

Numerische Simulation des mechanischen Verhaltens von Textilbeton unter Berücksichtigung mehrerer Strukturebenen

Ingolf Lepenies*, Mike Richter, Bernd W. Zastrau

Lehrstuhl für Mechanik
Institut für Baumechanik und Bauinformatik - Fakultät Bauingenieurwesen
Technische Universität Dresden, Deutschland
email: ingolf.lepenies@mailbox.tu-dresden.de

Abstract

The failure mechanisms of textile reinforced concrete (TRC), which is a composite of bundles of long fibers and fine concrete, are complex. Most important for the ductility is the successive debonding of the fibers from the surrounding matrix when the brittle matrix is cracking. Therefore, one of the main issues is the simulation of the bond behavior between the reinforcement and the matrix. By introducing a hierarchical material model for TRC the mechanical behavior is simulated by means of representative volume elements modelled on the meso scale. Finite element analysis is used to determine the effective properties of TRC within a periodic homogenization framework. Further, a multiscale finite element technique is suggested, where constitutive equations are formulated only on the meso level.

1. Einleitung

Textilbeton (Abb. 1) ist ein Verbundwerkstoff aus Filamenten (Endlosfasern) und Feinbeton (Größtkorn 1 mm). Die Filamente (z.B. Glasfilamente mit einem Durchmesser von ca. 13 μm) wirken



Abbildung 1: Textilbetonprobe

als Zugbewehrung in der spröden Feinbetonmatrix. Produktionsbedingt werden die Filamente zu Rovings (Filamentgarne mit bis zu 2000 Filamenten) zusammengefasst. Diese werden zu flächigen textilen Strukturen verarbeitet (Abb. 2). Die Menge der Bewehrung und die Bewehrungsausrichtung können so für das jeweilige Einsatzgebiet optimiert werden. Der Hochleistungsverbundwerkstoff Textilbeton bietet sich daher für eine Vielzahl von Instandsetzungs- und Umbauvorhaben von


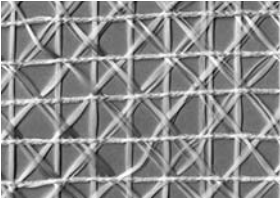
	Bezeichnung	Anzahl an Filamenten	Filament-Durchmesser	Textile Struktur
	NEG 155 tex	400	13.5 μm	
	NEG 310 tex	800	13.5 μm	
	NEG 620 tex	1600	13.5 μm	
	NEG 1100 tex	2000	16.1 μm	
	NEG 2400 tex	1900	24.3 μm	

Abbildung 2: Textile Bewehrung

bestehenden Tragwerken nicht nur aufgrund der Verbesserung der Tragwirkung durch kraftflussgerecht verlegte Textilbewehrungen an, sondern auch wegen seiner Wirtschaftlichkeit.

2. Versagensarten von Textilbeton

Zur mechanischen Beschreibung des Materialverhaltens des Verbundwerkstoffes Textilbeton ist die Kenntnis der wichtigsten Tragmechanismen nötig. Hierzu zählen das Versagen des Feinbetons, das sukzessive Versagen einzelner Filamente des Rovings, die Delamination von Bewehrungsschichten, das Ablösen der Filamente von der umgebenden Matrix bzw. das Verbundversagen innerhalb der Filamentbündel selbst. Durch die Zugabe von Glasfilamenten (Endlosfasern) in den spröden Beton wird weniger eine Erhöhung der Steifigkeit des Verbundwerkstoffes erreicht, als vielmehr eine Quasiduktilität erzielt (Abb. 3, 4). Dies ist hauptsächlich auf das sukzessiv versagende Interface zwischen Faser und Matrix zurückzuführen, nachdem der Beton eine Rissbildung erfährt. Die Faserbewehrung übernimmt die Übertragung der Zugkräfte am Riss. Infolge der Kraftübertragung von der Faser in die Matrix wird der Beton wieder zur Tragwirkung herangezogen und weitere Risse können im Beton entstehen. Ein Gesamtversagen tritt also nicht mehr plötzlich auf, sondern ist mit nennenswerten Verformungen der Struktur verbunden. Der Beschreibung des Verbundes muss somit besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden [10, 11]. Mit der Kenntnis der Schubspannungstransfermechanismen und der Versagenskriterien der Einzelwerkstoffe Beton und Faserbewehrung ist unter anderem die Vorhersage von Rissabständen, Rissbrei-

