

Sicherheitsbeurteilung und Entwurf von Tragwerken – numerische Analyse mit unscharfen Größen

Jan-Uwe Sickert¹, Frank Steinigen¹, Steffen Freitag², Stephan Pannier³,
Andreas Hoffmann¹, Wolfgang Graf⁴, Michael Kaliske⁴

Zusammenfassung: Im Beitrag werden Forschungsergebnisse zum numerischen Entwurf textilbewehrter Verstärkungsschichten zusammengefasst. Die Ergebnisse resultieren im Wesentlichen aus den Arbeiten der Teilprojekte D2-Numerische Simulation, E3-Sicherheitsbeurteilung und E4-Numerische Langzeitprognose des Sonderforschungsbereichs 528. Zusätzlich wird auf Transferleistungen verwiesen.

Summary: The paper provides a summary of research results concerning numerical design approaches for textile reinforced structures. The outcome mainly results from the work done in the subprojects of the Collaborative Research Centre 528: D2-Numerical Simulation, E3-Reliability Assessment und E4-Numerical Long-term Prognosis. Further, the paper also points out the transfer potential.

1 Einleitung

Der Entwurf von Tragwerken wird vielfach durch mehrere (teilweise konträre) Entwurfsziele, wie z.B. Sicherheit, Robustheit, Lebensdauer, Kosten und Ästhetik, beeinflusst. Die Entwurfsziele sind als Zielfunktionen zu quantifizieren, die von variierbaren Geometrie- und Materialgrößen abhängen. In den Zielfunktionen werden meist berechnete Kennwerte des Tragwerkes Vorgaben gegenübergestellt. Für den Vergleich hinsichtlich Sicherheit, Robustheit und Lebensdauer werden geeignete Maßzahlen benötigt, um zutreffende Ergebnisse zu erhalten. Geeignete Maßzahlen für die Sicherheit sind der Sicherheitsindex bzw. die Versagenswahrscheinlichkeit. Teilsicherheitsbeiwerte (TSB) erlauben nur eine konservative Abschätzung der Sicherheit. Problematisch ist auch die Verfügbarkeit bzw. Transparenz von

¹ Dr.-Ing., Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke, TU Dresden

² Dr.-Ing., School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Savannah

³ Dipl.-Ing., Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke, TU Dresden

⁴ Prof. Dr.-Ing., Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke, TU Dresden

TSB für bestehende gealterte Bauwerke und neue – in der Entwicklung befindliche – Materialien.

Für die Quantifizierung von Sicherheit, Robustheit und Lebensdauer ist die Unschärfe der Material-, Geometrie- und Lastgrößen differenziert zu erfassen und auf Tragwerksantworten abzubilden, die ebenfalls unscharf erhalten werden. Im Beitrag werden eine Klassifikation der Unschärfe vorgestellt und zugehörige Modelle beschrieben. Für die Ermittlung der unscharfen Tragwerksantworten werden Algorithmen vorgeschlagen, die sowohl eine modellbasierte als auch eine modellfreie Analyse ermöglichen. Die Wahl des Algorithmus wird von den verfügbaren Daten, deren Qualität und Quantität sowie dem numerischen Aufwand geleitet. Im Abschnitt 4 werden numerische Methoden für den Entwurf vorgestellt und Maßzahlen für Sicherheit, Robustheit und Lebensdauer eingeführt. Eine robustheitsbasierte Variantenuntersuchung einer Textilbetonverstärkung zeigt die Praxistauglichkeit der Algorithmen und Methoden.

2 Unschärfe

2.1 Klassifizierung

Das Tragverhalten textilverstärkter Strukturen kann nur realitätsnah prognostiziert werden, wenn verlässliche Eingangsdaten vorliegen. Die unvermeidbare Unschärfe dieser Daten ist zu klassifizieren, zu quantifizieren und bei der Simulation zu berücksichtigen.

Die Unschärfe der Daten für Eingangsgrößen der Analyse von Textilbeton-Tragwerken hat unterschiedliche Ursachen. Entsprechend der Ursache wird zwischen epistemischer und aleatorischer Unschärfe unterschieden [8], [9].

Epistemische Unschärfe resultiert aus der fehlenden Kenntnis des tatsächlichen Wertes einer Größe, für die angenommen wird, dass sie innerhalb eines Betrachtungsmaßstabes einen deterministischen Wert besitzt. Diese Unkenntnis entsteht aus einem Informationsdefizit. Zum Beispiel ist die Kraft, bei der ein Filament an einem bestimmten Punkt versagt, ein scharfer Wert. Sie wird in der Realität jedoch nie scharf erfassbar sein, da weder die scharfe Beobachtung noch die scharfe Definition des Versagensphänomens gelingen. Für epistemische Unschärfe werden in der Literatur auch die Begriffe subjektive, reduzierbare und Typ-B Unschärfe verwendet.

