

Stochastische Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von Wasserbauwerken mit optiSLang

**R. Schlegel, T. Dannenberg, T. Most, M. Grosse ^{*1}
C. Kunz ^{*2}**

^{*1} Dynardo GmbH, Weimar

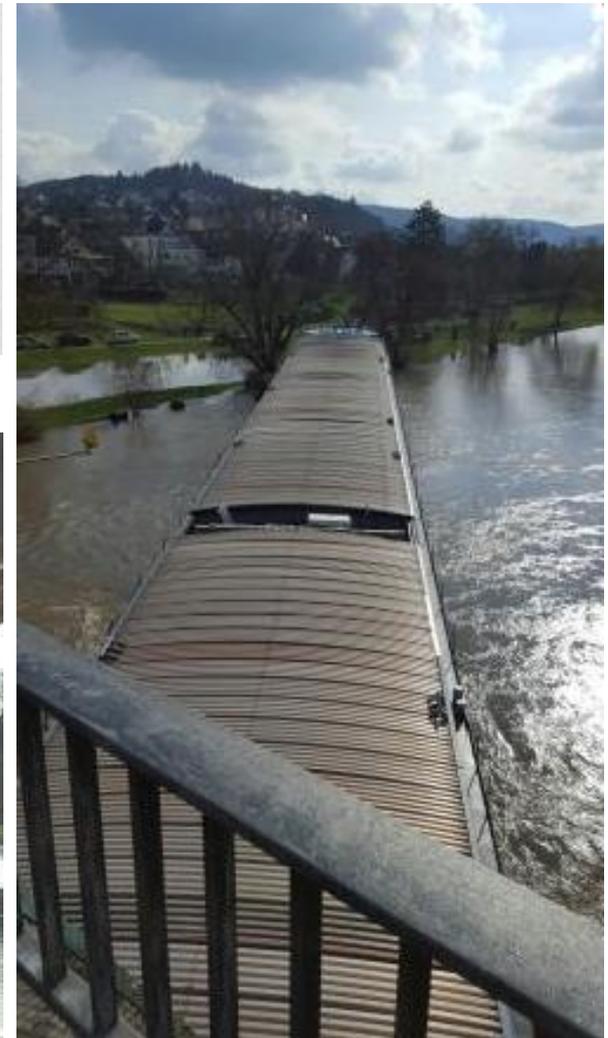
^{*2} Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Schiffsstoß

Regionalnews auf Radio Gong

Lohr: Betrunkener Kapitän verkeilt Schiff

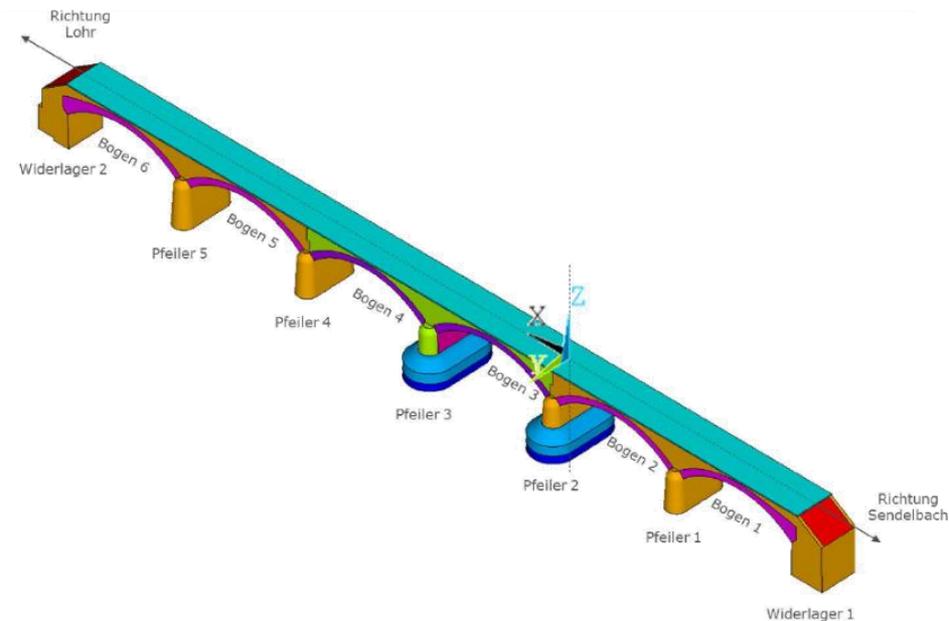
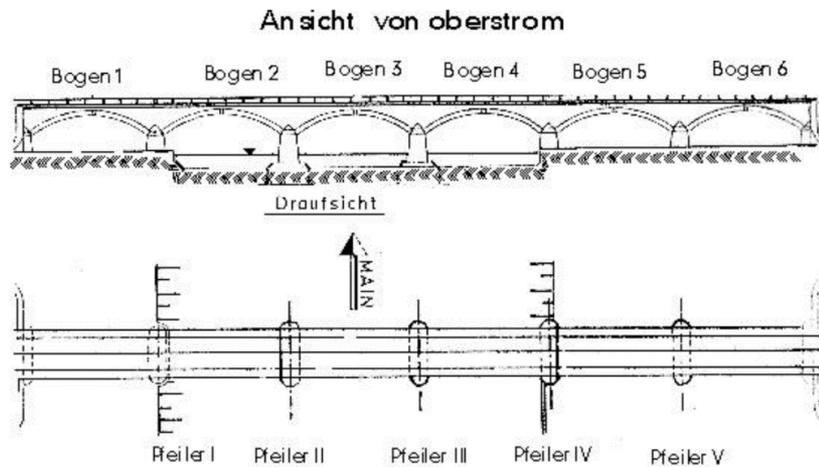
26.02.16 - 11:34 Uhr, Fotos: Hörer Christof



Alte Mainbrücke in Lohr (Main)



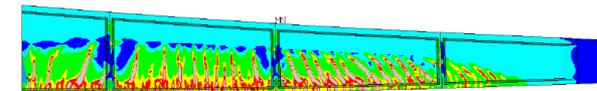
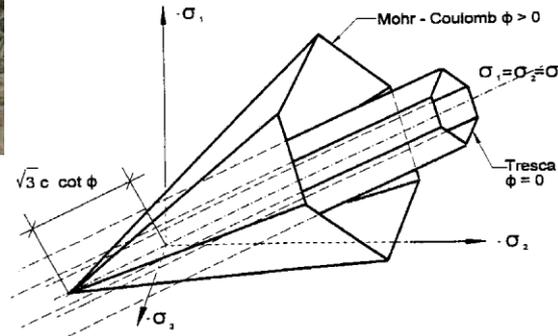
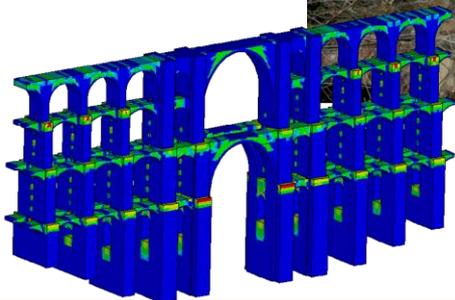
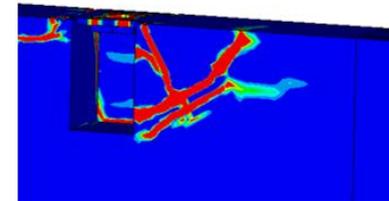
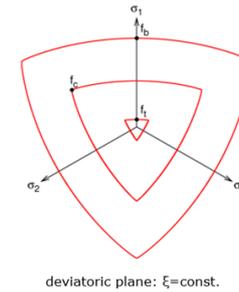
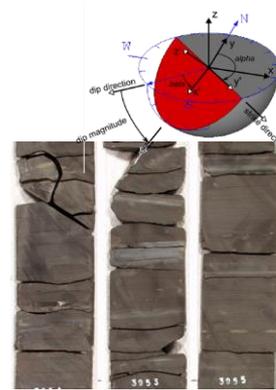
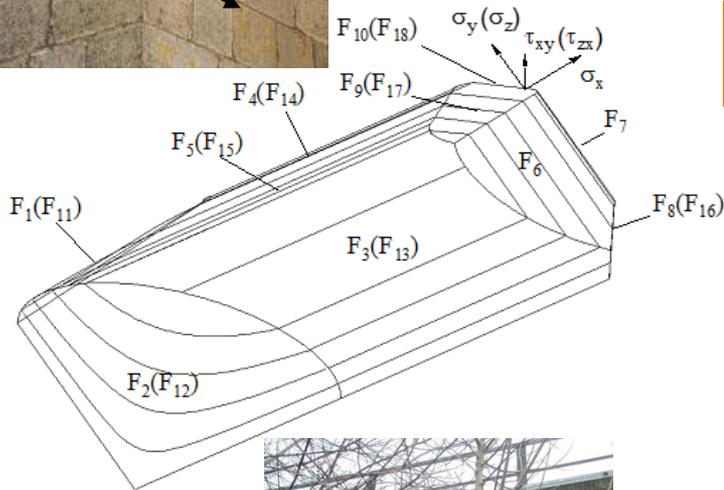
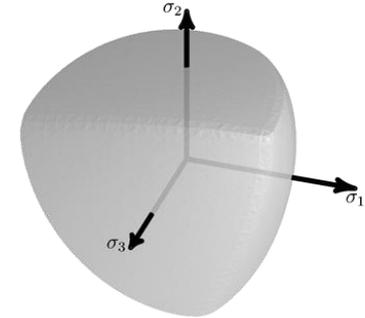
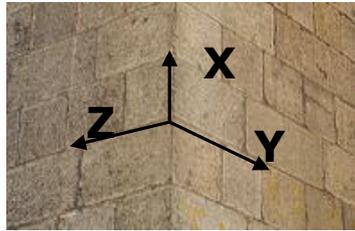
- Länge: 259 m; Bogenspannweite: 29,7 m
- Baujahr: 1875 / Natursteinmauerwerk
- 1946 Wiederaufbau Pfeiler 3 + Bögen 3, 4