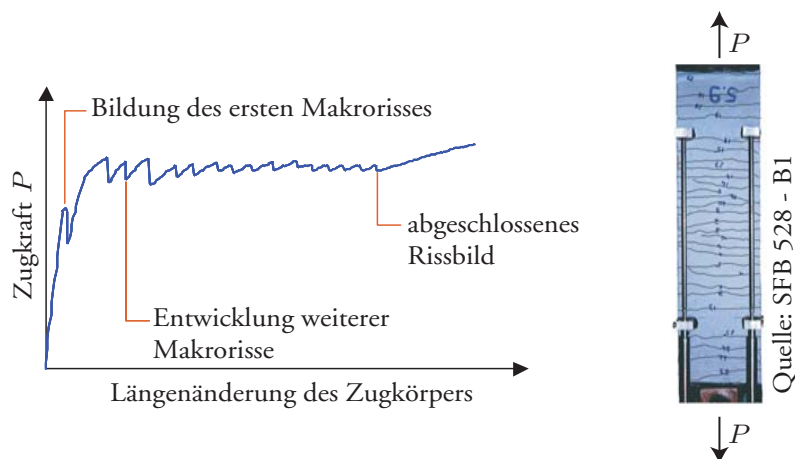


Abbildung 3: Numerische Simulation eines Zugversuches

ten, Übertragungslängen und Verankerungslängen im Textilbeton möglich.

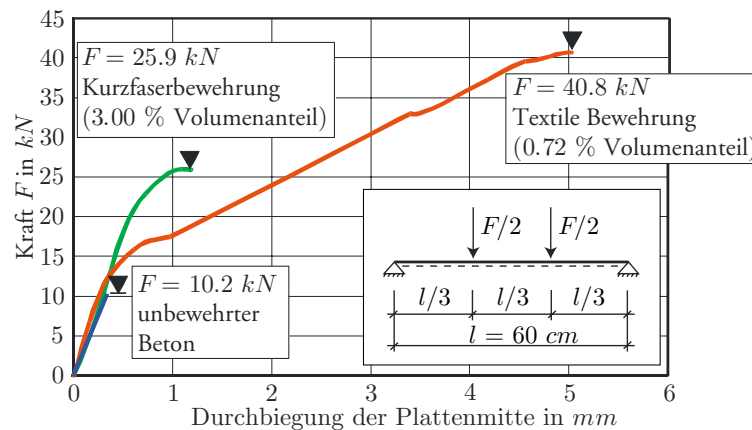


Abbildung 4: Steigerung von Traglast und Duktilität mittels Faserbewehrung im 4P-Biegeversuch

3. Strukturebenen

Das Hauptproblem bei einer Tragwerksanalyse mit Berücksichtigung der beschriebenen Versagensmechanismen stellen die unterschiedlichen Strukturebenen (Abb. 5) dar. Zum einen besitzen die Bewehrungselemente Durchmesser unter einem Millimeter, zum anderen gilt es, Tragwerke mit Abmessungen von mehreren Metern zu berechnen. Es werden deshalb Strukturebenen in einem hierarchischen Materialmodell eingeführt, welche die Materialstruktur auf unterschiedlichen Detaillierungsniveaus erfasst. So wird auf der sogenannten makroskopischen Strukturebene der Werkstoff Textilbeton als homogen betrachtet, auf der Mesoebene wird eine Unterscheidung zwischen Textilbewehrung und umgebender Matrix vorgenommen – wobei die Matrix als homogen angenommen wird – und auf der Mikroebene erfolgt eine Differenzierung zwischen den einzelnen Komponenten der Betonmatrix und den Filamenten des Roving.

Die numerische Analyse von Tragwerken aus Verbundwerkstoffen (z.B. aus faserbewehrtem Feinbeton) ist sehr unwirtschaftlich und mit massiven Anforderungen an die Hardware verbunden, wenn eine Diskretisierung unter Berücksichtigung der Meso- oder gar der Mikrostruktur durchgeführt wird. Um die mechanischen Eigenschaften auf der entsprechenden Strukturebene abbilden zu können, sind im Rahmen einer Finite-Element-Analyse Elemente in der Größenordnung der zu berücksichtigenden Heterogenitäten anzuwenden. Im Allgemeinen ist aber eine Diskretisierung des Gesamtproblems in dieser Feinheit nicht möglich. Deshalb wird eine Substitution der realen heterogenen Struktur durch ein homogenes Ersatzmaterial durchgeführt, welches makroskopisch ein äquivalentes Verhalten aufweist. Solch eine Vorgehensweise ist als Homogenisierung bekannt. Dazu wird die heterogene Struktur des Verbundwerkstoffes auf der Mesoebene mittels eines repräsentativen Volumenelementes (RVE) erfasst, wofür in Abbildung 6 für eine spezielle Bewehrungsanordnung ein geometrisches Modell dargestellt ist.

