

**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

<http://www.tu-dresden.de>

MANFRED CURBACH, REGINE ORTLEPP (HRSG.)

SONDERFORSCHUNGSBEREICH 528

**TEXTILE BEWEHRUNGEN ZUR BAUTECHNISCHEN
VERSTÄRKUNG UND INSTANDSETZUNG**

ABSCHLUSSBERICHT

- GEKÜRZTE FASSUNG -

FÜR DIE PERIODE

2008/2 – 2011/1

**Manfred Curbach
Regine Ortlepp
(Hrsg.)**

Sonderforschungsbereich 528

**Textile Bewehrungen
zur
bautechnischen Verstärkung
und Instandsetzung**

Technische Universität Dresden

**Abschlussbericht
2008/2 – 2009 – 2010 – 2011/1
– gekürzte Fassung –**

Deutsche Forschungsgemeinschaft
– Sonderforschungsbereiche –
53170 Bonn

Abschlussbericht des Sonderforschungsbereichs 528

„Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“

gefördert seit 1999/2
bis 2011/1
Sprecherhochschule: Technische Universität Dresden

Sprecher des Sonderforschungsbereichs:

Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach
Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden
01062 Dresden
Telefon: (0351) 463-376 60
Telefax: (0351) 463-372 89
E-Mail: Manfred.Curbach@tu-dresden.de

Sekretariat des Sonderforschungsbereichs:

Frau Cornelia Dehne
Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden
01062 Dresden
Telefon: (0351) 463-365 68
Telefax: (0351) 463-372 89
E-Mail: sfb528@mailbox.tu-dresden.de

Dresden, den 19. April 2012

Manfred Curbach
(Sprecher des Sonderforschungsbereichs)

Dresden, den 19. April 2012

Hans Müller-Steinhagen
(Rektor der TU Dresden)

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	7
1 Übersicht.....	9
1.1 Teilprojektleiterinnen und Teilprojektleiter	9
1.2 Teilprojekte	10
1.3 Beteiligte Einrichtungen.....	15
2 Zentrale Ergebnisse des Sonderforschungsbereichs.....	17
2.1 Wissenschaftliche Entwicklung.....	17
2.1.1 Ziele und Fortschritte	17
2.1.2 Wesentliche Fragestellungen und methodische Erkenntnisse.....	21
2.2 Interne Kooperation und Organisation	26
2.3 Aussenwirkung.....	30
2.3.1 Wissenschaftliches Umfeld	30
2.3.2 Außerwissenschaftliches Umfeld - Anwender	41
2.3.3 Öffentlichkeitsarbeit für die Gesellschaft.....	45
3 Strukturwirkung des Sonderforschungsbereichs am Standort.....	47
3.1 Personelle Auswirkungen	47
3.2 Infrastruktur.....	50
3.2.1 Materielle Infrastruktur	50
3.2.2 Institutionelle Infrastruktur.....	52
4 Hinweise an die Deutsche Forschungsgemeinschaft.....	54
5 Berichte über die einzelnen Teilprojekte der letzten Förderperiode.....	55
Teilprojekt A1 (Cherif)	55
Teilprojekt A3 (Zastrau).....	63
Teilprojekt A5 (Mäder).....	71
Teilprojekt A6 (Mechtcherine).....	79
Teilprojekt B1 (Jesse).....	87
Teilprojekt B3 (Häußler-Combe).....	93
Teilprojekt B5 (Ortlepp).....	101
Teilprojekt B6 (Richter)	113
Teilprojekt C1 (Curbach)	121
Teilprojekt D2 (Kaliske/Graf)	129
Teilprojekt D4 (Curbach)	135
Teilprojekt D5 (Mechtcherine).....	143

Teilprojekt D6 (Curbach/Cherif)	151
Teilprojekt E3 (Sickert)	159
Teilprojekt E4 (Kaliske/Graf)	165
Transferprojekt T6 (Curbach/Schach)	173
Transferprojekt T7 (Graf/Kaliske)	187
Serviceprojekt Y1 (Maas)	195

1 ÜBERSICHT

1.1 TEILPROJEKTLIMITERINNEN UND TEILPROJEKTLIMITER

Tabelle 1: Übersicht der Teilprojektleiter

Teilprojektleiterin bzw. Teilprojektleiter	Geburtsjahr	Jahr der Promotion	Institut ¹⁾	Teilprojekt
Beer, Michael (m) Prof. Dr.-Ing.	1970	2001	Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke	E4
Cherif, Chokri (m) Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing.	1966	1998	Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik	A1, D6, T1, T9
Curbach, Manfred (m) Prof. Dr.-Ing.	1956	1987	Institut für Massivbau	B1, B4, C1, D1, D4, D6, T3, T6
Graf, Wolfgang (m) Prof. Dr.-Ing.	1953	1981	Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke	D2, E3, E4, T4, T7
Haller, Peer (m) Prof. Dr.-Ing.	1958	1987	Institut für Baukonstruktionen und Holzbau	C3, C5
Häußler-Combe, Ulrich (m) Prof. Dr.-Ing. habil.	1955	1984	Institut für Massivbau	B3
Hufenbach, Werner (m) Prof. Dr.-Ing. habil.	1942	1973	Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik	C4
Jesse, Frank (m) Dr.-Ing.	1971	2004	Institut für Massivbau	B1
Kaliske, Michael (m) Prof. Dr.-Ing. habil.	1960	1995	Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke	D2, E4, T7
Maas, Hans-Gerd (m) Prof. Dr. habil.	1959	1992	Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung	D3, Y1
Mäder, Edith (w) Prof. Dr.-Ing. habil.	1948	1974	Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V.	A5
Mechtcherine, Viktor (m) Prof. Dr.-Ing.	1964	2000	Institut für Baustoffe	A6, D5
Möller, Bernd (m) Prof. Dr.-Ing. habil.	1941	1970	Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke	D2, E3, T4
Neuberg, Curt (m) apl. Prof. Dr.-Ing.	1939	1971	Institut für Mechanik und Flächentragwerke	C2
Offermann, Peter (m) Prof. Dr.-Ing. habil.	1940	1968	Institut für Textil- und Bekleidungstechnik	A1, A4
Opitz, Heinz (m) Prof. Dr.-Ing. habil.	1937	1970	Professur für bautechnisches Mess- & Versuchswesen	D3

Teilprojektleiterin bzw. Teilprojektleiter	Geburtsjahr	Jahr der Promotion	Institut ¹⁾	Teilprojekt
Ortlepp, Regine (w) Dr.-Ing.	1975	2007	Institut für Massivbau	B5
Proske, Dirk (m) Dr.-Ing. habil.	1967	2003	Institut für Massivbau	B4
Richter, Mike (m) Dr.-Ing.	1972	2005	Institut für Mechanik und Flächentragwerke	B6
Schach, Rainer (m) Prof. Dr.-Ing.	1951	1982	Institut für Baubetriebswesen	T6
Schiekel, Michael (m) apl. Prof. Dr. rer. nat. habil.	1945	1977	Institut für Baustoffe	A2
Schorn, Harald (m) Prof. Dr.-Ing.	1941	1972	Institut für Baustoffe	A2
Sickert, Jan-Uwe (m) Dr.-Ing.	1972	2005	Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke	E3
Stritzke, Jürgen (m) Prof. Dr.-Ing.	1937	1974	Institut für Massivbau	D1
Zastrau, Bernd (m) Prof. Dr.-Ing. habil.	1951	1980	Institut für Mechanik und Flächentragwerke	A3, C2

¹⁾ Alle Institutionen befinden sich in Dresden; weitere Bezeichnungen siehe Fußnoten zu Tabelle 3

1.2 TEILPROJEKTE

Tabelle 2: Übersicht der Teilprojekte

Teilprojekt	Titel	Fachgebiet und Arbeitsrichtung	Leitungsperson(en), Institut(e) ¹⁾	gefördert im SFB
A1	Textile Bewehrungen für Beton	Textiltechnik; textile Verstärkungsstrukturen, Stoffgesetze und Fertigungskennwerte, Bindungs- und Beschichtungstechnologie, Preforming	Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing Chokri Cherif, Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Offermann, Institut für Textil- und Bekleidungstechnik	1999/2 bis 2011/1
A2	Betonmatrix und Verbundelemente	Baustoffe, textildbewehrter Beton, Verbundverhalten	apl. Prof. Dr. rer. nat. habil. Michael Schiekel, Prof. Dr.-Ing. Harald Schorn, Institut für Baustoffe	1999/2 bis 09/2006

Teilprojekt	Titel	Fachgebiet und Arbeitsrichtung	Leitungsperson(en), Institut(e) ¹⁾	gefördert im SFB
A3	Konstitutive Gesetze	Technische Mechanik, Kontinuumsmechanik, numerische Methoden, Multi-Skalen-Methoden	Prof. Dr.-Ing. Bernd W. Zastrau, Institut für Mechanik und Flächentragwerke	1999/2 bis 2011/1
A4	Textile Verstärkungen für Formvollhölzer	Textiltechnik; verstärkte Formgestricke, modifizierte Flachstricktechnik	Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing Chokri Cherif, Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Offermann, Institut für Textil- und Bekleidungstechnik	2002/2 bis 2005/1
A5	Faser- und Grenzschichtdesign	Glasfaserspinnen, Oberflächenmodifizierung, Grenzschichten, Haftung, Mikro-mechanik	Prof. Dr.-Ing. habil. Edith Mäder, Leibniz-Institut für Polymerforschung e. V.	2002/2 bis 2011/1
A6	Matrixentwicklung und Verbund	Zementgebundene Verbundwerkstoffe, Betontechnologie, Dauerhaftigkeit, Bruchmechanik	Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine, Institut für Baustoffe	10/2006 bis 2011/1
B1	Spannungs-Dehnungs-Beziehungen	Massivbau, Stoffgesetze	Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach, Dr.-Ing. Frank Jesse, Institut für Massivbau	1999/2 bis 2011/1
B3	Tragmechanismus von Filamentgarnen	Massivbau, Stoffgesetze, Verbund, numerische Methoden	Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe, Institut für Massivbau	2005/2 bis 2011/1
B4	Statistische Beurteilung	Statistik, Zuverlässigkeitstheorie	Dr.-Ing. Dirk Proske, Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach, Institut für Massivbau	2005/2 bis 2008/1
B5	Grundlagen konstruktiver Bewehrungsdetails	Massivbau, Stoffgesetze, Verbund	Dr.-Ing. Regine Ortlepp, Institut für Massivbau	2008/2 bis 2011/1
B6	Roving-Roving-Übertragungsverhalten	Technische Mechanik, Kontinuumsmechanik, Kontaktmechanik, numerische Methoden	Dr.-Ing. Mike Richter, Institut für Mechanik und Flächentragwerke	2008/2 bis 2011/1
C1	Verbund alt-neu	Massivbau, Stoffgesetze, Verbund	Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach, Institut für Massivbau	1999/2 bis 2009/1
C2	Oberflächenorientierte Schalentheorie	Technische Mechanik, Schalentheorie, numerische Methoden	apl. Prof. Dr.-Ing. Curt Neuberg, Prof. Dr.-Ing. Bernd W. Zastrau, Institut für Mechanik und Flächentragwerke	1999/2 bis 2008/1

Teilprojekt	Titel	Fachgebiet und Arbeitsrichtung	Leitungsperson(en), Institut(e) ¹⁾	gefördert im SFB
C3	Formgerechte Bewehrung von Holzkonstruktionen	Bauwesen, Ingenieurholzbau	Prof. Dr.-Ing. Peer Haller, Institut für Baukonstruktionen und Holzbau	1999/2 bis 2005/1
C4	Kerbspannungsanalyse für Holzverbunde	Leichtbau, Kunststofftechnik, Faserverbundwerkstoffe, Werkstoffverbunde, Verstärkungssysteme, Simulation	Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Hufenbach, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik	1999/2 bis 2002/1
C5	Charakterisierung der Verbundfestigkeit	Bauingenieurwesen, Baukonstruktionen und Holzbau	Prof. Dr.-Ing. Peer Haller, Institut für Baukonstruktionen und Holzbau	2002/2 bis 2005/1
D1	Verstärkung mit textilibewehrtem Beton	Massivbau, Verstärkung	Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stritzke, Institut für Massivbau	1999/2 bis 2005/1
D2	Numerische Simulation	Statik, Dynamik, numerische Analyse	Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Möller, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf, Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske, Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke	1999/2 bis 2011/1
D3	Photogrammetrie	Bautechnisches Mess- und Versuchswesen, Digitale Nahbereichsphotogrammetrie, Computertomographie, Infrarotthermographie	Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Opitz, Prof. f. Bautechnisches Mess- & Versuchswesen; Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung	07/2000 bis 2008/1
D4	Verstärkung für Normalkraft und Torsion	Massivbau, Verstärkung	Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach, Institut für Massivbau	2005/2 bis 2011/1
D5	Korrosionsschutz bei Instandsetzung	Zementgeb. Verbundwerkstoffe, Betontechnologie, Rissverhalten, Massentransport, Dauerhaftigkeit	Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine, Institut für Baustoffe	2008/2 bis 2011/1
D6	Hochtemperaturverhalten von Textilbeton	Massivbau, Hochtemperaturverhalten, Stoffgesetze	Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach, Institut für Massivbau, Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing Chokri Cherif, Institut für Textil- und Bekleidungstechnik	2008/2 bis 2011/1

Teilprojekt	Titel	Fachgebiet und Arbeitsrichtung	Leitungsperson(en), Institut(e) ¹⁾	gefördert im SFB
E3	Sicherheitskonzepte	Statik und Dynamik, Zuverlässigkeitstheorie, Bemessung	Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Möller, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf, Dr.-Ing. Jan-Uwe Sickert, Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke	1999/2 bis 2011/1
E4	Numerische Langzeitprognose	Statik und Dynamik, Datenanalyse, numerische Langzeitprognose	Dr.-Ing. Michael Beer, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf, Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske, Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke	2005/2 bis 2011/1
T1	Entwicklung einer Multiaxialnähwirkmaschine mit modifiziertem Schussfadenaufnahme- und Transport- sowie Beschichtungs- und Konfektionierungs-/ Speichersystem	Textiltechnik, textile Flächenbildungsverfahren, Beschichtungstechnologie, textile Verstärkungshalbzeuge	Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing Chokri Cherif Institut für Textil- und Bekleidungstechnik, Dresden	2006/1 bis 2008/2
T3	Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbetonbauteilen für Querkraft	Massivbau, Verstärkung	Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach Institut für Massivbau, Dresden	2006/1 bis 2008/2
T4	Bewertung der numerisch ermittelten Robustheit von (textilverstärkten) Tragwerken	Statik und Dynamik, Zuverlässigkeitstheorie, Bemessung	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Möller Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke, Dresden	2006/1 bis 2008/2
T6	Biegeverstärkung von Platten	Massivbau, Stoffgesetze	Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach Institut für Massivbau, Dresden Prof. Dr.-Ing. Rainer Schach Institut für Baubetriebswesen, Dresden	2008/2 bis 2011/1

Teilprojekt	Titel	Fachgebiet und Arbeitsrichtung	Leitungsperson(en), Institut(e) ¹⁾	gefördert im SFB
T7	Adaption und Anwendung nicht-determinist. Simulations- und Bemessungsstrategien in der industriellen Entwurfspraxis	Statik und Dynamik, Zuverlässigkeitstheorie, Tragwerksentwurf	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kalliske Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke, Dresden	2009/1 bis 2011/2
T9	Technologie zur Verarbeitung von carbon fiber heavy tows zu textilen Betonbewehrungen	Textiltechnik, textile Flächenbildungsverfahren, Bindungs- und Beschichtungstechnologie, textile Verstärkungsstrukturen, Carbonfasern, carbon fiber heavy tows	Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing Chokri Cherif Institut für Textil- und Bekleidungstechnik, Dresden	2009/2 bis 2012/1
Y1	Photogrammetrie	Nahbereichsphotogrammetrie, Bildverarbeitung, Bauingenieurwesen	Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Dresden	2005/2 bis 2011/1

¹⁾ Alle Institutionen befinden sich in Dresden; weitere Bezeichnungen siehe Fußnoten zu Tabelle 3

1.3 BETEILIGTE EINRICHTUNGEN

Tabelle 3: Übersicht der beteiligten Einrichtungen

Förderperiode	1999/2- 2002/1	2002/2- 2005/1	2005/2- 2008/1	2008/2- 2011/1
universitär				
Fakultät Bauingenieurwesen				
Institut für Baubetriebswesen	-	-	-	T6
Institut für Baustoffe ¹⁾	A2	A2	A2 ¹⁰⁾	
	-	-	A6 ⁶⁾	A6
	-	-	-	D5
Institut für Massivbau ¹⁾	B1	B1	B1	B1
	-	-	B3	B3
	-	-	B4	-
	-	-	-	B5
	C1	C1	C1	C1 ⁹⁾
	D1	D1	-	-
	-	-	D4	D4
	-	-	-	D6
	-	-	T3 ¹¹⁾	T3 ¹¹⁾
	-	-	-	T6
Institut für Mechanik und Flächentragwerke ²⁾	A3	A3	A3	A3
	C2	C2	C2	-
	-	-	-	B6
Institut für Stahl- und Holzbau ³⁾	C3	C3	-	-
	-	C5	-	-
Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke ²⁾	D2	D2	D2	D2
	E3	E3	E3	E3
	-	-	E4	E4
	-	-	-	T4
	-	-	-	T7 ⁷⁾
Prof. f. Bautechnisches Mess- & Versuchswesen ¹⁾	D3 ⁵⁾	-	-	-
Fakultät Maschinenwesen				
Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik	C4	-	-	-
Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik ⁴⁾	A1	A1	A1	A1
	-	A4	-	-
	-	-	T1	-
	-	-	-	D6
-	-	-	T9 ⁸⁾	
Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften				
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung	D3 ⁵⁾	D3	D3	-
	-	-	Y1	Y1
Fakultät Informatik				
Institut für Künstliche Intelligenz	D3 ⁵⁾	-	-	-

Einrichtung	Förderperiode	1999/2- 2002/1	2002/2- 2005/1	2005/2- 2008/1	2008/2- 2011/1
außeruniversitär					
Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.	-	A5	A5	A5	A5

¹⁾ Perioden I & II: Institut für Tragwerke und Baustoffe

²⁾ Perioden I & II: Institut für Baumechanik und Bauinformatik

³⁾ Perioden I & II: Institut für Baukonstruktionen und Holzbau

⁴⁾ Perioden I-III: Institut für Textil- und Bekleidungstechnik

⁵⁾ Beide Institute waren am Projekt D3 beteiligt, welches während der ersten Förderperiode in den SFB528 integriert werden konnte.

⁶⁾ Fortsetzung der Forschungsarbeiten von Prof. Schorn aus dem TP A2 nach seinem Eintritt in den Ruhestand unter der Leitung des Nachfolgers Prof. Mechtcherine.

⁷⁾ Das Transferprojekt wurde innerhalb der dritten Förderperiode in den SFB 528 aufgenommen.

⁸⁾ Das Transferprojekt wird noch bis 30.06.2012 gefördert.

⁹⁾ Abschlussfinanzierung für ein Jahr

¹⁰⁾ Das Teilprojekt wurde innerhalb der dritten Förderperiode beendet (30.09.2006).

¹¹⁾ Laufzeitbeginn 2006, Projektlaufzeit zwei Jahre, kostenneutrale Verlängerung bis 2009 wegen Elternzeit von Frau Brückner.

2 ZENTRALE ERGEBNISSE DES SONDERFORSCHUNGSBEREICHS

2.1 WISSENSCHAFTLICHE ENTWICKLUNG

2.1.1 Ziele und Fortschritte

Ausgangspunkt der Antragstellung im Jahre 1998 war die Vision, dass Bauteile und Tragwerke aus Stahlbeton mit Hilfe einer nur wenige Millimeter dicken Schicht aus dem neuartigen Verbundwerkstoff Textilbeton verstärkt und Instand gesetzt werden können. Vor dem SFB528 gab es nur vereinzelte, aber vielversprechende Versuche, die zeigten, dass die Idee funktioniert. Mit der Erstantragstellung wurde das langfristige Ziel definiert, für die praktische Anwendung des neuartigen Verbundwerkstoffes Textilbeton gesicherte Grundlagen auf den Gebieten:

- 1) Werkstoffe (textile Bewehrungen und Feinbetonmatrix),
- 2) Mechanische Beschreibung des Verbundsystems,
- 3) Konstruktive Durchbildung,
- 4) Bemessung,
- 5) Technologische Aufbringung,
- 6) Bautechnische Umsetzung,
- 7) Langzeiteigenschaften (Dauerhaftigkeit und Dauerfestigkeit) und
- 8) Sicherheit und Lebensdauer

zu schaffen. Des Weiteren wurde ein möglichst früher Beginn des Praxistransfers angestrebt.