Problemstellung – Historische Mainbrücken

- mit einfachen Ingenieurmodellen nicht realitätsnah nachrechenbar
 - 3D-FEM + nichtlineare Berechnung notwendig um Lastreserven zu erschließen
 - steigendes Verkehrsaufkommen
 - größere Schiffe erwünscht / erforderlich
 - steigende Schiffsanpralllasten
- fehlende Interaktion mit den Stimmwänden
-
- Deterministischer Standsicherheitsnachweis nach Norm erfolgreich, aber:
 - Wie groß sind evtl. vorhandene Sicherheitsreserven?
 - Welche Bewertungskriterien sind geeignet?
 - Welche Unsicherheiten gibt es bei den Kennwertannahmen?
 - Welche Einflussparameter beeinflussen maßgeblich die Standsicherheitsaussage?
 - Stochastische Analyse / Robustheitsbewertung / Zuverlässigkeitsanalyse zur Einschätzung vorhandener Sicherheiten, widerspruchsfrei zu nichtlinearen Simulation

Materialmodelle für Mauerwerk, Beton, Untergrund



3D FE-Modell

Berechnungsmodell 1 (s. Abb. 3-2 und Abb. 3-3):

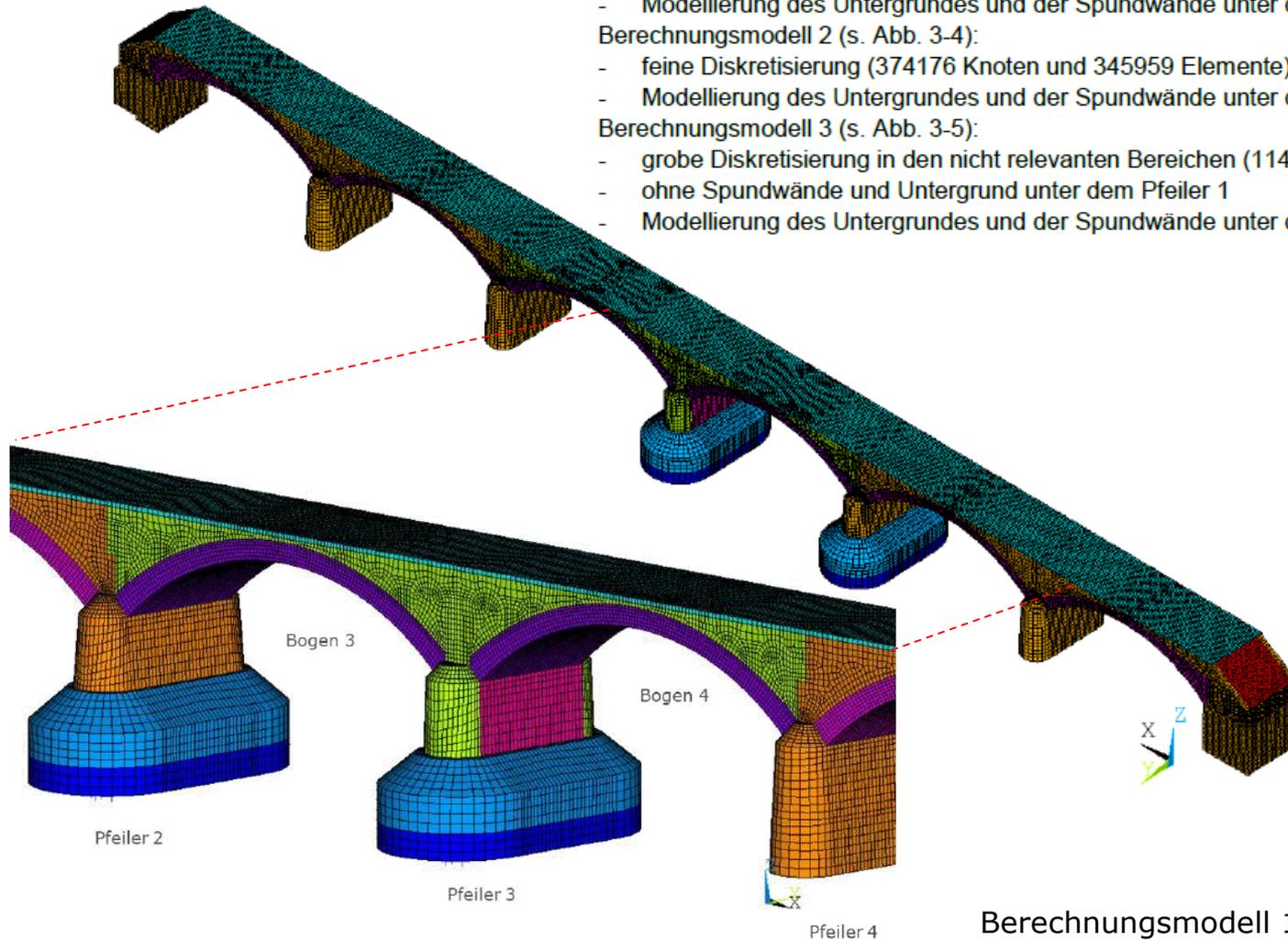
- feine Diskretisierung (333061 Knoten und 314414 Elemente),
- ohne Spundwände und Untergrund unter dem Pfeiler 1
- Modellierung des Untergrundes und der Spundwände unter dem Pfeiler 2 und 3

Berechnungsmodell 2 (s. Abb. 3-4):

- feine Diskretisierung (374176 Knoten und 345959 Elemente),
- Modellierung des Untergrundes und der Spundwände unter dem Pfeiler 1, 2 und 3

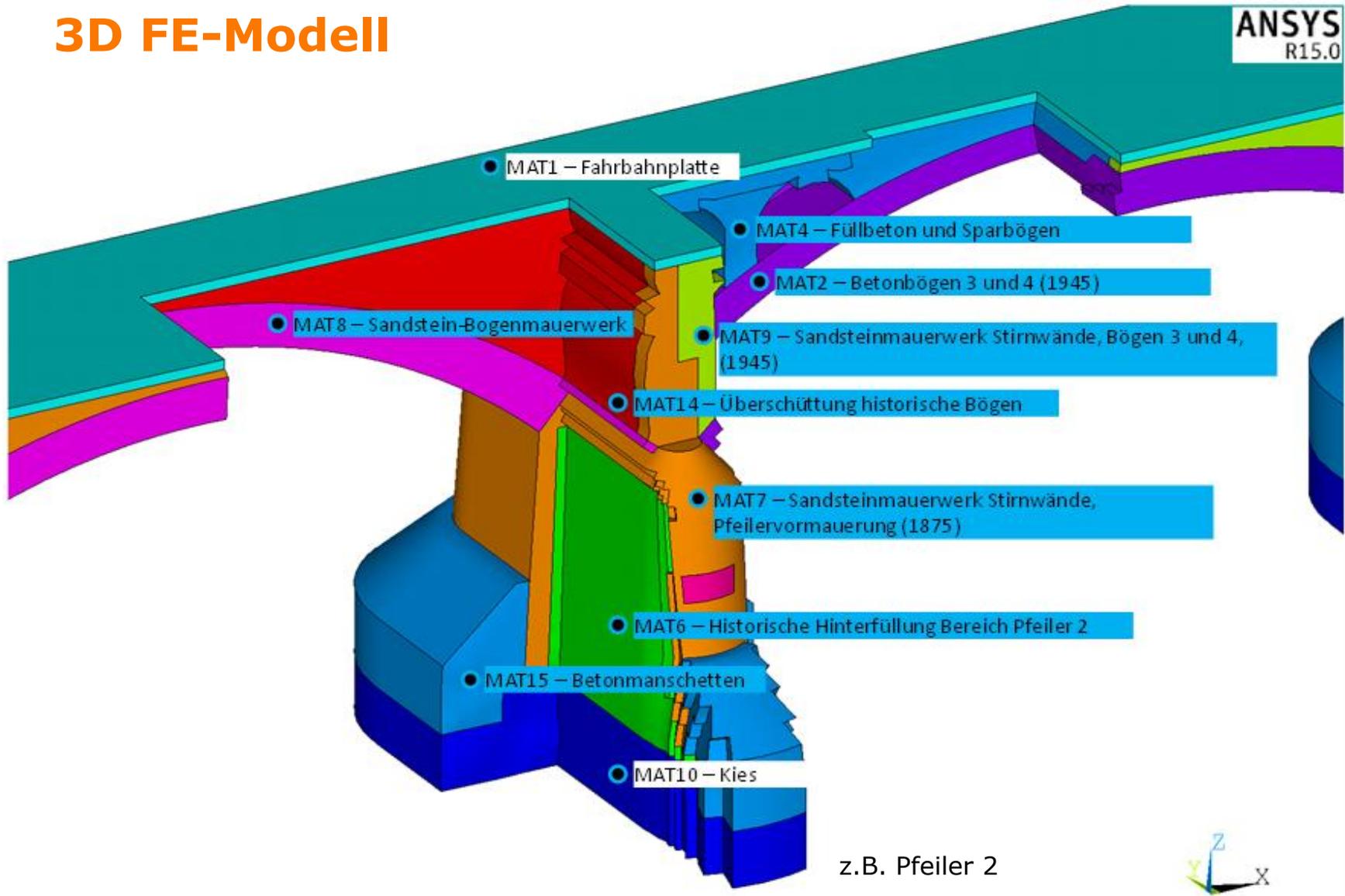
Berechnungsmodell 3 (s. Abb. 3-5):