Die aleatorische Unschärfe ist in der inhärenten Heterogenität und Variation des Composite-Werkstoffes begründet. Sie wird auch als stochastische, nicht reduzierbare und Typ-A Unschärfe bezeichnet. Beispielsweise können die Variationen der Material- und Geometrieparameter einzelner Filamente der aleatorischen Unschärfe zugeordnet werden.

2.2 Modelle

Traditionell wird Unschärfe unabhängig von der Ursache mit stochastischen Modellen quantifiziert. Im Ergebnis unscharfer Tragwerksanalysen mit stochastischen Modellen werden scharfe Wahrscheinlichkeitsaussagen getroffen, die dem Nutzer dieser Aussagen einen i.d.R. nicht vorhandenen Informationsgehalt vortäuschen. Diese Täuschung basiert auf dem frequentistischen Wahrscheinlichkeitsbegriff, der auf Massenerscheinungen begründet ist. Bei der Quantifizierung unscharfer Größen mit Wahrscheinlichkeitsmodellen tritt immer auch epistemische Unschärfe auf. Ursache ist das Informationsdefizit bezüglich der Grundgesamtheit, das nur mit einem unendlich großen – nicht zu realisierenden – Stichprobenumfang in Verbindung mit einer scharfen Wahrnehmung der Zufallsexperimente gegen null strebt.

Für eine zutreffende Bewertung unscharfer Strukturantworten ist es notwendig, die epistemische Unschärfe von der aleatorischen Unschärfe zu trennen, siehe auch [9]. Diese Forderung motiviert die Auseinandersetzung mit unterschiedlichen Unschärfemodellen. Während die aleatorische Unschärfe adäquat mit stochastischen Modellen beschrieben werden kann, ist die epistemische Unschärfe zutreffend mit alternativen (nichtstochastischen) Modellen quantifizierbar, siehe z.B. [7], [11].

Epistemische Unschärfe wird durch eine Wissenslücke, d.h. durch ein Informationsdefizit, verursacht. Quantifizierungsziel ist die Repräsentation des Informationsdefizites mit Hilfe von Bewertungsfunktionen. Diese Abbildung ist eine subjektive Entscheidung des Bewerternden, die durch objektive Bewertungen (z.B. einzelne Messergebnisse) gestützt sein kann. Im Hinblick auf die Quantifizierbarkeit und die numerische Behandlung werden alternative Unschärfemodelle mit Intervall-Größen und Fuzzy-Größen eingesetzt.

Die Beurteilung/Bewertung bestehender, nachträglich verstärkter Bauwerke ist stets ein Einzelfall, für den nur Stichproben mit einer geringen Anzahl von Stichprobenelementen zur Verfügung stehen. Sie bilden zusammen mit subjektiven Einschätzungen die Grundlage für die Erfassung der Unschärfe. Die Erfassung der Unschärfe entsprechend ihrer Ursache (aleatorisch und epistemisch) ist eine Voraussetzung für eine zutreffende Beurteilung der Tragwerkssicherheit. Das Zusammenführen von aleatorischer und epistemischer Unschärfe in einem Unschärfemodell gelingt mit dem Konzept der unscharfen Wahrscheinlichkeiten (imprecise probabilities) [1], [19]. Die mathematischen Modelle erlauben Variabilität und Informationsdefizit zu erfassen und separat auf Strukturantworten abzubilden. Das vorhandene Informationsdefizit ist im Ergebnis sichtbar.

Die numerische Umsetzung gelingt mit der Einführung von Fuzzy-Scharparametern. Sie definieren bewertete Mengen von reellwertigen Zufallsgrößen [10], [15]. Spezielle Fuzzy-Scharparameter sind die Verteilungsparameter, die zur Quantifizierung der Fuzzy-Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion gebraucht werden. Die Kombination von Zufallsgrößen mit Fuzzy-Scharparametern führt methodisch auf Algorithmen, die in [11] dem Unschärfemodell Fuzzy-Zufälligkeit zugeordnet wurden. Eine darüber hinausgehende

Generalisierung auf Basis einer mathematisch konsistenten Formulierung sind fuzzy-wahrscheinlichkeitsbasierte Fuzzy-Zufallsgrößen, s. [13].

Die Unschärfe der Daten z.B. für Materialparameter, Belastung, Randbedingungen ist eine Funktion veränderlicher Parameter $\underline{t} = \{\underline{\theta}, \tau, \underline{\varphi}\}$, z.B. der Zeit τ , der Raumkoordinaten $\underline{\theta} = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$ und weiterer Parameter $\underline{\varphi}$ wie z.B. Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit. Die variierende Unschärfe der Daten (abhängig von den Parametern \underline{t}) wird mit Fuzzy-Zufallsfunktionen quantifiziert, welche die Sonderfälle Zufallsfunktion und Fuzzy-Funktion enthalten. Ist die Fuzzy-Zufallsfunktion nur von der Zeit τ abhängig, wird ein Fuzzy-Zufallsprozess eingeführt, ist sie nur von den Raumkoordinaten $\underline{\theta}$ abhängig, liegt ein Fuzzy-Zufallsfeld vor.