Für einfache Bewehrungsanordnungen (z.B. unidirektionale Bewehrung) und Beschränkung auf elastisches Materialverhalten sind analytische Homogenisierungsmethoden anwendbar. Multiaxiale Gelege sowie die Berücksichtigung inelastischen Verhaltens erfordern jedoch die Anwendung numerischer Methoden.

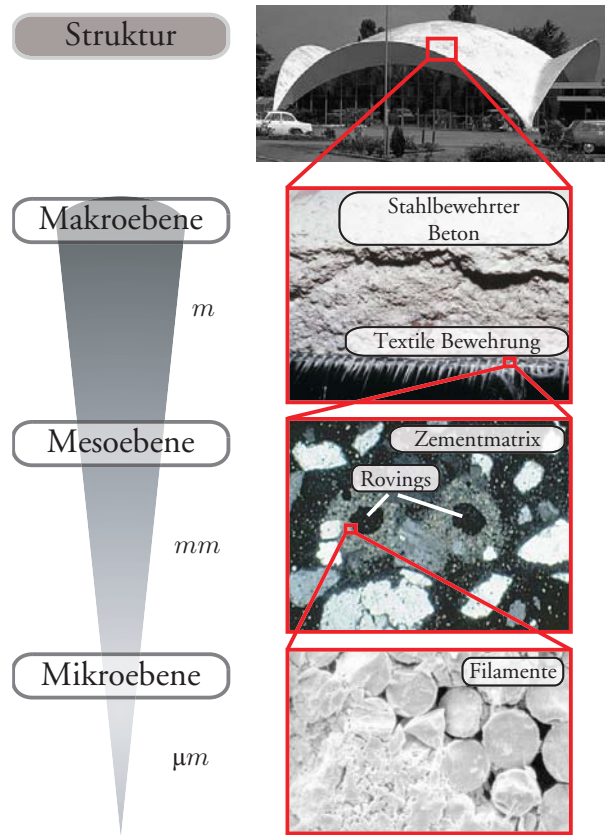


Abbildung 5: Strukturebenen

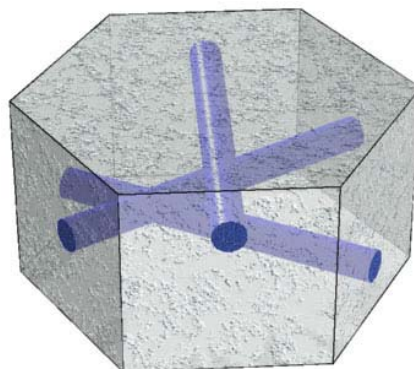


Abbildung 6: Beispiel eines repräsentativen Volumenelementes (RVE)

Die Modellierung des RVE mit finiten Elementen erlaubt die Abbildung der relevanten lokalen Schädigungs- bzw. Versagensmechanismen in diskreter oder verschmierter Form, d.h. es werden u.a. Interfaceversagen eines einzelnen Filamentes bzw. eines Teiles des Rovings, Matrixschädigung durch Mikrorissbildung, Matrixversagen und Filamentbruch berücksichtigt. Besondere Beachtung gilt dabei der Rissprozesszone im spröden Matrixmaterial.

Die Materialparameter für mesomechanische Modelle wurden z.B. anhand von zweiseitigen Auszugsversuchen von Rovings aus einer Feinbetonmatrix ermittelt. Dazu wurden Interfacemodelle entwickelt, die sowohl analytisch als auch numerisch gelöst wurden [10, 11]. Der Vorteil einer analytischen Beschreibung des Auszugsversuches ist eine vollständig geschlossene Lösung, die es erlaubt, auch die Spannungsverteilung entlang des Interface zwischen Faserbewehrung und Matrix anzugeben. Die zugrunde liegenden Verbundgesetze wurden dabei mittels multilinearer Funktionen approximiert.

