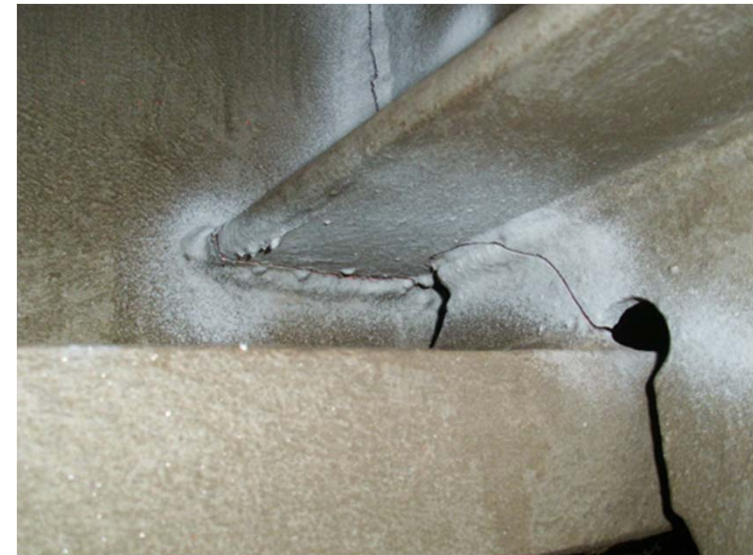
1. Motivation
2. Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer
3. Monitoring- und Bewertungskonzept
4. Das Monitoringsystem an einem fiktiven Beispiel
5. Das Monitoringsystem und die Nachrechnungsrichtlinie



Motivation

Monitoringsystem zur Bewertung von Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer bestehender Brücken.

Ziel: Bewertung durch quantifizierte aber unscharfe Aussagen



Bilder: Straßen NRW



Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer

Tragfähigkeit

- die Fähigkeit eines Bauteiles oder Bauwerkes, dem Versagen zu widerstehen
- Als Maß wird der Sicherheitsindex β verwendet.

Restnutzungsdauer

- Ist die Zeitdauer, die sich unter den Annahmen für die Berechnung als Zeit ohne Ermüdungsversagen ergibt.
- Als Maß wird die Schädigungssumme D verwendet.



1	Modell des idealen initialen Systems (System ungeschädigt) Zuverlässigkeitsindex mit den stochastischen Beschreibungen der Rand- und Lastbedingungen zum Zeitpunkt t_0 der Konstruktion des Bauwerks; Theoretischer Zuverlässigkeitsindex des Tragwerks zum Erstellungszeitpunkt
----------	---

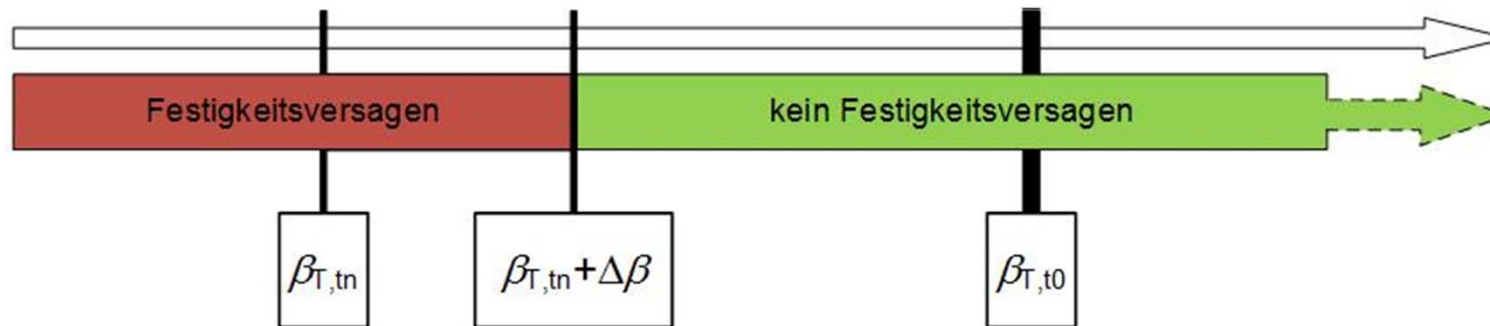
Monitoring

2	Modell des identifizierten Systems (Berücksichtigung des aktuellen, geschädigten Systemzustands aus Messungen) zum aktuellen Zeitpunkt t_1 Zuverlässigkeitsindex des Systems nach Identifikation der Systemparameter aus Messungen und monitoringbasierten stochastischen Beschreibungen der Rand- und Lastbedingungen
3	Modell des Systems in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (Vorhersage) zum Zeitpunkt t_n Ermittlung des Zuverlässigkeitsindex für zukünftige Schädigungs- und Lastsituationen bis zum Erreichen des Grenzzustands der Tragfähigkeit
4-n	Modell des identifizierten Systems zu Zeitpunkten t_i Vorhersage des Zuverlässigkeitsindex des identifizierten Systems unter Berücksichtigung eines zukünftigen Schädigungszustands und den Rand- und Lastbedingungen zum zukünftigen Zeitpunkt t_2 bis t_n