Nach nunmehr zwölf Jahren intensiver Grundlagenforschung können wir behaupten, dass jedes der 1998 gesteckten Ziele zufriedenstellend erreicht werden konnten:

Zu Pkt. 1) Werkstoffe

Geeignete textile Bewehrungen mit hoher Ausnutzung der Faserfestigkeit und ausreichenden Verbundeigenschaften wurden beständig weiterentwickelt, verbessert und bereits während der 4. Förderperiode durch eine Ausgründung aus der Textiltechnik (TUDATEX GmbH) und durch SGL Carbon, Meitingen (Praxispartner im Transferprojekt T9) kommerziell verfügbar gemacht. Die Textilien sind heute wirtschaftlich produzierbar und in der Praxis akzeptiert, was zahlreiche reale Anwendungen und (laufende) AiF-Projekte beweisen.

Auch die zweite wesentliche Komponente des Textilbetons, der Feinbeton, wird bereits seit 2009 durch die Firma Pagel Spezialbetone, Essen (Praxispartner im Transferprojekt T6 und Gründungsmitglied des TUDALIT-Markenverbands) kommerziell angeboten. Die für die Anwendung von Textilbeton notwendigen Werkstoffe stehen also der Baupraxis in ausreichender Menge und hoher Qualität zur Verfügung.

Zu Pkt. 2) Mechanische Beschreibung des Verbundsystems

Das Verbundsystem kann auf allen Skalenebenen - Mikro, Meso und Makro - so präzise beschrie-

ben werden, dass eine hinreichende Genauigkeit bei der Berechnung des Tragverhaltens von Stahlbetonbauteilen mit Textilbetonverstärkung nicht nur bei der Nachrechnung, sondern auch bei der Prognose erreicht werden konnte. Die Vorhersagequalität von Tragfähigkeiten für die Biege-, Querkraft- und Normalkraftverstärkung wurde mit Hilfe von Großversuchen in der 4. Förderperiode des SFB528 nachgewiesen, deren Ergebnisse den numerisch orientierten Teilprojekten vor der Berechnung nicht bekannt waren. Die Konzeption der Probekörper erfolgte im Teilprojekt D4. Anhand der bereitgestellten Materialparameter und Geometriedaten wurde in den numerischen Teilprojekten das Tragverhalten prognostiziert. Danach wurden im Teilprojekt D4 die Versuche durchgeführt. Bild 1 und Bild 2 zeigen beispielhaft für eine verstärkte großformatige Biegeplatte und einen verstärkten großformatigen Querkraftbalken die Ergebnisse der unscharfen Last-Verschiebungs-Analyse aus den Teilprojekten D2 und E3 vom Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke (Kaliske) im Vergleich mit den Versuchsergebnissen. Die prognostizierten Traglasten aus der fuzzy-stochastischen Tragwerksanalyse wurden durch die Experimente bestätigt.

In Bild 3 sind die Berechnungsergebnisse des Instituts für Mechanik und Flächentragwerke im Teilprojekt A3 (Zastrau) für die großformatigen Biegeplatten bei unterschiedlicher Verstärkungslagenzahl dargestellt und den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt. Sowohl die Traglasten als auch die Verformung konnten durch das entwickelte Modell nach Kalibrierung anhand der Materialkennwerte gut simuliert werden.

Die mithilfe eines im TP D4 (Curbach) entwickelten Ingenieurmodells ermittelten Bruchlasten der Platten lieferten ebenso eine sehr gute Vorhersage für die Biegeversuche (Bild 4).

Auch die Vorhersage der Bruchlasten für die verstärkten großformatigen Stützen auf der Basis empirischer Formeln aus dem Teilprojekt D4 (Curbach) traf die im Versuch ermittelten Bruchlasten sehr gut (Bild 5). Weitere Ergebnisse der Großversuche wurden auf dem Abschlusskolloquium CTRS 6 vorgestellt.

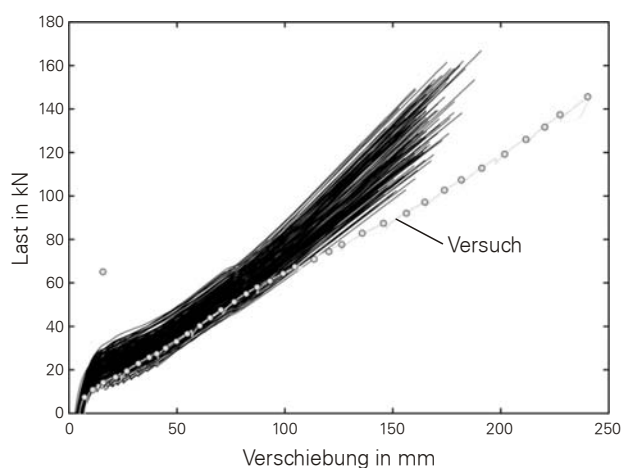


Bild 1: Last-Verschiebungs-Abhängigkeit einer verstärkten großformatigen Biegeplatte in Plattenmitte

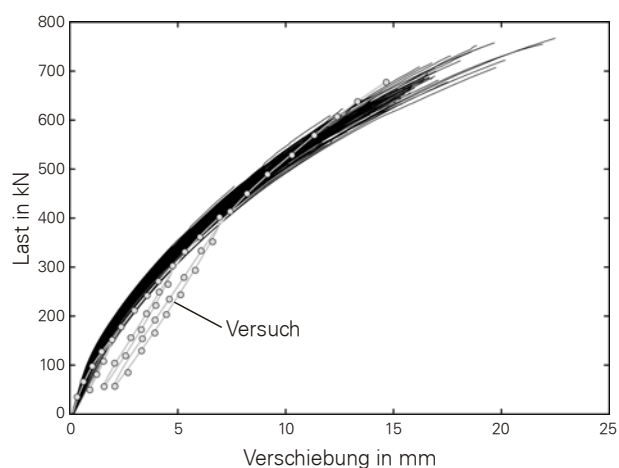


Bild 2: Last-Verschiebungs-Abhängigkeit eines verstärkten großformatigen Plattenbalkens unter Querkraftbeanspruchung in Feldmitte

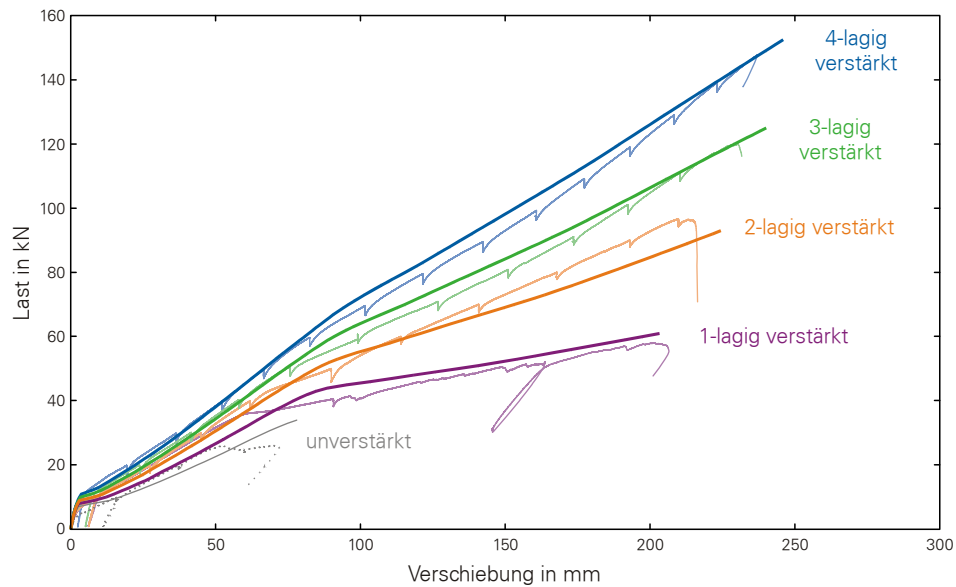


Bild 3: Last-Verschiebungs-Abhängigkeit einer verstärkten großformatigen Biegeplatte in Plattenmitte bei unterschiedlicher Anzahl textiler Verstärkungslagen

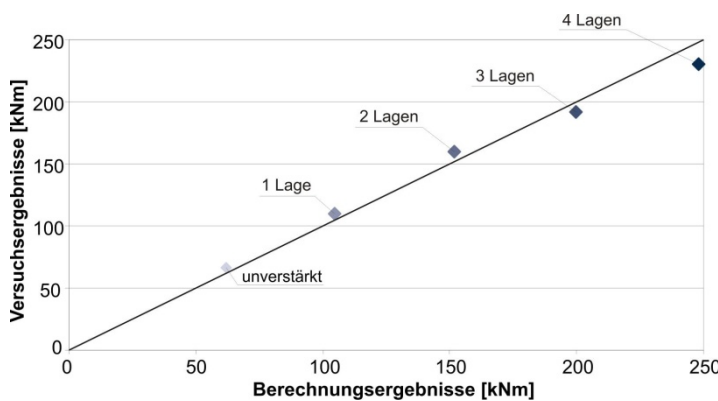


Bild 4: Vergleich der experimentellen mit den überschläglich berechneten Bruchlasten der großformatigen Biegeplatten

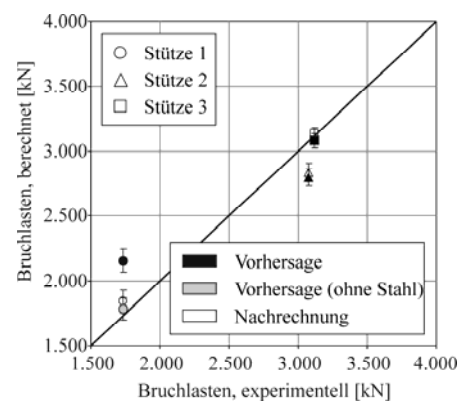


Bild 5: Vergleich experimentelle und berechnete Bruchlasten der großformatigen Stützen

Zu Pkt. 3) Konstruktive Durchbildung

In der 4. Förderperiode wurden durch praktisch einsetzbare Bemessungsmodelle für die Endverankerung, für symmetrische und asymmetrische Bewehrungsstöße und die für den praktischen Einsatz wesentlichen Regeln der konstruktiven Durchbildung erarbeitet und auf ein für die Baupraxis anwendbares Niveau gebracht.

Zu Pkt. 4) Bemessung

Für zwei Grundformen statischer Beanspruchung - Biegung und Torsion - liegen Bemessungsmodelle vor, die die für die wirtschaftliche Anwendung in der Baupraxis erforderliche Genauigkeit problemlos erreichen. Die Bemessungsmodelle für die baupraktisch ebenfalls wichtige Querkraftverstärkung müssen noch weiterentwickelt werden. Das liegt aber weniger an mangelhaften Modellen für die Verstärkung aus Textilbeton als vielmehr an offenen Fragen und ausreichend leistungsfähigen Modellen für die Querkrafttragfähigkeit des unverstärkten Stahlbetonquerschnitts

selbst. Der Tragfähigkeitszuwachs bei Querkraftverstärkung kann sehr wohl mit ausreichender Genauigkeit prognostiziert werden. Die Verstärkung für Normalkraft wurde erst in der 3. Förderperiode begonnen. Auch hier stehen heute erste Modelle zur Verfügung, mit denen der Zuwachs der Tragfähigkeit durch die Verstärkung nachgewiesen und prognostiziert werden kann. Außerdem wurde ein Bemessungsmodell für die Verbundkraftübertragung zwischen Altbeton und Textilbetonverstärkung entwickelt und verifiziert, so dass für alle baupraktisch relevanten Nachweise geeignete Modelle bereit stehen. Auch Konstruktionsregeln, bspw. für die Verankerung der Textilien, wurden abgeleitet.

Zu Pkt. 5) technologische Aufbringung

Für die technologische Aufbringung von Textilbeton wurden zwei Verfahren entwickelt und analysiert: Das Laminieren von Hand (händischer Auftrag des Feinbetons) und das Laminieren mit Sprühhbeton im Nassspritzverfahren. Beide Verfahren haben sich bewährt. Aufgrund der höheren Produktivität wird von den Praxispartnern das Sprühen im Nassspritzverfahren favorisiert.

Zu Pkt. 6) bautechnische Umsetzung

Die Bautechnische Umsetzung ist gegeben und durch mehrere Pilotprojekte nachgewiesen. Bei der bisher größten Maßnahme wurden ca. 3.000 m² Deckenfläche in einem Geschäftshaus erfolgreich mit Textilbeton verstärkt.

Zu Pkt. 7) Langzeiteigenschaften

Die für die Bauwerksverstärkung besser geeigneten Carbonfasern erreichen in der alkalischen Betonmatrix die notwendige Dauerhaftigkeit. Die für die Baupraxis erforderliche Dauerstandfestigkeit bei Verstärkung von Bauteilen unter vorwiegend ruhender Beanspruchung konnte ebenfalls nachgewiesen werden.

Zu Pkt. 8) Sicherheit und Lebensdauer

Speziell für den Textilbeton wurde ein fuzzy-probabilistisches Sicherheitskonzept entwickelt. Aufgrund der derzeit noch mangelnden Akzeptanz für dieses neuartige Nachweiskonzept werden auch die notwendigen Informationen für das bauaufsichtlich eingeführte und in der Baupraxis übliche semi-probabilistische Teilsicherheitskonzept bereit gestellt. Bei den bisher ausgeführten Pilot- und Demonstrationsprojekten kamen bereits das Sicherheitskonzept mit globalem Sicherheitsbeiwert und das semi-probabilistische Teilsicherheitskonzept zum Einsatz.

Zu Praxistransfer

Ab der dritten Förderperiode wurde gezielt mit Transferprojekten begonnen, da viele Firmen Interesse für den neuen Werkstoff zeigten. Mit dem Ende der 4. Förderperiode sind die Voraussetzungen für die praktische Anwendung gegeben. Die Beantragung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) für die Verstärkung mit Textilbeton wurde bereits in Angriff genommen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass alle zur Beginn der Förderung definierten mittel- und langfristigen Ziele erreicht wurden. Wirtschaftlich betrachtet ist aus der ersten Idee heute ein langfristig interessanter Baustoff geworden.

2.1.2 *Wesentliche Fragestellungen und methodische Erkenntnisse*

Wesentliche neue Fragestellungen, die sich während der Laufzeit des SFB ergaben, sollen beispielhaft vorgestellt werden:

1. Für die Durchführung systematischer Grundlagenuntersuchungen wurde eine für die Hochleistungsfilamentgarne geeignete Prüfmethode entwickelt, die eine statistisch gesicherte, reproduzierbare Bestimmung von Kraft-Dehnungs-Beziehungen mit und ohne Hochtemperatureinfluss gewährleistet.
2. Durch umfangreiche Prozessanalysen und Maschinenmodifizierungen wurden die Grundlagen für die Fertigung textiler Halbzeuge mit geeigneten Bindungen und topologischen Strukturen für die Betonbewehrung geschaffen.
3. Entwicklung eines geeigneten Beschichtungssystems, mit dem
 - (a) das Verbundverhalten der Filamente in den Garnbündeln und
 - (b) der Verbund zwischen textiler Bewehrung und Feinbetonmatrix gezielt beeinflusst werden kann und
 - (c) das gleichzeitig eine Barriere für die Alkalien aus der Betonmatrix bildet, um die Dauerhaftigkeit beim Einsatz von AR-Glas zu verbessern;
4. Erarbeitung der Grundlagen für den Einsatz von Carbonfasern als textile Bewehrung,
5. Schaffung der maschinentechnischen Voraussetzung für die textile Verarbeitung von Carbonfasern, speziell für den Einsatz von Heavy-Tow-Carbonfasern (3.300 tex, 50.000 Filamente je Garn),
6. Detailprobleme zum Verbund beim Einsatz von Carbonfasern (z. B. Verankerungselemente),
7. Verhalten unter hohen Temperaturen und Langzeitverhalten.

Diese Fragestellungen wurden in späteren Förderphasen des SFB528 in Anträgen formuliert, bearbeitet und beantwortet.

Neben der Formulierung neuer Fragestellungen wurden weit reichende methodische Erkenntnisse in den verschiedenen am SFB beteiligten Fach- und Spezialgebieten gewonnen, wie z. B.:

SFB allgemein. Die Forschung gestaltete sich so komplex und interdisziplinär, dass zahlreiche Kooperationen zwischen den TP und auch mit der Wirtschaft erforderlich waren, um alle Fragestellungen zu beantworten. Deshalb erwies sich bei dem bearbeiteten Forschungsfeld die Fördermöglichkeit „SFB“ als besonders geeignet. In vielen Teilprojekten mussten neuartige Prüfanlagen oder Versuchsstände konzipiert und umgesetzt werden, um die Herausforderungen bei der Materialoptimierung angehen zu können (z. B. Betonentwicklung, Integration einer Beschichtungstechnologie, Weiterentwicklung der Nähwirktechnik durch Kooperation zwischen den Instituten für Baustoffe, Massivbau, Textiltechnik sowie dem Leibniz-Institut) oder die für eine Modellierung oder Bemessung erforderlichen Materialkenngrößen ermitteln zu können, z. B. Prüfstände für die Untersuchung des Verbundverhaltens von TRC-Verstärkungsschichten zum Altbetonuntergrund und die biaxiale Prüfung von TRC.

Werkstoffentwicklung: In TP A5 wurde durch den Aufbau einer neuen Spinnanlage für alkaliresistente Glasfilamentgarne die Voraussetzung für eine gezielte Entwicklung alkaliresistenter Schlichte/Beschichtungen geschaffen.

Textiltechnik. Besonders erwähnenswert ist die Entwicklung von Prüfmethode zur Ermittlung des Kraft-Verformungs-Verhaltens von Filamentgarnen und textilen Bewehrungen, der Nadelversatztechnik für die Ausbildung kettfadenumschließender Maschenstrukturen und lage-symmetrischer Gelegestrukturen sowie der in den textilen Flächenbildungsprozess integrierten Beschichtungstechnologie zur Strukturverfestigung und -stabilisierung.

Experimentelle Verbunduntersuchungen. In den TP A2/A6 wurden Präparationstechniken zur Aufbereitung von Faser-Matrix-Verbundproben für Untersuchungen im ESEM entwickelt. Mit diesen Methoden konnten auch sensible morphologische Details in der Interphase zwischen Garn bzw. Filament und zementgebundener spröder Matrix schonend präpariert und in nahezu unverändertem Zustand im Elektronenmikroskop analysiert werden.

Rissüberbrückende Wirkung von Filamentbündeln. Es gelang die Formulierung eines anschaulichen Abstraktionsmodells zur vereinfachten Beschreibung dieses Sachverhalts in heterogenen Matrices an einem Einzelriss (Haftbrückenmodell, TP A2). Mit dem Modell lassen sich Hypothesen zur morphologischen Konfiguration der Interphase zwischen Multifilamentgarn und Matrix formulieren. Diese sind eine wesentliche Voraussetzung zur zutreffenden Bewertung und Einordnung der Resultate mikroskopische-phänomenologischer Analysen.

Lastübertragungsmechanismen an Bewehrungsstößen und Endverankerungen. Konstruktive Bewehrungsdetails wie Übergreifungsstöße und Verankerungen von Bewehrungen wurden im TP B5 (Ortlepp) experimentell und im TP B6 (Richter) numerisch untersucht. Für ausgewählte Textilien konnten darauf aufbauend erforderliche Übergreifungs- und Verankerungslängen bestimmt werden.

Standardisierung von Versuchen. Schon früh wurde festgestellt, dass standardisierte Versuche entwickelt werden müssen, um vergleichbare Materialkennwerte zu erhalten. Besonders anerkannt sind mittlerweile die Dresdner Variante des Dehnkörperversuchs (TP B1) und des Auszugversuchs (TP B5). Beide Versuche werden voraussichtlich Eingang in die Recommendations des RILEM TC „Test methods and design of textile reinforced concrete“ finden. Weiterhin wurden im TP A2 die Konzeption und Konfiguration von Garnauszugversuchen erarbeitet und umgesetzt, die sowohl einen hohen Probendurchsatz bei Herstellung und Prüfung (Aspekt: statistische Absicherung der Ergebnisse) als auch eine hinreichend hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der experimentellen Ergebnisse garantieren.

Im TP D5 wurde eine Herstellungstechnik von plattenförmigen Prüfkörpern mit beidseitig definierter Oberflächenqualität und hinreichender Formstabilität entwickelt, an denen das Rissbildungsverhalten untersucht sowie planmäßig Risse eingestellt werden können.

Transport verschiedener Medien in Textilbeton. Eine weitere Erkenntnis aus dem TP D5 ist die Entwicklung einer Permeabilitätsmesszelle und Konzeption eines Messverfahrens zur Prüfung des Transportverhaltens von flüssigen und gasförmigen Medien infolge eines äußeren Druckgefälles. Das generierte Messverfahren gestattet In-situ-Messungen unter Last sowie zu variablen Dehnungszuständen eines Prüfkörpers mit multipler Rissbildung über einen größeren Beaufschlagungsbereich von ca. 280 cm². Weiterhin ist es nun möglich, die Auswirkung von Selbstheilungseffekten auf das Transportverhalten bei langzeitiger Wasserbeaufschlagung direkt nachzuweisen.

Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit. In den TP A2/A6 wurden klimatische Regimes zur beschleunigten Alterung von Filament- und Garnmaterial sowie von Verbundproben aus textiler

Bewehrung und zementgebundener Matrix etabliert. Bei diesen Untersuchungen konnten außerdem Temperaturgrenzen abgeleitet werden, bei deren Einhaltung pathologische Gefügeveränderungen in der Interphase zwischen Faser und Matrix weitgehend vermieden werden können.

Photogrammetrie. Durch die Entwicklung photogrammetrischer Verfahren der kaskadierten Bildanalyse zur Rekonstruktion räumlich-zeitlich aufgelöster Rissbilder in Belastungsversuchen konnte ein neues, leistungsfähiges Messwerkzeug für die Materialprüfung entwickelt und erprobt werden. Dadurch ist eine automatische vollflächige Detektion von feinen Rissen sowie deren quantitative Messung möglich. Über die Aufnahme und Auswertung von Bildsequenzen können somit räumlich-zeitlich hoch aufgelöste Rissbilder generiert und analysiert werden.

Segmentmodell zur Modellierung der Wechselwirkung zwischen Multifilamentgarnen und Feinbeton. Das Tragverhalten von Multifilamentgarnen mit einer Betonummantelung weist eine erhebliche Komplexität auf, die angemessen nur in einer mikroskopischen Betrachtungsebene zu erfassen ist, bei der einzelne Filamente oder zumindest Gruppen von Filamenten explizit als Tragelemente berücksichtigt werden. Hierzu wurde als Simulationsmodell das sogenannte Segmentmodell erarbeitet. Die mit diesem Modell durchgeführten Studien zeigen u. a., dass das stochastische bzw. unscharfe Verhalten von Materialeigenschaften und insbesondere der Betonzugfestigkeit in einem Modell zu berücksichtigen sind, um das Tragverhalten von Bauteilen realitätsnah beschreiben zu können. Weiterhin liefert das Segmentmodell wichtige Hinweise für die korrekte Durchführung von Auszugs- und Dehnkörperversuchen.

Tragfähigkeitsprognose mittels Multi-Referenzebenen-Modell. Für die modellbasierte numerische Prognose des Tragverhaltens verstärkter Tragwerke wurde im TP D2 das Multi-Referenzebenen-Modell (MRM) entwickelt. Damit kann das Tragverhalten von mehrschichtigen Composite-Faltwerken mit ebenbleibenden Schichten und Verschiebungsdiskontinuitäten an den Schichtgrenzen modelliert werden. Basis dieses FE-Modells ist das hybride Variationsprinzip nach PIAN-TONG. Als Erweiterung insbesondere für die gemeinsame Erfassung geometrischer und physikalischer Nichtlinearitäten wurde das modifizierte Variationsprinzip nach HELLINGER-REISSNER eingeführt. Für gedrungene Bauteile (z. B. Stützen) wurden gemischt-hybride finite Volumenelemente entwickelt. Für die numerische Analyse allgemeiner, komplexer Tragwerke wurden Materialmodelle auf Makroebene für Textilbeton bereitgestellt. Sie erfassen die wesentlichen Nichtlinearitäten von Feinbeton, Textil und Verbund.

Verallgemeinerte Unschärfemodelle. Kern der methodischen Entwicklung im TP E3 sind verallgemeinerte Unschärfemodelle zur Erfassung aleatorischer und epistemischer Unschärfe. Insbesondere die epistemische Unschärfe wird dabei mit Intervall- und Fuzzy-Größen quantifiziert. Zur Erfassung von Variationen, die von Raumkoordinaten oder der Zeit abhängen, wurden Fuzzy-Zufallsfunktionen, -felder und -prozesse eingeführt. Zur Berücksichtigung der Unschärfe bei der Ermittlung unscharfer Tragwerksantworten wurden effiziente Algorithmen vorgeschlagen und umgesetzt, z. B. α -Level-Optimierung, Fuzzy-Monte-Carlo-Simulation. Auf den Ergebnissen dieser unscharfen Tragwerksanalysen aufbauend wurden neue Sicherheitsmaße definiert (Fuzzy-Sicherheitsindex, Fuzzy-Versagenswahrscheinlichkeit). Durch die Bereitstellung eines Robustheitsmaßes kann nunmehr die Robustheit von Strukturen quantifiziert und als Bewertungskriterium beim Vergleich unterschiedlicher Entwürfe verwendet werden. Die Maximierung der Sicherheits- und des Robustheitsmaßes werden als Entwurfsziel einge-

setzt. Optimale Tragwerksentwürfe können mit der direkten Lösung der inversen Aufgabe auf der Basis von Clustermethoden effektiv selektiert werden.

Modellfreie Prognose des Langzeitverhaltens. Im TP E4 wurden grundlegende Methoden zur modellfreien numerischen Prognose des zeitabhängigen Tragverhaltens von Strukturen entwickelt und auf textilverstärkte Tragwerke angewendet. Für die Prognose mit beschleunigten Verfahren wurde ein Vorgehen entwickelt, mit dem Degradationsprozesse auf der Basis zeitgeraffter Versuchsergebnisse ohne Vorgabe einer parametrischen Alterungsfunktion beschrieben werden. Das Langzeitverhalten (unter Dauerlasten) wurde auf der Grundlage zeitbegrenzter Messreihen prognostiziert. Zur Erfassung der Unschärfe beim modellfreien Vorgehen wurden rekurrente neuronale Netze für Fuzzy-Daten entwickelt. Für das Training und die Analyse stehen leistungsfähige Algorithmen zur Verfügung. Die rekurrenten neuronalen Netze für Fuzzy-Daten werden auch als Ersatz für Materialmodelle in modellbasierten FE-Analysen eingesetzt.

Praktische Anwendung verallgemeinerter Unschärfemodelle und Effizienzsteigerung. Für den Transfer der unscharfen Strukturanalyse, Sicherheitsbeurteilung und Robustheitsbewertung in die Industrie wurden in den Transferprojekten T4 und T7 Methoden zur Effizienzsteigerung entwickelt. Effizienzsteigernd wirken die Reduktion der Anzahl unscharfer Eingangsgrößen und die Approximation der Tragwerksantworten mit Ersatzmodellen (Antwortflächen). Für die Reduktion wurden neue Methoden der varianzbasierten und der netzbasierten Sensitivitätsanalyse entwickelt. Mit netzbasierten Methoden (Approximation der Tragwerksantworten mittels künstlicher neuronaler Netze) werden maßgebende Eingangsgrößen auch bei nichtlinearer Abhängigkeit zuverlässig selektiert. Für den Entwurf von Tragwerken bei Unschärfe wurden Methoden der Fuzzy-Optimierung entwickelt. Darüber hinaus wurden Methoden zur unscharfen Datenanalyse bereitgestellt.

Baubetriebliche Abläufe. Im TP T6 wurden wesentliche baubetriebliche Erkenntnisse gewonnen, z. B. hinsichtlich Kosten, Terminen, Qualitäten, Umwelt, Sicherheit und Gesundheitsschutz. Hierzu wurden baubetriebliche Großversuche an Fertigteilen durchgeführt, bei denen Rahmenbedingungen hinsichtlich dieser Einflusskomponenten variiert wurden. Bspw. wurden alle notwendigen Teilprozesse erprobt und definiert. Aus den Ergebnissen der baubetrieblichen Großversuche ließen sich außerdem Anwendungsregeln ableiten, die bei Verstärkungsarbeiten mit textildbewehrtem Beton beachtet werden sollten.

Praxistaugliche Trockenmischung. Im Rahmen der baubetrieblichen Großversuche (T6) wurde die genaue Mischprozedur der neuen Feinbetonmischung PAGEL® TUDALIT® TF10 entwickelt und erstmalig unter praxisrelevanten Bedingungen erprobt. Die Trockenmischung wird als Sackware in 25-kg-Säcken auf die Baustelle geliefert. Das Anmischen mit Wasser erfolgt nach einer genau definierten Prozedur.

Die zuvor beschriebenen Erkenntnisse wurden zumeist innerhalb eines, maximal zweier Teilprojekte erarbeitet. Andere konnten aber nur durch die enge Zusammenarbeit mehrerer TP gewonnen werden, z. B.:

Anforderungen an die Konstruktion und den Aufbau technischer Textilien für den Einsatz als Bewehrung in einer Feinbetonmatrix. Aus der Zusammenarbeit von Textiltechnik (TP A1 Cherif), Glasfaserweben und Beschichtungsentwicklung (TP A5 Mäder), Massivbau (TP B1 Jesse, TP B5 Ortlepp, TP C1/D1/D4 Curbach), Simulation auf der Mikroebene (TP A3 Zastra)

und der Mesoebene (TP B3 Häußler-Combe) und durch die Anwendung optischer Messverfahren der digitalen Photogrammetrie (TP D3/Y1 Maas) wurden alle wesentlichen Parameter der mechanischen Lastabtragung und des Versagens identifiziert. Darauf aufbauend erfolgte im Fachgebiet Textiltechnik die Entwicklung und prototypische Umsetzung maschineller Voraussetzungen (prozessintegrierte Beschichtungssysteme mit IR-Trocknung, Nadelversatztechnik für symmetrische Bindungsstrukturen) sowie die systematisierte Bereitstellung technologischer Grundlagen für die Fertigung applikationsgerechter Bewehrungstextilien mit reproduzierbarer Qualität.

Aufklärung der wesentlichen Mechanismen der Korrosion von alkaliresistenten Glasfasern.

Dies gelang durch die Kooperation der Fachgebiete Textiltechnik (TP A1 Cherif), Baustoffe (TP A2/A6 Mechtcherine) und Oberflächenchemie (TP A5 Mäder).

Struktur-Wirkmechanismen polymerer Garnbeschichtungen. Die grundlegende Beschreibung dieser Wirkmechanismen nachträglich aufgebracht polymerer Garnbeschichtungen zur Homogenisierung des Faser-Matrix-Verbundes, zur Verbesserung der Alkaliresistenz von Glasfasergarnen und zur Erhöhung der Temperaturbeständigkeit von Carbongarnen gelang durch die enge Kooperation von TP A1 (Cherif), TP A5 (Mäder), TP A2 (Schorn), TP A6 (Mechtcherine) und TP B5 (Ortlepp).

Phänomenologische Beschreibung der Faser-Matrix-Interaktion. Dies und die stoffgesetzliche Modellierung der Interaktion von textiler Bewehrung und in der Matrix weitgehend stochastisch orientierten Kurzfasern ist das Ergebnis der Kooperation zwischen den TP A6 (Mechtcherine) und B5 (Ortlepp).

Verbundverhalten von Multifilamentgarnen. Das Verhalten wurde durch Kombination von Einzelfaser-Pull-out-Versuchen (TP A5 Mäder), Garnauszugversuchen (TP A2 Schorn, TP A6 Mechtcherine), Dehnkörperversuchen (TP B1 Jesse), und Textilauszugversuchen (TP B5 Ortlepp) untersucht. Im TP A3 (Zastrau) und im TP B6 (Richter) erfolgten die Entwicklung mechanischer Modelle zur Beschreibung der Verbundmechanismen, die numerische Simulation der Auszugsversuche und die Bestimmung von Verbundgesetzen. Daraus ergaben sich wesentliche Impulse und Richtungsvorgaben für die Entwicklung der textilen Bewehrungen in (TP A1/T1 Cherif).

Verbund zwischen Altbeton und Textilbeton-Verstärkungsschicht. Der Verbund zwischen diesen beiden Schichten ist ausschlaggebend für die Effektivität einer textilen Verstärkung. Um die relevanten Mechanismen aufklären zu können, war die enge Kooperation der Fachgebiete Massivbau (TP C1 Ortlepp), Mechanik (TP C2 Zastrau) und Photogrammetrie (TP D3 Maas) erforderlich und erfolgreich.

Textilbeton unter erhöhten Temperaturen. Die Beschreibung des Temperaturverhaltens ist Ziel einer Kooperation der Fachgebiete Textiltechnik und Massivbau im TP D6 (Curbach/Cherif). Dieses Thema wird Gegenstand weiterer Forschungen bleiben.

Photogrammetrie. Aufbauend auf den schon zuvor dargelegten Erkenntnissen von Prof. Maas wurde ein Mess- und Auswerteverfahren zur Charakterisierung des Rissbildungsverhaltens von Dehnkörpern sowie des Rissbildes mittels der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie in Zusammenarbeit der TP D3 bzw. Y1 (Maas) / B1 (Jesse) / C1 (Curbach) / D5 (Mechtcherine) entwickelt. Analyse und Interpretation von photogrammetrischen Messungen erfolgten mit Hilfe der Entwicklung von Messmodulen zur flächenbasierten Risserfassung (Rissbildanalyse auf

der Grundlage flächenbasierter Verformungsmessung) und dynamischer Intervallmessung (profilbasierte, dynamische Rissbreitenberechnung).

Tragwerksanalyse mit Unschärfe

- a) Entwicklung der fuzzy-stochastischen Finite-Elemente-Methode zur Bestimmung unscharfer Tragwerksantworten mit Anwendung des MRM (D2/E3 Möller/Graf/Kaliske/Sickert)
- b) Grundlegende Entwicklungen von neuartigen zeitabhängigen Sicherheitskonzepten auf der Basis von Fuzziness und Fuzzy-Randomness waren durch die Kooperation der Fachgebiete Statik und Dynamik (D2 Möller/Graf/Kaliske) und Tragwerkssicherheit (E3 Möller/Graf/Sickert) und künstliche Intelligenz (E4 Beer/Kaliske/Graf)
- c) Erweiterung der modellfreien Langzeitprognose bei Unschärfe mit der Entwicklung rekurrenter neuronaler Netze für Fuzzy-Daten (E3/E4 Sickert/Kaliske/Graf).

2.2 INTERNE KOOPERATION UND ORGANISATION

Wichtigstes Mittel für die interne Kooperation und den internen Erfahrungsaustausch war die regelmäßige Mitgliederversammlung. Hier wurden strategische Entscheidungen zur Ausrichtung des SFB vorbereitet, diskutiert und getroffen. Es wurde über die Arbeitsfortschritte in den einzelnen Teilprojekten berichtet, Konflikte - meist bedingt durch Ressourcenmangel - wurden gelöst, beispielsweise wenn mehrere Ideen gleichzeitig verfolgt werden sollten, dies aber infolge der verfügbaren Ressourcen nicht möglich war. Die Zusammenarbeit von Sprecher, Geschäftsführer, Teilprojektleitern und weiteren SFB-Mitgliedern gestaltete sich aufgrund der regelmäßigen Treffen ebenfalls sehr gut. Der Regelfall waren reibungslose und im gegenseitigen Einvernehmen getroffene Entscheidungen, eine gute Streitkultur bei sachlichen und fachlichen Differenzen und Entscheidungsfindung durch die Mehrheit bei den Mitgliederversammlungen.

Als sehr vorteilhaft hat sich die Bildung von aufgabenspezifischen, aber fächer- und projektbereichsübergreifenden Arbeitsgruppen erwiesen. Die Leitung dieser Arbeitsgruppen wurde i. d. R. an Nachwuchswissenschaftler übertragen. Somit erhielten diese die Chance zur Profilierung und die Möglichkeit, sich in leitenden Funktionen zu beweisen. Die einhellige Meinung der Betroffenen ist, dass sie durch diese Tätigkeit für ihre eigene Karriere vor allem durch Führungskompetenz profitiert haben. Einige sind mittlerweile sogar schon Professoren geworden. Folgende Arbeitsgruppen gab es im SFB528:

1. Textile Strukturen und Eigenschaften,
2. Material,
3. Berechnungsgrundlagen, Numerik-Experiment,
4. Experimente im Betonbau,
5. Holz und
6. Dauerfestigkeit/Dauerhaftigkeit.

Die gewählten Kooperationsformen und die Arbeit in den Arbeitsgruppen war so erfolgreich, dass mit dem Abschluss des SFB alle Voraussetzungen erfüllt sind, um eine Verfahrenszulassung für die Verstärkung mit Textilbeton beim Deutschen Institut für Bautechnik DIBt, Berlin gestellt werden kann. Im Rahmen eines solchen Zulassungsverfahrens müssen zahlreiche Tests für die konk-

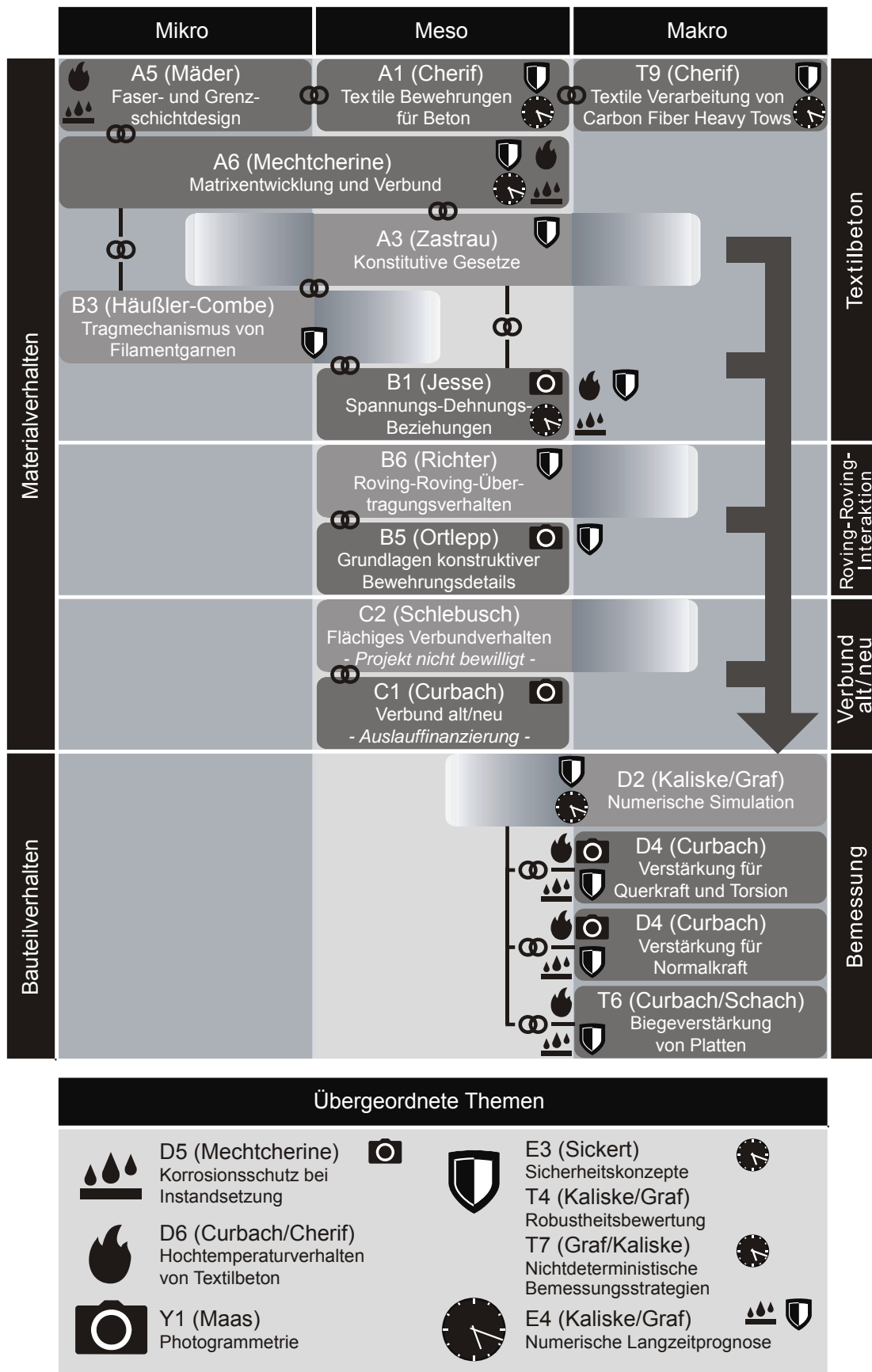


Bild 6: Strukturelle Gliederung des Sonderforschungsbereiches 528, 4. Förderperiode

ret ausgewählten Materialien erbracht werden. Die Tatsache, dass sich zahlreiche Industrieunternehmen in einem Markenverband zusammengeschlossen haben, um gemeinsam vor allem die erheblichen finanziellen Lasten zu tragen, zeigt eindeutig, dass durch die Grundlagenentwicklungen im SFB528 alle Voraussetzungen für die baupraktische Anwendung geschaffen werden konnten.

Die interne Zusammenarbeit und Kooperation lief natürlich nicht immer reibungslos. Schwierigkeiten gab es z. B. bei:

1. der Koordinierung der Teilfragestellungen;
2. Reaktionen der Kooperationspartner bei sich ändernder Fragestellung aufgrund neuer Erkenntnisse während der Projektlaufzeit;
3. der Kompensation der Stockung im Arbeitstempo bei Generationswechsel in den Teilprojekten (WMA scheiden nach Promotion aus und neue WMA ohne Erfahrungen steigen neu ein);
4. der Kompensation bei Teilprojektleiterwechsel (geplante – z. B. Ruhestand der Professoren und Neuberufungen - und ungeplante Wechsel – z. B. „Karrieresprünge“ bei Nachwuchswissenschaftlern (Prof. Beer, Dr. Proske, Dr. Jesse));
5. der Durchsetzungskraft der Arbeitsgruppenleiter oder
6. bei teilweise langen Promotionszeiten infolge der Häufung der Verantwortlichkeiten oder Aufgaben.

