

Tragwerke aus Textilbeton – unscharfe numerische Simulation

S. Freitag, W. Graf, A. Hoffmann, S. Pannier, J.-U. Sickert, F. Steinigen
Lehrstuhl für Statik
Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden,
D-01062 Dresden
E-Mail: statik@tu-dresden.de

Zusammenfassung

Im Beitrag werden Algorithmen für die unscharfe, physikalisch nichtlineare statische und dynamische Analyse von Tragwerken aus Textilbeton vorgestellt. Die Unschärfe der Daten und Modelle wird mit Hilfe von Fuzzy-Zufallsfunktionen modelliert. Die neu entwickelte Fuzzy-stochastische Finite-Elemente-Methode wird mit den angewendeten Materialmodellen zur Simulation des Kurz- und Langzeitverhaltens von Tragwerken eingesetzt. Beispielartig wird die Textilbetonbrücke für die Landesgartenschau 2006 in Oschatz numerisch untersucht.

Abstract

In the paper new algorithms are introduced for the uncertain, physically nonlinear computational analysis of structures made of textile reinforced concrete (TRC). The uncertainty of data and models is quantified with fuzzy random functions. Combining the new developed fuzzy stochastic finite element method with new material models the shorttime as well as the long-term behavior of TRC structures are numerically simulated. A TRC bridge which is situated on the Landesgartenschau 2006 in Oschatz is numerically investigated as an example.

1 Numerische Simulation und Unschärfe

Die uns umgebende Wirklichkeit läßt sich mit deterministischen Gedankenmodellen häufig nicht adäquat beschreiben. Dies trifft auch für die numerische Analyse von Tragwerken aus Textilbeton zu. Die Berücksichtigung der Unschärfe von Daten und Modellen ist eine wesentliche Voraussetzung für eine wirklichkeitsnahe Tragwerksanalyse.

Der Verbundwerkstoff Textilbeton besteht aus den Einzelkomponenten Textil und Beton. Die Bewehrung ist ein textiles Gelege mit quasi beliebig orientierten Garnsträngen (Rovings), die aus einzelnen Filamenten (Material: AR-Glas, Carbon) gebildet werden. Das Tragverhalten wird maßgeblich von den Einzelkomponenten und dem Verbund bestimmt. Alle Material- und Verbundparameter sind räumlich und zeitlich variierende unscharfe Größen. Sie werden je nach Unschärfecharakteristik und Datenlage mit unterschiedlichen mathematischen Modellen als unscharfe Funktionen beschrieben. Beispielartig wurden in [1] und [2] die Zugfestigkeit der Filamente, die Zug- und Druckfestigkeit des Feinbetons sowie der Verbund zwischen Garn und Feinbeton als unscharfe Funktionen modelliert. Neben der Entwicklung von Neubauteilen (s. Abschn. 3) können Textilbetonschichten auch zur Verstärkung bestehender Stahlbetonkonstruktionen eingesetzt werden. Auf die Oberfläche der Altkonstruktion werden Schichten aus Textilbeton aufgebracht. Das Tragverhalten des entstandenen Mehrschichtenverbundwerkstoffes wird dann auch von dem Verbund zwischen der bestehenden Stahlbetonkonstruktion und der textilibewehrten Verstärkungsschicht beeinflusst.

Experimentelle und numerische Untersuchungen haben gezeigt, daß die unscharfen Parameter des Textilbetons nicht ausschließlich zufällige Eigenschaften besitzen und deshalb nur eingeschränkt mit Methoden der Stochastik beschrieben werden können. Nichtkonstante Reproduktionsbedingungen der Stichprobenelemente und kleine Stichprobenumfänge führen zu nichtstochastischer Unschärfe, so daß verallgemeinerte Unschärfemodelle eingesetzt werden müssen. Bei Tragwerken aus Textilbeton gelingt eine adäquate Beschreibung der Unschärfe mit dem Unschärfemodell Fuzzy-Zufälligkeit [3]. Die unscharfen Parameter mit funktionaler Abhängigkeit werden dann als Fuzzy-Zufallsfunktionen [4] beschrieben. Die Sonderfälle Fuzzy-Funktionen und Zufallsfunktionen sind darin enthalten.

Die realitätsnahe Beschreibung des Tragverhaltens gelingt jedoch nur dann, wenn neben einer adäquaten Beschreibung der Datenunschärfe ein geometrisch und physikalisch nichtlineares deterministisches Berechnungsmodell eingesetzt wird. Dieses Berechnungsmodell wird im Rahmen der Tragwerksanalyse mit unscharfen Parametern als deterministische Grundlösung bezeichnet. Die Erweiterung einer deterministische Grundlösung auf der Basis Finiten-Elemente-Methoden zur Berücksichtigung von Fuzzy-Zufallsfunktionen führt auf die Fuzzy-stochastische Finite-Elemente-Methode (FSFEM). Für die Analyse von Neubauteilen aus Textilbeton und textilverstärkten Stahlbetontragwerken mit der FSFEM wird das Programm FALT-FEM fortentwickelt. Mit der Konzeption einer modularen Struktur gelingt es, auch weitere FE-Programme wie FEAP [5], ANSYS, ADINA, ATENA und ABAQUS für die FSFEM zu erweitern. Mit STATRA9 wird auch ein Programm zur geometrisch und physikalisch nichtlinearen Analyse ebener wirkender Stabtragwerke auf der Basis der exakten Differentialgleichungslösung erfolgreich als deterministische Grundlösung eingesetzt [6]. Für dynamische Mehrkörperanalysen mit Fuzzy-Zufallsfunktionen werden die Programme LS-DYNA und ADAMS verwendet [5].