Das Monitoringsystem

Bewertungsstrategie – Tragfähigkeit

Verwendung des Zuverlässigkeitsindex β als Maß der Zuverlässigkeit



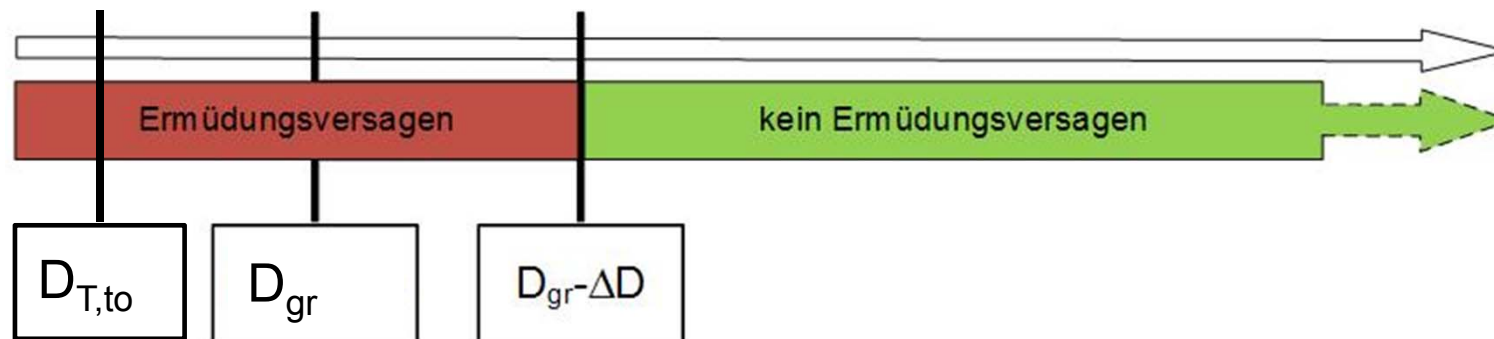
$\beta_{T,t0}$ initiales Tragsystem

$\beta_{T,tn}$ Tragsystem kurz vor dem Bruchzustand

$\Delta\beta$ definierter Abstand zum rechnerischen $\beta_{T,tn}$

Bewertungsstrategie - Ermüdung

Verwendung der Schädigungssumme D als Maß der Bewertung



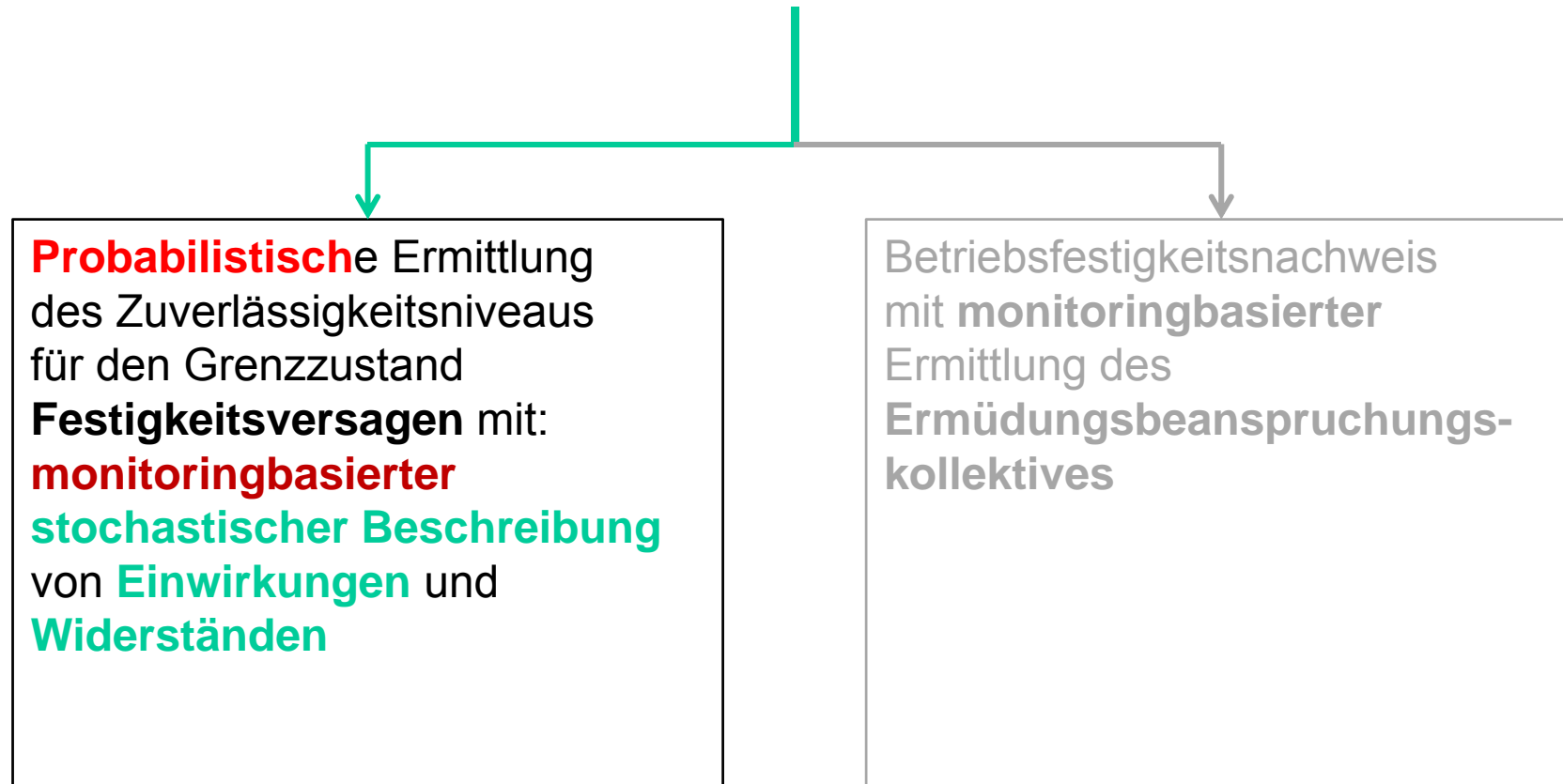
$D_{T,to}$ Ertragbare Ermüdungsschädigung initiales Tragsystem

D_{gr} Ertragbare Ermüdungsschädigung geschädigtes Tragsystem

ΔD definierter Abstand zu D_{gr}

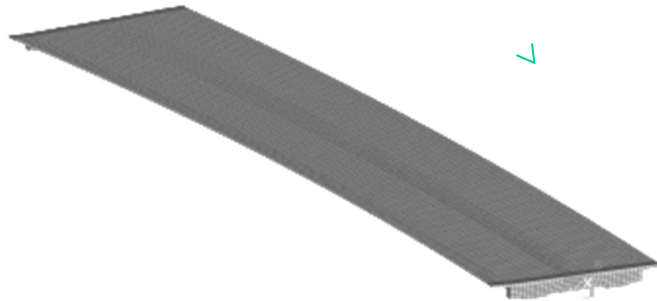


Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer

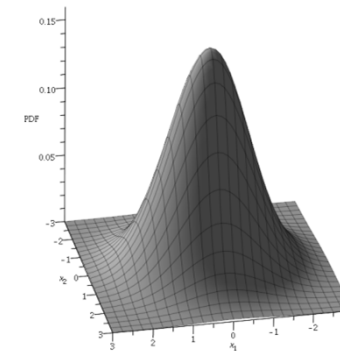


Probabilistisches Konzept

Tragsystem:



Stochastische Modelle:
E(X) / R(X) Widerstände



Zustandsfunktion: $g(\mathbf{X}) = R(\mathbf{X}) - E(\mathbf{X})$

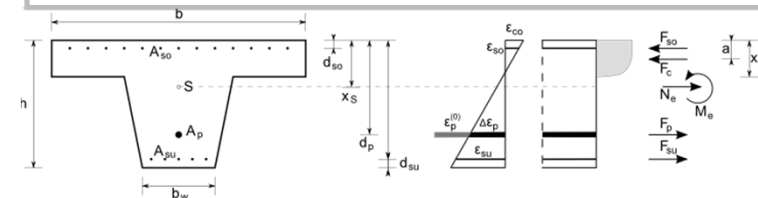
Versagenswahrscheinlichkeit:

$$P_f = P(E(\mathbf{X}) > R(\mathbf{X})) = \int_{g(\mathbf{x}) \leq 0} f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

Lösungsverfahren:

FORM oder SORM, ISPUD, AS, PMC, ...

Grenzzustand: $R(\mathbf{X}) > E(\mathbf{X})$



$$P_f = \Phi(-\beta)$$

Monitoringbasierte stochastische Beschreibungen von Widerständen

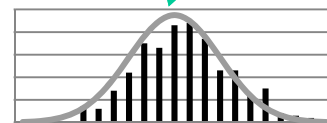
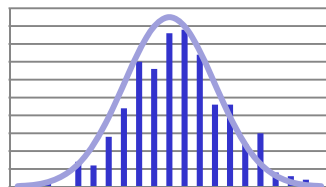
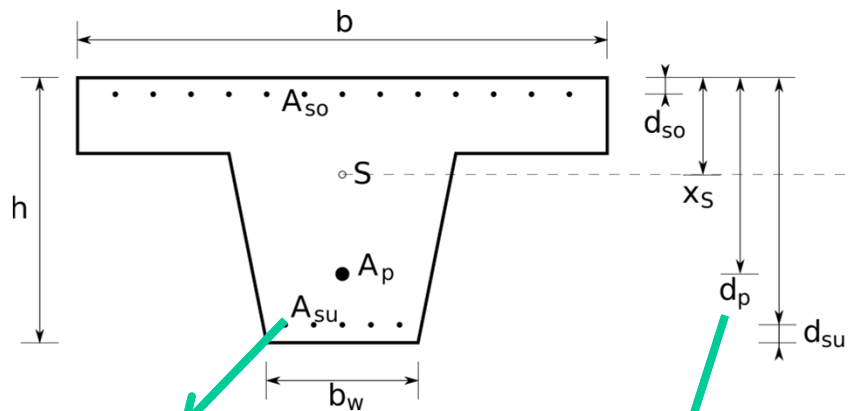
Welche physikalischen Größen?

- Festigkeiten
- Elastizitätsmodul
- Geometrieabmessungen
- Lage Bewehrung



Woher stochastische Modelle, Verteilungen?

- Ableitung aus Geometrieabmessungen am Querschnitt
- **Stichproben**, Messungen
Geometrie;
Abgleich Planungsunterlagen
- **Literatur**



Probenentnahme
+ Analyse

zerstörungsfreie
Messverfahren

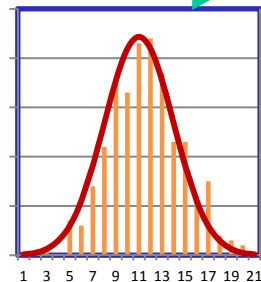
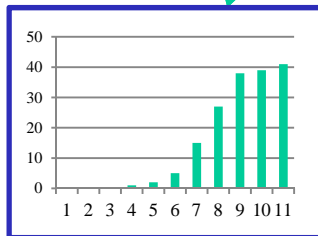
Häufigkeitsverteilungen
Verteilungsfunktionen



Monitoringbasierte stochastische Beschreibungen von Einwirkungen

Welche Einwirkungen ?

- ständige Lasten:
Eigenlasten, Ausbaulaste
- Windlasten,
- Zwangsbeanspruchungen
Temperatur, Setzungen, ...
- außergewöhnliche Belastungen:
Erdbeben



Woher stochastische Modelle, Verteilungen?