- grobe Diskretisierung in den nicht relevanten Bereichen (114.160 Knoten und 101.644 Elemente)
- ohne Spundwände und Untergrund unter dem Pfeiler 1
- Modellierung des Untergrundes und der Spundwände unter dem Pfeiler 2 und 3

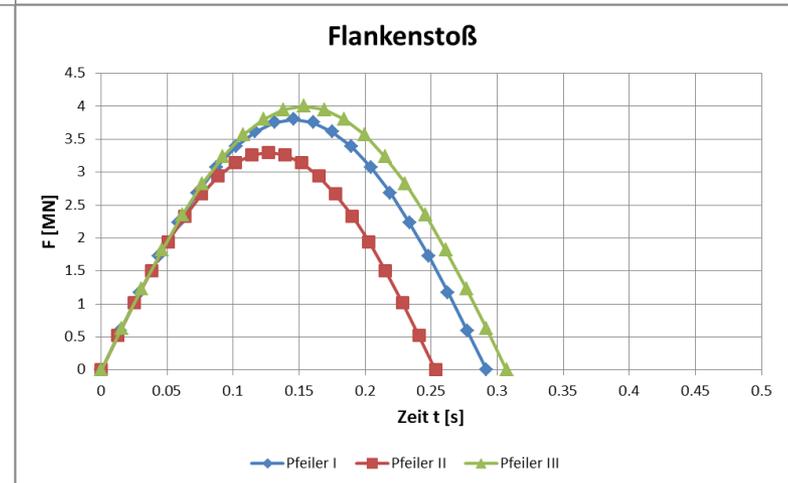
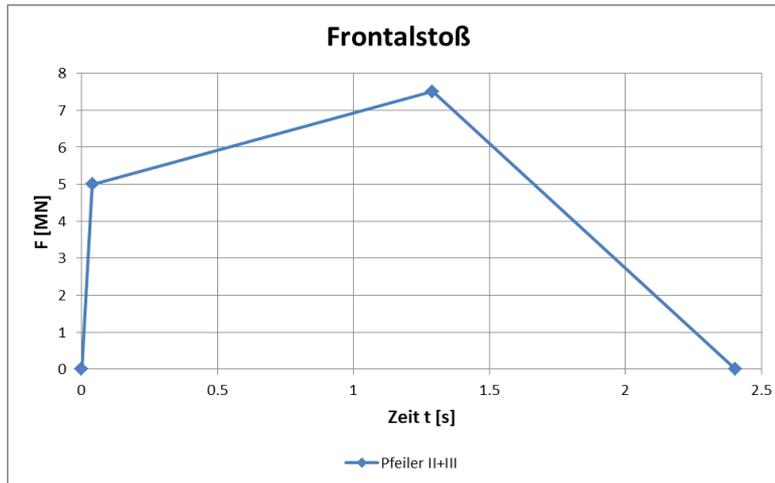
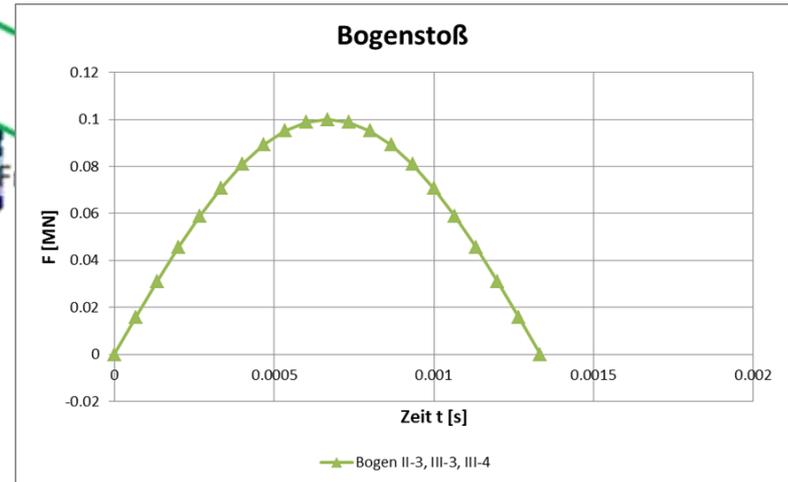
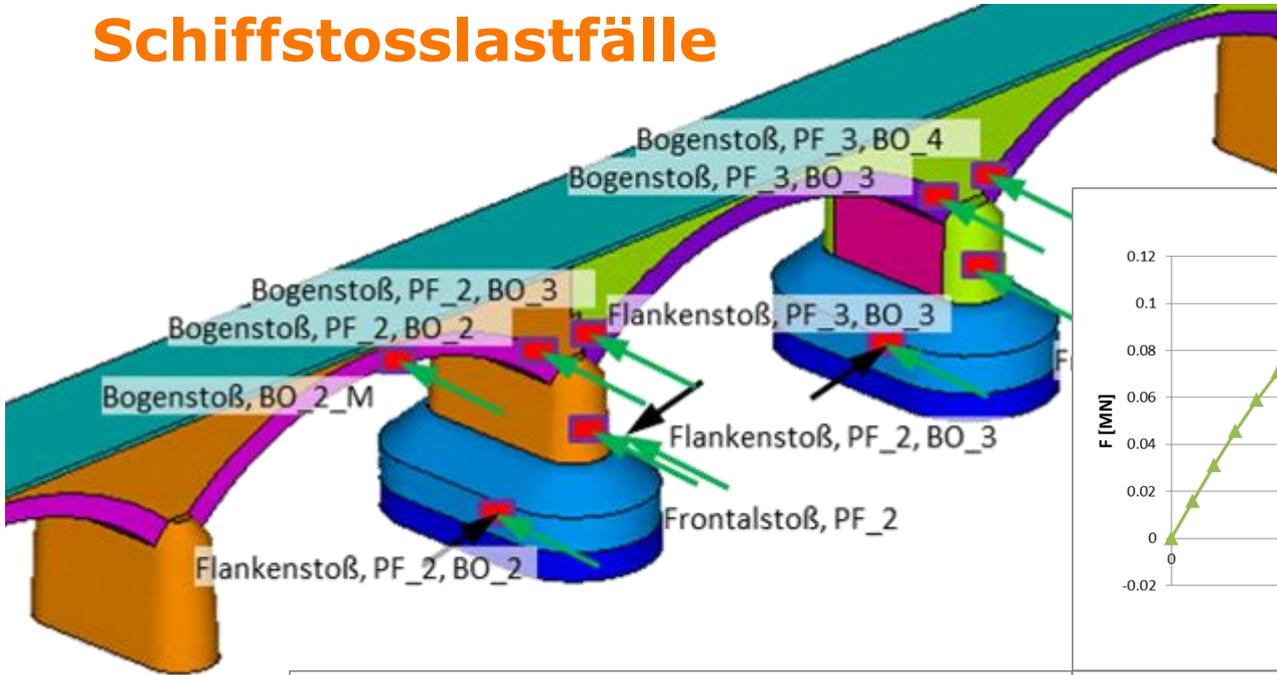


Berechnungsmodell 1

3D FE-Modell



Schiffstosslastfälle

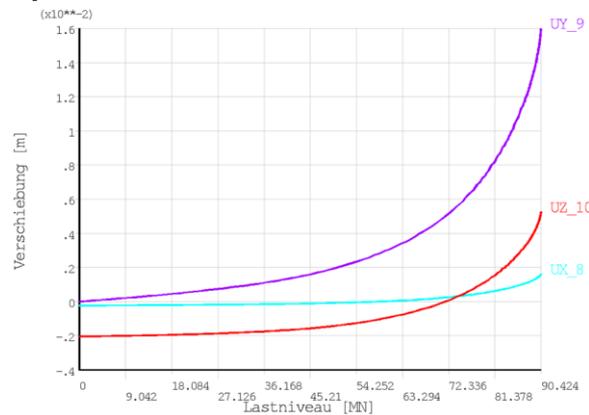
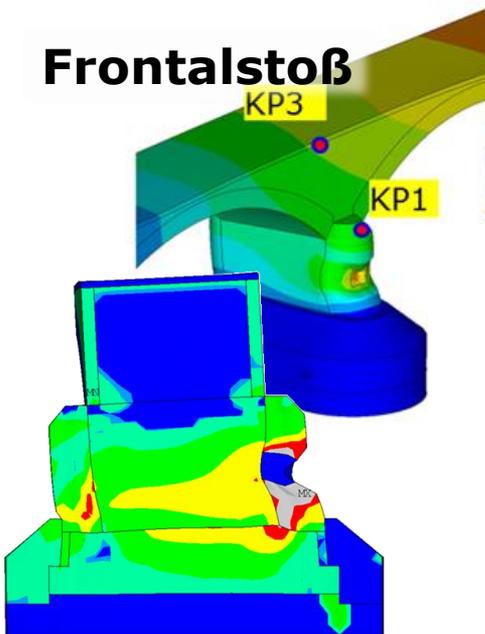