Dennoch wird insgesamt ein sehr positives Fazit der internen Struktur gezogen. Sehr bewährt haben sich die themenspezifischen und fächerübergreifenden Arbeitsgruppen und deren selbständige und eigenverantwortliche Leitung und Organisation durch den wissenschaftlichen Nachwuchs. Erfahrungen, Ideen und Vorschläge aus den Arbeitsgruppen wurden i. d. R. für die Neuausrichtung des SFB für die Finanzierungsanträge der folgenden Förderperioden erfolgreich aufgegriffen. Diese Vorgehensweise war gleichzeitig Gewähr dafür, dass sich alle Ebenen vom Teilprojektleiter über die wissenschaftlichen Mitarbeiter bis hin zu den Technikern und studentischen Hilfskräften voll Energie und Begeisterung für das Erreichen des Gesamtzieles engagiert haben.

Anderen SFBs möchten wir empfehlen, die Übertragung von Verantwortung und Kompetenzen an den wissenschaftlichen Nachwuchs noch frühzeitiger anzugehen. Als besonders wichtig erachten wir außerdem die aktive Förderung einer selbständigen Organisation der Doktoranden, die Einrichtung eines entsprechenden Forums (z. B. analog des Doktorandenkolloquiums der Fakultät Bauingenieurwesen der TUD) und die aktive Betreuung der Doktoranden durch ein Mentorenprogramm (versuchsweise bereits in der 4. Förderperiode des SFB528 durchgeführt), damit die in den ersten beiden Förderperioden des SFB528 zu beklagenden langen Promotionszeiten von teilweise über sechs Jahren nicht mehr auftreten.

Zwischen der TU Dresden und den außeruniversitären Forschungseinrichtungen im Großraum Dresden existiert bereits eine langjährige und erfolgreiche Kooperation. Entsprechend sehr gut und reibungslos gestaltete sich auch die Zusammenarbeit im Rahmen des SFB528. In vielen Fällen sind die Führungskräfte der außeruniversitären Einrichtungen gleichzeitig Inhaber einer Profes-

sur an der TU Dresden oder haben langjährige Lehraufträge an der TU. Auch im SFB528 gab es bereits vor dem Sonderforschungsbereich eine enge Kooperation zwischen der Textiltechnik und dem Institut für Polymerforschung (IPF). Während der Laufzeit des SFB528 habilitierte sich die am IPF tätige Teilprojektleiterin Dr. Mäder an der Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden (2001) und wurde 2009 zur Honorarprofessorin an der TU Dresden, Institut für Werkstoffwissenschaft, bestellt. Da die außeruniversitären Einrichtungen kein Promotionsrecht besitzen, laufen die Promotionsverfahren an der fachlich nächstliegenden Fakultät der TU Dresden. So entsteht eine partnerschaftliche und von gutem Willen geprägte Zusammenarbeit. Die außeruniversitären Einrichtungen bringen eine exzellente personelle und apparative Ausstattung in die Zusammenarbeit ein und ermöglichen den universitären Partnern so Zugriff auf Ressourcen, die die Universität oft nicht oder nicht in der erforderlichen Qualität und Quantität bieten kann.

Bei der Ausgabe der in einem Haushaltsjahr bewilligten Mittel wurde auch die von Seiten der DFG angebotene Flexibilität genutzt. So konnten Mittel zwischen den einzelnen Kostengruppen, z.B. Personal- und sächlichen Verwaltungsausgaben oder Investitionskosten bzw. auch umgekehrt im Rahmen der anfangs gültigen Grenze von 30% je nach Bedarf umdisponiert werden. Solche Möglichkeiten wurde u.a. auch für Elternzeitvertretungen genutzt.

Im Rahmen der Möglichkeiten wurden auch Mittel zwischen den Teilprojekten umdisponiert. Vor allem in den Anlaufphasen der einzelnen Förderperioden wurden aufgrund der Schwierigkeiten bei der kurzfristigen und kompetenten Besetzung aller Stellen Personalmittel hin zu Sachmittelausstattung und zu Investitionen umdisponiert. Durch eine noch bessere apparative Ausstattung konnte in vielen Fällen der Zeitverlust durch die späte Stellenbesetzung ausgeglichen werden. Dadurch wurde eine apparative Ausstattung möglich, die zum Zeitpunkt der jeweiligen Antragstellung nicht absehbar waren und damit nicht beantragt worden sind. Auch wurde z. B. im Fachbereich Textiltechnik, um nur einige wenige Beispiele zu nennen, die Beschaffung von Kleinteilen und Kleingeräten für den Ausbau der Nähwirkanlagen sowie der Prüftechnik (Ablaufgatter, Kettbaumantriebe, Sensoren, Erweiterung Zugprüfmaschinen, Aufbau Dauerstandsversuch) möglich.

Die Flexibilität des Einsatzes der in einem Haushaltsjahr bewilligten Mittel wurde immer dann und nur dann genutzt, wenn dies zum Nutzen des Gesamt-SFBs und zur Sicherung des wissenschaftlichen Erfolgs nötig war. Dies war beispielsweise der Fall, wenn apparative Ausstattungen erforderlich wurden, die in dem betreffenden Haushaltsjahr so nicht eingeplant gewesen waren. Entschieden wurde jeweils nach objektiven fachlichen und sachlichen Kriterien, bspw. wenn es um die Zuweisung erhöhter Personalressourcen bei für den Gesamt-SFB wichtigen Fragestellungen in einzelnen Teilprojekten ging. Auch wurden teilweise Investitionsmittel bei der Beschaffung von wissenschaftlichen Geräten aufgestockt, die für die Bearbeitung der wissenschaftlichen Kernfragen wesentliche Arbeitsvoraussetzung waren. Die Umverteilung von Mitteln wurde jeweils durch Mehrheitsbeschluss der Mitgliederversammlung auf Vorschlag der Gremien des SFB (z. B. Gerätekommission) reibungsfrei und konsensorientiert beschlossen.

Die interne Vergabe der zentral bewilligten Mittel richtete sich nach dem Bedarf der Teilprojekte an SHK und WHK zur Bearbeitung des wissenschaftlichen Arbeitsprogramms. Auch wurde zeitnah auf Bedarfe reagiert, die sich eventuell erst während der Laufzeit der Teilprojekte ergab. Die Verteilung der Gelder für SHK/WHK wurde jeweils in der Mitgliederversammlung mehrheitlich be-

schlossen. Die Reisekosten wurden nach sachlichen Kriterien wie der Bedeutung und Ansehen der wissenschaftlichen Konferenz auf die einzelnen Teilprojekte verteilt, da eine fachöffentlichkeitswirksame Verbreitung der Forschungsergebnisse angestrebt wurde.

2.3 AUSSENWIRKUNG

Wir sind stolz, sagen zu können, dass es uns in sehr kurzer Zeit gelungen ist, das Thema Textilbeton weltweit bekannt zu machen. Auch nach internationaler Wahrnehmung ist Deutschland heute Weltmarktführer, was den Textilbeton betrifft. Dies ist uns durch intensive Verbreitung der gewonnenen Erkenntnisse im wissenschaftlichen und außerwissenschaftlichen Umfeld - inkl. der allgemeinen Öffentlichkeit - erfolgreich gelungen.

2.3.1 Wissenschaftliches Umfeld

Um die Erkenntnisse der Grundlagenforschung national und international zu verbreiten, war die Organisation und die Teilnahme an Konferenzen ein Hauptschwerpunkt der Arbeit des SFB. National sind vor allem die Fachkonferenzen zu nennen, die gemeinsam mit dem SFB532 an der RWTH Aachen organisiert und durchgeführt wurden. Seit 2009 wird in Verbindung mit den CTRS außerdem eine Anwendertagung des Deutschen Zentrums Textilbeton (DZT) durchgeführt.

- 1. Kolloquium Textilbeton: 15./16. Februar 2001 in Aachen,
- CTRS2: 29.9.-1. Oktober 2003 in Dresden,
- CTRS3: 06.-07. September 2006 unter Schirmherrschaft von RILEM in Aachen, offizieller Titel: 1st International RILEM Symposium on Textile Reinforced Concrete (ICTRC 2006),
- CTRS4 und 1. Anwendertagung Textilbeton: 03.-05. September 2009 in Dresden,
- 2. Anwendertagung: 1. Oktober 2010 in Dresden,
- CTRS5: 6.-10. September 2010 unter Schirmherrschaft von RILEM in Aachen als Teil der International RILEM Conference on Material Science (MatSci), offizieller Titel: 2nd ICTRC Textile Reinforced Concrete,
- CTRS6 und 3. Anwendertagung Textilbeton: 19.-20. September 2011 in Berlin.

Außerdem nahmen Forscher des SFB regelmäßig an den jährlich stattfindenden Ulmer Betontagen teil, eine der bedeutendsten nationalen Veranstaltungen zur Information der Baupraxis. Aber auch auf vielen internationalen Konferenzen wurden Ergebnisse des SFB528 der Fachöffentlichkeit präsentiert. Besonders erwähnenswert ist, dass teilweise eigene Sessions für die Textilbetonforschung eingerichtet worden sind, z. B.:

- Ferro9: 9th International Symposium on Ferrocement im Mai 2009 in Bali (Indonesia); Key-note lecture über Textilbeton,
- ACI Spring Convention 2010, Chicago (Hier gab es einen eigenen Track Textilbeton, wie auch schon mehrmals in den Jahren davor.),
- 18th International Conference on Computer Methods in Mechanics (CMM2009) in Zielona Góra (Poland) vom 18. bis 21. Mai 2009; Dr. Mike Richter war hier Koordinator des Minisymposiums MS6 "textile reinforced concrete".

oder die Teilnahme an regelmäßig stattfinden Konferenzen führender internationaler Institutionen, die sich mit Beton befassen, z. B.:

- Konferenzen des American Concrete Institutes ACI:
 - ACI Spring Convention 2005, New York (USA),
 - ACI Fall Convention 2009, New Orleans, Louisiana (USA),
 - ACI Spring Convention 2010, Chicago (USA),
 - ACI Fall Convention 2010, Pittsburgh (USA),
- Konferenzen der fib - fédération internationale du béton:
 - fib 2004 Avignon,
 - fib 2005 Budapest,
 - fib 2009 London,
 - fib 2011 Prag (Keynote lecture über Textilbeton).

Darüber hinaus wurden Ergebnisse mit besonderem Bezug zur Verbundwerkstoffforschung auf folgenden internationalen Fachkolloquien kommuniziert:

- SAMPE (Society of Material and Process Engineering) 06 in Long Beach 2006, 07 in Baltimore 2007 und 09 in Baltimore 2009 (alle USA),
- International Conference on Composite Materials 16, Kyoto, Japan, 2007,
- 15th International Conference on Composite Structures, Porto, Portugal, 2009.

Innerhalb der vier Förderperioden des SFB 528 nahmen viele Mitarbeiter des SFB an weiteren verschiedensten (nationalen und) internationalen Konferenzen teil. Wesentliche können der folgenden chronologischen Auflistung entnommen werden. (Die CTRS-Tagungen der SFB 528 und 532 sind hier nicht dargestellt.)

Tabelle 4: Wesentliche Fachkonferenzen (ohne CTRS)

Jahr	Konferenz		Ort
06/2001	ICCOSAR	Eighth international Conference on Structural Safety and Reliability	Newport Beach (USA)
06/2001		Silkatechnischens Seminar im Rahmen des SFB 285 "Partikelwechselwirkungen"	Freiberg (D)
07/2001	FRPRCS-5	5th International Conference on Fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures (mit Keynote Lecture)	Cambridge (UK)
06/2003	HPFRCC 4	High Performance Fiber Reinforced Cement Composites: International RILEM Workshop	Ann Arbor (USA)
10/2003		Conference on Interfaces and Interphases in Multicomponent Materials	Balatonfüred (Ungarn)
09/2003	IBAUSIL ¹⁾	Internationale Baustofftagung	Weimar (D)
10/2003	GRC2003	13th Congress of the International Glassfibre Reinforced Cement Association	Barcelona (Spanien)
03/2004		Workshop "Erweiterter Einsatz von Polymerbeton"	Halle (D)
04/2004	fib	International <i>fib</i> Symposium	Avignon (Frankreich)

Jahr	Konferenz		Ort
09/2004	BEFIB	6th Int. RILEM Symposium of Fibre Reinforced Concrete	Varenna (Italien)
04/2005	fib	International <i>fib</i> Symposium	Budapest (Ungarn)
05/2005	ACI	Spring Convention 2005	New York (USA)
05/2005		Materials`Days, Interface Effects in Functional Materials	Rostock (D)
11/2005	ICCRRR	International Conferences on Concrete Repair, Rehabilitation and Retro-fitting	Kapstadt (Südafrika)
04/2006	ISPIC	International Symposium on Polymers in Concrete	Guimaraes (Portugal)
09/2006	IBAUSIL ¹⁾	Internationale Baustofftagung	Weimar (D)
09/2006	ICOSECS 5	International Conference of the Chemical Society of the South-East European Countries	Ohrid (Mazedonien)
11/2006	ACCM-5	The Fifth Asian-Australasian Conference on Composite Materials	
04-05/2006	SAMPE	Society of Material and Process Engineering	Long Beach (USA)
05/2006		Nanotech	Boston (USA)
06/2007	SAMPE	Society of Material and Process Engineering	Baltimore (USA)
07/2007	ICCM-16	International Conference on Composite Materials 16	Kyoto (Japan)
10/2007	DAfStb	48. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton	Dresden (D)
02/2008	REC	Reliable Engineering Computing	Savannah (USA)
03/2008	GRCA2008	Glassfibre Reinforced Concrete Association	Prag (Tschechien)
06/2008	WCCM	World Congress on Computational Mechanics	Venedig (Italien)
09/2008	BEFIB	7th Int. RILEM Symposium of Fibre Reinforced Concrete	Chennai (Indien)
09/2008	CONCREEP 8	8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures	Ise-Shima (Japan)
11/2008	ICCRRR	International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting	Kapstadt (Südafrika)
02/2008	REC	Reliable Engineering Computing	Savannah (USA)
07/2008	WCCM	World Congress on Computational Mechanics	Venedig (Italien)
05/2009	CMM	Computer Methods in Mechanics	Zielona Gora (Polen)
05/2009	Ferro9	9th International Symposium on Ferrocement	Bali (Indonesien)
06/2009	fib	International <i>fib</i> Symposium	London (GB)
07/2009	ICCM-17	17th Int. Conf. On Composite Materials	Edinburgh (GB)
05/2009	SAMPE	Society of Material and Process Engineering	Baltimore (USA)

Jahr	Konferenz		Ort
05/2009	ICCS15	15th International Conference on Composite Structures	Porto (Portugal)
09/2009	IBAUSIL ¹⁾	Internationale Baustofftagung	Weimar (D)
11/2009	ACI	Fall Convention	New Orleans (USA)
11/2009	ACM	International Conference on Advanced Concrete Materials	Stellenbosch (Südafrika)
03/2010	REC	Reliable Engineering Computing	Singapore (Singapur)
03/2010	ACI	Spring Convention	Chicago (USA)
05/2010	ECCM	European Conference on Computational Mechanics	Paris (Frankreich)
05/2010	FraMCoS 7	7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures	Seogwipo (Korea)
06/2010	fib	3rd International fib Congress	Washington (USA)
07/2010	WCCM	World Congress on Computational Mechanics	Sydney (Australien)
09/2010	ECF 18 ¹⁾	European Conference on Fracture Mechanics	Dresden
09/2010	IIMM 2010	Interfaces and Interphases in Multicomponent Materials	Sheffield (GB)
10/2010	ACI	Fall Convention	Pittsburgh (USA)
10/2010	SLD	Service Life Design for Infrastructure	Delft (Niederlande)
06/2011	fib	International <i>fib</i> Symposium	Prag (Tschech. Rep.)
06/2011	HPFRCC 6	High Performance Fiber Reinforced Cement Composites: International RILEM Workshop	Ann Arbor (USA)

¹⁾ Konferenz in Deutschland mit internationaler Beteiligung

Außer auf Konferenzen wurden die Ergebnisse des SFB528 vor allem durch Veröffentlichungen in nationalen und internationalen Fachzeitschriften verbreitet. Erwähnt werden sollen z. B.:

- ACI Journal
- Advances in Materials Science and Engineering
- Beton- und Stahlbetonbau
- Cement & Concrete Composites
- Cement and Concrete Research
- Composites Science and Technology
- Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering
- Computers & Structures
- Engineering Structures
- International Journal of Reliability and Safety
- Journal of Non-Crystalline Solids
- Journal of Photogrammetry and Remote Sensing
- Journal of the Textile Institute

- Langmuir
- Materials and Structures
- Materials Science & Engineering A
- Open Materials Science Journal
- Textile Research Journal
- Structure and Infrastructure Engineering

Besonders hervorzuheben ist das Juni-Heft 2004 der rezensierten Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau, das komplett Artikeln zur Erforschung des neuartigen Verbundwerkstoffs Textilbeton gewidmet war (Bild 7). Ausgewählte Veröffentlichungen des SFB sind nachfolgender Liste zu entnehmen. Aufgeführt sind ausschließlich Arbeiten, die in Publikationsorganen mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung zum Zeitpunkt der Erstellung des Abschlussberichts erschienen oder endgültig angenommen sind, und Buchveröffentlichungen.

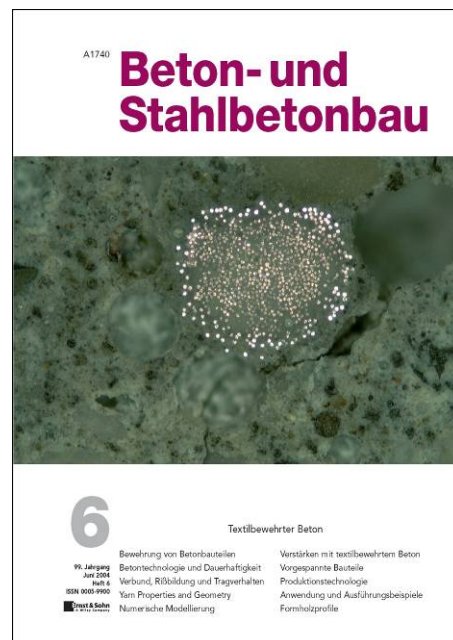


Bild 7: Titelseite des Sonderhefts der rezensierten Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau im Juni 2004

- [1] AZZAM, A.; RICHTER, M.: Investigation of stress transfer behaviour in textile reinforced concrete with application to reinforcement overlapping and development lengths. In: CURBACH, M. (Hrsg.); ORTLEPP, R. (Hrsg.): *Textilbeton in Theorie und Praxis: Tagungsband zum 6. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS6), Berlin, 19.–20.9.2011*. TU Dresden : Eigenverlag, 2011, S. 103-116
- [2] BAYER, D.; RICHTER, M.: Zur Anwendung bruchmechanischer Konzepte für die Modellierung der rissüberbrückenden Wirkung von Rovings. In: CURBACH, M. (Hrsg.); JESSE, F. (Hrsg.): *Textilbeton in Theorie und Praxis: Tagungsband zum 4. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung*. TU Dresden : Eigenverlag, 2009, S. 325-336.