- Ableitung aus Geometrieabmessungen
- Stichproben, Messungen:
Dichte; Homogenität
- **Literatur**

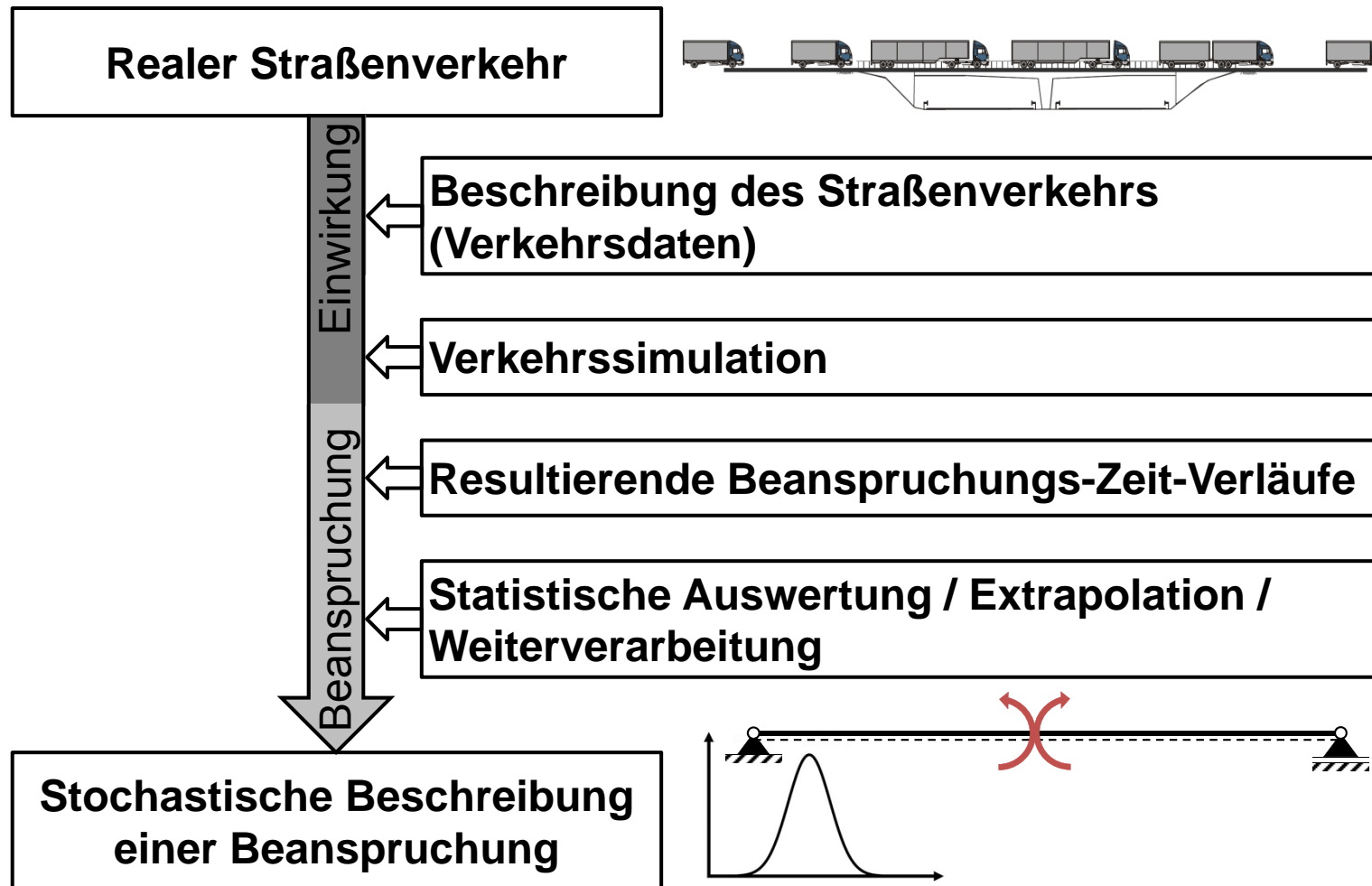
Probenentnahme
+ Analyse

zerstörungsfreie
Messverfahren

Häufigkeitsverteilungen
Verteilungsfunktionen

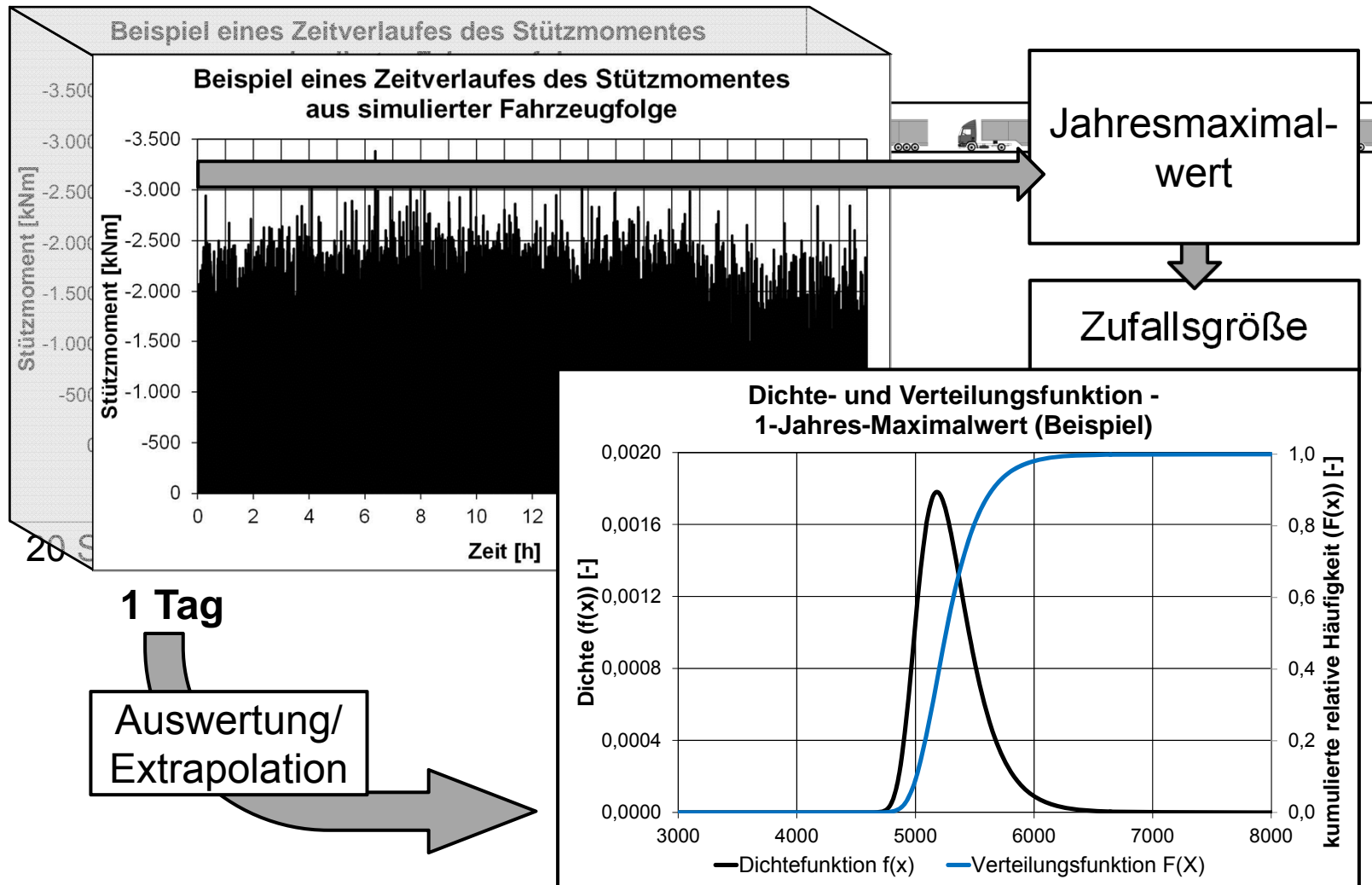


Ermittlung monitoringbasierter stochastischer Beschreibungen von Beanspruchungen aus Verkehr