Quasistatische Grenztraglastanalysen, Schiffsstoß

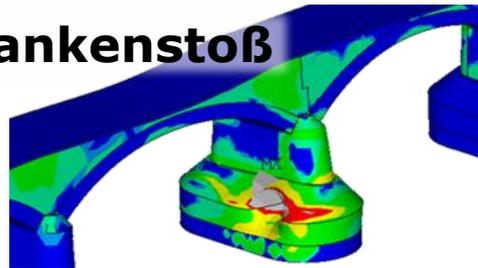
Grenztraglast infolge quasistatischer Laststeigerung der Stoßlast
(mit mittl. Widerstandswerten der deterministischen Berechnung)

- Untersuchung des maßgebenden Schiffsstoßszenarios,
- Untersuchung der zu erwartenden Versagensmechanismen und Grenztraglasten,
- Ableitung von Bewertungs- bzw. Schädigungskriterien für die Zuverlässigkeitsanalyse

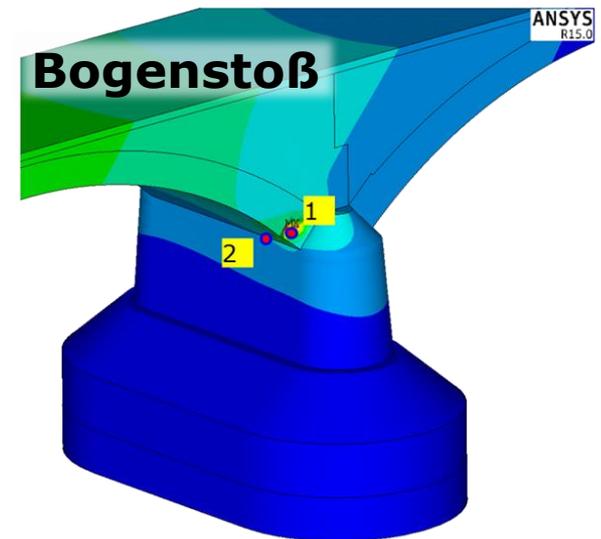
Frontalstoß



Flankenstoß



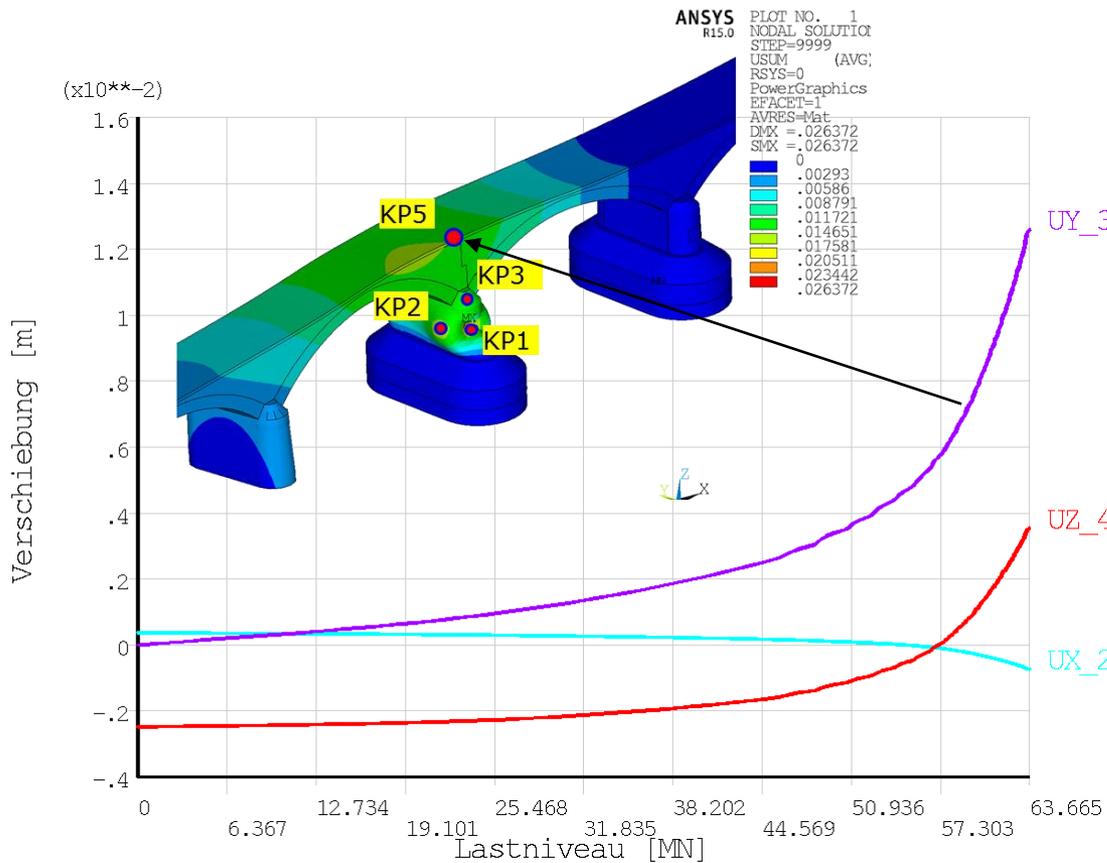
Bogenstoß



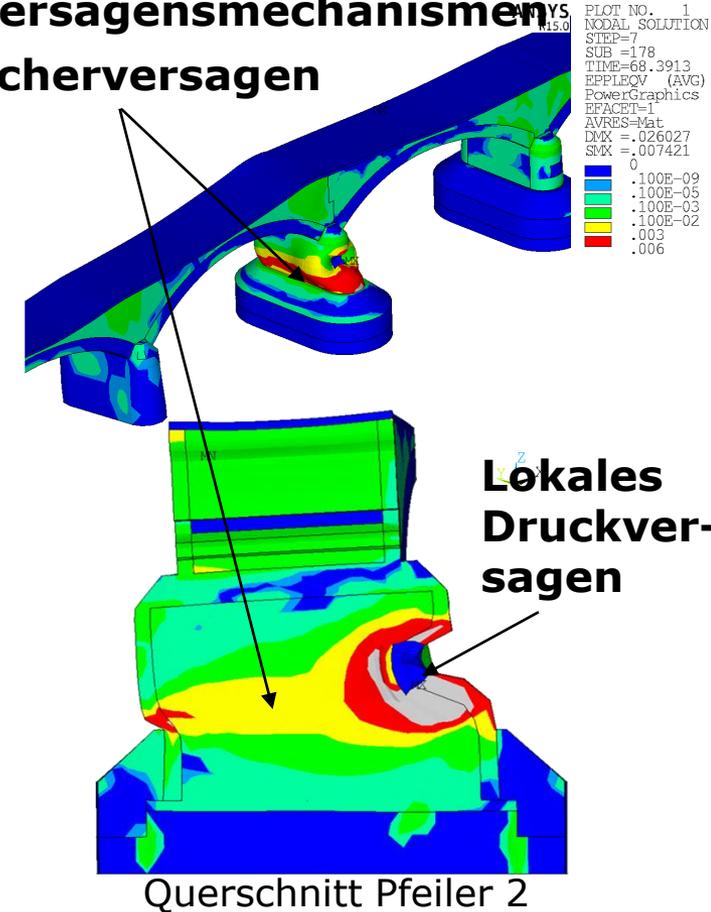
Quasistatische Grenzlastanalysen, Schiffsstoß

Frontalstoß Pfeiler 2 maßgebend

geringster statischer Laststeigerungsfaktor aller Lastfälle

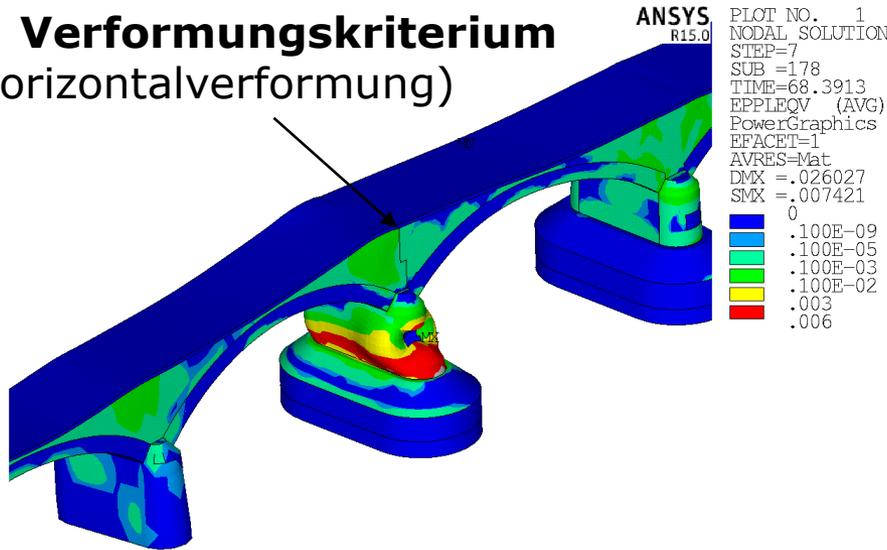


Versagensmechanismen Scherversagen

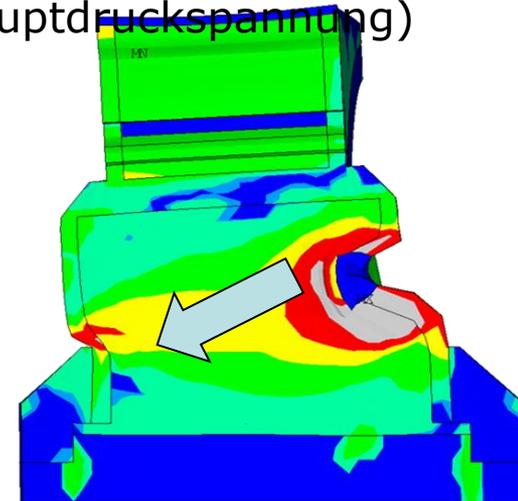


Ableitung von Bewertungskriterien

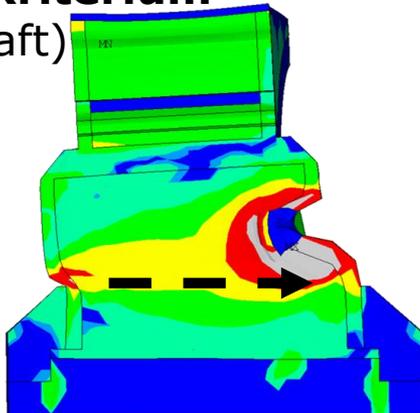
1. Verformungskriterium (Horizontalverformung)