3 Numerische Analyse

Im Kern numerischer Entwurfsmethoden ist eine numerische Tragwerksanalyse mehrfach auszuführen. Ziel ist die Abbildung der Eingangsgrößen auf Tragwerksantworten. Die prognostizierten Tragwerksantworten repräsentieren das Verhalten des Tragwerkes. Sie sind auch Indikatoren zur Beschreibung von Grenzzuständen (Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit). Die deterministische Abbildung wurde für die Berücksichtigung unscharfer Eingangsgrößen zur unscharfen Tragwerksanalyse erweitert. In Abhängigkeit von den verfügbaren Daten und vom numerischen Aufwand werden modellbasierte, modellfreie oder hybride Vorgehensweisen eingesetzt [5].

3.1 Modellbasiertes Vorgehen

Die modellbasierte Prognose setzt die Entscheidung für ein Tragwerksmodell voraus. Das Tragwerksmodell beinhaltet Geometrie-, Material- und physikalische Modelle sowie mathematische Formulierungen (z.B. ein Differentialgleichungssystem). Desweiteren sind zu wählen: die Dimension 1D, 2D oder 3D und die Basisalgorithmen wie z.B. Finite-Element-Methode, Mehrkörperdynamik und Zeitschrittverfahren. Die Vorauswahl beeinflusst das zu erwartende Ergebnis entscheidend. Die modellbasierte Vorhersage von Tragwerksantworten wird in der Tragwerksanalyse überwiegend angewendet.

Stahlbeton-Tragwerke mit textilibewehrten Verstärkungsschichten werden zutreffend mit dem Multi-Referenzebenenmodell (MRM) beschrieben. Dieses MRM wird für Mehrschichten-Composite mit einer diskontinuierlichen Multi-BERNOULLI-Kinematik verwendet. Die FE-Diskretisierung des MRM basiert auf einem hybriden Energiefunktional.

Ein MRM-Element beinhaltet $k + 1$ geschichtete Subelemente und k Interfaces. Jedes Subelement wird in Subschichten unterteilt. Die Subschichten bilden den Altbeton und die Stahlbewehrung oder den Feinbeton und die textile Bewehrung ab.

Die physikalisch nichtlineare Analyse textilverstärkter Tragwerke ist ein nicht-konservatives Problem resultierend u.a. aus Rissbildung und Schädigung. Die Lösung dieser Aufgabe gelingt für differentiale Lastschritte. Zur praktischen Handhabung wird auf inkrementale Lastschritte übergegangen und eine Iteration eingeführt. Für inkrementale Lastschritte gilt im statischen Fall

$$\underline{K}_T \cdot \underline{\Delta q} - \underline{\Delta R} - \underline{\Delta R}_K = 0 \quad (1)$$

mit der tangentialen Steifigkeitsmatrix \underline{K}_T , die zu Beginn des Lastschritts ermittelt wird. Weitere Lösungsstrategien und Materialbeschreibungen für textilverstärkte Stahlbeton-Tragwerke sind in [18] beschrieben.

3.2 Modellfreies Vorgehen

Als Alternative zum modellbasierten Vorgehen kann das zeitabhängige Strukturverhalten modellfrei prognostiziert werden. Das Vorgehen wird deshalb als modellfrei bezeichnet, weil weder ein Geometrie- noch ein Materialmodell vorgegeben werden müssen. Ausgangspunkt sind unscharfe Prozesse für Eingangsgrößen (z.B. zeitabhängige Lasten, Temperatur) und Tragwerksantworten (z.B. Verschiebungen), die mit einem (experimentellen/numerischen) Tragwerksmonitoring ermittelt werden.

Mit dem modellfreien Vorgehen werden die Prozesse der Eingangsdaten auf die Prozesse der Tragwerksantworten abgebildet. Alle unscharfen Tragwerksprozesse werden als Fuzzy- oder Fuzzy-Zufallsprozesse modelliert. In Abhängigkeit von den verfügbaren Daten und den Ursachen für die Unschärfe werden drei Abbildungstypen unterschieden.