Bei unscharfen Eingangsdaten in Form unscharfer Geometrie-, Material- und Lastparameter werden als Ergebnis einer Tragwerksanalyse unscharfe Systemantworten, z.B. Spannungen, Verschiebungen, Verzerrungen, erhalten. Diese Unschärfe der Systemantworten liefert zusätzliche Informationen, die für den Entwurf und die Bewertung eines Tragwerkes genutzt werden können.

In diesem Beitrag wird die FSFEM für die numerische Simulation von Tragwerken aus Textilbeton angewendet. Nach der Herleitung der Grundgleichungen der FSFEM für FALT-FEM werden Materialmodelle zur Beschreibung des Kurzzeit- und des Langzeitverhaltens beschrieben. Bemerkungen zu dynamischen Untersuchungen sind im Abschn. 2.3 enthalten. Die Leistungsfähigkeit der Algorithmen wird anhand numerischer Untersuchungen einer Textilbetonbrücke gezeigt.

2 Fuzzy-stochastische Finite-Elemente-Methode (FSFEM)

Tragwerke aus Textilbeton werden zutreffend mit dem Multi-Referenzebenen-Modell (MRM) beschrieben [7], [8]. Das MRM wird zur Beschreibung von Mehrschichtenverbundwerkstoffen mit einer diskontinuierlichen Multi-BERNOULLI-Kinematik verwendet.

Ein realitätsnahes FE-Modell für die statische und dynamische Analyse von Tragwerken aus Textilbeton läßt sich auf der Basis des hybriden Energiefunktionalis

$$\begin{aligned} \tilde{\Pi}_{\text{mh}} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \sum_{e=1}^n \left\{ \int_{\tilde{V}^e} \left[\tilde{w}_c(\tilde{\underline{\sigma}}_{\text{cl}}^e) + (\underline{\mathbf{G}} \cdot \tilde{\underline{\sigma}}_{\text{cl}}^e + \underline{\tilde{\mathbf{p}}}^e)^T \cdot \tilde{\underline{\mathbf{v}}}^e + \frac{1}{2} \tilde{\underline{\rho}}^e \cdot (\tilde{\underline{\mathbf{v}}}^e)^T \cdot \tilde{\underline{\mathbf{v}}}^e \right] dV + \int_{\tilde{V}^e} (\tilde{\underline{\sigma}}_{\text{cl}}^e)^T \cdot \tilde{\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}}_0^e dV \right. \\ \left. - \int_{\tilde{\mathcal{O}}_p^{r,e}} (\underline{\tilde{\mathbf{p}}}^{r,e} - \underline{\tilde{\mathbf{p}}}^{r,e})^T \cdot \tilde{\underline{\mathbf{v}}}^{r,e} d\mathcal{O} - \int_{\tilde{\mathcal{O}}_v^{r,e}} (\underline{\tilde{\mathbf{p}}}^{r,e})^T \cdot \tilde{\underline{\mathbf{v}}}^{r,e} d\mathcal{O} \right\} d\tau \end{aligned} \quad (1)$$

herleiten. Darin sind die Fuzzy-Zufallsfunktionen für die innere Ergänzungsenergie $\tilde{w}_c(\tilde{\underline{\sigma}}_{\text{cl}}^e)$, die externen Kräfte $\underline{\tilde{\mathbf{p}}}^e$, die Verschiebungen $\tilde{\underline{\mathbf{v}}}^e$, die Dichte $\tilde{\underline{\rho}}^e$ und die Verschiebungsgeschwindigkeit $\tilde{\underline{\mathbf{v}}}^{r,e}$ im Elementvolumen \tilde{V}_e , die Anfangsverzerrungen $\tilde{\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}}_0^e$, die inneren Kräfte $\underline{\tilde{\mathbf{p}}}^{r,e}$, die äußeren Kräfte $\underline{\tilde{\mathbf{p}}}^{r,e}$ und die Verschiebungen $\tilde{\underline{\mathbf{v}}}^{r,e}$ der Randfläche $\tilde{\mathcal{O}}_p^{r,e}$ sowie die vorgeschriebenen Verschiebungen $\tilde{\underline{\mathbf{v}}}^{r,e}$ der Randfläche $\tilde{\mathcal{O}}_v^{r,e}$ enthalten. Infolge unscharfer Geometrie sind das Elementvolumen \tilde{V}_e und die Randflächen $\tilde{\mathcal{O}}_p^{r,e}$, $\tilde{\mathcal{O}}_v^{r,e}$ ebenfalls Fuzzy-Zufallsfunktionen [4]. $\underline{\mathbf{G}}$ repräsentiert die Matrix der Differentialoperatoren und τ die Zeit.