4. Homogenisierung

Ziel der Homogenisierung ist es, ein effektives Materialverhalten eines homogenen Ersatzmedium zu finden, welches sich genauso verhält wie das zu untersuchende heterogene Medium. Ein Punkt der heterogenen Struktur kann mittels zweier Koordinaten bezeichnet werden (Abb. 7): zum einen mit der makroskopischen Koordinate x , welche auch den Punkt in dem homogenen Ersatzmedium beschreibt, und zum anderen mit der mesoskopischen Koordinate y , welche den Ort in der Umgebung der Heterogenität beschreibt. Bei der Anwendung von repräsentativen Volumenelementen wird jedem materiellen Punkt x auf der Makroebene ein Gebiet (RVE) auf der Mesoebene zugeordnet, wobei jeder materielle Punkt im RVE mit der Koordinate y bezeichnet wird. Bei der Anwendung der hier verwendeten Homogenisierungsmethode wird vorausgesetzt, dass die charakteristischen Größen der Heterogenitäten klein genug gegenüber der makroskopischen Struktur sind. Weiterhin wird eine periodische Anordnung der Heterogenitäten angenommen. Somit kann unter der Annahme einer vollständigen Repräsentation der Mesostruktur des Materials durch ein repräsentatives Volumenelement (RVE) eine Beziehung zwischen den lokalen Zustandsvariablen eines makroskopischen Punktes x und den zugehörigen gemittelten Zustandsvariablen

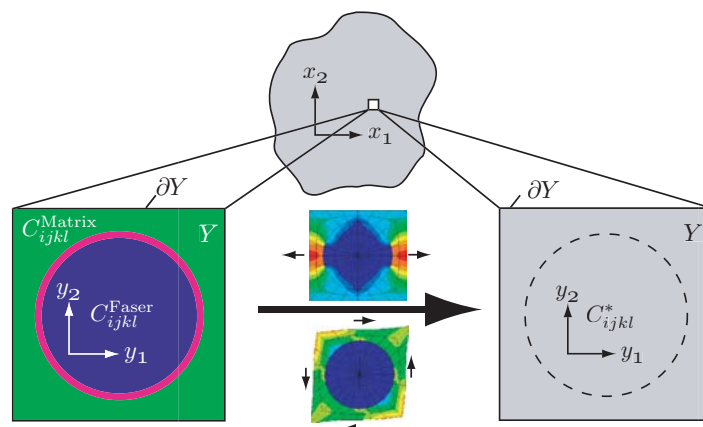


Abbildung 7: Schema der Homogenisierung des RVE

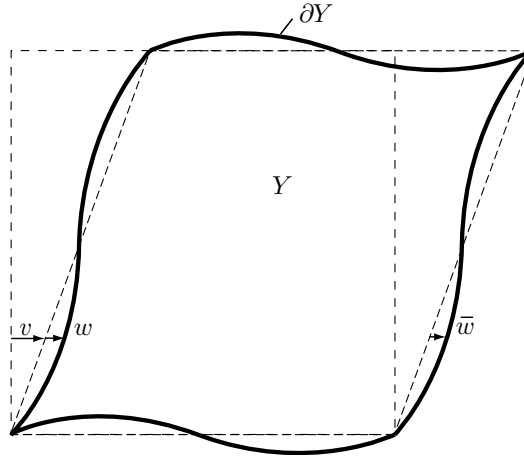


Abbildung 8: Zelle mit periodischen Randbedingungen

des repräsentativen Volumenelementes aufgestellt werden.

$$\Sigma(\mathbf{x}) = \langle \boldsymbol{\sigma} \rangle_{RVE(\mathbf{x})} \quad (1)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}) = \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle_{RVE(\mathbf{x})} \quad (2)$$

Für die Identifikation der effektiven Materialparameter des Verbundwerkstoffes Textilbeton wurden für typische Bewehrungsstrukturen repräsentative Volumenelemente modelliert. Mittels geeigneter Verzerrungszustände des RVE erfolgte eine numerische Homogenisierung 1. Ordnung, bei der periodische Randbedingungen (Abb. 8) zur Anwendung kamen. Dazu wurde das Verschiebungsfeld \mathbf{u} in einen homogenen Anteil \mathbf{v} und einen fluktuierenden (periodischen) Anteil \mathbf{w} aufgespalten (3).