2. Spannungskriterium (Hauptdruckspannung)

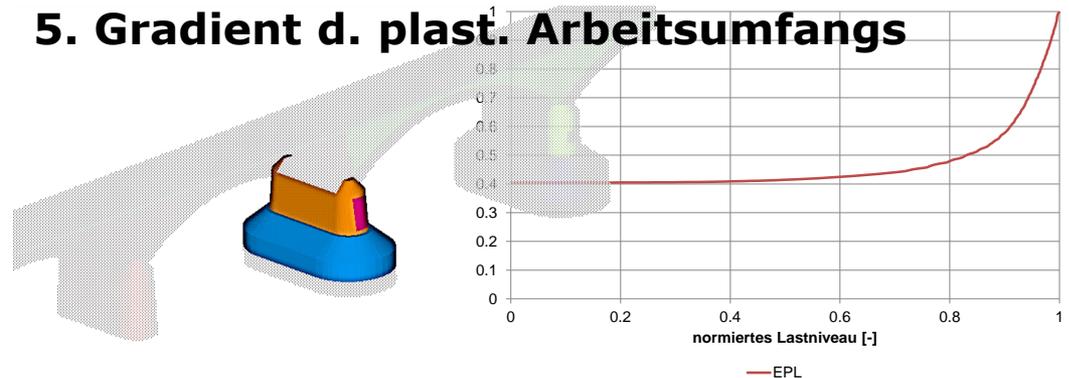


3. Kraftkriterium (Scherkraft)



4. Gradient d. plast. Dehnungsumfangs

5. Gradient d. plast. Arbeitsumfangs



Robustheitsbewertung, Frontalstoß Pfeiler 2

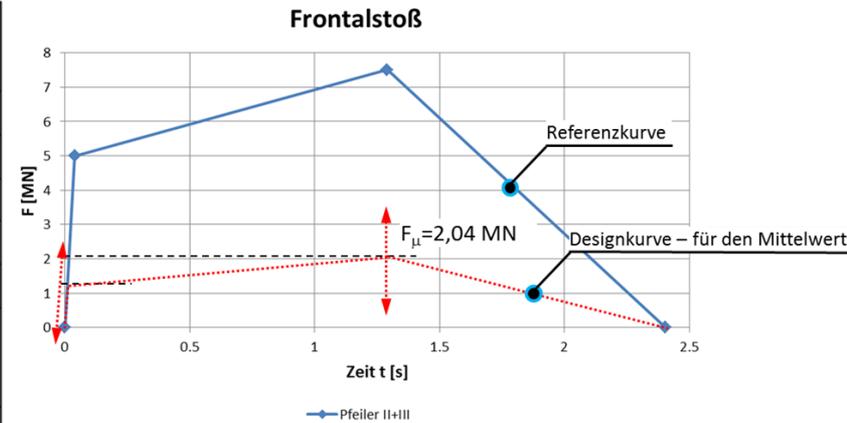
Streuungen der Widerstands- und Einwirkungsparameter

Materialparameter	Zeichen	Parameterzeichen	Einheit	Referenzwert aus /26/	Mittelwert	Standardabweichung	Verteilungstyp
Elastizitätsmodul	E	E_6	MPa	6759	6759	3415	Lognormal
Querdehnzahl	v	-	-	0,2 (konstant)	0,2 (konstant)	-	-
Schubmodul	G	-	MPa	aus E und v	abhängig	-	abhängig
Festigkeitskoeffizient	c	c_6	MPa	4,155	4,155	1,102	Zwischengröße zur Berechnung
Druckfestigkeit	f _{td}	-	MPa	4,155	4,155	1,102	Zwischengröße zur Berechnung
Innerer Reibwinkel	δ	-	°	45 (konstant)	45 (konstant)	-	-
Kohäsion	c	c_6	MPa	0,852	0,852	-	Lognormal
Zugfestigkeit	f _{tE}	f _{tE}	MPa	0,20	0,20	0,06	Lognormal
Entfestigungskoeffizienten	k ₁	-	-	-	-	-	-
Rest-Reibungswinkel / Dilatazwinkel	f _r	-	°	32 / 32	45 / 32 (konstant)	-	-
Rest-Kohäsion	c _R	-	MPa	0,8	= Kohäsion	abhängig	abhängig
Sonstige	-	-	-	-	-	-	-
Wärmedehnkoeffizient	α	-	-	-	-	-	-
Dichte	ρ	-	-	-	-	-	-

¹⁾ entsprechend /5/

Ableitung der 5% Quantilwerte, Verteilungsfunktion, Standardabweichung aus Materialprüfungen oder Annahme aus Mittelwerten, charakteristischen Werten, Designwerten

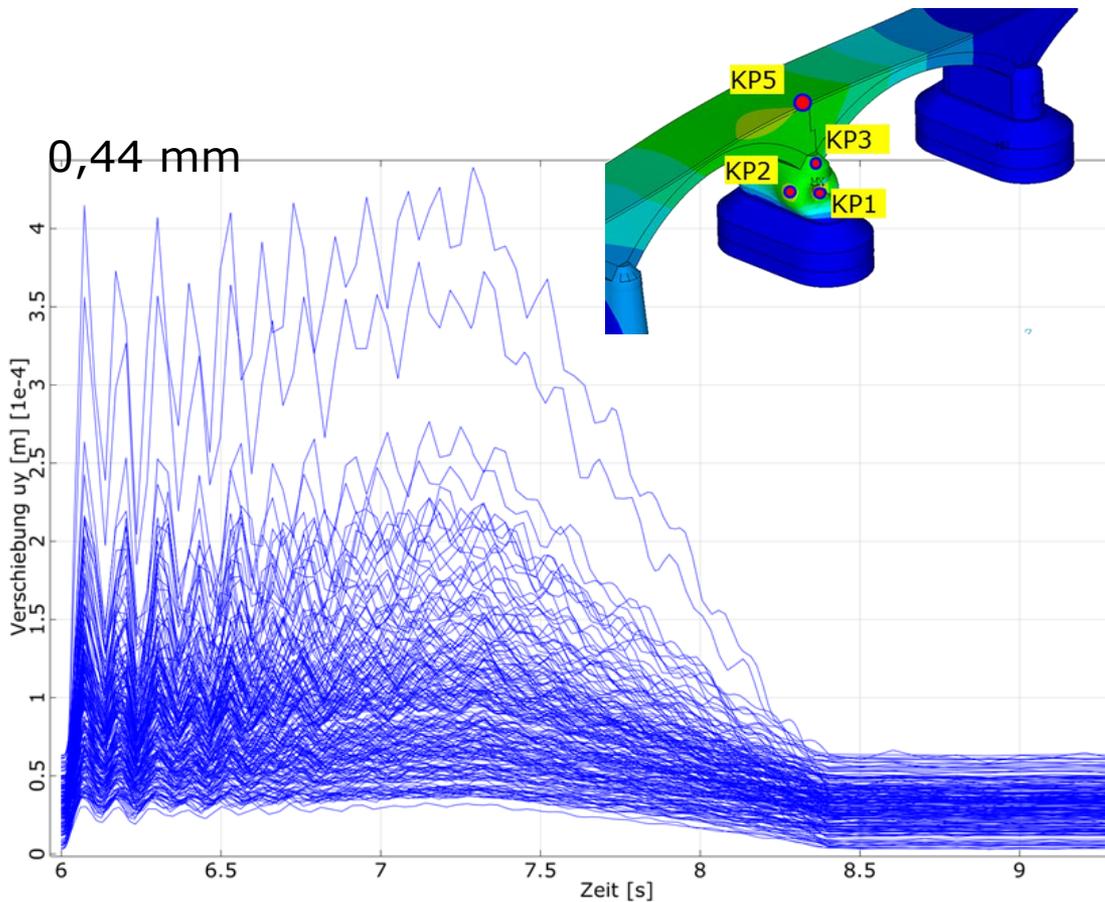
Historische Hinterfüllung Pfeiler 2



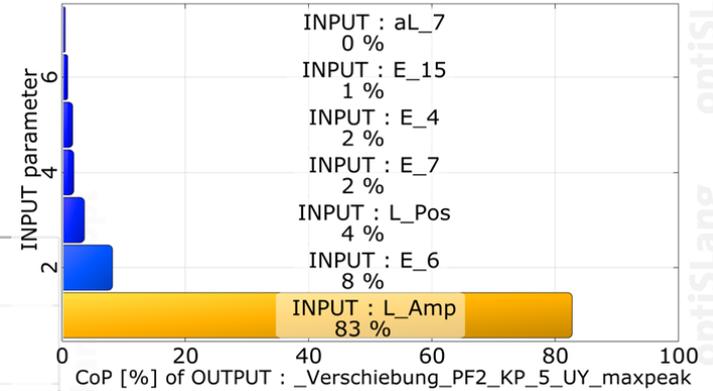
Einwirkungsparameter	Parameterzeichen	Einheit	Referenzwert aus /26/	Mittelwert	Standardabweichung	Verteilungstyp
Schiffsanprallkraft (Lastamplitude)	L_Amp	kN	3800	2040	1500	LOGNORMAL
Anprallhöhe (Lastposition)	L_Pos	mNN	149.53	149.74	0.3	TRUNCATEDNORMAL