Formal unterscheidet sich das fuzzy-stochastische Funktional gemäß Gl. (1) vom deterministischen Fall nur durch die Tilden zur Beschreibung von Fuzzy-Zufallsfunktionen. Diese Erweiterung des deterministischen Funktionals ist durch die Entwicklung des sog. Fuzzy-Stochastischen Samplings (FSS) möglich [4]. Mit dem FSS werden alle Fuzzy-Zufallsfunktionen in bewertete Scharen deterministischer Funktionen (Trajektorien) diskretisiert. Diese Diskretisierung erlaubt es, alle mathematische Operationen, die für deterministische Funktionen definiert sind, auch für Fuzzy-Zufallsfunktionen auszuführen.

Ein MRM-Element besteht aus $k+1$ geschichteten Subelementen und k Interface-Elementen. Das Subelement i mit der zugehörigen Referenzebene R_i ($i = 0, \dots, k$) wird in s_i Subschichten (Beton- und Stahlsubschichten oder Feinbeton- und Textilschichten) unterteilt. Die Referenzebene R_i liegt mittig in der beliebig wählbaren Subschicht 0, der sogenannten Referenzschicht. Für alle Subelemente werden dieselben Spannungsansätze im Element, Randverschiebungsansätze und Elementverschiebungsansätze gewählt.

Bei der physikalisch nichtlinearen Untersuchung von nachträglich textilbetonverstärkten Stahlbetontragwerken und Neubauteilen aus Textilbeton liegt ein nichtkonservatives Problem vor, hervorgerufen durch die Ribbildung, das nichtlineare Materialverhalten, den Verbund und die Schädigung. Zur Lösung des nichtkonservativen Problems wird eine differentiale Belastungsänderung betrachtet. Ausgehend von Gl. (1) kann die fuzzy-stochastische Bewegungsgleichung aufgestellt werden. Für den Übergang von differentialen zu inkrementalen (endlichen) Belastungsänderungen muß eine Iteration eingeschaltet werden.

$$\tilde{\underline{\mathbf{K}}}_T \cdot \Delta \tilde{\underline{\mathbf{q}}} + \tilde{\underline{\mathbf{M}}} \cdot \Delta \tilde{\underline{\dot{\mathbf{q}}}} - \Delta \tilde{\underline{\mathbf{R}}}_L - \Delta \tilde{\underline{\mathbf{R}}}_K = 0 \quad (2)$$

In Gl. (2) sind die inkrementalen Zuwächse der Knotenverschiebungen $\Delta \tilde{\underline{\mathbf{q}}}$ und Beschleunigungen $\Delta \tilde{\underline{\dot{\mathbf{q}}}}$ Fuzzy-Zufallsfunktionen. Die tangentielle Systemsteifigkeitsmatrix $\tilde{\underline{\mathbf{K}}}_T$ und die Massenmatrix $\tilde{\underline{\mathbf{M}}}$ hängen wie die Vektoren der inkrementalen Lastzuwächse $\Delta \tilde{\underline{\mathbf{R}}}_L$ und $\Delta \tilde{\underline{\mathbf{R}}}_K$ von Fuzzy-Zufallsfunktionen ab.

Bei Vernachlässigung der Trägheitskräfte kann aus Gl. (2) ein FE-Modell für den Sonderfall statischer und quasi statischer Belastung abgeleitet werden. Je nach Aufgabenstellung lassen sich

unterschiedliche Materialmodelle integrieren. Die verwendete endochrone Stoffbeschreibung erlaubt die Erfassung des Kurzzeit- und des Langzeitverhaltens durch die Berücksichtigung eines fiktiven inneren Zeitmaßes.

2.1 Kurzzeitverhalten

Für die numerische Analyse des Kurzzeitverhaltens werden endochrone Stoffgesetze für Beton und Stahl verwendet. Zur Berücksichtigung der Faltwerksspezifika wurde in [9] das ursprünglich dreiaxiale Betonstoffgesetz auf den ebenen Spannungszustand übertragen. Mit Hilfe einer affinen Parametertransformation kann das endochrone Stoffgesetz, dessen Parameter ursprünglich für normalfesten Beton galten, auch für den Feinbeton der Verstärkungsschichten angewendet werden. Risse werden nach dem Konzept der subschichtweise verschmierten Risse erfaßt. Im Materialpunkt sind zwei nichtorthogonale feste Risse zulässig. *Tension stiffening* nach Rißentstehung wird mit einer modifizierten Spannungs-Dehnungs-Abhängigkeit des Betons erfaßt.

Für den textilbewehrten Feinbeton werden zwei verschiedene Materialmodelle eingesetzt. Für einsinnige Lastprozesse kann eine homogenisierte Beschreibung verwendet werden, die auf den Ergebnissen einaxialer Zugversuche an textilbewehrten Dehnkörpern basiert [10]. In dieser Beschreibung sind der Verbund zwischen Feinbeton und Textilroving und die damit verbundenen Phänomene, z.B. *tension stiffening* und Schädigung des Textilrovings im Riß, zusammengefaßt.

Bei zyklischen Lastprozessen und zur Berücksichtigung des zwei axialen Tragverhaltens werden Feinbeton und textile Bewehrung getrennt modelliert. Für den Feinbeton wird dann das o.g. endochrone Stoffgesetz eingesetzt. Die textile Bewehrung – ein Multiaxialgelege – wird für jede Bewehrungsrichtung getrennt als homogene, einaxial wirkende Subschicht mit nichtlinear elastischem Stoffgesetz modelliert.