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{v}(\mathbf{x}) + \mathbf{w}(\mathbf{y}) \quad (3)$$

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{E}\mathbf{x} + \mathbf{w}(\mathbf{y}) \quad (4)$$

Für gewählte repräsentative Volumenelemente wurden die effektiven Parameter des Elastizitätstensors für den allgemeinen anisotropen Fall anhand der gemittelten Verzerrungs- bzw. Spannungsfelder bestimmt (initiale Anisotropie). Beispielhaft seien hier die Komponenten des Elastizitätstensors für die Einheitszelle in Abb. 9 angegeben.

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = C_{ijkl}^* \langle \varepsilon_{kl} \rangle \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \langle \sigma_{11} \rangle \\ \langle \sigma_{22} \rangle \\ \langle \sigma_{33} \rangle \\ \langle \sigma_{23} \rangle \\ \langle \sigma_{31} \rangle \\ \langle \sigma_{12} \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111}^* & C_{1122}^* & C_{1133}^* & C_{1123}^* & C_{1131}^* & C_{1112}^* \\ C_{2211}^* & C_{2222}^* & C_{2233}^* & C_{2223}^* & C_{2231}^* & C_{2212}^* \\ C_{3311}^* & C_{3322}^* & C_{3333}^* & C_{3323}^* & C_{3331}^* & C_{3312}^* \\ C_{2311}^* & C_{2322}^* & C_{2333}^* & C_{2323}^* & C_{2331}^* & C_{2312}^* \\ C_{3111}^* & C_{3122}^* & C_{3133}^* & C_{3123}^* & C_{3131}^* & C_{3112}^* \\ C_{1211}^* & C_{1222}^* & C_{1233}^* & C_{1223}^* & C_{1231}^* & C_{1212}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \langle \varepsilon_{11} \rangle \\ \langle \varepsilon_{22} \rangle \\ \langle \varepsilon_{33} \rangle \\ \langle 2 \varepsilon_{23} \rangle \\ \langle 2 \varepsilon_{31} \rangle \\ \langle 2 \varepsilon_{12} \rangle \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[C_{ijkl}^*] = \begin{bmatrix} 36\,038 & 8\,850 & 8\,850 & 0 & 0 & 0 \\ 8\,850 & 34\,754 & 8\,798 & 0 & 0 & 0 \\ 8\,850 & 8\,798 & 34\,754 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12\,963 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 13\,046 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 13\,046 \end{bmatrix} \frac{MN}{m^2} \quad (7)$$

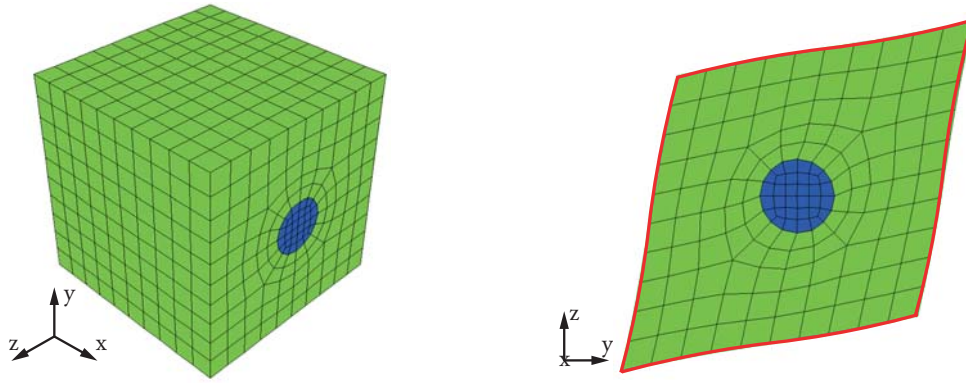


Abbildung 9: Einheitszelle mit periodischen Randbedingungen

Als Materialparameter für die Feinbetonmatrix wurden $C_{1111}^{Matrix} = 33\,333 \frac{MN}{m^2}$, $C_{1122}^{Matrix} = 8\,333 \frac{MN}{m^2}$ und $C_{1212}^{Matrix} = 12\,500 \frac{MN}{m^2}$ angenommen. Der Fasergehalt betrug 5% bei einem E-Modul von $75\,000 \frac{MN}{m^2}$.