Robustheitsbewertung, Frontalstoß Pfeiler 2

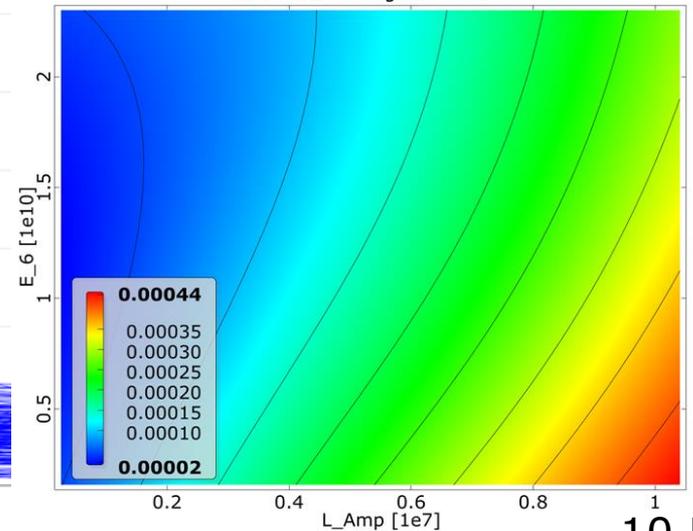
Verformungskriterium (Horizontalverformung KP5)



Coefficients of Prognosis (using MOP)
full model: CoP = 97 %

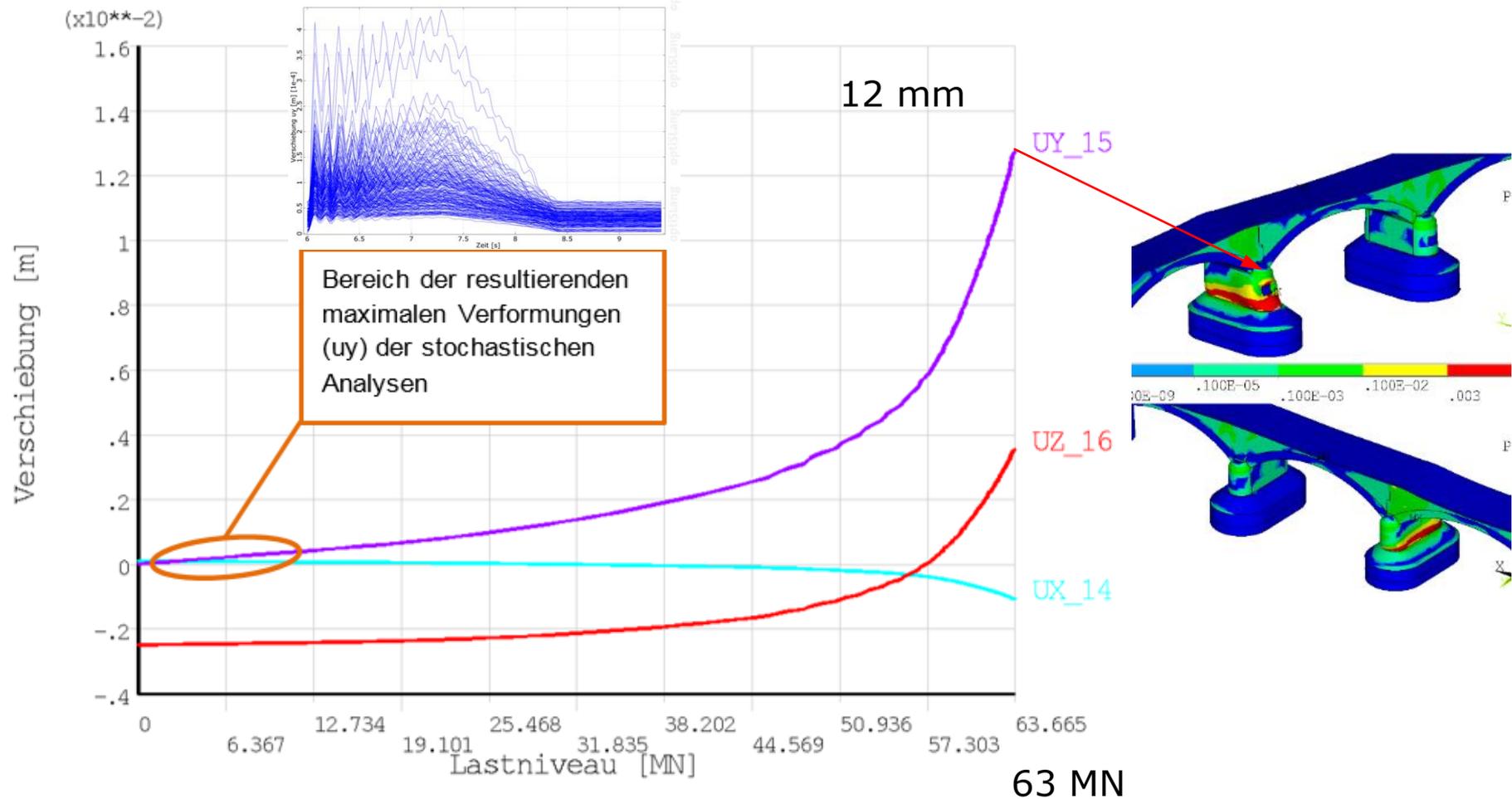


MOP generated Anisotropic Kriging of _Verschiebung_PF2_KP_5_UY_maxpeak
Coefficient of Prognosis = 97 %



Robustheitsbewertung, Frontalstoß Pfeiler 2

Verformungskriterium (Horizontalverformung KP5)

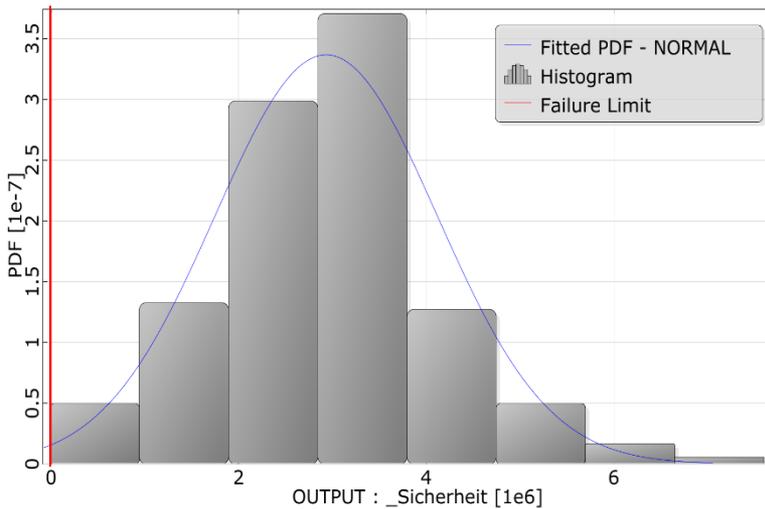


Robustheitsbewertung, Frontalstoß Pfeiler 2

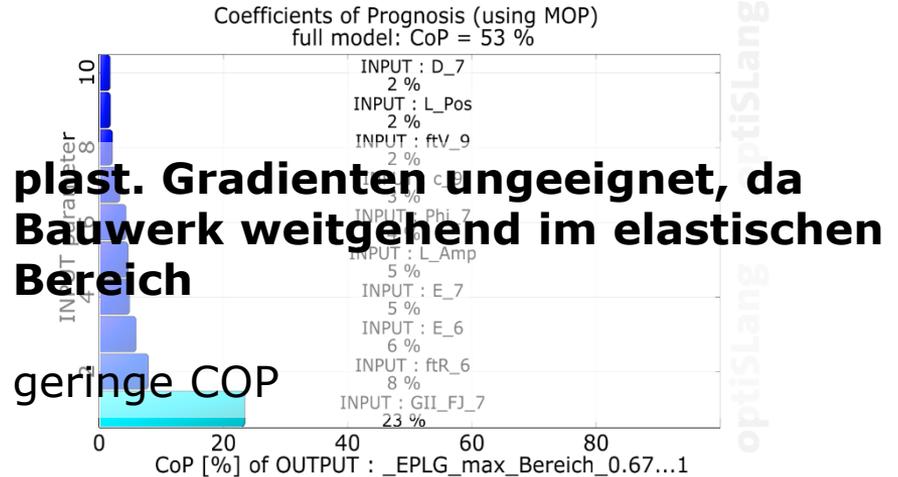
Spannungskriterium ungeeignet, da Lastumlagerungen nicht berücksichtigbar

unrealistisch große Versagenswahrscheinlichkeit Schätzung 10^{-3}

OUTPUT : _Sicherheit



Kraftkriterium ungeeignet, da Scherwiderstandskraft viel (10er-Pot.) größer als max. Lastamplitude Last ohne Einfluss