Das Nachrißverhalten des textilbewehrten Feinbetons unterscheidet sich aufgrund des speziellen Verbundes zwischen Roving und Feinbeton grundsätzlich von dem des Stahlbetons. Zur numerischen Simulation des Nachrißverhaltens des textilbewehrten Feinbetons wird für den Roving eine Schädigungsfunktion in Verbindung mit einer angepaßten Spannungs-Dehnungs-Abhängigkeit eingeführt. Mit einer erweiterten FE-Formulierung für Rovings kann der inhomogene Aufbau des Textilrovings berücksichtigt werden. Die unterschiedlichen Dehnungen der Einzelfilamente werden über eine Querschnittskinematik in Abhängigkeit von den Matrixdehnungen ausgedrückt [1].

In [2] und [4] wird die Erweiterung der Materialbeschreibung für das Kurzzeitverhalten von Textilbeton zur Berücksichtigung der fuzzy-stochastischen Datenunschärfe gezeigt.

2.2 Langzeitverhalten

Die numerische Simulation des Langzeitverhaltens von Textilbeton erfordert die Erfassung von lastabhängiger Schädigung und lastunabhängiger Veränderung des Materials. Betrachtet werden exemplarisch die Langzeitphänomene Relaxation und Retardation. Diese Phänomene basieren auf identischen physikalischen Ursachen und können mit einem fraktionalen Stoffmodell beschrieben werden. Im Unterschied zu ganzzahligen rheologischen Elementen beinhalten die Differentialgleichungen fraktionaler rheologischer Elemente reellwertige Zeitableitungen der Dehnung und

Spannung, vgl. [11]. Dies ermöglicht eine bessere Anpassung des Stoffmodells an Versuchsergebnisse mit wenigen Parametern, welche physikalisch interpretierbar sind. Infolge der Inhomogenität des Textilbetons sind diese Parameter unscharf. In [12] wurden die fraktionalen KELVIN- und NEWTON-Elemente zu fuzzy-stochastischen rheologischen Elementen erweitert. Die Differentialgleichungen (3) und (4) dieser Elemente beschreiben den funktionalen Zusammenhang zwischen den Spannungen, den Dehnungen und den fraktionalen Zeitableitungen der Dehnungen.

$$0 = \tilde{\mathbf{E}}_{\mathbf{K}}(\boldsymbol{\sigma}) \cdot \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\mathbf{K}}(\boldsymbol{\tau}) + \tilde{\mathbf{p}}_{\mathbf{K}}(\boldsymbol{\sigma}) \cdot \left(\frac{d^{\tilde{\alpha}_{\mathbf{K}}(\boldsymbol{\sigma})}}{d\boldsymbol{\tau}^{\tilde{\alpha}_{\mathbf{K}}(\boldsymbol{\sigma})}} \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\mathbf{K}}(\boldsymbol{\tau}) \right) - \tilde{\boldsymbol{\sigma}}(\boldsymbol{\tau}) \quad (3)$$

$$0 = \tilde{\mathbf{p}}_{\mathbf{N}}(\boldsymbol{\sigma}) \cdot \left(\frac{d^{\tilde{\alpha}_{\mathbf{N}}(\boldsymbol{\sigma})}}{d\boldsymbol{\tau}^{\tilde{\alpha}_{\mathbf{N}}(\boldsymbol{\sigma})}} \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\mathbf{N}}(\boldsymbol{\tau}) \right) - \tilde{\boldsymbol{\sigma}}(\boldsymbol{\tau}) \quad (4)$$

Die Parameter $\tilde{\mathbf{E}}_{\mathbf{K}}$, $\tilde{\mathbf{p}}_{\mathbf{K}}$, $\tilde{\mathbf{p}}_{\mathbf{N}}$ sowie die Operatoren $\tilde{\alpha}_{\mathbf{K}}$ und $\tilde{\alpha}_{\mathbf{N}}$ der Differentialgleichungen (3) und (4) sind Fuzzy-Zufallsfunktionen, die vom Spannungszustand abhängen. Die Lösung der Differentialgleichung (3) des fuzzy-stochastischen fraktionalen KELVIN-Elements wird in der deterministischen Grundlösung unter Berücksichtigung der Randbedingung für Retardation mit Hilfe der LAPLACE-Transformation erhalten.

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\mathbf{K}}(\boldsymbol{\tau}) = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{\tilde{\mathbf{E}}_{\mathbf{K}}(\boldsymbol{\sigma})} \cdot \left[1 - \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\left(-\frac{\tilde{\mathbf{E}}_{\mathbf{K}}(\boldsymbol{\sigma})}{\tilde{\mathbf{p}}_{\mathbf{K}}(\boldsymbol{\sigma})} \cdot \boldsymbol{\tau}^{\tilde{\alpha}_{\mathbf{K}}(\boldsymbol{\sigma})} \right)^i}{\Gamma(i \cdot \tilde{\alpha}_{\mathbf{K}}(\boldsymbol{\sigma}) + 1)} \right] \quad (5)$$

Der Term $\Gamma(\cdot)$ repräsentiert die Gamma-Funktion, mit der die Berechnung reellwertiger Fakultäten gelingt. Analog folgt aus Gl. (4) die Lösung für das fuzzy-stochastische fraktionale NEWTON-Element.