1. Fuzzy-Einwirkungen werden auf Fuzzy-Tragwerksantworten abgebildet. Die Parameter der Abbildung sind deterministisch. Die Unschärfe der Tragwerksantworten ist vollständig in der Unschärfe der Einwirkungen begründet.
2. Deterministische Einwirkungen werden auf Fuzzy-Tragwerksantworten abgebildet. Für die unscharfe Abbildung werden Fuzzy-Parameter benötigt. In diesem Fall resultiert die Unschärfe der Tragwerksantworten nicht aus den Einwirkungen. Streuungen der Materialeigenschaften oder der Geometrie sind mögliche Ursachen, die beim modellfreien Vorgehen jedoch nicht explizit spezifiziert werden müssen.
3. Die Kombination von 1. und 2. führt auf eine dritte Variante, bei der Fuzzy-Einwirkungen mit Fuzzy-Parametern unscharf auf Fuzzy-Tragwerksantworten abgebildet werden.

Wenn die Abhängigkeiten zwischen den Einwirkungen und den Tragwerksantworten mit Hilfe vorliegender Daten identifizierbar sind, können unscharfe Tragwerksantworten ohne ein Strukturmodell numerisch prognostiziert werden. Für diese Aufgabe werden künstliche neuronale Netze angewendet [2], [3]. Zur Berücksichtigung der Unschärfe und der Zeitabhängigkeit wurden rekurrente neuronale Netze für Fuzzy-Daten entwickelt und beispielartig für die Prognose der Langzeitverformungen textilverstärkter Stahlbeton-Platten eingesetzt, [3], [4].

3.3 Hybrides Vorgehen

Das modellbasierte und das modellfreie Vorgehen sind kombinierbar. Im Ergebnis liegen hybride Lösungsstrategien vor. Beispiele sind die Ergänzung der modellfreien Analyse durch modellbasierte Bereitstellung von Trainingsdaten und die Einführung einer modellfreien Beschreibung des Materialverhaltens innerhalb einer modellbasierten Analyse.

Der Berechnungsaufwand einer unscharfen Analyse mit Fuzzy-Zufallsgrößen textilverstärkter Stahlbetontragwerke hängt maßgeblich vom Aufwand der nichtlinearen deterministischen Analyse ab. Eine Effizienzsteigerung wird durch die Substitution der deterministischen Analyse mit einem Ersatzmodell möglich. Ersatzmodelle sind Approximationsfunktionen, die sehr schnell analytisch auswertbar sind und in einem Trainingsprozess an die tatsächliche Lösung angepasst werden [14]. Ersatzmodelle, die Tragwerksantworten spezifizieren, werden als Antwortflächenapproximationen bezeichnet.

Die Auswahl und Güte einer Antwortflächenapproximation hängt maßgeblich von den Charakteristiken der modellbasierten Lösung ab. Für den Ersatz des MRM-Modells nach Abschnitt 3.1 ist eine flexible, allgemeingültige, nichtlineare Approximation erforderlich. Sehr gute Erfahrungen wurden in diesem Zusammenhang mit Approximationen auf der Basis künstlicher neuronaler Netze gemacht. Die neuronalen Netze können die Informationen initialer modellbasierter Analysen extrahieren und anschließend die Antwortfläche reproduzieren [16], [17].

Als weiteres hybrides Vorgehen wird in [2] gezeigt, wie das zeitabhängige Materialverhalten von Textilbeton mit Hilfe rekurrenter neuronaler Netze für Fuzzy-Daten modellfrei prognostiziert werden kann. Das neuronale Netz wurde an Versuchsdaten trainiert und anschließend in einer modellbasierten Analyse einer verstärkten Struktur zur Beschreibung des Langzeitverhaltens eingesetzt.

4 Entwurf textilbewehrter Verstärkungsschichten

4.1 Indikatoren

Wesentliche Entwurfsziele bei der Verstärkung von Tragwerken sind die Funktion und die Kosten. Die Sicherstellung der Funktion ist ein primäres Ziel. Im Vergleich dazu sind die Kosten meist ein konträres Entwurfsziel. Im Rahmen des Teilprojekts E3 des SFB 528 wurde das Hauptaugenmerk auf die Funktion der Verstärkung gelegt, die u.a. mit den Indikatoren Sicherheit, Lebensdauer und Robustheit bewertet werden kann. Auf Basis dieser Indikatoren gelingt die Formulierung der jeweiligen Zielfunktion. Können für Sicherheit, Lebensdauer bzw. Robustheit einzuhaltende Grenzwerte angegeben werden, dann können diese Entwurfsziele alternativ als Nebenbedingung berücksichtigt werden [13].