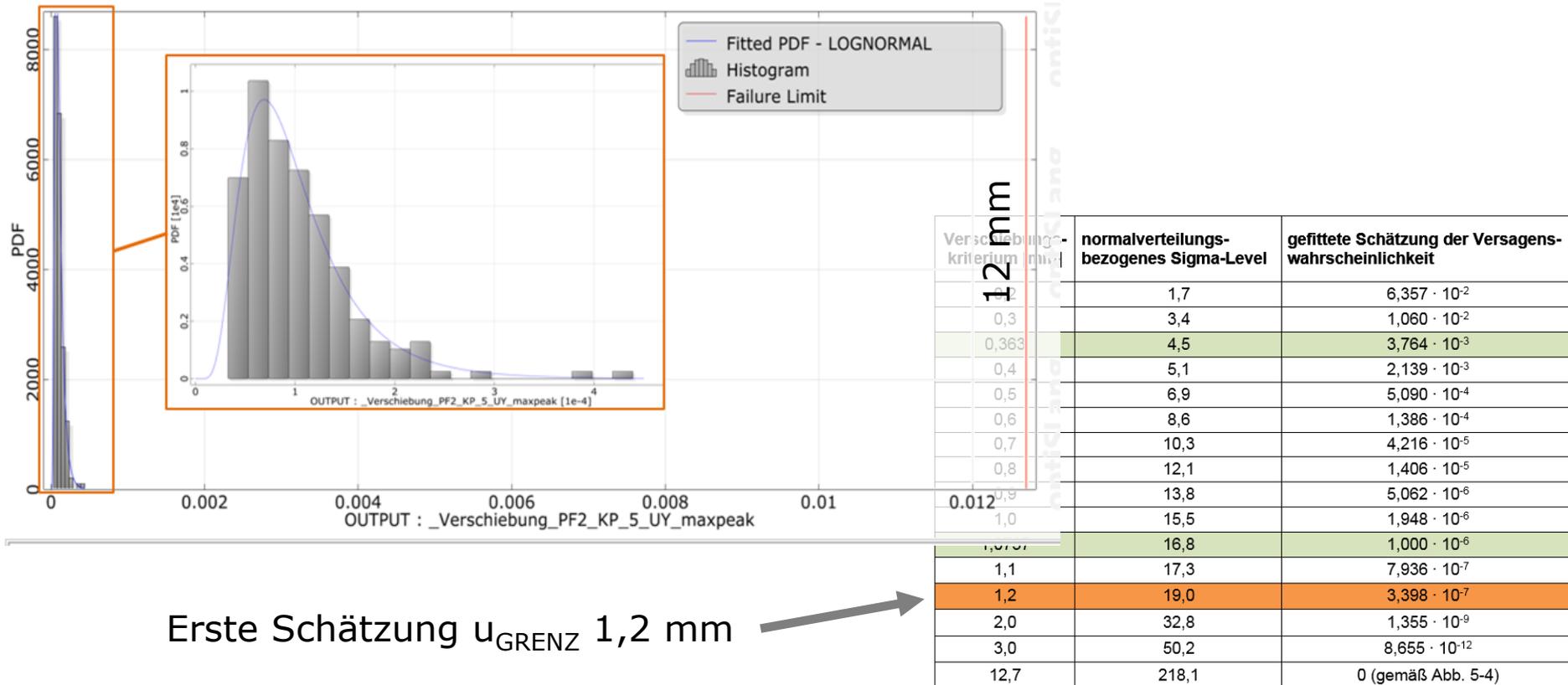


plast. Gradienten ungeeignet, da Bauwerk weitgehend im elastischen Bereich

geringe COP

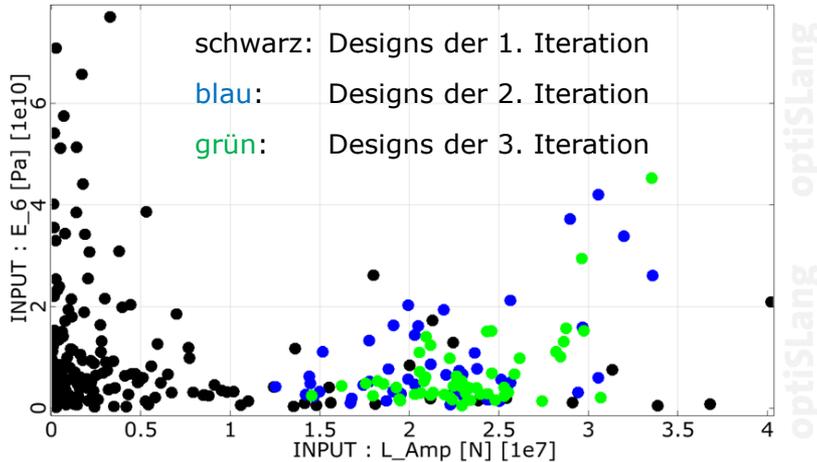
Robustheitsbewertung, Frontalstoß Pfeiler 2

- in Robustheitsbewertung kein Versagensfall (für Bauwerke normal)
- Versagenswahrscheinlichkeit zu gering → Bewertungskriterium verschieben
- Gesucht Grenzverschiebung deren Überschreitungswahrscheinlichkeit der zul. Versagenswahrscheinlichkeit entspricht 10^{-6} → EC0

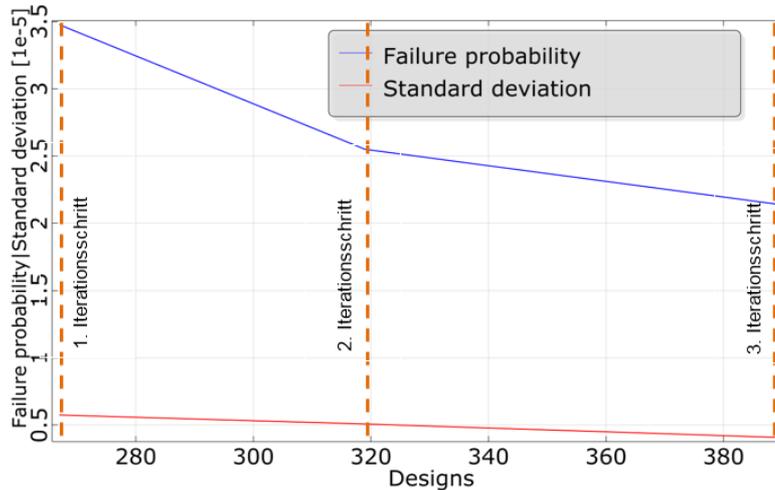


Zuverlässigkeitsanalyse 1, u_{GRENZ} 1.2 mm

INPUT : L_Amp vs. INPUT : E_6, (linear) $r=0.036$



Result history



Method : Adaptive Response Surface Method (ARSM)

Probability of Failure : 2.14353e-05
 Standard deviation error : 4.09349e-06
 Reliability Index : 4.09144

Selected data : 3. Approximation
 Approximation errors : R^2 / R^2_{pred}
 lim_st_Verschiebung_PF2_KP_5_UY_maxpeak : 1 / 0.88482

Number of designs

Total: domain : 389
 Safe domain : 271
 Unsafe domain : 39
 Failure strings : 0
 Unsuccessful : 79

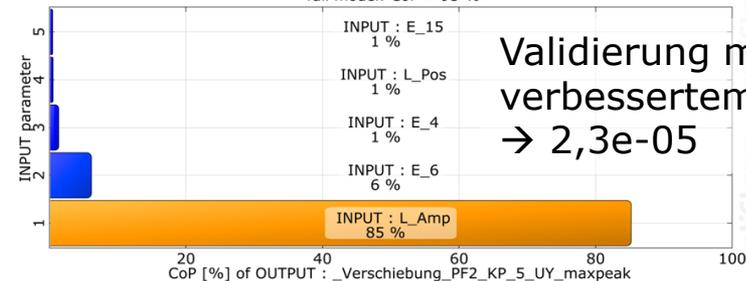
Directional Sampling on Response Surface

Complete directions : 5000 / 5000

Number of designs

Total : 28865
 Safe domain : 21249
 Unsafe domain : 7616
 Failure strings : 0
 Unsuccessful : 0

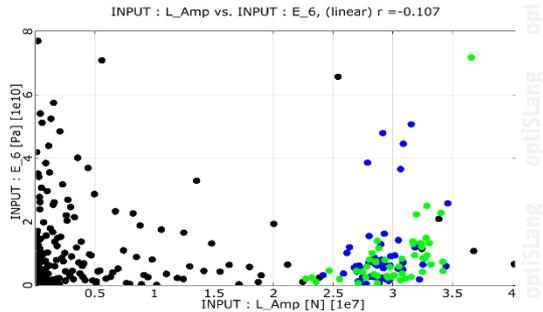
Coefficients of Prognosis (using MOP)
 full model: CoP = 95 %