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_{\mathbf{N}}(\boldsymbol{\tau}) = \boldsymbol{\sigma} \cdot \frac{1}{\tilde{\mathbf{p}}_{\mathbf{N}}(\boldsymbol{\sigma}) \cdot \Gamma(\tilde{\alpha}_{\mathbf{N}}(\boldsymbol{\sigma}) + 1)} \cdot \boldsymbol{\tau}^{\tilde{\alpha}_{\mathbf{N}}(\boldsymbol{\sigma})} \quad (6)$$

Mit dem Fuzzy-Stochastischen Sampling kann eine numerische Simulation des Langzeitverhaltens erfolgen. In [12] wurde der Fuzzy-Zufallsprozeß des Retardationsverhaltens von Textilbetondehnkörpern unter Zugbelastung numerisch simuliert. Die Ergebnisse sind in Abb. 1 dargestellt.

Das Implementieren der fuzzy-stochastischen fraktionalen Stoffmodelle in die FSFEM ermöglicht die Berücksichtigung der Phänomene Retardation und Relaxation bei der fuzzy-stochastischen Langzeitanalyse von Tragwerken aus Textilbeton.

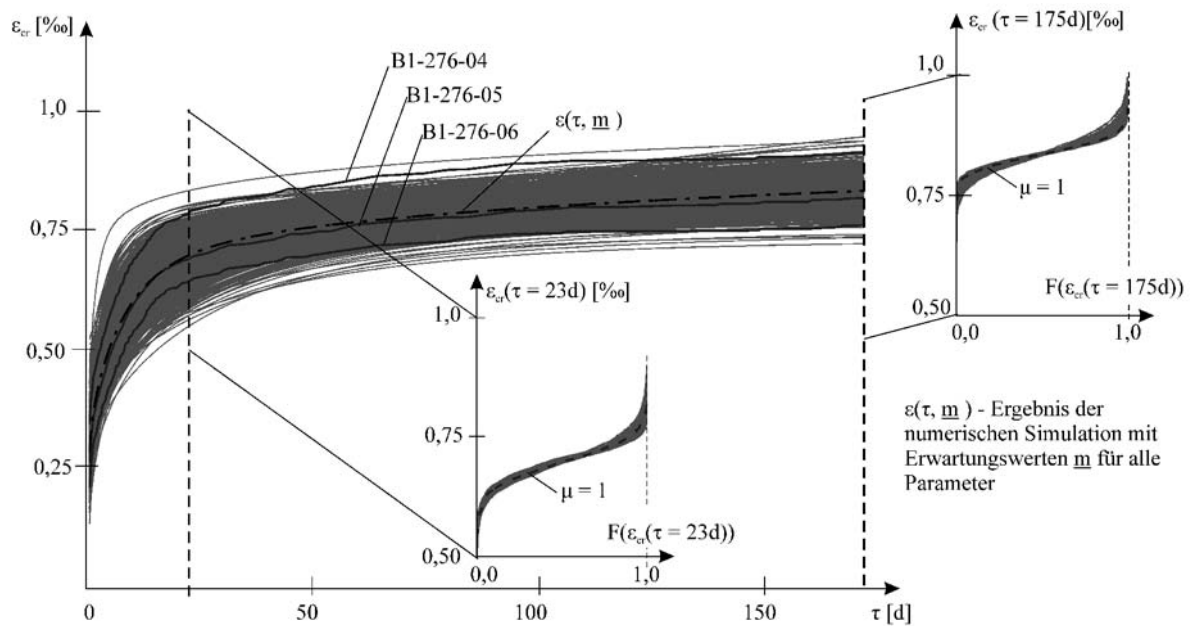


Abb. 1 Numerische Simulation des fuzzy-stochastischen Kriechprozesses

2.3 Dynamik

Für dynamische Untersuchungen werden Tragwerke aus Textilbeton analog zu statischen Aufgaben mit Hilfe der FSFEM im Raum diskretisiert. Das fuzzy-stochastische Differentialgleichungssystem Gl. (2) wird mit Hilfe des Fuzzy-Stochastischen Samplings gelöst. Innerhalb der mehrfach zu ermittelnden deterministischen Grundlösung wird der implizite Zeitschrittoperator nach NEWMARK in Verbindung mit der modifizierten NEWTON-RAPHSON-Iteration verwendet. Material- und Strukturdämpfung werden mit der RAYLEIGH-Dämpfung erfaßt.

$$\tilde{\mathbf{D}}_T = \alpha \cdot \tilde{\mathbf{K}}_T + \beta \cdot \tilde{\mathbf{M}} \quad (7)$$

Für beliebige Last-Zeit-Funktionen (Erdbebenanregung, Stoß, harmonische Erregung) können unscharfe dynamische Tragwerksantworten unter Berücksichtigung der physikalischen Nichtlinearitäten des Textilbetons entsprechend den Abschn. 2.1 und 2.2 berechnet werden.

Ausgehend von der fuzzy-stochastischen Bewegungsgleichung (2) können die von der Zeit und dem Schädigungszustand abhängigen Eigenkreisfrequenzen bestimmt werden. Bei Vernachlässigung der Dämpfung wird das fuzzy-stochastische lineare Eigenwertproblem

$$\left(\tilde{\mathbf{K}}_T(\tau, \tilde{\mathbf{q}}, \tilde{\mathbf{d}}) - \tilde{\omega}^2 \cdot \tilde{\mathbf{M}}(\tau, \tilde{\mathbf{q}}, \tilde{\mathbf{d}}) \right) \cdot \Delta \tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (8)$$

formuliert. Die fuzzy-zufälligen Eigenkreisfrequenzen $\tilde{\omega}$ können zur Bewertung von Resonanzen und Schädigung verwendet werden. Die Anwendung der $\tilde{\omega}$ für Berechnungen von unscharfen Schädigungsindikatoren ist z.B. in [1] gezeigt.