Als Maß für die Bewertung der Sicherheit wurden der Fuzzy-Sicherheitsindex [10] und die zeitabhängige Fuzzy-Versagenswahrscheinlichkeit [15] eingeführt. Darauf aufbauend wurde die Lebensdauer als Entwurfsziel definiert. Sie beschreibt die Fähigkeit einer Struktur, eine zugewiesene Funktion unter vorgegebenen Bedingungen im betrachteten Zeitraum zu erfüllen. Als Indikator für die Funktion wurde die Zuverlässigkeit eingesetzt [12], [16]. Für den Vergleich der Entwurfsvarianten wurde ein Robustheitsmaß eingeführt [6], [17]. Robustheit wurde dabei als Fähigkeit definiert, eine zugewiesene Funktion unter allen (denkbaren) Bedingungen zu übernehmen.

4.2 Entwurfsmethoden

Zur Lösung von Entwurfsaufgaben wurden effiziente numerische Strategien entwickelt und angewendet [13]. Für diskrete Entwurfsaufgaben mit einer endlichen Anzahl möglicher Entwürfe eignet sich die Variantenuntersuchung. Alle Varianten werden systematisch untersucht und die Ergebnisse der Zielfunktion verglichen.

Eine gebräuchliche Entwurfsstrategie zur Lösung von Entwurfsaufgaben mit diskreten oder kontinuierlichen Eingangsgrößen ist die Optimierung. Die Eingangs-(Entwurfs-)größen werden so gewählt, dass die zugehörigen Ergebnisgrößen „optimal“ werden. Im Rahmen der Entwicklung von Entwurfsstrategien für Textilbeton-Verstärkungen wurden Optimierungsverfahren entwickelt, die eine Berücksichtigung von Fuzzy-Zufallsgrößen erlauben. Dabei wurden sowohl die Zielfunktion als auch die Nebenbedingungen als unscharfe Funktionen formuliert [13].

Bei der Variantenuntersuchung und der Optimierung ist die Entwurfsaufgabe als Vorwärtsaufgabe formuliert. Die Eingangsgrößen werden vorgegeben und die Ergebnisgrößen berechnet. In der Praxis wird jedoch häufig das Ergebnis mit einem Zielwert vorgegeben und nach den zugehörigen Eingangsgrößen gefragt. Diese Fragestellung wird als inverses Problem

bezeichnet. Mit Methoden der Clusteranalyse kann das inverse Problem auf der Basis der Ergebnisse unscharfer Tragwerksanalysen direkt gelöst werden. Die Algorithmen und Anwendungsbeispiele sind z.B. in [12] und [16] enthalten.

5 Beispiel

Untersucht wird ein Stahlbeton-Vordach, das Teil einer bestehenden Konstruktion ist. Die Dachkonstruktion wird an der Ober- und Unterseite nachträglich mit in Feinbeton eingebetteten textilen Bewehrungsmatten aus Carbon verstärkt. Betrachtet werden unterschiedliche Anordnungen der nachträglichen Verstärkung.