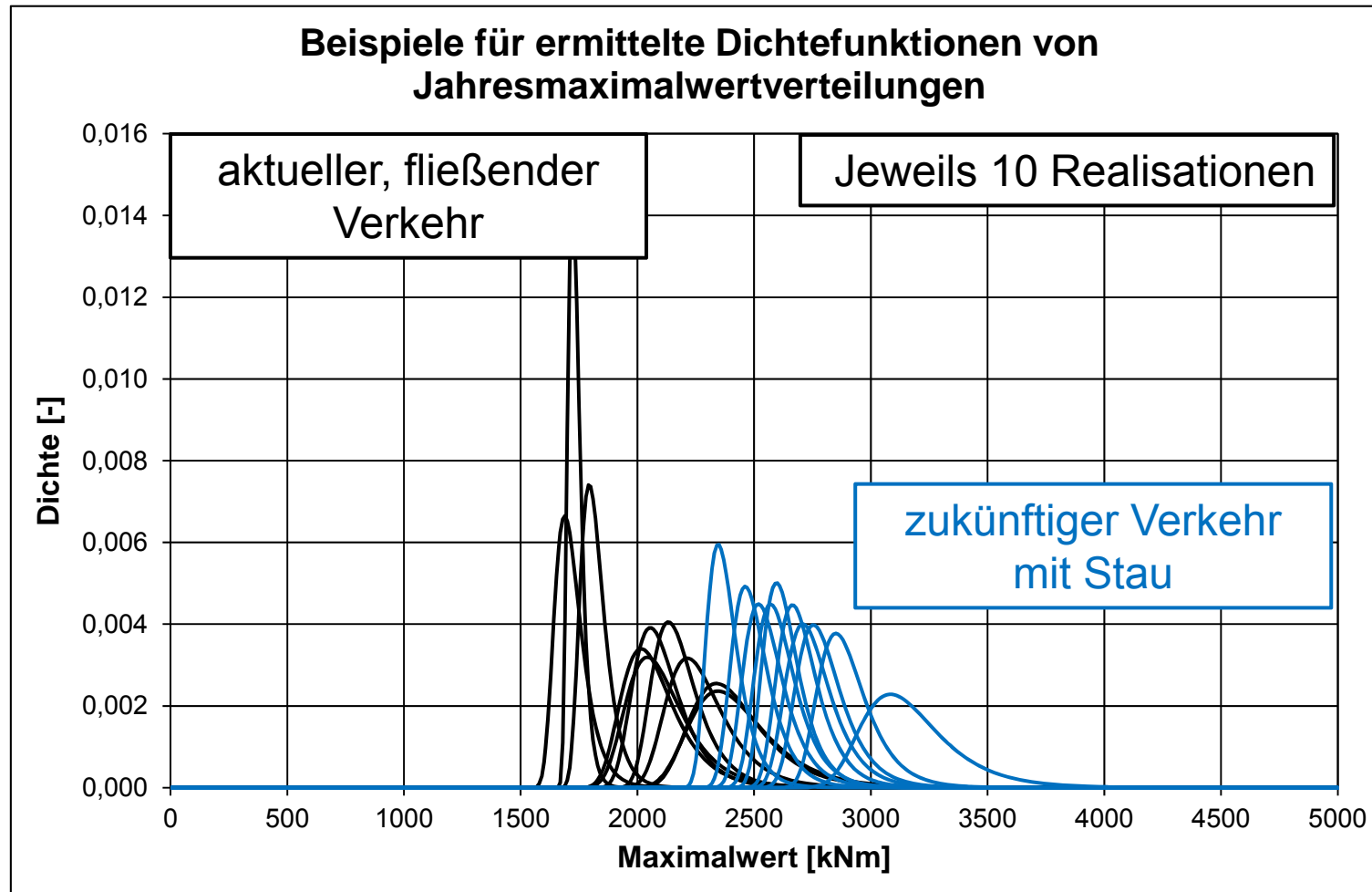


Ermittlung monitoringbasierter stochastischer Beschreibungen von Beanspruchungen aus Verkehr



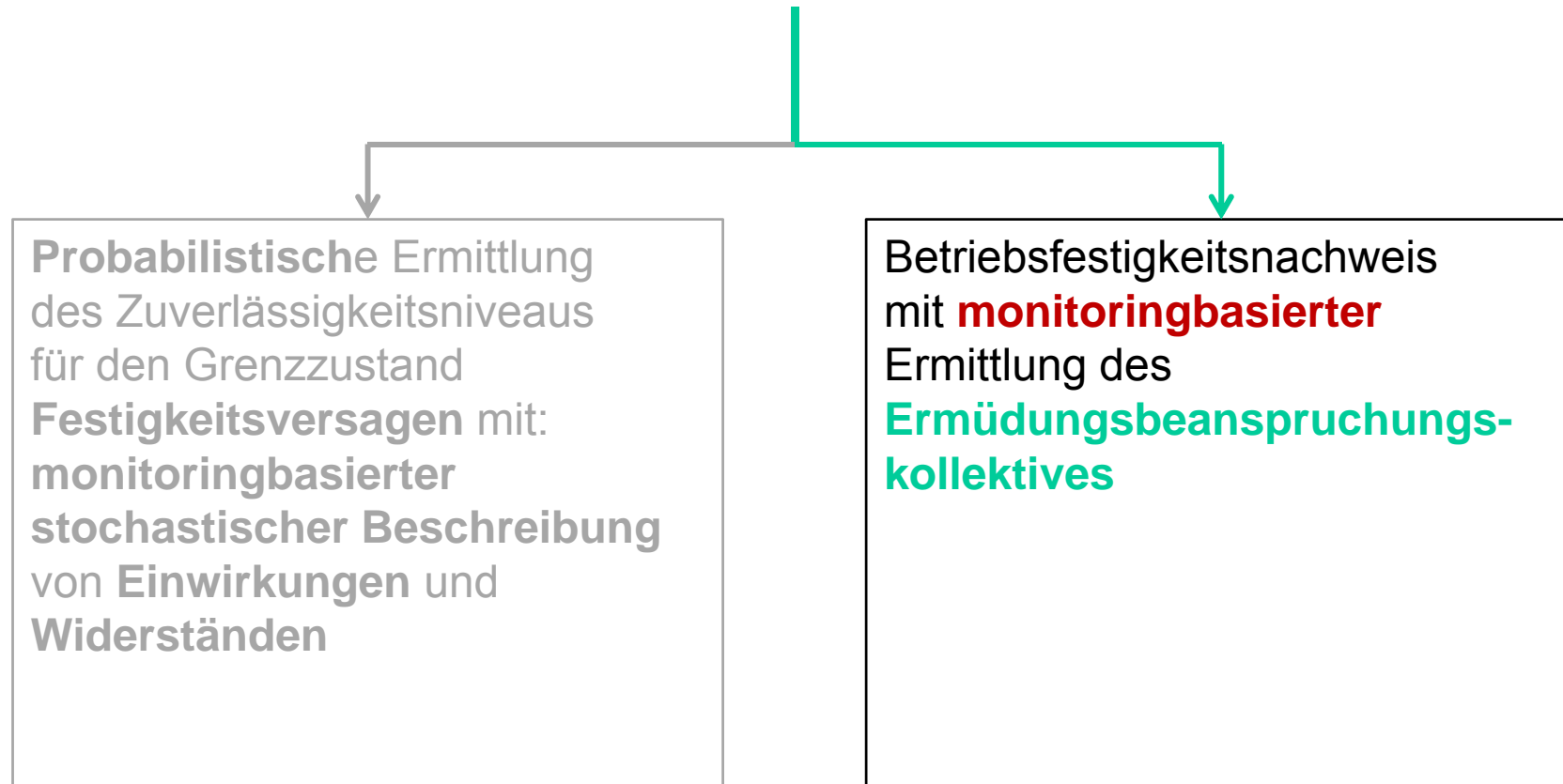


Ermittlung monitoringbasierter stochastischer Beschreibungen von Beanspruchungen aus Verkehr z.B. Maximalwerte Stützmomente