3 Beispiel Textilbetonbrücke

Untersucht wird das Tragverhalten der Fuß- und Radwegbrücke aus Textilbeton über die Döllnitz, die für die Landesgartenschau 2006 in Oschatz neu errichtet wurde, s. Abb. 2. Die Brücke besteht aus 10 U-förmigen vorgefertigten Segmenten. An den Rändern der Segmente sind Rippen angeordnet. Die 3 cm dicke Textilbetonwand ist an den Ecken, am oberen Abschluß (Handlauf) und im Bereich der Auflager verstärkt. Im Boden sind Längssteifen angeordnet. Die Segmente werden mit einem Feinmörtel verklebt und mit 6 Spanngliedern ohne Verbund so vorgespannt, daß die Brückenkonstruktion unter Gebrauchslasten überdrückt ist.



Abb. 2 Textilbetonbrücke auf der Landesgartenschau 2006 in Oschatz

Geometrie und FE-Modell. In Abb. 3 sind die Hauptabmessungen der Brücke angegeben. Die Maße beziehen sich auf die Referenzebene des FE-Modells. Die Stützweite beträgt 8,60 m. Das Tragwerk wird mit MRM-Elementen mit einer Referenzebene vernetzt, s. Abb. 3. Jedes Element besteht aus 5 Feinbeton- und 2 Textilschichten. In den Rippen und den Längssteifen im Boden

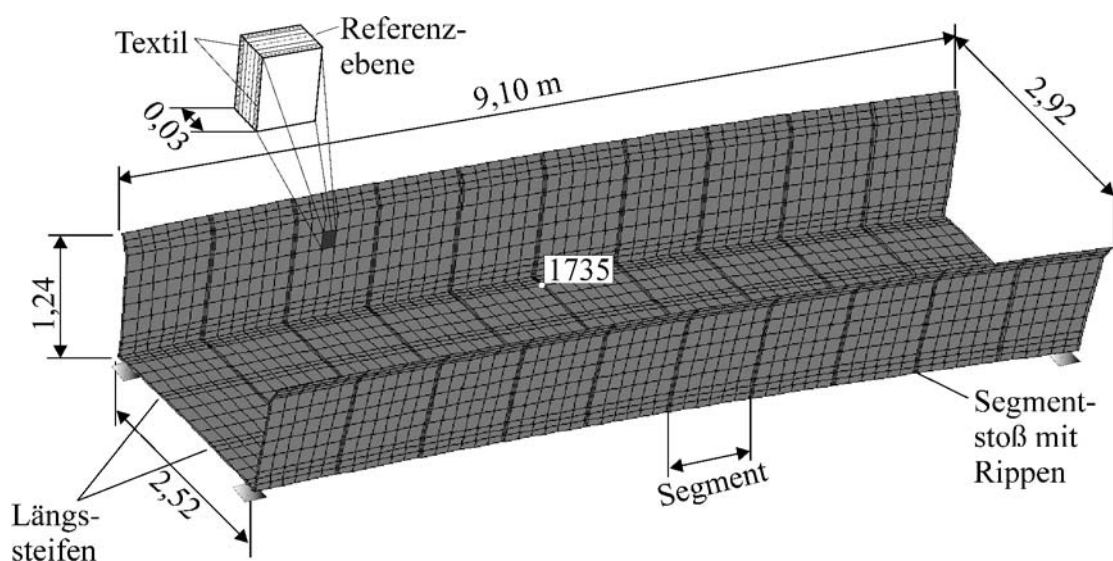


Abb. 3 Geometrie und FE-Modell

wird die eingelegte Edelstahlbewehrung als zusätzliche verschmierte Bewehrungsschicht modelliert. Für die Segmentfugen zwischen den Rippen wird starrer Verbund angenommen. Die Vorspannung wird mit internen Spanngliedern ohne Verbund modelliert [9].

Eingangsdaten. Wie z.B. in [1], [2] gezeigt, sind die Materialdaten von Textilbeton unscharf. Exemplarisch wird die Zugfestigkeit des Feinbetons als Fuzzy-Zufallsfeld modelliert. Mit Hilfe des unscharfen Faktors \tilde{c} werden elementweise unterschiedliche Realisierungen der Zugfestigkeit simuliert [4]. Infolge der händischen Herstellung ist auch die Geometrie der Segmente unscharf. Hier werden die Dicke \tilde{d} und die Breite \tilde{b} der Rippen als Fuzzy-Zahlen modelliert ($\tilde{d} = \langle 8; 9; 11 \rangle$ cm, $\tilde{b} = \langle 2,0; 3,5; 5,0 \rangle$ cm). Die Dicke der Rippen im Bereich der Aufweitungen ist mit $\tilde{d} + 3$ cm ebenfalls unscharf. Vorspannung und Verankerung der Spannglieder, Eigen- und Verkehrslast werden im scharfen Lastprozeß zusammengefaßt.