- [3] BEER, M.; LIEBSCHER, M.: Designing robust structures a nonlinear simulation based approach. In: *Computers & Structures* 86(2008)10, S. 1102-1122 – doi:10.1016/j.compstruc.2007.05.037
- [4] BEYER, F.; ZASTRAU, B. W.: Predicting the Uniaxial Material Properties of TRC and Implications for a Biaxial Model. In: *Proceedings of the ACI Fall 2010 Convention Pittsburgh (Textile Reinforced Concrete – Modern Developments)*, 2010 (zur Veröffentlichung angenommen).
- [5] BEYER, F.; ZASTRAU, B. W.; JESSE, D.; JESSE, F.: On the Load Bearing Behavior of Textile Reinforced Concrete under Biaxial Loading. In: *Proceedings of the International RILEM Conference of Material Science (MatSci), Volume I: 2nd ICTRC Textile Reinforce Concrete*, 2010, S. 295-305.
- [6] BEYER, F.; ZASTRAU B. W.: Aspekte der Modellierung des Tragverhaltens von Textilbeton unter biaxialer Beanspruchung. In: CURBACH, M. (Hrsg.); ORTLEPP, R. (Hrsg.): *Textilbeton in Theorie und Praxis: Tagungsband zum 6. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS6)*, Berlin, 19.–20.9.2011. TU Dresden : Eigenverlag, 2011, S. 157-174.
- [7] BUTLER, M., HEMPEL, S., MECHTCHERINE, V.: Modelling of ageing effects on crack-bridging behaviour of AR-glass multifilament yarns embedded in cement-based matrix. *Cement and Concrete Research* 41, (2011), pp. 403-411, doi:10.1016/j.cemconres.2011.01.007
- [8] BUTLER, M., MECHTCHERINE, V., HEMPEL, S.: Auswirkungen der Matrixzusammensetzung auf die Dauerhaftigkeit von Betonen mit textilen Bewehrungen aus AR-Glas. *Beton- und Stahlbetonbau* 104, (2009), S.485 - 495, doi: 10.1002/best.200900003.
- [9] BUTLER, M., MECHTCHERINE, V., HEMPEL, S.: Durability of textile-reinforced concrete made with AR glass fibre - Effect of the matrix composition. *Materials and Structures* 43 (2010), S. 1351-1368, doi: 10.1617/s11527-010-9586-8.
- [10] BUTLER, M., MECHTCHERINE, V., HEMPEL, S.: Experimental investigations on the durability of fibre-matrix interfaces in textile-reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites* 31 (2009), S. 221-231, doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.02.005.
- [11] CURBACH, M. (Hrsg.); JESSE, F. (Hrsg.): *Textilbeton in Theorie und Praxis: Tagungsband zum 4. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung*. TU Dresden : Eigenverlag, 2009. 608 S. – ISBN 978-3-86780-122-5
- [12] CURBACH, M. (Hrsg.); ORTLEPP, R. (Hrsg.): *Textilbeton in Theorie und Praxis: Tagungsband zum 6. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS6)*, Berlin, 19. und 20.9.2011. – SFB 528, Technische Universität Dresden, D-01062 Dresden : Eigenverlag, 2011. 444 S. – ISBN 978-3-86780-245-1
- [13] DE ANDRADE SILVA, F.; BUTLER, M.; MECHTCHERINE, V.; ZHU, D.; MOBASHER, B.: Strain rate effect on the tensile behaviour of textile-reinforced concrete under static and dynamic loading. In: *Materials Science and Engineering A* 528 (2011) 3, S. 1727-1734 – doi: 10.1016/j.msea.2010.11.014.
- [14] EHLIG, D.; JESSE, F.; CURBACH, M.: Textilbeton verstärkte Platten unter Brandbelastung. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 105 (2010) 2, S. 102-110

- [15] FREITAG, S.; BEER, M.; GRAF, W.; KALISKE, M.: Lifetime prediction using accelerated test data and neural networks. In: *Computers & Structures* 87 (2009), S. 1187-1194 – doi:10.1016/j.compstruc.2008.12.007
- [16] FREITAG, S.; GRAF, W.; KALISKE, M.: Identification and prediction of time-dependent structural behavior with recurrent neural networks for uncertain data. In: BEER, M. (Hrsg.); MUHANNA, R. L. (Hrsg.); MULLEN, R. L. (Hrsg.): *Proceedings of the 4th International Workshop on Reliable Engineering Computing (REC 2010), Singapore, 2010*. Singapore : Research Publishing Services, 2010, S. 577-596 – doi:10.3850/978-981-08-5118-7_026
- [17] FREITAG, S.; GRAF, W.; KALISKE, M., SICKERT, J.-U.: Prediction of time-dependent structural behaviour with recurrent neural networks for fuzzy data. In: *Computers & Structures* 89 (2011), S. 1971-1981 – doi:10.1016/j.compstruc.2011.05.013
- [18] GAO, S.-L.; MÄDER, E.; PLONKA, R.: Nanocomposite coatings for healing surface defects of glass fibers and improving interfacial adhesion. In: *Composites Science and Technology* 68 (2008), S. 2892-2901
- [19] GAO, S.-L.; ZHUANG, R.-C.; ZHANG, J.; LIU, J.; MÄDER, E.: Glass Fibers with Carbon Nanotube Networks as Multifunctional Sensors. In: *Advanced Functional Materials* 20 (2010), S. 1885-1893
- [20] GAO, S.-L.; MÄDER, E.: Nano Reinforcements in Surface Coatings and Composite Interphases. In: REDDY, B. S. R. (Hrsg.): *Advances in nanocomposites – synthesis, characterization and industrial applications, Rijeka, Intech 2011* – ISBN 978-953-307-165-7
- [21] GRAF, W.; FREITAG, S.; KALISKE, M.; SICKERT, J.-U.: Recurrent Neural Networks for Uncertain Time-Dependent Structural Behavior. In: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 25 (2010) S. 322-333
- [22] GRAF, W.; HOFFMANN, A.; MÖLLER, B.; SICKERT, J.-U.; STEINIGEN, F.: Analysis of textile reinforced concrete structures under consideration of non-traditional uncertainty models. In: *Engineering Structures* 29 (2007) 12, S. 3420-3431
- [23] GRAF, W.; JENKEL, C.; PANNIER, S.; SICKERT, J.-U.; STEINIGEN, F.: Numerical structural monitoring with the uncertainty model fuzzy randomness. In: *International Journal of Reliability and Safety* 3 (2009) 1/2/3, S. 218-234
- [24] GRAF, W.; SICKERT, J.-U.; PANNIER, S.; KALISKE, M.: Robust design with uncertain data and response surface approximation. In: BEER, M. (Hrsg.); MUHANNA, R. L. (Hrsg.); MULLEN, R. L. (Hrsg.): *Proceedings of the 4th International Workshop on Reliable Engineering Computing (REC 2010), Singapore, 2010*. Singapore : Research Publishing Services, 2010, pp. 554-574 – doi:10.3850/978-981-08-5118-7_027
- [25] HAMPEL, U., MAAS, H.-G.: Cascaded image analysis for dynamic crack detection in material testing. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (2009), S. 345-350 – doi: 10.1016/j.isprsjprs.2008.12.006
- [26] HARTIG, J.; HÄUßLER-COMBE, U.: A model for the uniaxial tensile behaviour of Textile Reinforced Concrete with a stochastic description of the concrete material properties. In: BICANIC,

- N. (Hrsg.); DE BORST, R. (Hrsg.); MANG, H. (Hrsg.); MESCHKE, G. (Hrsg.): *Computational Modeling of Concrete Structures - Proceedings of the EURO-C 2010*. London : Taylor & Francis, 2010, S. 153-162
- [27] HARTIG, J.; HÄUßLER-COMBE, U.; SCHICKTANZ, K.: Influence of bond properties on the tensile behaviour of Textile Reinforced Concrete. In: *Cement and Concrete Composites* 30 (2008) 10, S. 898-906 - doi: 10.1016/j.cemconcomp.2008.08.004
- [28] HARTIG, J.; JESSE, F.; SCHICKTANZ, K.; HÄUßLER-COMBE, U.: Influence of experimental setups on the apparent uniaxial tensile load-bearing capacity of Textile Reinforced Concrete specimens. In: *Materials and Structures* – doi: 10.1617/s11527-011-9775-0 (online first)
- [29] HAUSDING, J.; CHERIF, C.: Improvements in the warp knitting process and new patterning techniques for stitch-bonded textiles. In: *The Journal of the Textile Institute* 101 (2010) 3, S. 187-196 - doi:10.1080/00405000802370354
- [30] HAUSDING, J.; LORENZ, E.; ORTLEPP, R.; LUNDAHL, A.; CHERIF, C.: Application of stitch-bonded multi-pplies made by using the extended warp knitting process: reinforcements with symmetrical layer arrangement for concrete. In: *The Journal of the Textile Institute* 102 (2011) - doi: 10.1080/00405000.2010.515729
- [31] HÄUßLER-COMBE, U.; HARTIG, J.: Bond and failure mechanisms of textile reinforced concrete (TRC) under uniaxial tensile loading. In: *Cement and Concrete Composites* 29 (2007) 4, S. 279-289 - doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.12.012
- [32] HÄUßLER-COMBE, U.; JESSE, F.: Rechnerische Untersuchungen zum einaxialen Tragverhalten von Textilbeton. In: *Bauingenieur* 80 (2005) 3, S. 131-141
- [33] JESSE, F.; CURBACH, M.: Verstärken mit Textilbeton. In: BERGMEISTER, K. (Hrsg.); FINGERLOOS, F. (Hrsg.); WÖRNER J.-D. (Hrsg.): *Beton-Kalender 2010*. Berlin : Ernst & Sohn, 2009, S. 457-565
- [34] KOECKRITZ, U.; CHERIF, CH.; WEILAND, S.; CURBACH, M.: In-Situ Polymer Coating of Open Grid Warp Knitted Fabrics for Textile Reinforced Concrete Application. In: *Journal of Industrial Textiles (2010)* - doi:10.1177/1528083709102938
- [35] LIEBOLDT, M., MECHTCHERINE, V.: Multiple cracking in textile reinforced Concrete and its effect on the transport of water and gases. In: *Proceedings of the Second International Symposium on Service Life Design for Infrastructure – SLD 2010, 4-6 October 2010, Delft, The Netherlands*. Bagneux : RILEM, 2010, S.107-114
- [36] LIEBOLDT, M., MECHTCHERINE, V.: Transport of Liquids and Gases through Textile Reinforced Concrete. In: BRAMESHUBER, W. (Hrsg.): *Proceedings of International RILEM Conference on Material Science, volume I: Textile Reinforced Concrete (2nd ICTRC), RILEM PRO 77*, Bagneux : RILEM, 2010, S. 343-351
- [37] LORENZ, E.; ORTLEPP, R.; HAUSDING, J.; CHERIF, C.: Effizienzsteigerung von Textilbeton durch Einsatz textiler Bewehrungen nach dem erweiterten Nähwirkverfahren. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011) 1, S. 21-30 – doi: 10.1002/best.201000072

- [38] MAAS, H.-G., HAMPEL, U.: Photogrammetric Techniques in Civil Engineering Material Testing and Structure Monitoring. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72 (2006) 1, S. 39-45 (ausgezeichnet mit dem W. Talbert Abrams Award 'Honorable Mention' der ASPRS)
- [39] MECHTCHERINE, V., LIEBOLDT, M.: Permeation of water and gases through cracked textile-reinforced concrete. In: *Cement and Concrete Composites* 33 (2011) 7, S. 725-734 – doi:10.1016/j.cemconcomp
- [40] MÖLLER, B.; BEER, M.: Engineering computation under uncertainty capabilities of non-traditional models. In: *Computers & Structures* 86 (2008) 10, S. 1024-1041 – doi: 10.1016/j.compstruc.2007.05.041
- [41] MÖLLER, B.; BEER, M.: *Fuzzy Randomness - Uncertainty in Civil Engineering and Computational Mechanics*. Berlin : Springer Verlag, 2004
- [42] MÖLLER, B.; GRAF, W.; BEER, M.: Fuzzy structural analysis using α -level optimization. In: *Computational Mechanics* 26 (2000) 6, S. 547–565.
- [43] MÖLLER, B.; GRAF, W.; HOFFMANN, A.; SICKERT, J.-U.; STEINIGEN, F.: Tragwerke aus Textilbeton – Berechnungsmodelle, Anwendungen. In: *Bautechnik* 82 (2005) 11, S. 782-795 – doi:10.1002/bate.200590231
- [44] MÖLLER, B.; GRAF, W.; SICKERT, J.-U.; STEINIGEN, F.: Fuzzy random processes and their application to dynamic analysis of structures. In: *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems (MCMDS)* 15 (2009) 6, S. 515-534 – doi: 10.1080/13873950903375338
- [45] MÖLLER, B.; GRAF, W.; SICKERT, J.-U.; BEER, M.: Time-dependent reliability of textile strengthened RC structures under consideration of fuzzy randomness. In: *Computers and Structures* 84 (2006) 8-9, S. 585-603
- [46] MÖLLER, B.; GRAF, W.; HOFFMANN, A.; STEINIGEN, F.: Numerical simulation of structures with textile reinforcement. In: *Computers and Structures* 83 (2005) 19-20, S. 1659-1688 – doi: 10.1016/j.compstruc.2004.11.024
- [47] MÖLLER, B.; LIEBSCHER, M.; PANNIER, S.; GRAF, W.; SICKERT J.-U.: An inverse solution of the lifetime-oriented design problem. In: *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance* 7 (2011) 5, S. 325-340 – doi: 10.1080/15732470802658946
- [48] MÖLLER, B.; REUTER, U.: Prediction of uncertain structural responses using fuzzy time series. In: *Computers and Structures* 86 (2008) 10, S. 1123-1139 – doi: 10.1016/j.compstruc.2007.09.002
- [49] MÖLLER, B.; REUTER, U.: *Uncertainty Forecasting in Engineering*. Berlin : Springer, 2007
- [50] ORTLEPP, R.; SCHLADITZ, F.; CURBACH, M.: Textilbetonverstärkte Stahlbetonstützen. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011) 9, S. 640–648 – doi: 10.1002/best.201100017

- [51] ORTLEPP, R.; LORENZ, A.; CURBACH, M.: Umschnürungswirkung textilbewehrter Verstärkungen im Lasteinleitungsbereich von Stützen in Abhängigkeit von der Geometrie. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011) 7, S. 490–500 – doi: 10.1002/best.201100018
- [52] ORTLEPP, R.; LORENZ, A.; CURBACH, M.: Column strengthening with TRC: Influences of the column geometry onto the confinement effect. In: *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2009, Article ID 493097, doi:10.1155/2009/493097
- [53] SCHEFFLER, C.; FÖRSTER, T.; MÄDER, E.; HEINRICH, G.; HEMPEL, S.; MECHTCHERINE, V.: Ageing of alkali-resistant glass and basalt fibers in alkaline solutions: Evaluation of the failure stress by Weibull distribution function. In: *Journal of Non-Crystalline Solids* 355 (2009) 2588-2595
- [54] SCHLADITZ, F.; CURBACH, M.: Torsion tests on textile-reinforced concrete strengthened specimens. In: *Materials and Structures* – Online First Publication, 2011
- [55] SEIDEL, A.; LEPENIES, I.; ENGLER, TH.; CHERIF, CH.; ZASTRAU, B.: Aspects of Creep Behavior of Textile Reinforcements for Composite Materials. In: *Open Materials Science Journal* (2009) 3, S. 67-79 - doi: 10.2174/1874088X00903010067
- [56] SHAYED, M. A.; CHERIF, CH.; HUND, R.-D. CHENG, T.; OSTEROD, F.: Carbon and glass fibers modified by polysilazane based thermal resistant coating. In: *Textile Research Journal* (2010) 03 - doi: 10.1177/0040517509357648
- [57] RICHTER, M.; BAYER, D.: On the crack opening in textile reinforced concrete with regard to fiber bridging. In: *Proceedings of The International RILEM Conference on Material Science (MatSci), Aachen, 2010*. S. 91-101.
- [58] SCHACH, R.; HENTSCHEL, M.: Grundlagen für die Nutzwertanalyse für Verstärkungen aus textilbewehrtem Beton. In: CURBACH, M. (Hrsg.); JESSE, F. (Hrsg.): *Textilbeton – Theorie und Praxis. Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, Juni 2009*. S. 459-470
- [59] SCHACH, R.; HENTSCHEL, M.: Process Optimization for the Rehabilitation and Strengthening with Textile Reinforced Concrete. In: BRAMESHUBER W. (Hrsg.): *Proceedings of the International RILEM Conference on Material Science (MatSci), Aachen, September 2010*. S. 245-254
- [60] SCHACH, R.; HENTSCHEL, M.: Verfahrenstechnische Grundlagen für die Verstärkung mit textilbewehrtem Beton im Hochbau. In: MOTZKO, C. (Hrsg.): *Baubetriebliche Aufgaben. Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Institutes für Baubetrieb der TU Darmstadt*. Düsseldorf: VID-Verlag (Fortschrittberichte VDI/4, 211), 2009, S. 263-273
- [61] SCHULZE, M.: Material analysis applying computer tomography and voxel-based photogrammetry. In: GRÜN, A. (Hrsg.); KAHMEN H. (Hrsg.): *Optical 3-D Measurement Techniques VII. Vol. II, 2005*, S. 273-278
- [62] SICKERT, J.-U.; FREITAG, S.; GRAF, W.: Prediction of uncertain structural behaviour and robust design. In: *International Journal of Reliability and Safety* 5 (2011) 3/4, S. 358-377

[63] SICKERT, J.-U.; GRAF, W.; PANNIER, S.: Numerical design approaches of textile reinforced concrete strengthening under consideration of imprecise probability. In: *Structure and Infrastructure Engineering* 7 (2011), S. 163-176

Nicht zuletzt aufgrund der regen Veröffentlichungstätigkeit und der Mitgestaltung zahlreicher Fachkonferenzen wurde das RILEM TC 201-TRC „Textile Reinforced Concrete“ ins Leben gerufen, in der Wissenschaftler des SFB528 mitarbeiten und maßgeblich mitgestalten. Der „Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC“ (2006) war das Ergebnis der Zusammenarbeit in diesem Fachgremium, vor allem mit Wissenschaftlern des SFB532 an der RWTH Aachen. Derzeit arbeiten wir aktiv im RILEM 232-TDT „Test methods and design of textile reinforced concrete“ mit.

Ebenfalls basierend auf den aus dem SFB hervorgegangenen Publikationen konnte sich die Professur für Photogrammetrie (Prof. Maas) einen Ruf als eines der weltweit führenden Institute in der Nahbereichsphotogrammetrie erarbeiten. Dies wird u.a. in der Präsidentschaft der Kommission V der International Society for Photogrammetry and Remote Sensing 2004-2008 und in der V. Talbert Abrams Award Honorable Mention der American Society for Photogrammetry and Remote Sensing 2007 von Prof. Maas sichtbar.

In den zwölf Jahren Förderung durch die DFG haben wir ein weites Netzwerk aus intensiven internationalen Kontakten zu vielen Wissenschaftlern aufbauen können, das wir auch nach Beendigung der Förderung gewinnbringend für alle weiter nutzen und ausbauen möchten. So konnte Prof. Curbach Kontakte nach Israel (Prof. Alva Peled), Arizona (Prof. Barzin Mobasher), Michigan (Prof. Antoine Naaman) und Frankreich (Prof. Bruno Fioiro) knüpfen. Prof. Mechtcherine baute intensive wissenschaftliche Beziehungen zu Prof. Toledo (UFRJ, Brasilien), Prof. van Zijl und Dr. Boshoff (Stellenbosch University, Südafrika) sowie Prof. Mobasher (ASU, USA) auf. Die Arbeitsgruppe von Prof. Mäder pflegt einen engen Erfahrungsaustausch mit Prof. Jang-Kyo Kim (Dept. of Mechanical Engineering, Hong Kong University of Science and Technology) und Dr. Serge Zhandarov (Dept. of Polymer Composites and Coatings, Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus) sowie mit der Arbeitsgruppe von Prof. Paul Smith (University of Surrey, Guildford, UK). Am Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke (Prof. Kalsike/Prof. Graf) bestehen besonders intensive internationale Kontakte zu Prof. R. Muhanna (GeorgiaTech, Atlanta), Prof. R. Viertl (TU Wien), Prof. P. Spanos (Rice University, Houston), Prof. M. Beer (University Liverpool), Prof. D. Vanderpitte (KU Leuven), Prof. J. Beck (Caltech, Pasadena) und Prof. G. Schueller (Uni Innsbruck). Prof. Zastraup pflegt Kontakte mit Prof. C. Meyer (New York, USA) und Prof. M. Kuczma (Zielona Góra, Polen). Seitens des Teilprojektleiters Professor Cherif (Textiltechnik) besteht eine wissenschaftliche Kooperation mit Professor G. Buschle-Diller (Department of Polymer and Fiber Engineering der Auburn University Samuel Ginn College of Engineering, USA). Diese umfasste die Einbindung des Gastwissenschaftlers B. Sc. Vladimir Quinones Silva aus Kolumbien in das Teilprojekt A1. Des Weiteren arbeiteten die Wissenschaftler um Professor Cherif mit dem Danish Technological Institute in Taastrup, Dänemark zusammen. Im Ergebnis dieser Zusammenarbeit konnten die Forschungen im SFB 528 durch die Gastwissenschaftlerin M. Sc. Anna Lundahl unterstützt werden.

Außerdem wurden viele Forscher außerhalb des SFB528 angeregt, die Idee des Textilbetons aufzunehmen und selbst weiter zu entwickeln. So sind mittlerweile z. B. Forschungen zum Textilbeton an der TU Chemnitz, am Sächsischen Textilforschungsinstitut Chemnitz oder an der HTWK Leipzig bekannt. Es wurde das TEXTON-Netzwerk gegründet, zu dessen wissenschaftlichen Partnern das Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik und das Institut für Massivbau (beide TUD) sowie das Deutschen Zentrum Textilbeton (DZT, s. a. Kap. 3.2.2) gehören. Es gibt ein Projekt zum Einsatz von Textilbeton zur Verstärkung von Windkraftanlagen am Kompetenzzentrum Windenergie in Kooperation mit der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (Prof. Schmidt-Gönner) oder ein Projekt zum Einsatz von Textilbeton in Fahrbahndecken mit funktioneller Überbauverstärkung (Projektpartner: Universität Innsbruck (Prof. Feix), STRABAG AG (Südtirol), Amt der Tiroler Landesregierung und transidee transfercenter universität innsbruck GmbH). Auch kooperative Promotionsverfahren wurden und werden durchgeführt.