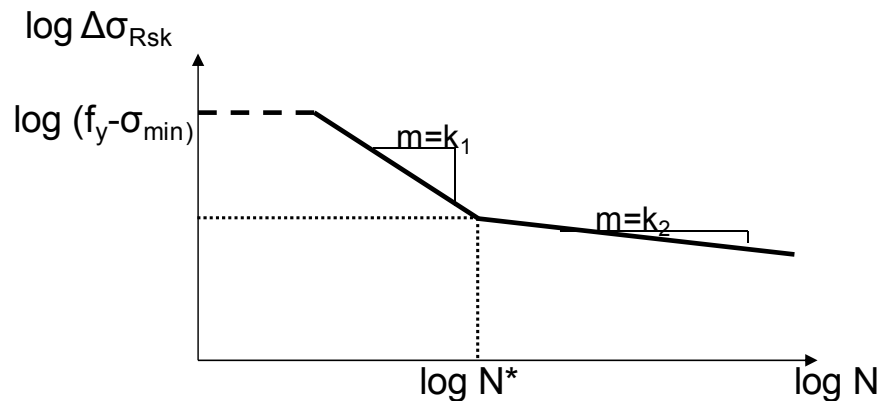
Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer





Schädigung infolge Materialermüdung / Ermüdung

Wöhlerlinien – normenkonform Beispiel Betonstahl



Anzahl Schwingenspiele mit konst. Amplitude $\Delta\sigma_i$ bis zum Bruch $N_{1,i}$

$$N_{1,i} = N^* \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)} \cdot \gamma_{S,fat} \right)^{-k_i}$$

Schädigung durch einzelnes Schwingenspiel mit Amplitude $\Delta\sigma_i$

$$d_{1,i} = \frac{1}{N_{1,i}}$$

Lineare Schädigungsakkumulation – Palmgren - Miner

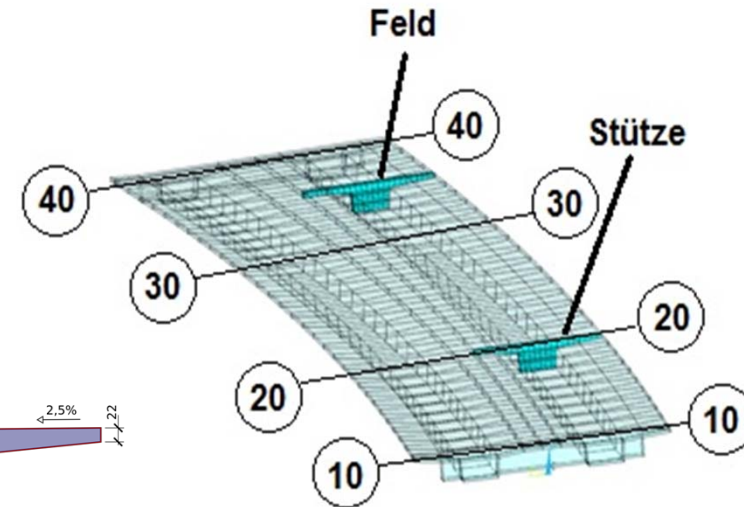
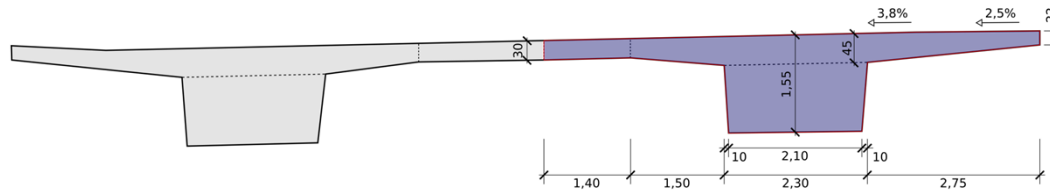
$$D = \sum n_i \cdot d_{1,i} = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{1,i}} \xrightarrow{\text{Extrapolation}} D_{T,ti} = 100 \cdot D_{i,year}$$

Modellierung von Tragsystemschädigungen

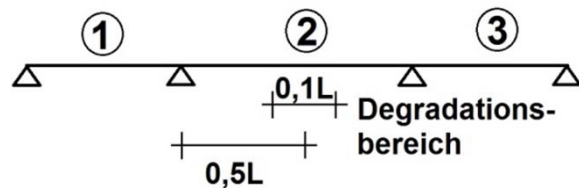
Tragsystemmodell

Schnittgrößen am betrachtetem Querschnitt **Plattenbalken West**:

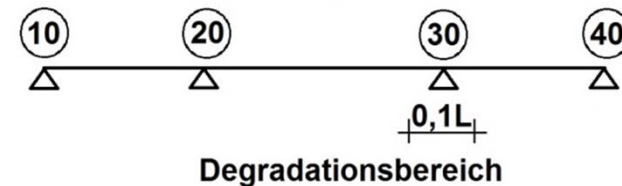
- Feld 3 (max. Feldmoment)
- Stütze (Achse 20)



Schädigung Feldbereich



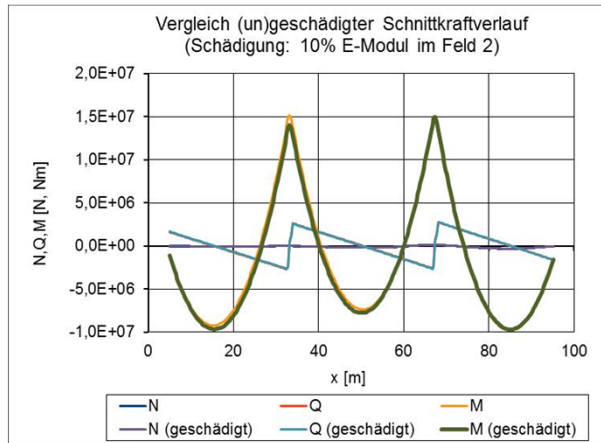
Schädigung Stützbereich



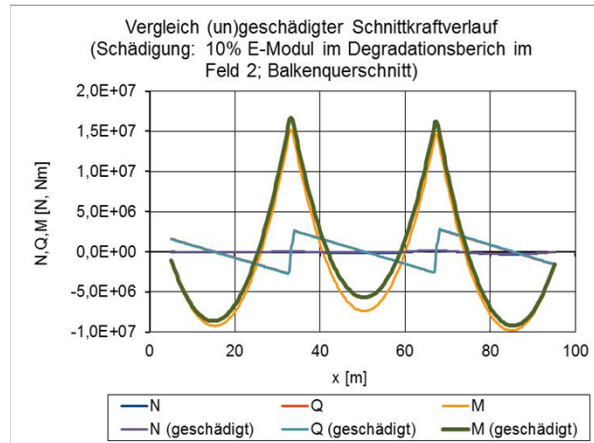
Schädigung der lokalen Tragsystemsteifigkeit; Reduktion Elastizitätsmodul

Schnittgrößenverlauf – ungeschädigtes vs. geschädigtes Tragsystem

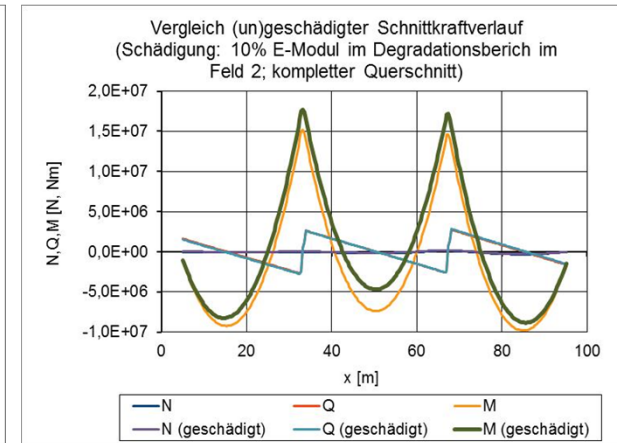
Geschädigtes Tragsystem – Feld 2 Mitte



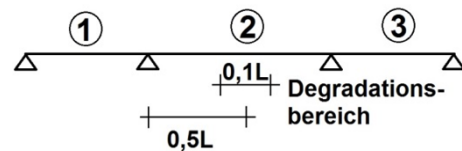
10% E_0 gesamtes Feld 2;
globale Degradation