Simulation. Die unscharfen Tragwerksantworten werden mit der in Abschn. 2 vorgestellten FSFEM berechnet. Die nichtlineare deterministische Grundlösung (FALT-FEM) mit inkremental-iterativer Abarbeitung des Lastprozesses wird vielfach ausgeführt. Abb. 4 zeigt 440 Trajektorien der unscharfen Last-Verschiebungs-Abhängigkeit. Dargestellt ist der Verschiebungszuwachs v_3 des Knotens 1735 infolge Verkehrslast p . Zum Vergleich ist das Ergebnis des Belastungsversuchs am Gesamttragwerk eingetragen, mit dem der Nachweis der Tragfähigkeit erbracht wurde [13]. Für eine scharfe Realisierung ($d = 8$ cm, $b = 2$ cm, $c = 0,102$) sind in Abb. 5 die Hauptspannungen σ_{II} der Schicht 1 (Innenseite) und der Schicht 5 (Außenseite) dargestellt. Das zugehörige Lastniveau ergibt sich zu $p = v \cdot 5$ kN/m². Der dargestellte Rißzustand verdeutlicht die zunehmende Schädigung bei Laststeigerung von $v = 2,5$ auf $v = 3,0$. Neben der Ermittlung des unscharfen Spannungs- und Verschiebungszustandes wurden Eigenfrequenzen und Eigenformen ermittelt sowie Stabilitätsuntersuchungen durchgeführt.

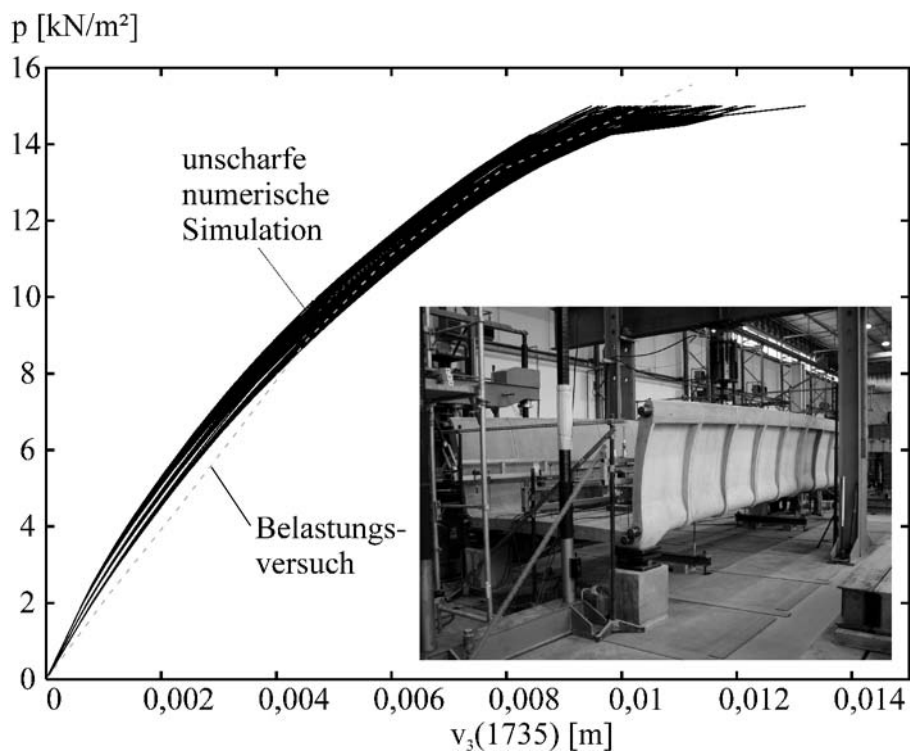


Abb. 4 Unscharfe Last-Verschiebungs-Abhängigkeit (440 Trajektorien), Meßergebnis aus Belastungsversuch des Prototyps