2.3.2 Außerwissenschaftliches Umfeld - Anwender

Neben den Forschungsarbeiten wurde in Dresden sehr viel Wert auf Kooperationen mit Unternehmen gelegt, so dass bereits einige Pilotprojekte wie Textilbeton-Fußgänger-Brücken in Osnabrück und Kempten und zwei Tragwerksverstärkungen in Schweinfurt und Zwickau erfolgreich umgesetzt werden konnten. So sollten zum einen potentielle Anwender auf die Neuentwicklung Textilbeton aufmerksam gemacht werden, zum anderen sollte die nichtwissenschaftliche Öffentlichkeit möglichst viel über die mit öffentlichen Geldern finanzierte Grundlagenforschung erfahren.

Hinsichtlich der erstgenannten Interessengruppe sind vor allem Messebeteiligungen oder Vorstellungen der Thematik auf Messen zu nennen, die möglichst regelmäßig organisiert wurden. Vor allem sind hier:

- die Techtexil in den Jahren (1996-98), 1999, 2001-03, 2005-07 und
- die Hannover Messe in den Jahren 2004 und 2007

zu nennen.

Bei allen Veranstaltungen wurde uns großes Interesse von Partnern aus Forschung und Industrie entgegengebracht. Nicht zuletzt unsere öffentlichkeitswirksame Präsentation der Forschungsergebnisse war der Grundstein für insgesamt sechs Transferprojekte des SFB528, in denen sich schon während der Laufzeit des SFB528 mehrere namhafte Industriepartner an der Entwicklung der Grundlagen für den baupraktischen Einsatz von TRC beteilig(t)en:

- TP T1: „Entwicklung einer Multiaxialnähwirkmaschine mit modifiziertem Schussfadenaufnahme- und Transport- sowie Beschichtungs- und Konfektionierungs-/ Speichersystem“, Prof. Cherif & KARL MAYER Malimo Textilmaschinenfabrik GmbH (Chemnitz) als Partnerinstitution
- TP T3: „Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbetonbauteilen für Querkraft“, Prof. Curbach & TORKRET AG (Essen) als Partnerinstitution
- TP T4: „Bewertung der numerisch ermittelten Robustheit von (textilverstärkten) Tragwerken“, Prof. Möller/Prof. Graf & Dynamore GmbH (Stuttgart) als Partnerinstitution
- TP T6: „Bemessungsmodell und Applikationstechnologie für Biegeverstärkung von

- Stahlbetonplatten“, Prof. Curbach/Prof. Schach & hauptsächlich Bilfinger Berger SE (NL Leipzig) und Putzmeister AG (Aichtal) als Partnerinstitution sowie Pagel Spezialbetone GmbH & Co. KG (Essen) (weitere s. Bericht T6),
- TP T7: „Adaption und Anwendung nicht-deterministischer Simulations- und Bemessungsstrategien in der industriellen Entwurfspraxis“, Prof. Graf/Prof. Kaliske & BMW AG (München), Dynamore GmbH (Stuttgart) als Partnerinstitution
- TP T9: „Technologie zur Verarbeitung von carbon fiber heavy tows zu textilen Betonbewehrungen“, Prof. Cherif & SGL Technologies GmbH (Meitingen), KARL MAYER Malimo Textilmaschinenfabrik GmbH Chemnitz als Partnerinstitutionen

Besonders bemerkenswert ist außerdem die Gründung des Deutschen Zentrums Textilbeton (DZT, [www.textilbetonzentrum.de], welches die Aufgabe der strukturellen Fortsetzung des Sonderforschungsbereiches hat. Details hierzu sind im Kap. 3.2.2 beschrieben, ebenso zum 2009 gegründeten TUDALIT-Markenverband [www.tudalit.de], dem derzeit folgende Firmen angehören:

- Gründungsmitglieder:
 - TUDAG
 - TU Dresden
 - Bilfinger Berger Instandsetzung GmbH
 - SGL Group (SGL Carbon Meitingen)
 - TORKRET AG
 - PAGEL Spezial-Beton GmbH&Co. KG
 - KARL MAYER Malimo Textilmaschinenfabrik GmbH
 - LIBA Maschinenfabrik GmbH
 - V. FRAAS GmbH
- Weitere Mitglieder ab 1.10.2009
 - Hering Bau GmbH & Co. KG
 - Laumer Bautechnik GmbH
 - Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.
 - Lefatex-Chemie GmbH
 - Groz-Beckert KG
 - Repenning + Sohn Bauwerkerhaltung GmbH
 - TUDATEX
 - Synthomer
 - SAERTEX

Weitere Praxispartner sind u.a.:

- Betonwerk Oschatz GmbH,
- beweka Betonwerk Kahla,
- Quinting Zementol GmbH,
- EBF Dresden,

- Bendl Hoch- und Tiefbau GmbH & Co. KG Sebnitz,
- AIB GmbH Bautzen,
- Ingenieurbüro HRK Dresden,
- ifn Lauchhammer,
- Helmut Lindt Malerfachbetrieb GmbH

Seit Anfang 1990 (seit 1999 auch in dem von der DFG eingerichteten Sonderforschungsbereich 528 in Dresden und SFB532 in Aachen) wird Textilbeton intensiv erforscht. Neben den Forschungsarbeiten wurde in Dresden sehr viel Wert auf Kooperationen mit Unternehmen gelegt.

Das Interesse der Baupraxis spiegelt sich z. B. in zwei Brücken aus Textilbeton in Oschatz und Kempten wieder (Brücke Oschatz: erste Textilbetonbrücke weltweit und Auszeichnung mit dem „Outstanding Concrete Structures“ des Weltbetonverbandes (fib), Bild 8a; Brücke Kempten: weltweit größte Spannweite einer Textilbetonbrücke bis 2010, Bild 8b) oder in ersten Anwendungen des Textilbetons zur Verstärkung und Instandhaltung von Tragwerken (Bild 8c; Näheres ist in einschlägigen Veröffentlichungen zu diesen Themen nachzulesen). Zudem wurden einem Kooperationspartner, dem Betonwerk Oschatz, im Jahr 2007 für die erste Textilbetonbrücke in Oschatz weitere Auszeichnungen verliehen (siehe Bild 8a).

Einige Forscher wurden auch mit Preisen geehrt. Für aus der Grundlagenforschung abgeleitete Anwendungen von Textilbeton mit Pilotcharakter wurden Wissenschaftler aus dem Projektbereich A des SFB528 in den Jahren 2003 und 2005 mit dem Techtexil-Innovationspreis gewürdigt. 2008 wurde Uwe Köckritz mit dem Förderpreis der Walter Reiners-Stiftung des Deutschen Textilmaschinenbaues für seine Dissertation ausgezeichnet. Weiterhin zu nennen wären aus dem Fachbereich Statik und Dynamik der Tragwerke Michael Beer und Martin Liebscher, die 2009 den Best paper award der Zeitschrift Computers & Structures für ihren Beitrag „Designing robust structures a nonlinear simulation based approach“ erhielten. 2011 erhielt ein Forscher des SFB528 - Frank Schladitz, Institut für Massivbau – den Innovationspreis Bautechnik des Deutschen Betonvereins e.V., der alle zwei Jahre für herausragende Arbeiten Studierender oder Promovierender des Bauingenieurwesens vergeben wird. Aus dem Institut für Mechanik und Flächentragwerke erhielt Dr.-Ing. Rainer Schlebusch 2002 in Gdansk das Best Presentation by Young Researcher Diploma für seinen Vortrag „On Theory and Application of Surface-Related Shell Theories for the Numerical Simulation of Contact Problems“ sowie 2007 auf dem IUTAM Symposium in Tiflis den Best Scientific Paper Award für seinen Aufsatz mit dem Titel „On the Simulation of Textile Reinforced Concrete Layers by a Surface-Related Shell Formulation“.

Weitere Preise gingen an:

- Dr.-Ing. Silke Scheerer
2010 Kurt-Beyer-Preis, gestiftet von der HOCHTIEF Construction AG Sachsen
- Dr.-Ing. Kerstin Speck (Institut für Massivbau):
2009 Rüscher Forschungspreis
- Dipl.-Ing. Andreas Franze (Institut für Mechanik und Flächentragwerke)
2009 Schöck Bau-Innovationspreis, gestiftet von der Eberhard-Schöck-Stiftung



(a) Beispiele für Auszeichnungen und Preise



(b) TRC-Brücke in Kempten

(c) Verstärkung einer Tonnenschale in Zwickau

Bild 8: Erfolgreiche Anwendungen von Textilbeton

- Dr.-Ing. Regine Ortlepp (Institut für Massivbau):
2007 Dissertationspreis der Commerzbank-Stiftung
2001 und 2008 Kurt-Beyer-Preis, gestiftet von der HOCHTIEF Construction AG Sachsen
- Dr.-Ing. habil. Uwe Reuter
2006 Kurt-Beyer-Preis, gestiftet von der HOCHTIEF Construction AG Sachsen
- Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse
2005 Kurt-Beyer-Preis, gestiftet von der HOCHTIEF Construction AG Sachsen
- Dr.-Ing. Dirk Proske
2004 Kurt-Beyer-Preis, gestiftet von der HOCHTIEF Construction AG Sachsen
- Prof. Dr.-Ing. Michael Beer
2002 Kurt-Beyer-Preis, gestiftet von der HOCHTIEF Construction AG Sachsen
- Dr.-Ing. Jens Kluger
1999 Kurt-Beyer-Preis, gestiftet von der HOCHTIEF Construction AG Sachsen

2.3.3 Öffentlichkeitsarbeit für die Gesellschaft

Auf eine herausragende Öffentlichkeitsarbeit wurde während der gesamten Förderung des SFB528 großen Wert gelegt. Besonders erfolgreich konnte sich die ÖA ab der 3. Förderperiode entwickeln, da ab diesem Zeitpunkt ein professioneller Wissenschaftsjournalist (Ulrich van Stipriaan) mit 10 h/Woche für den SFB beschäftigt werden konnte. Außer der normalen Pressearbeit wie:

- Regelmäßig Pressemitteilungen (Regional & überregional),
- Pflege des Internetauftritts des SFB528,
- Regelmäßige Berichte auf Homepage und im BauBlog der Fakultät Bauingenieurwesen der TU Dresden über die Arbeit des SFB528 (<http://baublog.tu-dresden.de/>),
- Initiierung und Begleitung von Reportagen in Rundfunk und Fernsehen (z. B. im Deutschlandfunk am 28. 8. 2007, s. a. <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/forschak/663358/>, oder in der mdr-Sendung „Einfach genial“ am 15. September 2009, s. a. <http://baublog.tu-dresden.de/index.php/2009/09/textilbeton-einfach-genial/>)

betreute Herr van Stipriaan die Kunstprojekte mit, organisierte Vernissagen/Ausstellungen, initiierte die Bewerbung für den Ort der Idee 2009 (was dann der SFB528 auch wurde, Bild 9a), gestaltete den Internetauftritt mit vielen aktuellen Kurzbeiträgen attraktiv und arbeitete maßgeblich an der Erstellung der Kurzfilme im Rahmen des Pilotprojektes DFG Science TV „Beton light“ 2008 mit (<http://dfg-science-tv.de/projekte/beton-light.html>).



(a) Verleihung des Titels „Ort der Idee 2009“ (b) Vernissage anlässlich der Eröffnung der Ausstellung Beton-Blätter in Dresden/Hellerau (c) Einladung zur Ausstellung im Land Schloss Zuschendorf

Bild 9: Erfolgreiche Öffentlichkeitsarbeit

Im Folgenden finden Sie eine exemplarische Zusammenstellung von weiteren Aktivitäten der Öffentlichkeitsarbeit im Rahmen des SFB528:

- Wanderausstellung des VDI, bspw. im Japanischen-Palais in Dresden (04/2008),
- SFB-Kunstprojekt (I): Der Dresdner Künstler Einhardt Grothegut schuf „Betonblätter“ (<http://textilbeton-kunst.de/>, Bild 9b, welche auf einer Ausstellung mit Vernissage in den Werkstätten Hellerau der Öffentlichkeit gezeigt wurden: <http://baublog.tu-dresden.de/index.php/2008/08/ausstellung-mit-groteguts-textilbeton-kunst/> und <http://baublog.tu-dresden.de/index.php/2008/09/beton-blatter-in-hellerau/>. Zudem wurden die Kunstwerke in einem großformatigen Kalender 2008 abgedruckt.

- TRC-Exponate im Science Express des VDI 2009, der in sieben Monaten durch 60 Städte tourte: <http://baublog.tu-dresden.de/index.php/2009/07/textilbeton-als-zukunftstrachtiger-baustoff-im-science-express/>,
- Ort im Land der Ideen 2009:
<http://baublog.tu-dresden.de/index.php/2009/06/ort-im-land-der-ideen/>,
- SFB-Kunstprojekt (II): Der Dresdner Künstler Volker Mixsa schuf Objekte aus Textilbeton, die bereits an mehreren Orten in und um Dresden der Öffentlichkeit präsentiert werden konnten (Bild 9c):
<http://baublog.tu-dresden.de/index.php/2009/11/sfb-528-grundlagenwissen-in-die-praxis-uberfuehren/>,
<http://baublog.tu-dresden.de/index.php/2011/03/skulpturen-in-beton/> und <http://baublog.tu-dresden.de/index.php/2011/04/skulturen-aus-beton-in-zuschendorf/>.
Zu diesem Projekt erstellte Herr van Stipriaan einen öffentlichkeitswirksamen Werkstattbericht, der auch als pdf unter:
<http://sfb528.tu-dresden.de/mixsa/katalog.pdf>
abrufbar ist.

Weitere „Randgebiete“, in denen sich Textilbeton öffentlichkeitswirksam präsentieren und beweisen konnte, sind mehrere Betonkanus, die von Dresdner Studenten regelmäßig für die zweijährlich stattfindende Betonkanuregatta des Bundesverbandes der Zementindustrie gebaut werden, oder mehrere Designprojekte (z. B. Möbel aus Textilbeton:

<http://www.martin-kleppe.de/martin-kleppe/> und <http://www.napoleon-moebel.de/de/home>).

Die Fakultät Bauingenieurwesen der TU Dresden verfolgt seit 2002 ein zu dem Zeitpunkt ziemlich einmaliges Konzept der Öffentlichkeitsarbeit. Um das schlechte Image des Bauingenieurberufes und den Mangel an Nachwuchs zu beheben, wurde ein ausgebildeter Wissenschaftsjournalist aus Mitteln der Fakultät eingestellt und speziell mit der öffentlichkeitswirksamen Darstellung und Werbung außerhalb der engeren Fachöffentlichkeit beauftragt. Es ist seit dem 5.9.2002 die erste Bau fakultät im deutschsprachigen Raum mit einem eigenen Blog (<http://baublog.tu-dresden.de>), in dem regelmäßig über aktuelle Geschehnisse der Fakultät und des Bauwesens berichtet wird (http://baublog.blogspot.com/2002_09_01_archive.html / ab Juni 2003 <http://baublog.twoday.net/>, seit Januar 2007 <http://baublog.tu-dresden.de>).

Auf der 1. Internationalen Konferenz BlogTalk in Wien (23./24. Mai 2003) konnte Herr van Stipriaan einem breiten Blog-Fachpublikum den Kommunikations-Ansatz der Dresdner Bauingenieure vorstellen (<http://baublog.tu-dresden.de/InAndOut.pdf>). Seit dem 2. August 2010 twittert van Stipriaan für die Fakultät Bauingenieurwesen (https://twitter.com/#!/bau_tud) und bringt auf diesem Kanal auch Statusmeldungen zum SFB528 unter.

Die Öffentlichkeitsarbeit der Fakultät ist eng eingebunden in die Pressearbeit der Technischen Universität Dresden. So werden Anfragen aus dem Bereich Bauwesen prinzipiell an die Fakultät weitergeleitet – und die Fakultät gibt ihre Pressmeldungen und Einladungen zu presserelevanten Ereignissen über die Pressestelle der TU Dresden an die Presse sowie entsprechende Online-Dienste.

Pauschale Mittel waren im SFB 528 nicht vorhanden.

3 STRUKTURWIRKUNG DES SONDERFORSCHUNGSBEREICHS AM STANDORT

3.1 PERSONELLE AUSWIRKUNGEN

Alle Professuren, deren Inhaber während der Laufzeit die Altersgrenze für den Ruhestand erreichten, wurden durch langfristig geplante und durchgeführte Berufungsverfahren der Fakultäten/Universität nahtlos wiederbesetzt, bzw. wurde die Teilprojektleitung im Fall von Prof. Opitz (D3) von Prof. Maas (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung) übernommen. In allen Fällen haben die Nachfolger das Engagement ihrer Vorgänger fortgesetzt bzw. im Regelfall sogar noch deutlich erweitert. Dies ist der starken aktiven Beteiligung des SFB528 bei der Auswahl der Kandidaten in allen Berufungsverfahren zu verdanken:

- Jürgen Stritzke: Überschreiten der Altergrenze in 12/2002 (tätig bis 03/2003)
Wiederbesetzung durch: Ulrich Häußler-Combe, 04/2003,
Projekte im SFB528: TP B3 seit 07/2005
- Peter Offermann: Überschreiten der Altersgrenze in 10/2005
Wiederbesetzung: Chokri Cherif, 10/2005
Projekte im SFB528: A1 seit 10/2005, T1 seit 10/2005
- Harald Schorn: Überschreiten der Altersgrenze in 10/2006
Wiederbesetzung: Viktor Mechtcherine, 10/2006
Projekte im SFB528; A2 von 07/1999 bis 09/2006, A6 seit 10/2006
- Bernd Möller: Überschreiten der Altergrenze in 09/2006
Wiederbesetzung: Michael Kaliske, 10/2006
Projekte im SFB528: D2, E4, T7 von 07/1999 bis 06/2011

Außer diesen planmäßigen personellen Veränderungen wurden mehrere Forscher für die hervorragenden Leistungen in Lehre und Forschung - und hier auch insbesondere für die im Sonderforschungsbereich 528 - honoriert durch die Verleihung des Titels eines außerplanmäßigen Professors. Im Einzelnen sind dies:

- apl. Prof. Dr. rer. nat. habil. Michael Schiekkel (12/2005), Mitarbeit in TP A2 bzw. TP A6
- Verleihung des Titels apl. Prof. an Wolfgang Graf (03/2000)
Teilprojektleiter im TP D2, E3, E4, T4, T7 von 07/1999 bis 06/2011
- Bestellung von Edith Mäder zur Honorarprofessorin an der TUD, Institut für Werkstoffwissenschaft (12/2009), TPL im TP A5 von 07/2002 bis 06/2011

An den Instituten für Massivbau sowie dem Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke wurden entgegen dem allgemeinen Trend der Stellenreduzierung entsprechend dem Hochschulentwicklungsplanes jeweils eine zusätzliche Haushaltstelle durch die Hochschule finanziert:

- Am Institut für Massivbau für Herrn Dr.-Ing. Frank Jesse in der Funktion des Geschäftsführers des SFB und Teilprojektleiter im TP B1;
- Am Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke für Herrn Dr.-Ing. Jan-Uwe Sickert in der Funktion des Teilprojektleiters im TP E3 (Finanzierung zu 75 % von der Hochschule);

- Am Institut für Baustoffe wurden ab 01/2002 im Rahmen Überführung von WIP-finanzierten Wissenschaftlern an die TU Dresden vier neue, reguläre Haushaltstellen geschaffen (Finanzierung: 1 × 100 %, 2 × 75 %, 1 × 50 %).

Außerdem wurden Nachwuchswissenschaftler, die Teilprojektleiter werden wollten, auf Haushaltsstellen umgesetzt. Die sonstige aus der Grundausstattung finanzierte Personalausstattung konnte über die Laufzeit von 12 Jahren vollständig erhalten werden.