10% E_0 Feld 2 (Mitte;
Zugbereich Balken);
lokale Degradation

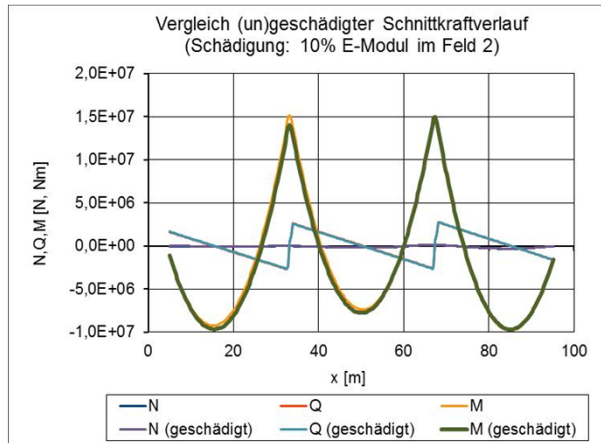


10% E_0 Feld 2 (Mitte,
gesamter Querschnitt)
lokale Degradation

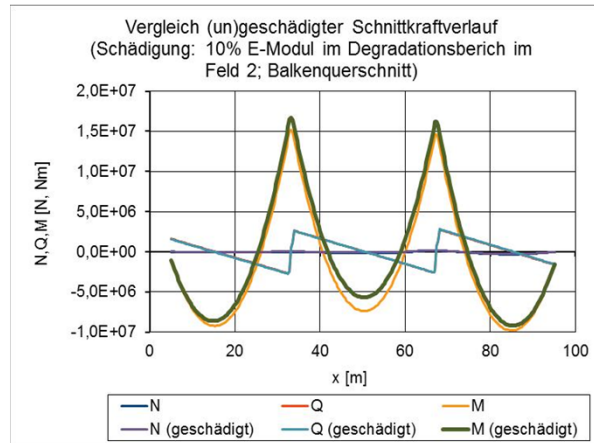


Schnittgrößenverlauf – ungeschädigtes vs. geschädigtes Tragsystem

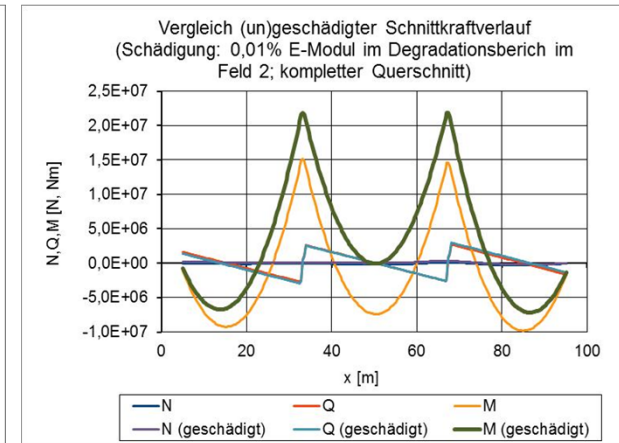
Geschädigtes Tragsystem – Feld 2 Mitte



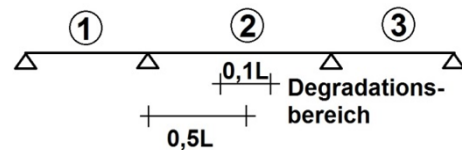
10% E_0 gesamtes Feld 2;
globale Degradation



10% E_0 Feld 2 (Mitte;
Zugbereich Balken);
lokale Degradation

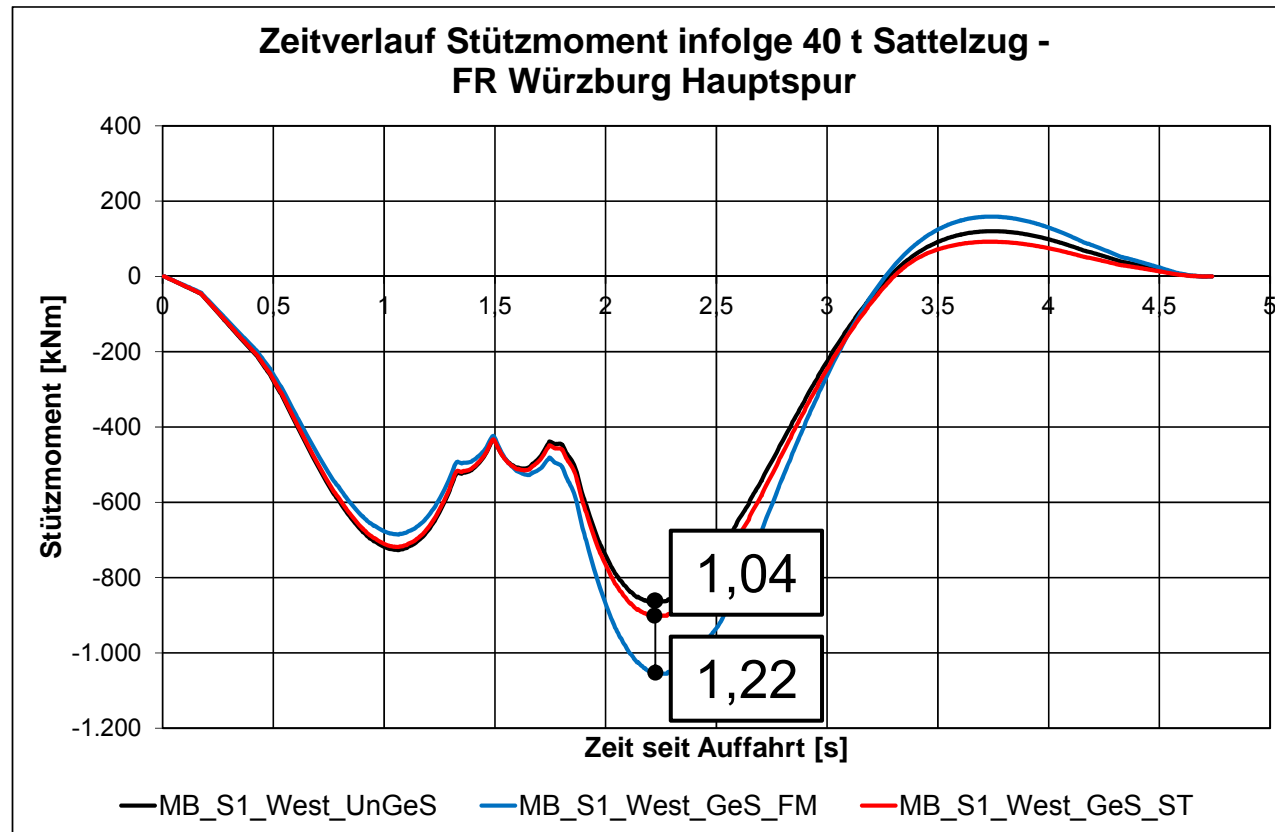


0,01% E_0 Feld 2 (Mitte,
gesamter Querschnitt)
lokale Degradation bis
quasi plastisches Gelenk



Auswirkungen der Schädigungen am Tragsystem auf Beanspruchungen aus Verkehr

- Auswirkungen von Schädigungen auf Beanspruchungsverlauf infolge Einzelfahrzeug



ungeschädigtes System
(Abk. **UnGeS**)

Schädigung im Stützbereich
(10 % E-Modul;
Abk. **GeS ST**)