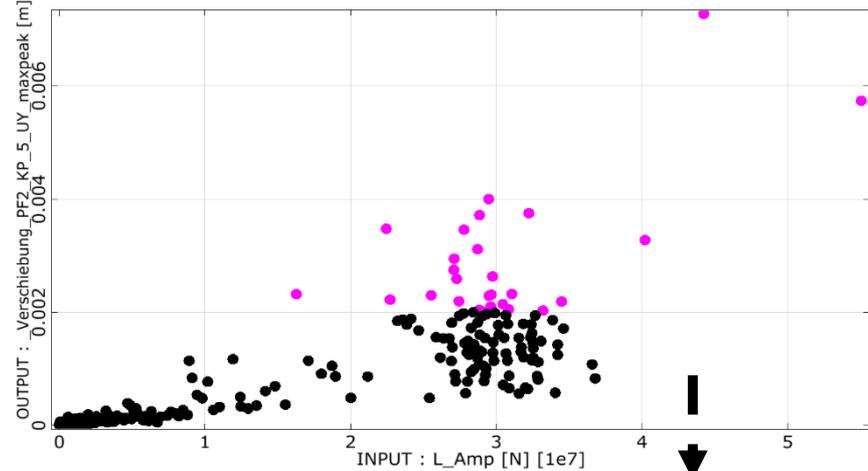
Validierung mit verbessertem MOP + DS
 $\rightarrow 2,3e-05$

Zuverlässigkeitsanalyse 2

u_{GRENZ} 2 mm



INPUT : L_Amp vs. OUTPUT : _Verschiebung_PF2_KP_5_UY_maxpeak, (linear) r = 0.813



Method : Adaptive Response Surface Method (ARSM)

Probability of Failure : 4.31857e-06
 Standard deviation error : 9.49968e-07
 Reliability Index : 4.44875

Selected data : 3. Approximation
 Approximation errors : R^2 / R^2_{pred}
 lim_st__Verschiebung_PF2_KP_5_UY_maxpeak: 1 / 0.961637

Number of designs

Total : domain : 328
 Safe domain : 270
 Unsafe domain : 32
 Failure strings : 0
 Unsuccessful : 26

Directional Sampling on Response Surface

Complete directions : 5000 / 5000

Number of designs

Total : 27937
 Safe domain : 21015
 Unsafe domain : 6922
 Failure strings : 0
 Unsuccessful : 0

Zuverlässigkeitsanalyse 3

u_{GRENZ} 3 mm auf MOP

Method : Directional Sampling (DS)

Complete directions : 2000 / 2000

Probability of Failure : 6.95972e-07
 Standard deviation error : 1.85762e-07
 Reliability Index : 4.82615

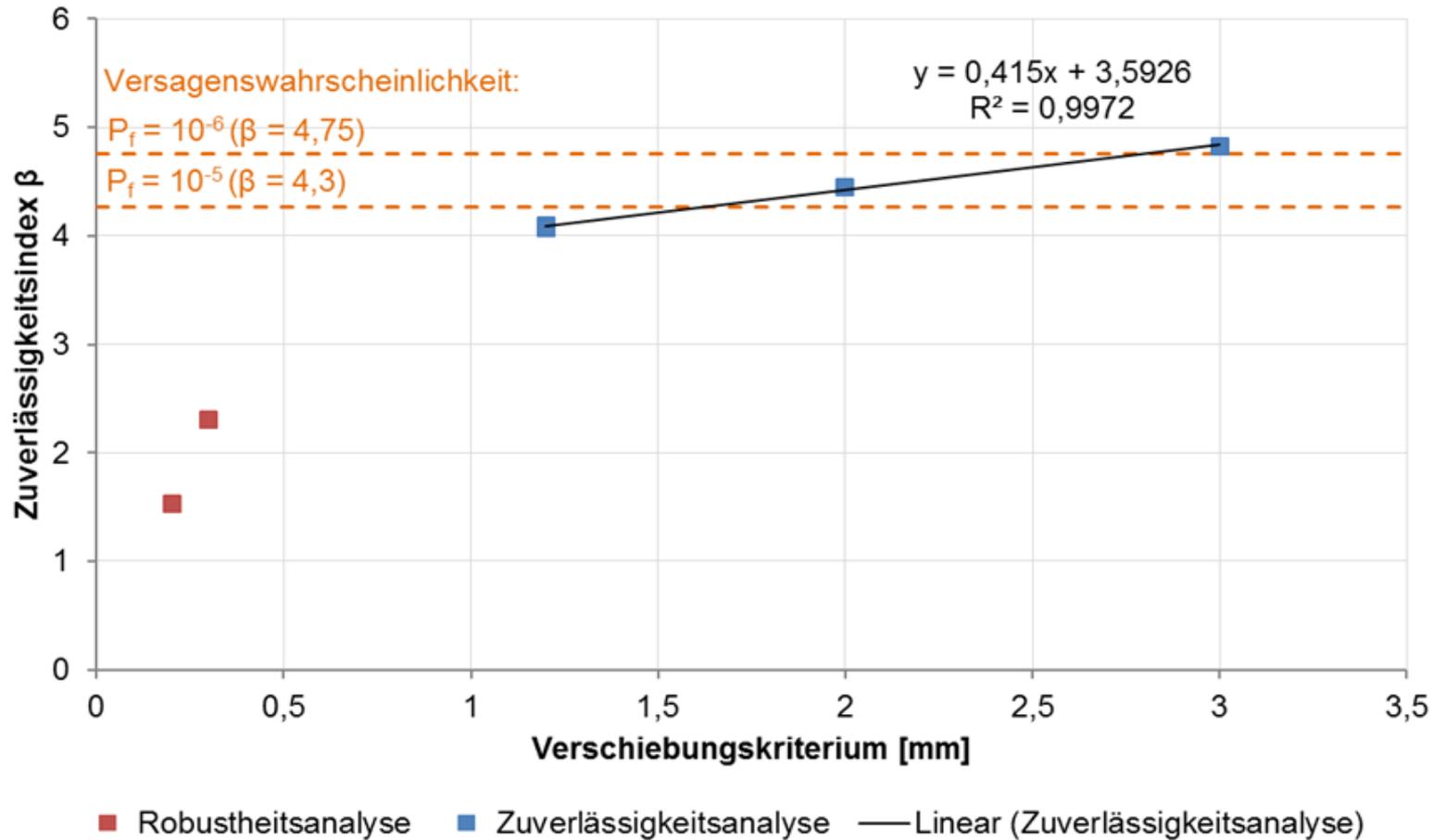
Number of designs

Total : 3951
 Safe domain : 2975
 Unsafe domain : 976
 Failure strings : 0
 Unsuccessful : 0

Zuverlässigkeitsanalyse, Frontalstoß Pfeiler 2

	Verschiebungskriterium [mm]	gefittete Schätzung der Versagenswahrscheinlichkeit nach Tab. 5-2	relative Versagenswahrscheinlichkeit	Zuverlässigkeitsindex β gemäß Abschnitt 2.4
Zuverl.analyse 1	0,2	$6,357 \cdot 10^{-2}$	$6,28 \cdot 10^{-2}$ (Robustheitsbewertung)	1,53
	0,3	$1,060 \cdot 10^{-2}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$ (Robustheitsbewertung)	2,31
	1,2	$3,398 \cdot 10^{-7}$	$2,14 \cdot 10^{-5}$ (ARSM-DS) (Zuverlässigkeitsanalyse)	4,09
			$2,30 \cdot 10^{-5}$ (MOP-DS) (Zuverlässigkeitsanalyse)	4,08
	1,7 ¹⁾	-	$1,0 \cdot 10^{-5}$	4,3
Zuverl.analyse 2	2,0	$1,355 \cdot 10^{-9}$	$4,32 \cdot 10^{-6}$ (ARSM-DS) (Zuverlässigkeitsanalyse)	4,45
	2,8 ¹⁾	-	$1,0 \cdot 10^{-6}$	4,75
	3,0	$8,655 \cdot 10^{-12}$	$6,96 \cdot 10^{-7}$ (MOP-DS) (Zuverlässigkeitsanalyse)	4,83
12,7			0	$4,0 \cdot 10^{-19}$
¹⁾ interpolierter Wert gemäß Abb. 6-11 ²⁾ extrapolierter Wert gemäß Abb. 6-11				

Zuverlässigkeitsanalyse, Frontalstoß Pfeiler 2



Zusammenfassung – Vorgehen

- **Aufbau eines 3D FE-Modells / Parametrische, gekoppelte FE-Simulationskette:** des Bauwerks und Untergrund, Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens mit geeigneten Materialmodellen, nichtlineare statische / dynamische Analyse,
- **Modellvalidierung / -kalibrierung** / Abgleich des 3D FE-Modells mit verfügbaren Messwerten
- **Grenzzustandsanalysen** durch Widerladerreduktion / Laststeigerung
Identifikation relevanter Versagenszustände, Definition der Bewertungskriterien
- **Robustheitsbewertung** – stochastische Analyse (LHS, ca. 100 Designs, im 2-Sigma Bereich), Identifikation der relevanten Unsicherheiten, Reduktion des erf. Parameterraum, Auswahl des Verfahrens der Zuverlässigkeitsanalyse
- **Zuverlässigkeitsanalyse** zur Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeit / Überschreitungswahrscheinlichkeit der Struktur mit 2 alternativen Verfahren

Thank you

For more information please
visit our homepage:
www.dynardo.de