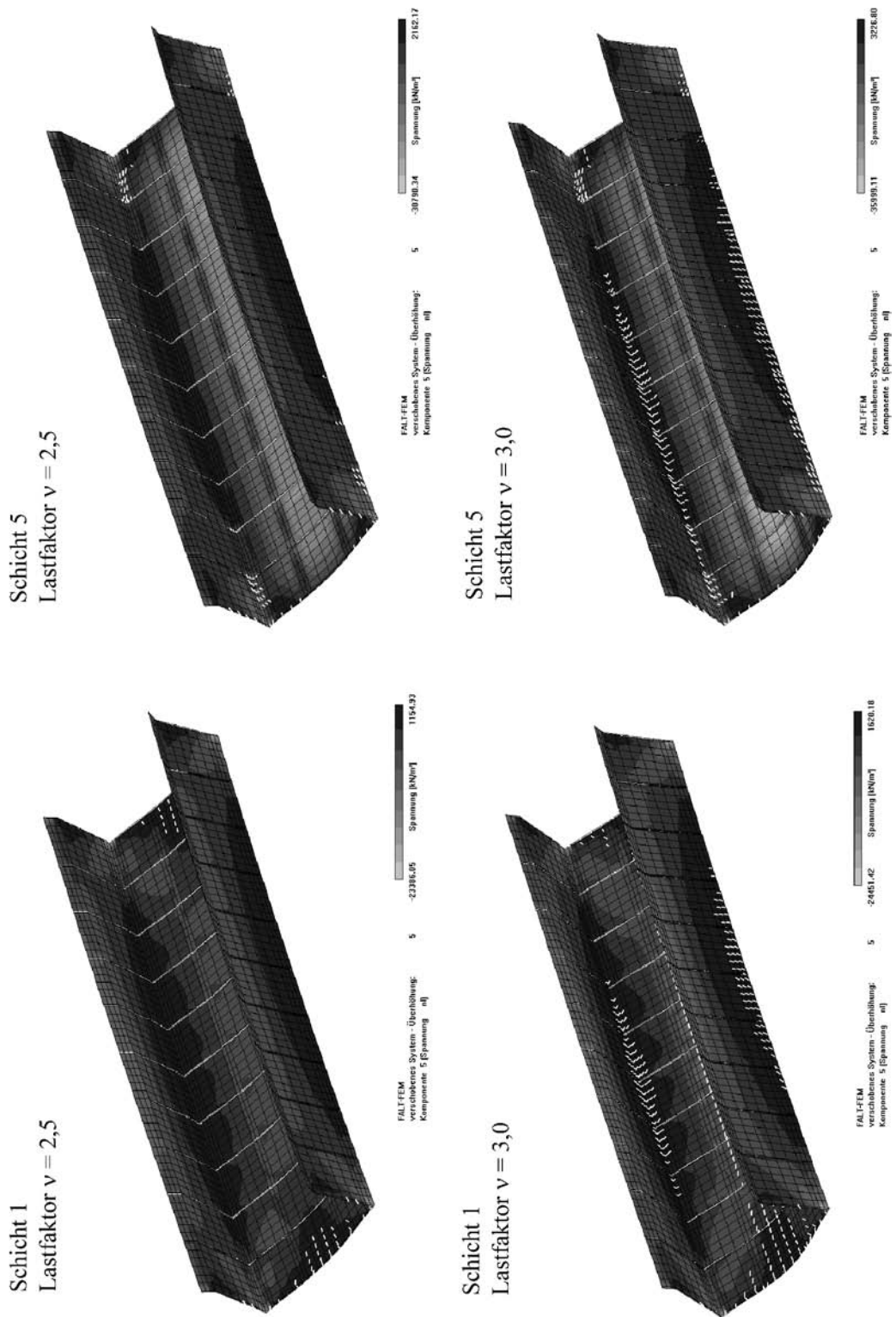


Abb. 5 Hauptspannung σ_{II} und Rißzustand einer Realisierung der unscharfen Eingangsdaten

Danksagung

Die Autoren danken für die Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 528 „Textile Bewehrung zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“ an der Technischen Universität Dresden.

Literatur

- [1] Möller, B.; Graf, W.; Hoffmann, A.; Sickert, J.-U.; Steinigen, F. *Tragwerke aus Textilbeton – Berechnungsmodelle, Anwendungen*, Bautechnik 82(2005), S. 782–795
- [2] Möller, B.; Graf, W.; Sickert, J.-U.; Beer, M. *Time-dependent reliability of textile strengthened RC structures under consideration of fuzzy randomness*, Computers & Structures 84(2006) 8-9, pp. 585–603
- [3] Möller, B.; Beer, M. *Fuzzy Randomness – Uncertainty in Civil Engineering and Computational Mechanics*, Springer Verlag, Berlin, 2004
- [4] 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, 2006
- [5] Möller, B.; Liebscher, M. *Numerische Simulation von Sprengvorgängen unter Berücksichtigung von Daten- und Modellunschärfe*, Arbeitsbericht der DFG Forschergruppe 500 „Computergestützte Destruktion komplexer Tragwerke durch Sprengung“ Teilprojekt 4, 2005, S. 1–23
- [6] Bartzsch, M. *Tragwerksmodifikation als unstetiger und unscharfer Prozeß*, TU Dresden, Veröffentlichungen des Instituts für Statik und Dynamik der Tragwerke, Heft 12, 2006
- [7] Möller, B.; Graf, W.; Hoffmann, A.; Steinigen, F. *Numerical simulation of RC structures with textile reinforcement*, Computers & Structures 83(2005) 19-20, pp. 1659–1688
- [8] Steinigen, F. *Numerische Simulation des Tragverhaltens textilverstärkter Bauwerke*, TU Dresden, Veröffentlichungen des Instituts für Statik und Dynamik der Tragwerke, Heft 11, 2006
- [9] Kluger, J. *Numerische Modelle zur physikalisch nichtlinearen Analyse von Stahlbeton-Faltwerken*, TU Dresden, Veröffentlichungen des Lehrstuhls für Statik, Heft 1, 1999
- [10] Jesse, F. *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix*, TU Dresden, Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden, Heft 5, 2005
- [11] Oeser, M.; Freitag, S.; Möller, B.; Wellner, F.; Werkmeister, S. *3-D Constitutive Model for Asphalt on the Basis of Fractional Creep Functions*, Proceedings on the 10th International Conference on Asphalt Pavements, ISAP, Québec, 2006
- [12] Sickert, J.-U.; Möller, B.; Graf, W.; Freitag, S. *Time-dependent reliability of strengthened RC structures*, 1st International Conference Textile Reinforced Concrete, RWTH Aachen, 2006
- [13] Curbach, M.; Weiland, S.; Jesse, D. *Eine Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton für die Landesgartenschau 2006 in Oschatz*, 16. Dresdner Brückenbausymposium, TU Dresden, 2006