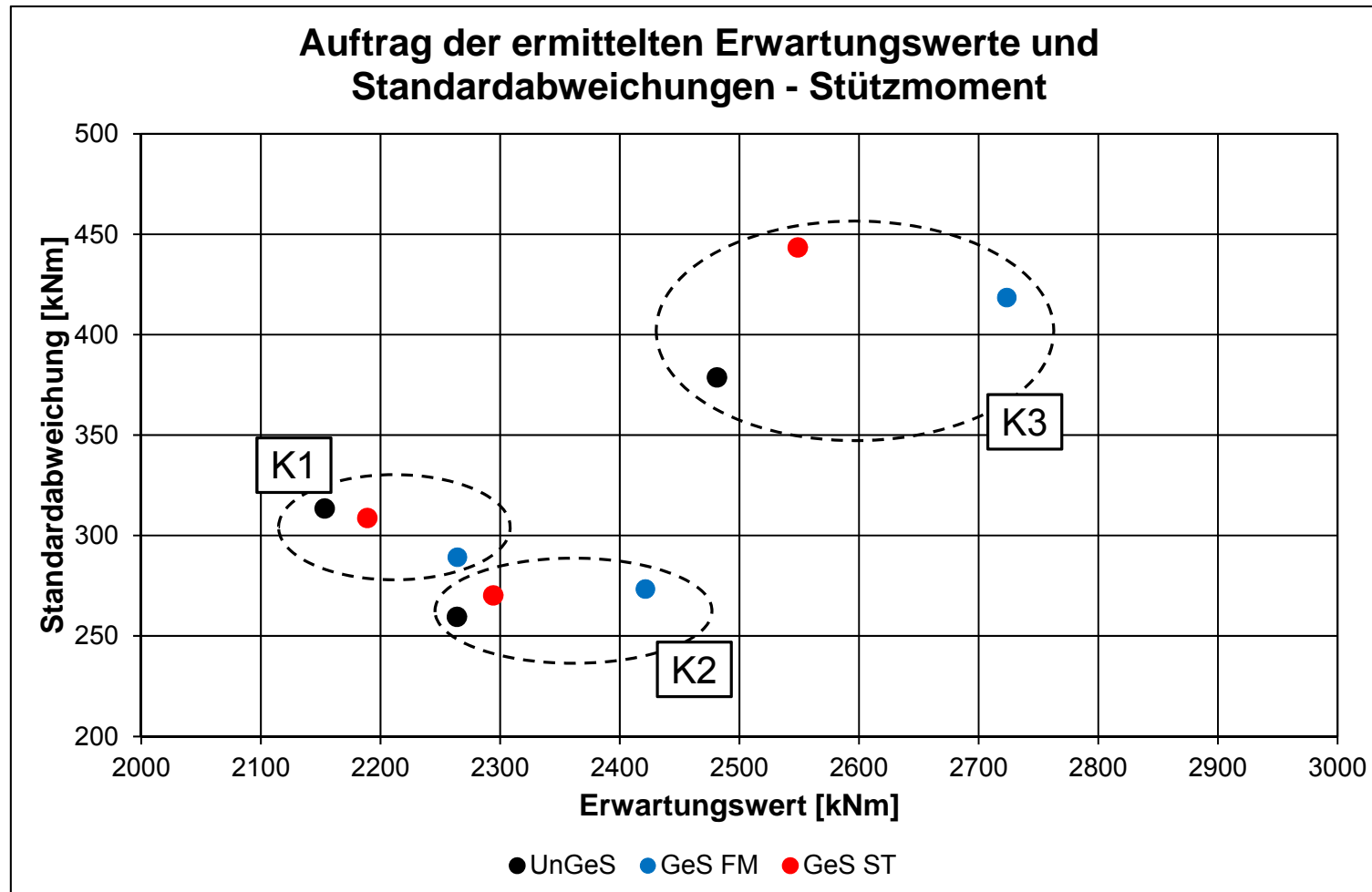
Schädigung im Feldbereich
(10 % E-Modul;
Abk. **GeS FM**)



Auswirkungen der Schädigungen am Tragsystem auf Beanspruchungen aus Verkehr

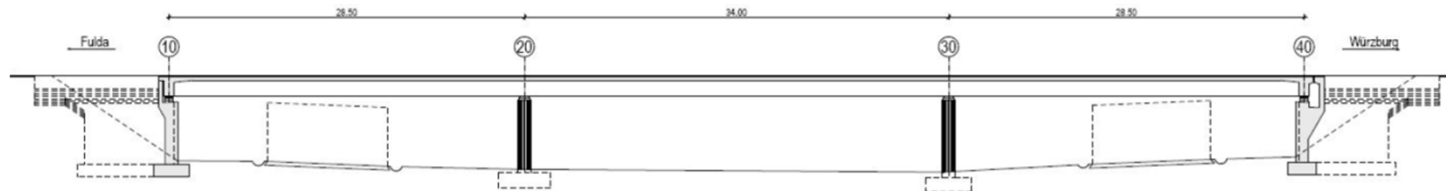
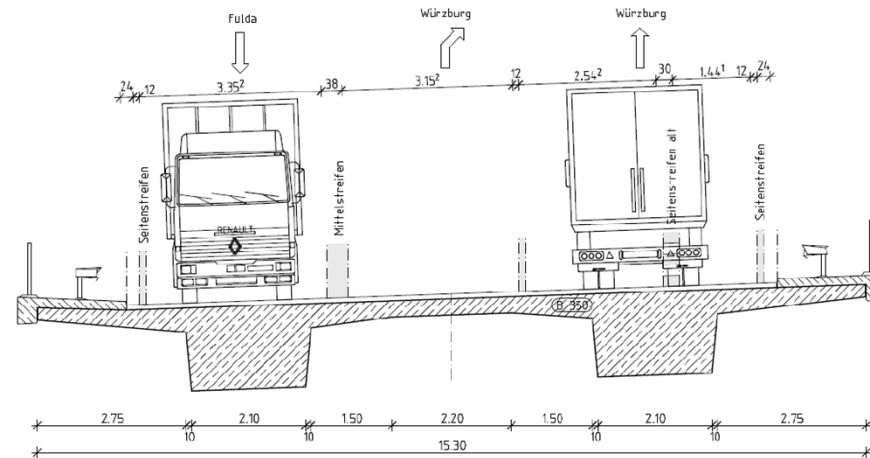
- Stochastische Beschreibung der Beanspruchungen aus Verkehr auf Grundlage von Simulationsrechnungen mit definierten Verkehrsdaten
 - Beispieldaten: Brücke Fulda
 - Verkehrsvarianten:
 - Aktueller Verkehr (Datenerhebung) **K1**
 - Prognostizierter Verkehr in 25 Jahren (Zuwachs DTV-SV) **K2**
 - Prognostizierter Verkehr in 50 Jahren (Zuwachs DTV-SV)
 - Prognostizierter Verkehr in 50 Jahren (Zuwachs DTV-SV + Änderung Verkehrszusammensetzung) **K3**
 - Weitere Variationen in Spurbelegung, Stauabbildung

Auswirkungen der Schädigungen am Tragsystem auf Beanspruchungen aus Verkehr





Einsatz am fiktiven Beispiel: Brücke über den Kreisel Bronnzell / Fulda



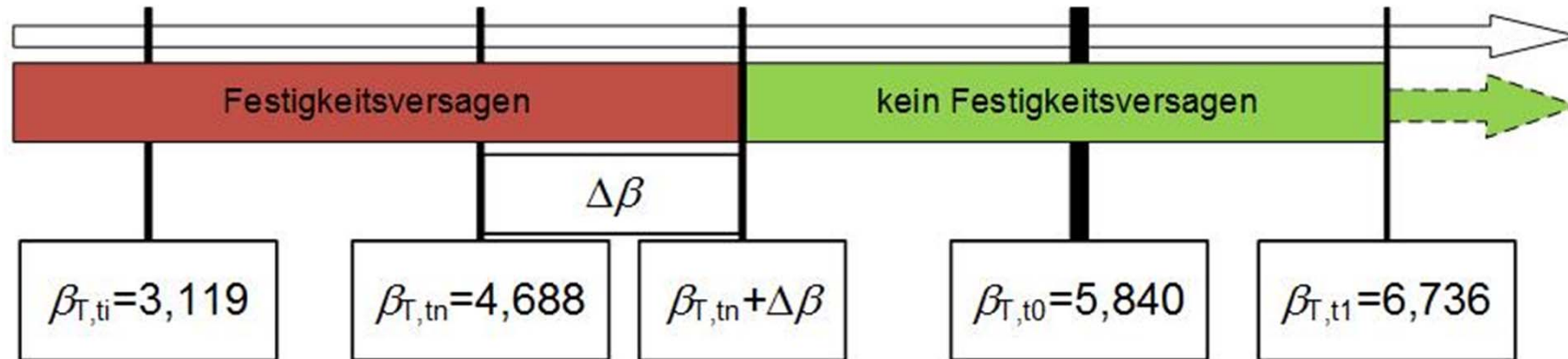
Schädigungsszenarien:

- Biegetragfähigkeit im Feldbereich
- Querkrafttragfähigkeit Lagerbereich
- Tragfähigkeit der Stützen
- Globale Abnahme der Steifigkeit des Überbaus