Neben den rein wissenschaftlichen Aspekten waren uns Gleichstellung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern und die Vereinbarkeit von Familie und Beruf sehr wichtig. Selbstverständlichkeit war, dass Mitarbeiter allein aufgrund ihrer Fähigkeiten eingestellt wurden (unabhängig vom Geschlecht). Im Hinblick auf Familien haben sich die am SFB beteiligten Institute entgegen den leider immer noch starren Regelungen des Dienstrechts der Universität auf Gleitarbeitszeiten verständigt. Es wurde größtmögliche Unterstützung für Wissenschaftler während der Elternzeit gewährt, z. B. durch Weiterführung des Versuchsprogramms oder Einstellung wissenschaftlicher Mitarbeiter, die während der Elternzeit das laufende Forschungsprogramm betreuten und im direkten Kontakt mit der Kollegin in Elternzeit standen. Für alle Doktoranden in Elternzeit konnte sichergestellt werden, dass sie ihr Thema nach Ablauf der Elternzeit weiter bearbeiten und erfolgreich beenden konnten, z. B.:

- Anna Bösche (TP D1)
Verteidigung der Dissertation am: 14.09.2007
- Anett Brückner (TP D1, später TP T3)
Dissertation eingereicht, Verteidigung im Dezember 2011
- Jan Hausding (TP A1)
Verteidigung der Dissertation am: 17.03.2010
- Dirk Jesse (TP B1)
Verteidigung der Dissertation am: 13.07.2007
- Roland Kleicke (TP T1 & T9)
- Yen Le Michler (TP B1)
Verteidigung der Dissertation am: 20.02.2009
- Kerstin Speck (TP B1)
Verteidigung der Dissertation am: 31.1.2008
- Silke Scheerer (TP D1)
Verteidigung der Dissertation am: 27.11.2009
- Regine Ortlepp (TP C1)
Verteidigung der Dissertation am: 13.07.2007
- Stephan Pannier (TP T7)
Verteidigung der Dissertation am: 06.10.2011
- Christina Scheffler (TP A5)
Verteidigung der Dissertation am 17.12.2009

Mit Unterstützung der DFG konnte zudem die Weiterbeschäftigung nach Elternzeit garantiert werden. Eine weitere große Unterstützung forschender Eltern war die Einrichtung der sogenannten „SFB-KiTa“. Hier wurde in der dritten Förderperiode mit Unterstützung durch die DFG in Zusammenarbeit mit der TU Dresden und dem Studentenwerk eine eigene Gruppe für 18 Kinder von jungen Forscherinnen und Forscher des SFB 528 in der Kindertageseinrichtung "Am Beutlerpark" eingerichtet. Dort ist eine bedarfsgerechte Kinderbetreuung möglich, womit Karriere und Familie leichter vereinbar wurden. Besonders stolz sind wir, dass das Konzept dieses Kita-Pilotprojektes mittlerweile von der DFG als eine mögliche Fördervariante übernommen wurde, da es in Dresden so erfolgreich war.

Dass die Maßnahmen zur Gleichstellung und Nachwuchsförderung erfolgreich waren, belegt die hohe Zahl an Promotionen, die während der zwölfjährigen Förderung des SFB528 entstanden, Tabelle 5.

Tabelle 5: Graduierungen von Nachwuchswissenschaftlern

Förderperiode	Promotionen		Habilitationen		Berufungen ²⁾⁻⁵⁾	
	m	w	m	w	m	w
II/1999-I/2002	1	-	-	-	-	-
II/2002-I/2005	10	1	-	-	-	-
II/2005-I/2008	15	5	-	-	-	-
II/2008-I/2011 ¹⁾	12 (19)	4	2	-	4	-
Gesamt II/1999-I/2011	38 (45)	10	2	-	4	-

¹⁾ Insgesamt 9 Promotionen aus der 4. Förderphase des SFB528 sind derzeit schon eingereicht worden (2) oder werden es noch im ersten Halbjahr 2012 (7).

²⁾ Michael Beer, 06/2007: Assistant Professor, Dep. of Civil Engineering, National University of Singapore; 07/2011: Professor, Centre for Engineering Sustainability, School of Engineering, University of Liverpool.

³⁾ Markus Oeser, 04/2007: Lecturer, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Sydney; 09/2011: W3-Professur für Straßenwesen, RWTH Aachen.

⁴⁾ Steffen Marx, seit 06/2011 W3-Professur für Massivbau an die Leibniz-Universität Hannover.

⁵⁾ Frank Jesse, Ruf auf die Juniorprofessur „Konstruktion mit Hochleistungsbetonen“ an der TU Kaiserslautern (2009), seit 11/2010 Professorenvertretung und Leitung des Lehrstuhls Massivbau an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus.

Promotionen:

Periode I:

Beer

Periode II: Abdkader, Cebulla, Dietzel, Jesse (F), Leopold, Nguyen, Pristavok, Proske, Richter, Schlebusch, Ünal

Periode III: Bösche, Damme, Eckfeldt, Hampel (T), Hampel (U), Köckritz, Kula, Lepenies, Le Phuc, Liu, Matheas, Orawattanasrikul, Ortlepp (R), Ortlepp (S), Reuter, Sickert, Steinigen, Speck, Seif, Wust

Periode IV:

Butler, Brückner (eingereicht), Freitag, Geißler, Hartig, Hausding, Jesse (D), Michler (L), Panier, Scheerer, Scheffler, Schladitz (eingereicht), Seidel, Stransky, Weber, Weiland

Geplant: Barhum, Ehlig, Hentschel, Kleicke, Lieboldt, Lorenz, Younes

Habilitationen:

Periode IV:

Oeser, Reuter

Als besondere Form der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses wurden im SFB528 den promovierenden und promovierten Mitarbeitern in den TP die selbständige und eigenverantwortliche Leitung und Organisation der Arbeitsgruppen übertragen. Die Erfahrungen damit waren von Beginn der ersten Förderperiode an sehr gut. Die Übertragung von Verantwortung und Kompetenzen hat zu einer starken Motivation vor allem der Promovierenden geführt. Die Arbeitstreffen wurden auch ohne die Professoren durchgeführt und zeichneten sich durch eine sehr offene und konstruktive Atmosphäre aus. Kooperationen wurden sehr oft auf diesem Weg initiiert, ebenso wie daraus folgende gemeinsame Veröffentlichungen der beteiligten Teilprojekte. Zudem hat der wissenschaftliche Nachwuchs ein eigenes Doktorandenkolloquium organisiert und durchgeführt.

3.2 INFRASTRUKTUR

3.2.1 Materielle Infrastruktur

Um die Grundlagenforschung im Rahmen des SFB528 erfolgreich betreiben zu können, wurden wichtige Geräte maßgeblich von der DFG finanziert. Bauliche Maßnahmen der Universität wurden (ebenfalls) von der DFG, dem Land Sachsen, der EU und Industriepartnern finanziell unterstützt. Die wichtigsten DFG-finanzierten Maßnahmen sind nachfolgend tabellarisch zusammengestellt, ebenso die baulichen Maßnahmen, die als Eigenanteil der TU Dresden unter dankenswerter Beteiligung der oben genannten Geldgeber verwirklicht worden sind (Tabelle 6). In einer zweiten Auflistung sind relevante wissenschaftliche Geräte aufgeführt, die ebenfalls im Rahmen des SFB528 angeschafft worden sind (

Tabelle 7).

Tabelle 6: Bauliche Maßnahmen im Zusammenhang mit dem SFB528

Bauliche Maßnahme	Baujahr
Bau der Neuen Textilmaschinenhalle auf dem Campus der TUD	2000
Ausbau der Textilmaschinenhalle Dresden-Dobritz	2010
Neubau des Technikums am Otto-Mohr-Labor (1. Bauabschnitt)	2008/09
Energetische sowie technische Sanierung des OML	2009/2010
10-MN-Säulenprüfmaschine im Otto-Mohr-Labor (siehe Bild 10)	2009/10
Erweiterung des Technikums am Otto-Mohr-Labor (2. Bauabschnitt)	2010/11

Tabelle 7: Relevante wissenschaftliche Geräte (Auswahl)

Haushaltsjahr	Name	TP
1999/2		
2000	Multiaxial-Nähwirkmaschine	A1
	Universal-Zugprüfmaschine	
2001		
2002/1		
2002/2	Parallelschuss-Nähwirkmaschine	A1, T1
2003		
2004		
2005/1	EasyLeno-Greiferwebmaschine	T1
2005/2		
2006	Walzenauftrag mit IR-Strahler	A1
2007	Beschichtungsmodul	T1
2008/1		
2008/2		
2009	Ultraschall-Schneidanlage	A1
	Nähwirkanlage Malitronic	T9
2010	Beschichtungseinheit für Malitronic	T9
2011/1		



(a) Stützenprüfung



(b) geprüfte Stützen



(c) Plattenbalken

Bild 10: 10-MN-Säulenprüfmaschine, in der die Großversuche (TP D4) durchgeführt wurden

3.2.2 Institutionelle Infrastruktur

Im Oktober 2007 wurde das „Deutsche Zentrum Textilbeton“ (DZT) gegründet. Unter dem Dach der TUDAG – der Vermarktungsgesellschaft der TU Dresden – werden seither Erkenntnisse aus der Forschung zum textilbewehrten Beton in die Praxis überführt. Das DZT ist eine Maßnahme innerhalb des preisgekrönten Modellprojekts „Austauschplattform für SFBs und Exzellenzcluster“ des Stifterverbandes für die Deutsche Wissenschaft, in dem erstmals in Dresden parallel zur Grundlagenforschung der Transfer einer neuen Technologie von der Wissenschaft in die Wirtschaft gefördert wird. Während der "baufach"-Messe in Leipzig im Herbst 2007 stellte sich das Deutsche Zentrum Textilbeton erstmals der Öffentlichkeit vor. Neben Messeauftritten, Schulungen und Seminaren für Ingenieure ist das DZT in Dresden erster Anlaufpunkt für Firmen, die Textilbeton praktisch anwenden wollen. Damit wurde an der Technischen Universität Dresden bereits bei laufender Grundlagenforschung die Anwendung, Vermarktung und Kooperation mit Unternehmen erfolgreich durchgeführt. Aus dieser Initiative ist 2009 auch der von mehreren namhaften Unternehmen und der TU Dresden gegründete Markenverband entstanden. Gemeinsam mit den Verbandsmitgliedern soll unter der Marke TUDALIT® Textilbeton zur Verstärkung und Instandsetzung im Bauwesen und für neuartige Produkte und Tragwerksteile weltweit vermarktet und auf der Grundlage vorgegebener Qualitätsstandards schlanke, dauerhafte und tragfähige Konstruktionen möglich werden (Weiteres hierzu s. Abschn. 2.3.2). Aktuell wird hauptsächlich an der ersten Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung für Textilbeton als Biegeverstärkung gearbeitet.

Um das im SFB528 erarbeitete Wissens- und Kompetenzspektrum zu textilen Bewehrungen Wirtschaftspartnern für anwendungsnahe Entwicklungen von Musterstücken und Prototypen zugänglich zu machen, wurde im Jahr 2009 außerdem die TUDATEX GmbH gegründet. Diese versteht sich als ein Dienstleistungsunternehmen für Wissens- und Technologietransfer auf dem Gebiet der Textiltechnik. Sie ist dabei auf neuartige Verfahren und Maschinenkonzepte spezialisiert und verfügt über flexible Maschinentechniken und ein interdisziplinär angelegtes Know-How. Die TUDATEX GmbH fertigte die Bewehrungstextilien für Bauanwendungen, die bereits in mehreren Pilotprojekten des TUDALIT Markenverbandes zum Einsatz gekommen sind

Kooperationen mit Einrichtungen außerhalb der Wissenschaft existieren ebenso. Hervorzuheben ist die langjährige Zusammenarbeit der TU Dresden mit dem Martin-Andersen-Nexö-Gymnasium der Stadt Dresden. Schüler der 7. und 8. Klasse dieses Gymnasiums absolvieren jährlich eine Woche Praktikum an verschiedensten Instituten der Universität. Ausgehend von der Beteiligung des SFB528 (Bild 11) an diesem Projekt werden Schülerpraktika nun auch in anderen Forschungsbereichen an den beteiligten Instituten angeboten.

Daten wurden auf einem Server auf geschützten Seiten gesammelt, auf die alle SFB-Mitglieder Zugriff haben, und somit allen Teilprojekten zur Verfügung gestellt. Durch entsprechende Datensicherungsmaßnahmen wird sichergestellt, dass die Rohdaten wenigstens 10 Jahre sicher aufgehoben sind.



Bild 11: Kooperation mit Schulen: Jährliches Schülerpraktikum in Kooperation mit dem Martin-Andersen-Nexö-Gymnasium in Dresden – auch hier ist Textilbeton seit einigen Jahren ein Thema!

4 HINWEISE AN DIE DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT

Die Merkblätter der DFG und Antragsvorlagen haben sich in den 12 Jahren der Laufzeit positiv entwickelt. Vor allem die letzte Umstellung hat zahlreiche Redundanzen reduziert und zu einer klareren Antragsstruktur geführt. Klare Vorgaben führen generell zu einheitlicheren und damit vergleichbareren Anträgen und erleichtern auch die interne Kommunikation während der Antragsentwicklung.

Die Umstellung von einer 3-jährigen auf eine 4-jährige Förderperiode wird sehr begrüßt, weil sie mehr und länger Zeit für die eigentliche wissenschaftliche Arbeit lässt.

Pauschale Mittel aus dem Overhead sind in Anbetracht der Haushaltlage der Universitäten sehr positiv und wurden und werden auch in Dresden sinnvoll eingesetzt.

Das harte Seitenlimit von 400 Seiten hilft sehr bei der Disziplinierung der antragstellenden Kollegen. Jeder ist gezwungen, einen sehr gut strukturierten Antrag zu verfassen. Es war für uns eine sehr positive Erfahrung, dass es auch für Professoren Erziehungsmittel gibt.

Eine uns wichtige Kritik/Anregung möchten wir auch formulieren: Für eine Erzieherin in einer KITA/einer Kinderkrippe sind 40 TEUR statt der bewilligten 30 TEUR erforderlich.

Nach 12 Jahren Finanzierung ist die Forschung noch nicht abgeschlossen, auch wenn die anfänglichen Ziele erreicht worden sind. Es haben sich neue Fragen ergeben und es sollte aus unserer Sicht die Frage gestellt werden, was nun nach dem Ende an zusätzlicher Forschung noch nötig wäre (z.B. als Punkt im Formblatt 60.13 ergänzen). In unserem Fall wäre das z.B., dass zum Verhalten unter nicht ruhender Belastung derzeit noch keine ausreichenden Erkenntnisse vorliegen, welche jedoch für einen umfassenden Einsatz des Werkstoffs Textilbeton als Verstärkungsmaterial, z. B. an Brücken, von besonderer Bedeutung sind. Des Weiteren ist eine Erweiterung der Forschungsaktivitäten auf Textilien auf der Basis von Carbon Fiber Heavy Tows (CFHT) für einen erfolgreichen Transfer der wissenschaftlichen Erkenntnisse in die Praxis dringend erforderlich.

5 BERICHTE ÜBER DIE EINZELNEN TEILPROJEKTE DER LETZTEN FÖRDERPERIODE

5.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM TEILPROJEKT A1

5.1.1 Modellierung und Entwicklung anforderungsgerechter textiler Betonbewehrungen

5.1.2 Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Chokri Cherif

Dienststellung: Direktor des Instituts für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik, Inhaber der Professur für Textiltechnik

Geburtsdatum: 24.05.1966

Staatsangehörigkeit: deutsch

Institution: Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden, Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik, 01062 Dresden

Telefon/ Telefax: 0351 463 39300/ 0351 463 39301

E-Mail: chokri.cherif@tu-dresden.de

5.2 ENTWICKLUNG DES TEILPROJEKTS

5.2.1 Bericht

Einleitung mit Überblick zu den Förderperioden 1 bis 3

Das Teilprojekt A1 umfasst werkstoff- und halbzeugorientierte Arbeiten zur Entwicklung und reproduzierbaren Fertigung leistungsfähiger Bewehrungstextilien aus Hochleistungsfasern und multifunktionalen Beschichtungen. In den ersten beiden Förderperioden wurde hierfür das Eigenschaftspotential von AR-Glas- sowie Carbonfilamentgarnen mit neu entwickelten Messmethoden und -geräten charakterisiert. Auf dieser Basis konnten durch systematische Untersuchungen in der gesamten Prozesskette vom Garn bis zum späteren baustellengerechten Bewehrungshalbzeug grundlegende technologischen Voraussetzungen für eine maximale Ausnutzung der theoretischen Faserfestigkeit und des Arbeitsvermögens im Verbund geschaffen werden.

Die Förderperiode 3 war auf die verarbeitungs- und beanspruchungsgerechte Ausrichtung der Bewehrungseigenschaften ausgerichtet. Mit der hierfür entwickelten und maschinenbaulich umgesetzten Methode zur Online-Beschichtung lassen sich insbesondere Tragreserven der Fasermaterialien erschließen und die Verschiebestabilität der Textilien applikationsgerecht auf eine flächenhafte oder räumliche Bewehrungsführung abstimmen. Parallel wurden mit der bindungstechnischen Modellierung kettfadenumschließender Maschenstrukturen neue Möglichkeiten für die Umsetzung textiler Betonbewehrungen mit anforderungsgerechten Faservolumengehalten und homogenen Eigenschaften im Betonverbund bereitgestellt.

Unter Anwendung der neuer Bindungs- und Flächenkonstruktionen sowie des erweiterten Flächenbildungsverfahrens wurden in der vierten Förderperiode Gitterstrukturen mit symmetrischem Lagenaufbau und reproduzierbarem Leistungspotenzial realisiert. Zu diesem Zweck mussten auch

die entwickelte Beschichtungstechnologie unter Einsatz der Polymerdispersionen aus dem TP A5 auf Carbonfilamentgarne übertragen und verfahrenstechnische Grundlagen für die kontinuierliche Konturierung bahnförmiger Bewehrungstextilien zu 2D-Preforms erarbeitet werden. Als weitere Forschungsschwerpunkte wurden die Entwicklungen zum modularen Nähwirkanlagenkonzept abgeschlossen und die Untersuchungen zum zeitabhängigen Materialverhalten von AR-Glas- und Carbonfilamentgarnen durch Wechsellastversuche komplettiert.

Bindungsmodellierung und Ausführung symmetrischer Bewehrungstextilien

Zum Ende der dritten Förderperiode war bekannt, dass die Parameter des Nähwirkprozesses (Bindung, Stichlänge, Abbindung, Fadenspannung) einen deutlichen Einfluss sowohl auf die Eigenschaften der textilen Bewehrung als auch auf deren Verbund zur Betonmatrix haben. Daraus ergab sich der Ansatzpunkt für die Nutzung des in der dritten Förderperiode entwickelten erweiterten Nähwirkprozesses mit versetzbarer Nadelbarre zur Herstellung von Textilbetonbewehrungen mit deutlich verbessertem Verbundverhalten. So wird mit der Realisierung des Nadelversatzes das ohnehin schon sehr weite Spektrum möglicher Bindungen, die sich auf Nähwirkmaschinen umsetzen lassen, weiter vergrößert. Die Modellierung relevanter Bindungskonstruktionen, die mittels Nadelbarrenversatz erzeugt werden können, beruht auf der Entwicklung einer Systematik zu deren theoretischer Beschreibung. Dazu wurde zunächst die etablierte Darstellungsweise für Nähwirkbindungen angepasst. Die konventionelle Darstellung mittels Legungsbild beruht auf der Annahme einer feststehenden Nadelbarre. Das Prinzip des Nadelversatzes beinhaltet aber gerade die Verschiebung der Nadelbarre, weshalb die neuen Bindungen nicht aus der bisher üblichen grafischen Darstellung erkennbar sind. Auf dieser Grundlage wurde eine verbesserte Beschreibungsmöglichkeit für Nähwirkbindungen entwickelt [1], [2]. Die eingeführte Neuerung erfordert die Anpassung der bisher üblichen Darstellungsweise von Wirkbindungen. Die Beschreibung der erweiterten Wirkbindungen kann aufbauend auf den klassischen numerischen und grafischen Darstellungen (Legungsplan und Legungsbild) erfolgen. Für die numerische Angabe der Nadelbarrenbewegung im Legungsplan für die Maschinensteuerung wird eine zusätzliche Zahlenfolge eingeführt, die in ihrer Darstellungsweise auf der Angabe der Legebarrenbewegung beruht. Ein Wirkzyklus, beziehungsweise die Bildung einer Maschenreihe, wird durch zwei Zahlen gekennzeichnet, von denen die erste die Position der Nadelbarre vor dem Einschwingen der Fadenführer und die zweite die Position der Nadelbarre nach dem Ausschwingen der Fadenführer definiert. Diese Darstellung bietet eine einfache und eindeutige Beschreibung der Nadelbarrenbewegung. Ist eine Modellierung der Bindung erforderlich, so stehen drei Varianten eines erweiterten Legungsbilds zur Verfügung. Anders als bei konventionellen Wirkbindungen ist es bei Bindungen nach dem erweiterten Wirkprozess nicht generell möglich, sowohl die Legebarrenbewegung als auch die Gestalt der Bindung gleichzeitig dem Legungsbild zu entnehmen. Nur bei Einsatz einer Grundbahn, mit der die Bindung fixiert wird, stimmt die Bewegung von Lege- und Nadelbarre mit dem Verlauf der Bindung überein. Deshalb zeigt das einfache Legungsbild für den erweiterten Wirkprozess nur die Bewegung der Legebarre und den Legungsplan als numerische Darstellung der Nadelbarrenbewegung. Durch Einführung von relativen Positionsnummern, welche die Stellung der Nadelbarre in jeder Maschenreihe kennzeichnen, kann das Legungsbild auf einfache Weise um diese relevante Information erweitert werden. Zur Darstellung des tatsächlichen Bindungs-

verlaufs müssen die relativen Positionsnummern wieder auf die Ausgangsstellung verschoben werden. Das Legungsbild mit verschobenen relativen Positionsnummern bietet dann eine realitätsnahe Abbildung der Bindung [2].