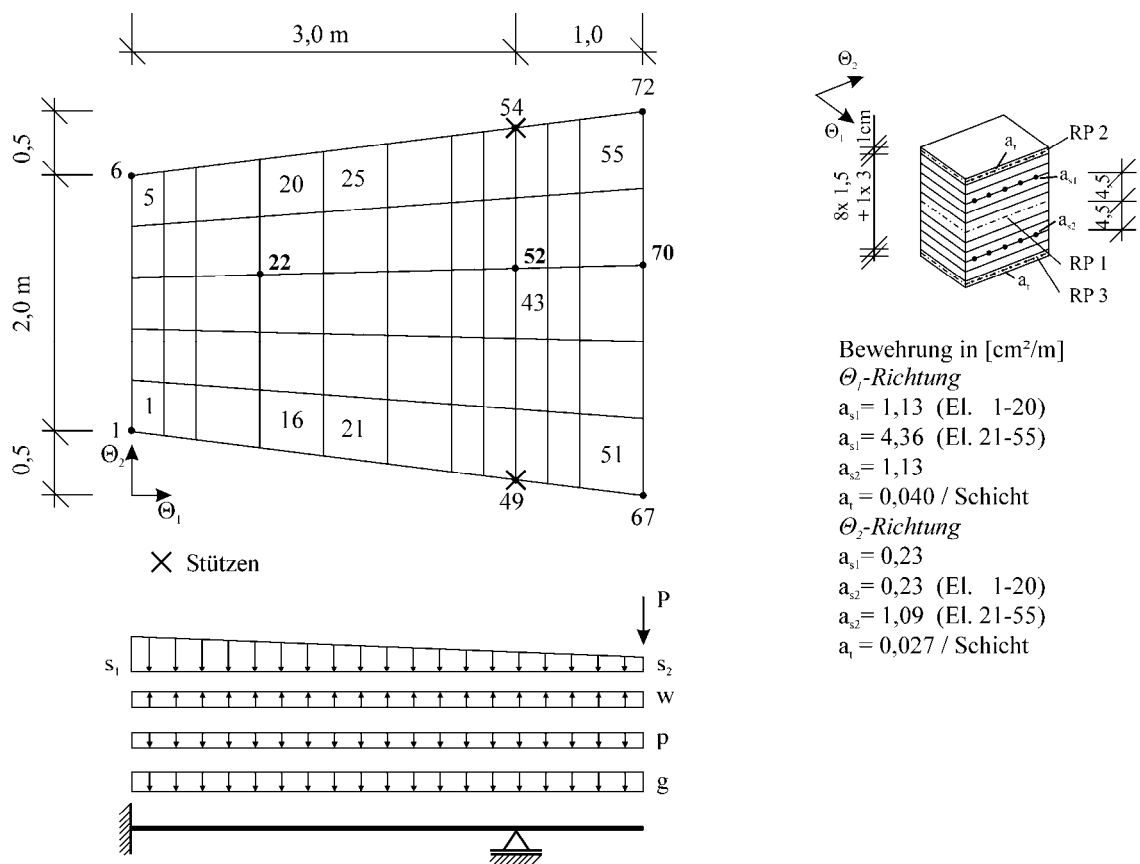


Bild 1: Geometrie, FE-Diskretisierung, Belastung

Fig. 1: Geometry, FE discretization, loading

Die Bilder 1 und 2 zeigen das Berechnungsmodell einschließlich der betrachteten Lastfälle. Neben der statischen Belastung aus Eigen-, Verkehrs-, Wind- und Schneelasten werden vertikale und horizontale Stoßlasten (jeweils zwei unscharfe Dreieckimpulse) berücksichtigt. Wesentliche (unscharfe) Eingangsgrößen der numerischen Simulation sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

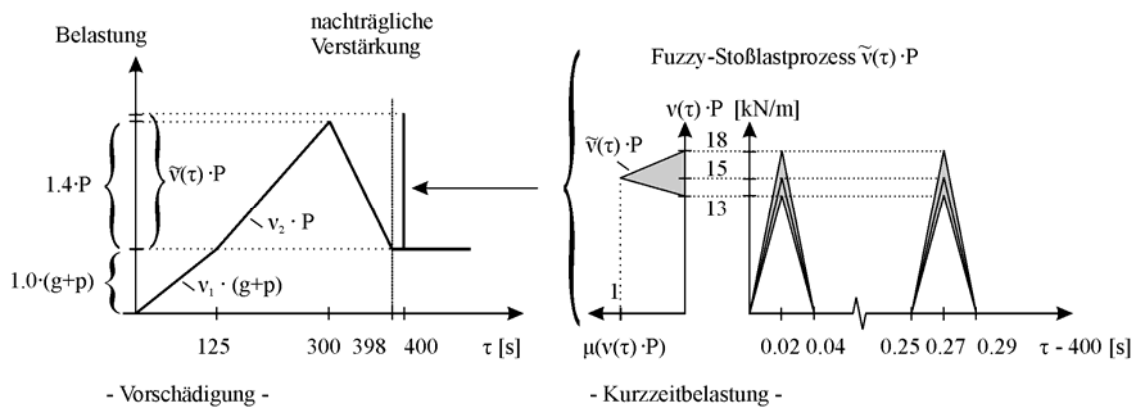


Bild 2: Lastprozesse

Fig. 2: Load processes

Tabelle 1: Unscharfe Eingangsgrößen

Table 1: Uncertain input variables

Name	Typ	Parameter 1	Parameter 2
f_c (Druckfestigkeit) der Betonschichten der RP1	lognormal	$\tilde{\mu} = \langle 28; 30; 32 \rangle^*$	$\sigma = 2 \text{ N/mm}^2$
f_c der Betonschichten der RP2	lognormal	$\mu = 83 \text{ N/mm}^2$	$\sigma = 8 \text{ N/mm}^2$
f_c der Betonschichten der RP3	lognormal	$\mu = 83 \text{ N/mm}^2$	$\sigma = 8 \text{ N/mm}^2$
Verkehrslast p vor der Verstärkung	Ex-max-Typ I	$\mu = 1 \text{ kN/m}^2$	$\tilde{\sigma} = \langle 0,05; 0,1; 0,2 \rangle$
c der Betonschichten der RP2	normal	$\mu = !1,095$	$\sigma = 0,129$
c der Betonschichten der RP3	normal	$\mu = !0,8$	$\sigma = 0,1$
a_{s2} (Elemente 1-20) in θ_1 -Richtung	exponential	$\tilde{\lambda} = \langle 7; 8; 9 \rangle$	$d = 1,13 \text{ cm}^2 / \text{m}$
a_{s1} (Elemente 1-20) in θ_1 -Richtung	exponential	$\tilde{\lambda} = \langle 7; 8; 9 \rangle$	$d = 1,13 \text{ cm}^2 / \text{m}$
a_{s2} (Elemente 21-55) in θ_1 -Richtung	exponential	$\tilde{\lambda} = \langle 7; 8; 9 \rangle$	$d = 1,13 \text{ cm}^2 / \text{m}$
a_{s1} (Elemente 21-55) in θ_1 -Richtung	exponential	$\tilde{\lambda} = \langle 7; 8; 9 \rangle$	$d = 1,13 \text{ cm}^2 / \text{m}$
a_{s2} (Elemente 21-55) in θ_2 -Richtung	exponential	$\tilde{\lambda} = \langle 7; 8; 9 \rangle$	$d = 1,13 \text{ cm}^2 / \text{m}$
Dichte ρ Altbeton	normal	$\mu = 2,3 \text{ t/m}^3$	$\sigma = 0,2 \text{ t/m}^3$
Dichte ρ Feinbeton	normal	$\mu = 2,3 \text{ t/m}^3$	$\sigma = 0,2 \text{ t/m}^3$