Quelle Bilder: BAST-Forschungsprojekt FE 88.0106/2010; Abschlussbericht

Bewertung der Tragfähigkeit



$\beta_{T,t0}$ initiales Tragsystem – Modell 1

$\beta_{T,t1}$ identifiziertes Tragsystem – Modell 2

$\beta_{T,tn}$ Tragsystem kurz vor dem Biegeversagen – Modell 4

$\beta_{T,ti}$ Tragsystem kurz vor dem Biegeversagen – Modell 3

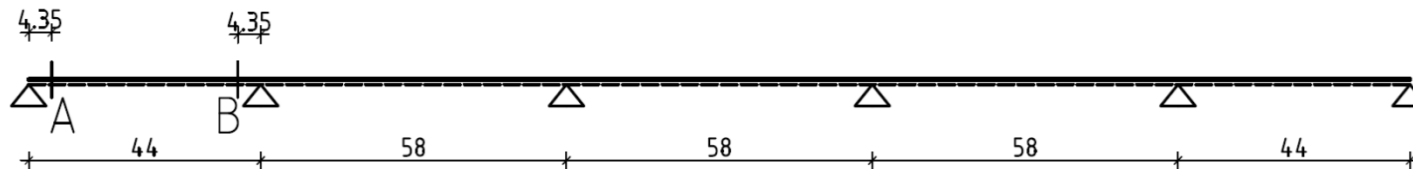
$\Delta\beta$ definierter Abstand zum rechnerischen $\beta_{T,tn}$



Beispiel: Ermittlung der Restnutzungsdauer infolge Materialermüdung

Beispiel: Talbrücke Lützelbach

5 - feldriger durchlaufender Überbau mit Hohlkastenquerschnitt mit Stützweiten von 44-58-58-58-44 m



Beispielnachweis:

Ermüdung Querkraftbewehrung am Endauflager (Schnitt A)



Schädigungssummen zum Zeitpunkt t_0 und t_i

Schädigungssumme je Jahr – initiales System, Ermüdungslastmodell 4

	Gesamtzahl n_i [-]	Zeitpunkt t_0 - Entwurfsstadium		
		$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	N_1	$D_{LM4,i}$
ELM 4-1	$2,20 \cdot 10^5$	24,04	$1,63 \cdot 10^{13}$	$1,35 \cdot 10^{-8}$
ELM 4-2	$1,10 \cdot 10^5$	37,06	$3,32 \cdot 10^{11}$	$3,31 \cdot 10^{-7}$
ELM 4-3	$2,20 \cdot 10^5$	53,03	$1,32 \cdot 10^{10}$	$1,67 \cdot 10^{-5}$
ELM 4-4	$3,30 \cdot 10^5$	41,39	$1,23 \cdot 10^{11}$	$2,69 \cdot 10^{-6}$
ELM 4-5	$2,20 \cdot 10^5$	46,02	$4,72 \cdot 10^{10}$	$4,66 \cdot 10^{-6}$
Summe	$1,10 \cdot 10^6$		Summe	$2,44 \cdot 10^{-5}$

Schädigungssumme je Jahr – aktueller Verkehr

Realisation	1	2	3	4	5
Schädigung D_5	$1,467 \cdot 10^{-7}$	$1,591 \cdot 10^{-7}$	$1,516 \cdot 10^{-7}$	$1,487 \cdot 10^{-7}$	$1,568 \cdot 10^{-7}$

Gemittelte Schädigungssumme aus den 5 Realisationen (je 5 Tage Dauer) $1,526 \cdot 10^{-7}$

Schädigungssumme je Jahr $7,628 \cdot 10^{-6}$

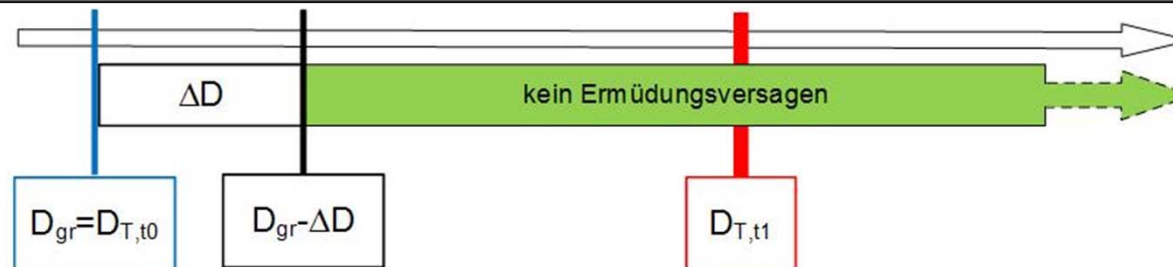
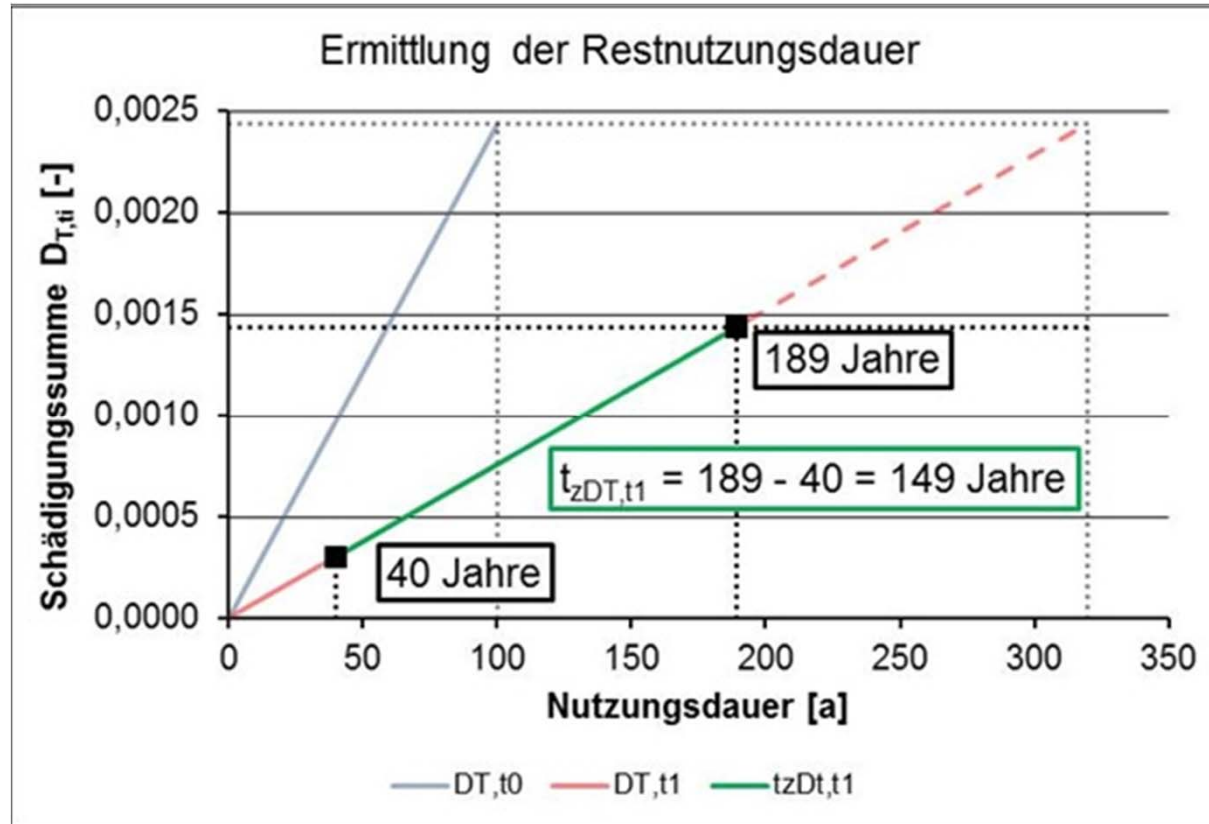
Gesamtschädigung im Nutzungszeitraum 100 Jahre :

$$D_{T,t0} = 2,44 \cdot 10^{-3}$$

$$D_{T,ti} = 7,63 \cdot 10^{-4}$$



Bewertung der Restnutzungsdauer





Das Monitoringkonzept und die Nachrechnungsrichtlinie

Beurteilung Tragfähigkeit und Restnutzungsdauer bei uneingeschränktem Zuverlässigkeitsniveau

Monitoringkonzept

Nachrechnungsrichtlinie

Probabilistische Ermittlung des Grenzzustandes mit:

- Monitoringbasierter

**E und R unscharf,
Ergebnis unscharf**

Ei

und Widerstand

- Ergebnis β , P_f , Teilsicherheitsfaktoren

Semiprobabilistische Ermittlung des Grenzzustandes mit:

**E und R scharf aber auf unscharfen Annahmen,
Ergebnis scharf**

- Ergebnis: Nachweis erfüllt oder nicht erfüllt