Unter Einbeziehung lokaler Schädigungs- und Versagenkriterien für die Einzelmaterialien wurde außerdem die Evolution der globalen anisotropen Schädigung für ausgewählte Belastungspfade untersucht (induzierte Anisotropie). Abbildung 10 stellt eine unidirektional bewehrte Einheitszelle mit vordefiniertem Riss dar, welche in Bewehrungsrichtung belastet wurde. Mit steigender Belastung kommt es zum Ablösen der Faserbewehrung von der umgebenden Matrix. Im Diagramm in Abbildung 10 ist die relative Abnahme ausgewählter Komponenten des effektiven Elastizitätstensors C_{ijkl}^* mit steigender mittlerer Dehnung in Bewehrungsrichtung dargestellt, wobei die effektiven Größen auf einen Zustand mit ausgebildetem Matrixtransversalriss und intaktem Faser-Matrix-Interface C_{ijkl}^0 bezogen sind.

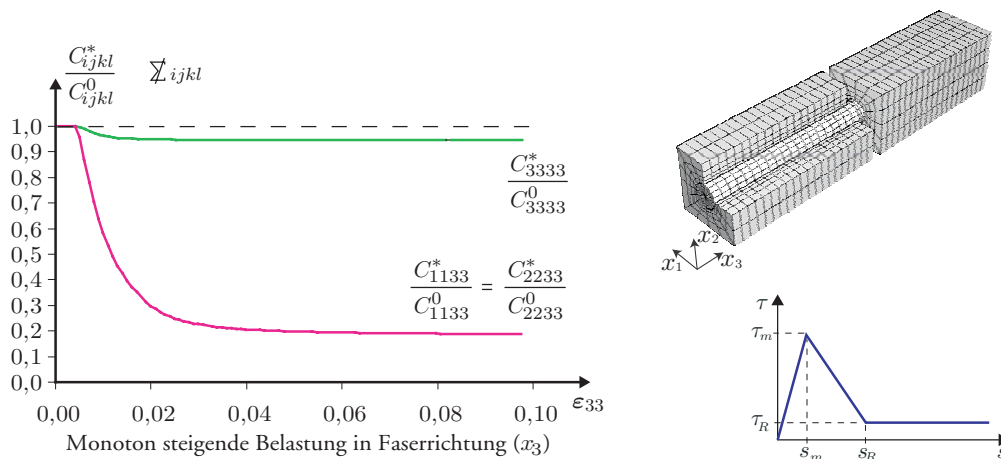


Abbildung 10: Berücksichtigung von Schädigung

5. Mehrskalenmethoden

Für Strukturanalysen, bei denen die Mikrostruktur des Materials berücksichtigt werden soll, kommen in jüngster Zeit Mehrskalenmethoden zum Einsatz [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Eine mögliche Klassifizierung dieser Methoden kann auf der Skala beruhen, auf welcher die konstitutiven Beziehungen formuliert werden. Dabei wird zwischen sogenannten sequentiellen bzw. integrierten Multiskalenanalysen (MSA) unterschieden. Sequentielle Multiskalenanalysen nutzen die Analyse der Mikro- bzw. Mesostruktur zur Bestimmung von Parametern für makroskopische Materialmodelle. Die Strukturanalyse beruht demzufolge auf makroskopischen konstitutiven Beziehungen. Integrierte Multiskalenanalysen beziehen das lokale Materialverhalten auf der Mikro- bzw. Mesoebene direkt in die makroskopische Strukturanalyse ein. Dazu wird für den aktuellen Beanspruchungszustand auf der Makroebene die zugehörige Materialantwort anhand von mikro- bzw. mesomechanischen Untersuchungen ermittelt. Es ist demzufolge keine Formulierung makroskopischer konstitutiver Beziehungen nötig.

Mehrskalenmethoden, welche Modelle auf der Makroebene mit Kontinuamodellen höherer Ordnung abbilden (z.B. Cosserat-Theorie [5]) erfordern Homogenisierungsmethoden höherer Ordnung (Berücksichtigung der Krümmung) [3, 4, 5].

Neben der Finite-Element-Methode kommen auch andere Verfahren zur Berechnung der Mikro- bzw. Mesostruktur zur Anwendung. Ghosh [6] nutzt z.B. „Voronoi cells“. Auch netzfreie Methoden werden zur Berechnung der Modelle auf den unterschiedlichen Strukturebenen verwendet [7].