* $\langle a; b; c \rangle$ repräsentiert eine Fuzzy-Dreieckzahl mit dem Support $[a; c]$ und dem Gipfel b

Die Stahlbeton-Konstruktion wird nach einem Vorbelastungsprozess (aus Eigenlast g und Verkehrslast p) und abgeschlossenem Schädigungsprozess (Rissbildung) verstärkt. Vier textile Verstärkungsschichten können unterschiedlich verteilt an der Ober- und der Unterseite der Konstruktion aufgebracht werden. Betrachtet werden fünf Verstärkungsvarianten, bezeichnet mit

$$p = 1: (0/4) \text{ (0 Textilschichten an Oberseite, 4 Textilschichten an Unterseite),}$$

$$p = 2: (1/3), \quad p = 3: (2/2), \quad p = 4: (3/1) \quad \text{und} \quad p = 5: (4/0).$$

Die Textilschichten sind in einer entsprechend dicken Feinbetonmatrix eingebettet. Bei 0 Textilschichten entfällt die Feinbetonmatrix.

In die Robustheitsbewertung werden vier Lastprozesse (LP) einbezogen:

- LP1: vertikale Stoßbelastung (Knoten 67 – 72),
- LP2: horizontale Stoßbelastung (Knoten 49),
- LP3: Schneebelastung s_2 ,
- LP4: Windlast w .

Tabelle 2: Vergleich der Robustheit

Table 2: Comparison of robustness

Variante	1 (0/4)	2 (1/3)	3 (2/2)	4 (3/1)	5 (4/0)
$R_{4,3}^{[p]}$	0,757	0,089	0,721	1,000	0,700

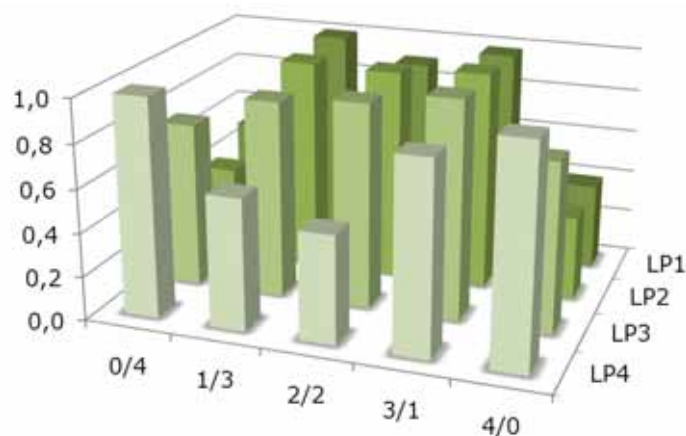


Bild 3: Ergebnis der Robustheitsanalyse $R_{4,3}^{[p]}$

Fig. 3: Result of robustness analysis $R_{4,3}^{[p]}$

Das Tragverhalten der textilverstärkten Stahlbeton-Konstruktion wird mit dem Multi-Referenzebenen-Modell (MRM) modellbasiert untersucht. Anschließend werden die Verschiebungsantworten mit neuronalen Netzen approximiert. Im Ergebnis der unscharfen Analyse werden sechs Fuzzy-Scharparameter (Mittelwerte und Standardabweichung) von drei Fuzzy-Wahrscheinlichkeitsgrößen (Verschiebungen der Knoten 22, 52 und 70) in die Robustheitsbewertung einbezogen.

In Bild 3 sind Ergebnisse der Robustheitsbewertung visualisiert, in Tabelle 2 sind für die fünf Entwurfsvarianten die normierten Robustheitsmaße $R_{4,3}$ (für 4 Lastprozesse und 3 Ergebnisdaten) zusammengestellt. Die beste Bewertung (größtes normiertes Robustheitsmaß) besitzt demnach die Entwurfsvariante $p = 4$, d.h. die nachträgliche Verstärkungsvariante mit 3 Textilbetonschichten an der Oberseite und 1 an der Unterseite. Diese Entwurfsvariante besitzt folglich die größte Robustheit hinsichtlich der untersuchten Lastfälle und der daraus resultierenden Verformungen.