Zur Analyse von typischen Beanspruchungen in einem Tragwerk aus Textilbeton wird ein Multi-Skalen-Berechnungsmodell (Abb. 11) entwickelt, welches auf makroskopischer Ebene den Beanspruchungszustand im Mittel erfasst und das Materialverhalten mittels mesoskopischer Modelle ermittelt. Das heterogene Material wird durch ein RVE modelliert und mit einem übergeordneten makroskopischen Modell verknüpft. Dabei wird jedem Integrationspunkt im makroskopischen Finite-Element-Modell ein RVE auf der Mesoebene zugeordnet. Die Schädigungs- bzw. lokalen Versagensmechanismen werden somit auf einer Mesoebene beschrieben und nach einer Homogenisierung der Zustandsvariablen im RVE bei der weiteren Belastung im makroskopischen Modell berücksichtigt.

Die Vorgehensweise bei dieser Mehrskalenmethode sieht folgendermaßen aus:

1. Modellierung der Makrostruktur (Tragwerk).
2. Modellierung des mechanischen Verhaltens des RVE auf der Mesoebene.
3. Zuordnung eines RVE zu jedem makroskopischen Integrationspunkt auf der Makroebene.
4. Bestimmung der Randbedingungen am RVE entsprechend des makroskopischen Verformungszustandes (Lokalisierung).
5. Lösen des Zellproblems auf der Mesoebene.
6. Bestimmung der makroskopischen Spannungen anhand des bekannten mesoskopischen Spannungszustandes (Homogenisierung).

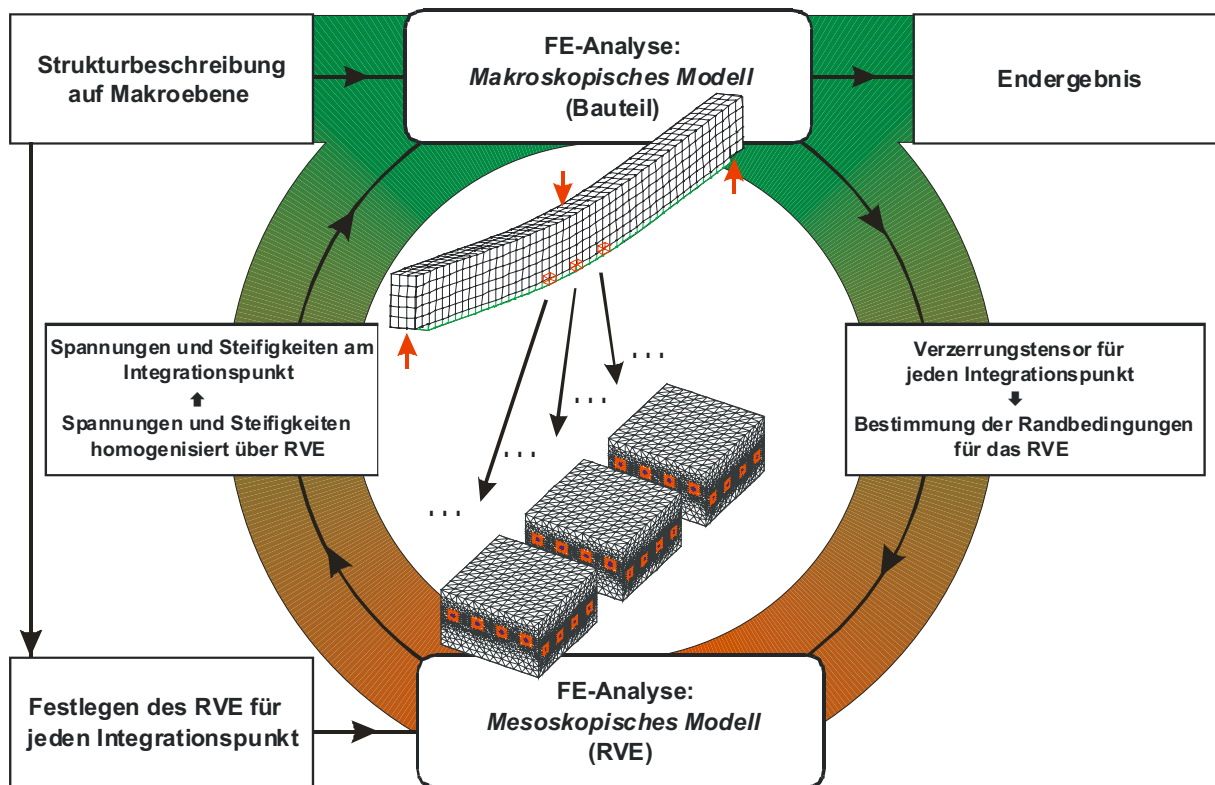


Abbildung 11: Multi-Skalen-Berechnungsmodell

Die Vorteile einer solchen Mehrskalenmethode liegen zum einen in der direkten Einbeziehung der Mesostruktur bei der Beschreibung des Materialverhaltens auf der Makroebene, da sowohl die Geometrie als auch die Eigenschaften der Mesostruktur erfasst werden, und zum anderen in der Formulierung relativ einfacher konstitutiver Beziehungen auf der Mesoebene. Nachteilig sind die enormen Anforderungen an die Hardware. Erwähnenswert ist die einfache Parallelisierung dieser Methode, da die repräsentativen Volumenelemente simultan berechnet werden können.

Ausblick

Ziel der weiteren Forschung ist es, basierend auf der vorgeschlagenen Multiskalenmethode, die mesoskopischen Versagensmodelle zu verbessern. Für typische Beanspruchungszustände ist eine sequentielle Multiskalenmethode angedacht, bei der ausgewählte Belastungspfade untersucht werden sollen. Weiterhin wird an einer verbesserten analytischen Beschreibung des Rovingmodells gearbeitet.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung der Forschung im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 528 „Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“ an der Technischen Universität Dresden sowie den Kollegen für die Bereitstellung der experimentellen Daten.

Literatur

- [1] CHABOCHE, J.-L. ; FEYEL, F. : On the multiscale analysis of composite structures by using a FE2 technique and fibre-matrix damage mechanics. In: *Workshop on Continuous Damage and Fracture, Cachan (France)* (2000), November
- [2] FEYEL, F. ; CHABOCHE, J.-L. : Multi-scale non linear FE2 analysis of composite structures: damage and fiber size effects. In: *Numerical Modelling in Damage Mechanics - NUM-DAM'00* 10 (2001), Nr. 2-3-4, S. 449–472
- [3] FISH, J. ; CHEN, W. : Higher-Order Homogenization of Initial/Boundary-Value Problem. In: *Journal of Engineering Mechanics* 127 (2001), Dezember, Nr. 12, S. 1223–1230
- [4] FISH, J. ; SHEK, K. : Multiscale analysis of composite materials and structures. In: *Composites Science and Technology* 60 (2000), S. 2547–2556
- [5] GEERS, M. ; KOUZNETSOVA, V. ; BREKELMANS, W. : Perspectives in multi-scale modeling of composite and heterogeneous materials upon localization. In: *WCCM V - Fifth World Congress on Computational Mechanics, Wien* (2002), Juli
- [6] GHOSH, S. ; LEE, K. : Two scale analysis of heterogeneous elastic-plastic materials with asymptotic homogenization and Voronoi cell finite element model. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 132 (1996), S. 63–116
- [7] JUN, S. ; IM, S. : Multiple-scale meshfree adaptivity for the simulation of adiabatic shear band formation. In: *Computational Mechanics* (2000), Nr. 25, S. 257–266
- [8] LIU, W. K. ; HAO, S. ; BELYTSCHKO, T. ; LI, S. : Multi-scale methods. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 47 (2000), S. 1343–1361
- [9] MAIRE, J. ; LEVASSEUR, P. ; PAULMIER, P. : Multi-Scale Model of Crack Propagation in unidirectional Metallic Matrix Composites. In: *13th European Conference on Fracture (ECF13) San Sebastian (Spain)* (2000), September
- [10] ZASTRAU, B. W. ; LEPENIES, I. ; RICHTER, M. : Zur mechanischen Modellierung der Ablöseerscheinungen im Faser-Matrix-Interface von unidirektional bewehrtem Feinbeton im Zugversuch. In: HEGGER, J. (Hrsg.): *1. Fachkolloquium der SFB 528 und 532 - Textilbeton* RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, 2001, S. 179–192
- [11] ZASTRAU, B. ; RICHTER, M. ; LEPENIES, I. : On the Analytical Solution of Pullout Phenomena in Textile Reinforced Concrete. In: *Journal of Engineering Materials and Technology* 125 (2003), S. 38–43