6 Literatur

- [1] AUGUSTIN, T.; HABLE, R.: On the impact of robust statistics on imprecise probability models: A review. *Structural Safety*, 32 (2010), pp. 358–365
- [2] FREITAG, S.: *Modellfreie numerische Prognosemethoden zur Tragwerksanalyse*. TU Dresden: Veröffentlichungen – Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke, Heft 19, 2010 – Dissertationsschrift
- [3] FREITAG, S.; GRAF, W.; KALISKE, M.; SICKERT, J.-U.: Prediction of time-dependent structural behaviour with recurrent neural networks for fuzzy data. *Computers & Structures*, in press, DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.05.013
- [4] GRAF, W.; FREITAG, S.; KALISKE, M.; SICKERT, J.-U.: Recurrent neural networks for uncertain time-dependent structural behavior. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Special Issue*, 25 (2010), pp. 322–333
- [5] GRAF, W.; FREITAG, S.; SICKERT, J.-U.; PANNIER, S.; KALISKE, M.: Neural Network Approaches in Structural Analysis under Consideration of Imprecision and Variability. In: TOPPING, B.H.V.; TSOMPANAKIS, Y. (eds.), *2nd Internat. Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering*, Chania, 2011 (in press)
- [6] GRAF, W.; SICKERT, J.-U.; PANNIER, S.; KALISKE, M.: Robust design with uncertain data and response surface approximation. In: BEER, M.; MUHANNA, R.L.; MULLEN, R.L. (eds.): *Proceedings of the 4th International Workshop on Reliable Engineering Computing (REC 2010)*, Singapore: Research Publishing Services, 2010, pp. 554-574
- [7] HELTON, J. C.; OBERKAMPF, W. L.: Alternative representations of epistemic uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety*, 85 (2004), pp. 1–10

- [8] HELTON, J.; JOHNSON, J.; OBERKAMPF, W.; STORLIED, C.: A sampling-based computational strategy for the representation of epistemic uncertainty in model predictions with evidence theory. *Computational methods in applied mechanics and engineering*, 196 (2007), pp. 3980–3998
- [9] KIUREGHIAN, A. D.: Analysis of structural reliability under parameter uncertainties. *Probabilistic engineering mechanics*, 23 (2008), pp. 351–358
- [10] MÖLLER, B.; BEER, M.: *Fuzzy Randomness – Uncertainty in Civil Engineering and Computational Mechanics*. Springer, Berlin, 2004
- [11] MÖLLER, B.; BEER, M.: Engineering computation under uncertainty – capabilities of non-traditional models. *Special Issue of Computers and Structures*, 86 (2008), pp. 1024–1041
- [12] MÖLLER, B.; GRAF, W.; LIEBSCHER, M.; SICKERT, J.-U.; PANNIER, S.: An inverse solution of the lifetime-oriented design problem. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 7 (2011), pp. 325–340
- [13] PANNIER, S.: *Effizienter numerischer Entwurf von Strukturen und Prozessen bei Unschärfe*. TU Dresden: Veröffentlichungen – Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke, 2011 – Dissertationsschrift (eingereicht)
- [14] PANNIER, S.; SICKERT, J.-U.; GRAF, W.; KALISKE, M.: Tailored metamodels for fuzzy reliability based optimization task. In: RODRIGUES, H. et al. (eds.): *Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Optimization (EngOpt)*, Lisboa, 2010, pp. 264–265
- [15] SICKERT, J.-U.: *Fuzzy-Zufallsfunktionen und ihre Anwendung bei der Tragwerksanalyse und Sicherheitsbeurteilung*. TU Dresden: Veröffentlichungen des Instituts für Statik und Dynamik der Tragwerke, Heft 9, 2005 – Dissertationsschrift
- [16] SICKERT, J.-U.; GRAF, W.; PANNIER, S.: Numerical design approaches of textile reinforced concrete strengthening under consideration of imprecise probability. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 7 (2011), pp. 163–176
- [17] SICKERT, J.-U.; FREITAG, S.; GRAF, W.: Prediction of uncertain structural behaviour and robust design. *Int. J. Reliability and Safety* (in press)
- [18] STEINIGEN, F.: *Numerische Simulation des Tragverhaltens textilverstärkter Bauwerke*. TU Dresden: Veröffentlichungen des Instituts für Statik und Dynamik der Tragwerke, Heft 11, 2006 – Dissertationsschrift
- [19] WALLEY, P.: *Statistical reasoning with imprecise probabilities*. Chapman & Hall, London, 1991