Mit diesen Darstellungsmethoden ist es möglich, alle Bindungen falls nötig auch mit mehreren Wirkfadensystemen zu entwickeln und exakt zu beschreiben. Als Ergänzung dazu wurde ein Berechnungsverfahren entwickelt, das es erlaubt, konventionelle und erweiterte Bindungen ineinander umzurechnen. Grundsätzlich kann für jede erweiterte Bindung, wenn sie für eine klassische Wirkware und nicht im Nähwirkprozess eingesetzt wird, eine Bindung nach dem konventionellen Verfahren gefunden werden, die einen äquivalenten Fadenverlauf im Textil aufweist [1].

Die erste maschinelle Umsetzung des erweiterten Nähwirkprozesses erfolgte in Form eines Prototyps, der auf einer herkömmlichen Parallelschuss-Nähwirkmaschine basiert. Der Prototyp dient der Optimierung des Prozesses hinsichtlich Produktionsgeschwindigkeit, Fadenzuführung, möglicher Versatzbewegungen und Bewegungsabläufe der Wirkelemente. Ergänzend wurde ein manuell bedienbarer Technologie-Demonstrator entwickelt, der die Grundlage für eine ganzheitliche Untersuchung aller möglichen Nadelbewegungen sowie den daraus resultierenden Bindungen bildete und die Voraussetzung für die Entwicklung der oben beschriebenen Bindungskonstruktionsmethoden darstellte.

Ausgehend von dem mit Hilfe des Technologie-Demonstrators untersuchten Umfang an möglichen Bindungsvarianten erfolgte eine systematische Bewertung und Auswahl von Bindungskonstruktionen unter Beachtung von deren Einflüssen auf die Textil- und Verbundeigenschaften. Bindungsvarianten mit einem hohen Einflusspotenzial wurden mit Hilfe der Prototypmaschine in textile Bewehrungen überführt. Die Prüfung der textilen Bewehrung hinsichtlich mechanischer Eigenschaften nach einer Integration in den Textil-Beton-Verbund wurde in Zusammenarbeit mit den TP B1 (Jesse) und B5 (Ortlepp) durchgeführt. Durch die neuen Bindungsmöglichkeiten und die freie Lagenanordnung wird eine deutlich verbesserte Qualität der textilen Bewehrung erreicht, die ein nachweisbar günstigeres Verbundverhalten zeigt als die konventionelle Variante. Durch die sichere Verhinderung von Abplatzungen an der Betonoberfläche bei Gebrauchslast wird eine wichtige Voraussetzung für den praktischen Einsatz textiler Betonbewehrungen geschaffen [3][4][5].

Ergänzend zum Versuchsprogramm mit Textilbeton wurden erste Untersuchungen zur Übertragung des im TP A1 entwickelten erweiterten Nähwirkverfahrens an thermoplastischen Mehrlagenverbunden aus GF/PP-Hybridgarn durchgeführt. Diese zeigen deutlich, dass durch die Verwendung des erweiterten Wirkprozesses aus der Lagenanordnung resultierende Eigenspannungen im Bauteil zuverlässig zu vermeiden sind. Weiterhin werden Verbesserungen sowohl der Zugfestigkeit und des E-Moduls als auch der Schlagzähigkeit im Verbund erreicht. Die Anwendung einer maschengerechten Einbindung der Schuss- und Kettfäden führt in Verbindung mit dem erweiterten Nähwirkprozess beim Einsatz geeigneter Bindungen, bei denen alle benachbarten Maschenstäbchen miteinander verbunden sind, zu einer sehr guten Drapierbarkeit bei praxistgerechter Handhabbarkeit. Damit ergeben sich sehr gute Chancen, die Ergebnisse des SFB 528 zu diesem Themenkomplex nicht nur für Bauanwendungen sondern auch für den Bereich der Faser-Kunststoff-Verbunde industriell zu etablieren.

Modular aufgebaute Nähwirkanlagen für die Fertigung textiler Betonbewehrungen

Einen weiteren Schwerpunkt dieses Teilprojektes stellte die Weiterentwicklung des im TP T1 (Ofermann) entwickelten modularen Nähwirkanlagenkonzepts dar. Zu diesem Komplex gehörten die Aufgabenstellungen Multiaxiallegevorrichtung, Beschichtung und Zuschnitt der Bewehrungstextilien.

Alle aktuell verfügbaren Multiaxial-Nähwirkmaschinen stechen prinzipbedingt die Schussfäden während des Nähwirkprozesses an. Infolge dessen besitzen die hergestellten Gitterstrukturen undefinierte, ungleichmäßige Gitteröffnungen, die bei der Verbundherstellung zu einer Qualitätsminderung führen.

Für die Realisierung absolut gleichmäßiger und eindeutig definierter Gitteröffnungen sind teilungsgerecht eingebrachte Schussfäden erforderlich und wurden in diesem Teilprojekt auch auf Basis der Prototypenmaschine für den erweiterten Nähwirkprozess umgesetzt [2]. Allerdings sind auf dieser Maschinenplattform grundsätzlich nur biaxiale Bewehrungen realisierbar. Das Ziel, vergleichbare Geleugequalitäten auch auf Multiaxial-Nähwirkmaschinen umzusetzen, wird durch die Synchronisation aller relevanten Teilfunktionen der Maschine, dazu gehören Schussfadenlegen, Transportkettenbewegen und Maschenbilden, sowie die Anpassung der Aufnahmeelemente der Transportkette erreicht. Allerdings ist dabei grundsätzlich die Gittergeometrie dahingehend eingeschränkt, dass die Schussfäden möglichst an einem Punkt zusammenlaufen sollten (Abbildung 1, rechts). Durch die Synchronisation des Schussfadenlegers mit der Transportkette in Kombination mit den angepassten Aufnahmeelementen (Abbildung 1, links) wird eine genaue Platzierung der Schussfäden in der Transportkette realisiert. Die Teilung der Aufnahmeelemente ist abhängig von den verwendeten Schussfadengarnfeinheiten sowie der Gittergeometrie. Eine zweite sensorgesteuerte Synchronisation erfolgt zwischen Transportkette und Hauptwelle (Nähwirkstelle). Dabei registriert der Sensor die Lage der Schussfäden und passt die Geschwindigkeit der Transportkette bzw. der Hauptwelle so an, dass die Schussfäden in die Masche hineingelegt werden. Demzufolge wird von der bisher üblichen konstanten, hier nicht erforderlichen, Stichelänge abgewichen. Die konzeptionelle Lösung für die teilungsgerecht vorgelegten Schussfäden ist ausgearbeitet und kann industriell in der Multiaxial-Nähwirkmaschine durch die in den Transferbemühungen des SFB 528 eingebundenen Unternehmen umgesetzt werden.

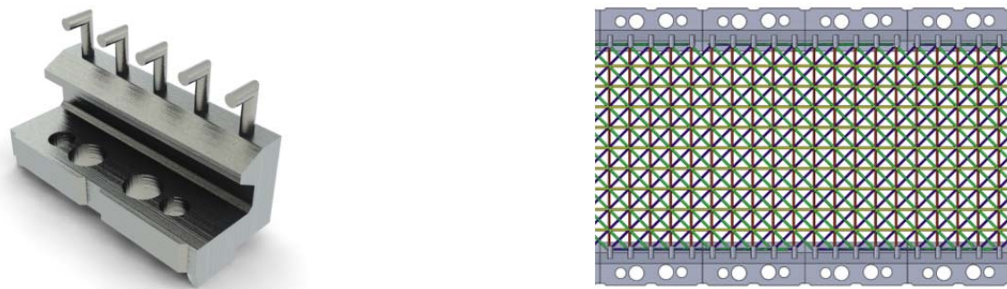


Abbildung 1: Angepasstes Aufnahmeelement der Transportkette (links) und damit realisierbare teilungsgerechte Schussfadenablage (rechts).

Für die Grundlagenuntersuchungen zum Zuschnitt gitterförmiger Bewehrungsstrukturen steht eine Ultraschallschneidmaschine CM-10 der Firma GFM GmbH (Österreich) zur Verfügung, die auf der Grundlage von Vorversuchen am ITM für den Zuschnitt von Betonbewehrungen optimiert wurde. Diese Ultraschallschneidmaschine trennt das Schneidgut mechanisch mit einem mit Ultra-

schallfrequenz schwingendem Messer. Das erlaubt mit einem geeigneten Messer saubere, genaue, reproduzierbare Schnittverläufe. Die durchgeführten Versuche ergaben eine Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,2$ mm und eine Konturgenauigkeit von $\pm 0,8$ mm bei Schneidgeschwindigkeiten von bis zu 60 m/min (Abbildung 2). Es zeigte sich, dass für den Zuschnitt beschichteter Carbonfilamentgarn-Gitterstrukturen vorzugsweise ein Messer mit einem doppelten Schneidwinkel von 38° (Frequenz 20 kHz) in Kombination mit einem Niederhalter verwendet wird. Zur Fixierung des Schneidgutes sollte ein Vakuumtisch in Kombination mit luftdurchlässigem Papier und Abdeckfolie zum Einsatz kommen. Auf der Grundlage der in den umfangreichen Schneidversuchen ermittelten Daten wurde ein Konzept entwickelt, den Schneidvorgang online im Fertigungsprozess durchzuführen. Der ermittelte Platzbedarf ermöglicht jedoch mit der im TP A1 zur Verfügung stehenden Multiaxial-Nähwirkmaschine vom Typ Malimo 14024 (Fa. KARL MAYER Textilmaschinenfabrik GmbH (Deutschland)) am jetzigen Aufstellort keine Integration des Schneidprozesses in die Maschine. Dafür bietet die aus den Ergebnissen des TP T1 (Offermann) hervorgegangene neue, modular aufgebaute Maschinengeneration Malitronic® MULTIAXIAL der gleichen Firma (bereitgestellt für das TP T9 (Cherif)) eine individuelle Gestaltung der Maschine und somit einen Online-Zuschnitt. Das ausgearbeitete Konzept für die Integration der Ultraschallschneidmaschine CM-10 in die Nähwirkmaschine kann nun durch die Transferpartner umgesetzt werden.



Abbildung 2: Messer (links) und damit ausgeführte Schnittkanten an einer Carbonfilamentgarn-Gitterstruktur (rechts).

Für die Aktivierung des Eigenschaftspotenzials von Carbonfilamentgarnen im Beton ist deren Beschichtung unabdingbar. Die im TP A5 (Mäder) entwickelte Polymerbeschichtung für AR-Glasfasern eignet sich ebenso für die Beschichtung der Carbonfilamentgarne [6], sowohl mit der Nähwirktechnik als auch mit der ondulationsfreien Webtechnik. Eine Online-Strukturbeschichtung mit der Epoxidbeschichtung aus dem TP A5 (Mäder) kann mit der vorhandenen Beschichtungs- und Trocknungsanlage technisch nicht realisiert werden. Einschränkend wirken besonders der nicht vorhandene Bauraum und die daraus resultierende kurze Trocknungsstrecke. Aufbauend auf den in diesem TP erworbenen Erkenntnissen erfolgte die Entwicklung einer angepassten Beschichtungs- und Trocknungsanlage. Diese mit der Industrie entwickelte Lösung wird im TP T9 (Cherif) umgesetzt. Damit konnte eine weitere Voraussetzung für die industrielle Nutzung des Textilbetons geschaffen werden.

Langzeitverhalten von Filamentgarnen für Textilbeton

In Zugversuchen an kommerziellen und modifizierten Filamentgarnen ist unter längerer Lasteinwirkung in zahlreichen Fällen ein zeitlich veränderliches Materialverhalten zu beobachten. So sind bereits in Versuchszeiträumen im Stunden- bis Tagebereich Relaxations- sowie Retardationser-

scheinungen nachweisbar. Eine genaue Kenntnis über die Spezifik des Langzeitverhaltens für die im Projekt relevanten Garne sowie die baumechanische Modellierung durch ein zeitabhängiges Materialgesetz bilden die Voraussetzungen, um das Tragverhalten der Filamentgarne als Bewehrungskomponente in einer Betonmatrix abbilden und Aussagen zum Langzeitverhalten von Bauteilen aus Textilbeton treffen zu können. Von besonderer Bedeutung sind für die Anwendung in Textilbetonbauteilen vor allem Carbon- und AR-Glasfaserrovings. Um detailliertere Erkenntnisse zum zeitlich veränderlichen Materialverhalten dieser beiden Materialien zu gewinnen, wurden zahlreiche Probekörper in verschiedenen Feinheiten sowie mit und ohne Applikation eines Beschichtungsmittels unter Dauerbelastung untersucht. Von maßgeblichem Interesse ist dabei das Verhalten im Gebrauchslastbereich, dieser entspricht in den meisten Anwendungen einem Beanspruchungsniveau von ca. 30 bis 50 % der maximalen Zugfestigkeit.

In Vorbereitung eines geeigneten Dauerversuchsstandes wurden Versuche an AR-Glasfilamentgarnen unter konstanten Zugkräften über Zeiträume von mehreren Wochen durchgeführt. Dabei konnte ein signifikanter Dehnungszuwachs innerhalb der ersten Stunden nach Lastaufbringung und anschließend eine moderate Zunahme der Dehnungen beobachtet werden, die in ihrer Form einer klassischen Kriechfunktion entspricht und nach zwei bis drei Monaten weitestgehend abgeklungen ist. Neben der Quantifizierung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens im Zeitverlauf ist die Aufteilung der Kriechdehnung in reversible Anteile (verzögert elastische Verformung) und irreversible Anteile (Fließverformung) von großer Bedeutung, um das Materialverhalten unter veränderlichen Beanspruchungsniveaus mit mechanischen Modellen simulieren zu können.

Dazu wurde ein Versuchsstand entwickelt, der eine Prüfung von Garnproben mit einer Probenlänge von 75 cm ermöglicht. Durch einen modularen Aufbau lassen sich bis zu sechs Probekörper gleichzeitig und unabhängig voneinander untersuchen. Um eine erforderliche Messgenauigkeit von 1 μm zu gewährleisten, ist der Aufstellraum des Versuchsstandes klimatisiert und weitgehend gegen Störungen gesichert. Die Garndehnung wird mit Hilfe von mechanischen Messuhren über die Verschiebung von gleitgelagerten Klemmen präzise ermittelt. Um den Einfluss der Garnlänge auf das Dauerlastverhalten der Garnproben zu untersuchen, wurde ein zweiter Versuchsstand für sehr lange Probekörper entwickelt. Hierbei wird das Garn zwischen zwei mechanischen Klemmen senkrecht eingespannt, die freie Länge der Garnproben beträgt ca. 26 m. Die Belastung des Garns erfolgt durch Anhängen von konstanten Gewichten. Der Längenzuwachs wird über einen am unteren Ende angeordneten Wegstreckenaufnehmer ermittelt. Um mögliche Einflüsse von Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf die Messung ausschließen zu können, werden die Klimadaten ständig mit erfasst und in die Auswertung einbezogen. Außerdem wird die Höhe des Versuchstandes mit einem Lasermessgerät regelmäßig gemessen, um Rückschlüsse auf temperaturbedingte Längenänderungen des Versuchsgebäudes (Turm in massiver Bauart) ziehen zu können. Detaillierte Informationen über die Versuchsstände, Bedingungen und Materialien sind in [8] zu finden.

Bei den Untersuchungen auf beiden Versuchsständen wurde jeweils ein schrittweiser Belastungsauftrag bis zu einem Belastungsniveau von ca. 50 % der maximalen Zugfestigkeit durchgeführt. Sowohl bei den geprüften Glas- als auch bei den Carbonfilamentgarnen ist unter Erstbelastung eine signifikante und nach Entlastung im Garn verbleibende Anfangsdehnung in der Größenordnung von 0,5 bis 0,8 % festzustellen, die maßgeblich in den ersten Minuten bis Stunden nach Lastaufbringung stattfindet. Als Ursache hierfür wurde der Prozess des zugkraftaxialen Ausrichtens und Umorientierens der zunächst mehr oder weniger ungeordnet im Garn liegenden Filamente identifiziert. Im folgenden Zeitverlauf konnte bei den getesteten AR-Glasfilamentgarnen eindeu-

tig ein zeitlich veränderliches Materialverhalten nachgewiesen werden. Die Dehnungszuwächse infolge Kriechen liegen bei den betrachteten Untersuchungszeiträumen von mehreren Monaten unter der o.g. Dauerlast bei etwa 0,3 %. Bei den getesteten Carbonfilamentgarnen wurden nach Einstellen der Anfangsdehnung nach Erstbelastung keine weiteren Dehnungszuwächse festgestellt. Auch nach ca. einem halben Jahr Dauerbelastung (längster Untersuchungszeitraum) konnte eine konstant bleibende Dehnung in den Carbonproben verifiziert werden [7], [8].

Das bei den AR-Glasfilamentgarnen beobachtete Kriechverhalten entspricht in den Grundzügen dem eines viskoelastischen Festkörpers, bei dem nach Änderung (bzw. Aufbringung) des Belastungsniveaus $\sigma(t)$ eine zeitverzögerte Verformung $\epsilon(t)$ eintritt, die allmählich abklingt und sich nach einem gewissen Zeitraum einem Endwert annähert. Somit lässt sich dieses Verhalten in einem rheologischen Modell mit den mechanischen Grundelementen der HOOKE'schen Feder und des NEWTON'schen Dämpfers abbilden. Durch entsprechende Kombination der Grundelemente Feder und Dämpfer und nach Kalibrierung der Materialparameter aus den ausgewerteten Versuchsdaten lässt sich der Kriechverlauf des jeweiligen Filamentgarnes darstellen [7], [8] und als Baustein in das Berechnungsmodell für das Textilbeton-Gesamtbauteil integrieren.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen zum Kriechverhalten wurde der Versuchsstand außerdem so modifiziert, dass auf 2 Stationen zyklische Versuche mit verschiedenen Be- und Entlastungsszenarios durchgeführt werden können. Von Interesse sind auch hier Carbon- und AR-Glasfilamentgarne mit Zugkraftbeanspruchungen im Gebrauchslastbereich von 30 bis 50 % der maximalen Zugfestigkeit. Die Einspannung der Proben erfolgt analog den Dauerlastversuchen mit einer Probenlänge von 75 cm. Die Belastung wird mittels Servomotoren aufgebracht und lässt sich beliebig bis auf 1000 N einstellen. Die präzise Ermittlung der Längenänderung erfolgt mittels eines linearen Längenänderungssystemes auf Basis optischer Sensoren, wobei in Relation zur Ausgangslänge der jeweils relative Dehnungszuwachs ermittelt wird. Die Versuche wurden weggesteuert durchgeführt und die Probekörper jeweils mit bis zu 100.000 Lastzyklen beaufschlagt. Die Versuchsergebnisse unter zyklischen Belastungen zeigen, wie häufige Lastwechsel und hohe Lastintensitäten zu einer zunehmenden Schädigung im Garn führen. Dabei wurden deutliche Unterschiede zwischen den unbeschichteten Probekörpern und den beschichteten festgestellt. Die unbeschichteten Carbonfilamentgarne weisen bei einem Belastungsniveau von ca. 30 % einen Schädigungsgrad von etwa 10 % auf. Das bedeutet, etwa 10 % der ursprünglich intakten Querschnittsfläche gehen durch sukzessives Versagen einzelner Filamente verloren. Das ist auch visuell anhand der abspießenden Filamente sehr gut erkennbar. Bei einem Belastungsniveau von ca. 50 % beträgt der Schädigungsgrad etwa 15 %. Bei den getesteten AR-Glasfilamentgarnen ist ein prinzipiell ähnliches Verhalten festzustellen, wobei die Schädigung etwas später beginnt, anschließend jedoch deutlich stärker zunimmt. Bei den getesteten Lastniveaus von 30 % bzw. 50 % wurden Schädigungsgrade in Höhe von 5 % bzw. 25 % ermittelt.

Im Gegensatz zu den unbeschichteten Filamentgarnen zeigen die beschichteten Garne nahezu keine Anfälligkeit gegenüber zyklischen Beanspruchungen. Bei allen getesteten Probekörpern wurden bis zur maximalen Lastintensität von 50 % der Zugfestigkeit keine abspießenden Filamente beobachtet, die Querschnittsfläche bleibt auch nach 100.000 Zyklen praktisch unverändert. Das ist dadurch zu erklären, dass die Beschichtung zur Erhöhung der Reibung zwischen den einzelnen Filamenten und somit zu einem besseren Verbund zwischen diesen führt. Damit werden alle Filamente gleichermaßen zur Lastabtragung herangezogen, so dass ein Aufreißen der Querschnittsfläche und damit ein Einzelfilamentversagen verhindert wird.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Rezensierte Veröffentlichungen und Buchveröffentlichungen

- [1] HAUSDING, J.; CHERIF, C.: Improvements in the warp knitting process and new patterning techniques for stitch-bonded textiles. In: *The Journal of the Textile Institute*. 101 (2010), 3, S. 187-196 (doi:10.1080/00405000802370354)
- [2] HAUSDING, J.: *Multiaxiale Gelege auf Basis der Kettenwirktechnik – Technologie für Mehrschichtverbunde mit variabler Lagenanordnung*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2010 (<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-27716>)
- [3] LORENZ, E.; ORTLEPP, R.; HAUSDING, J.; CHERIF, C.: Effizienzsteigerung von Textilbeton durch Einsatz textiler Bewehrungen nach dem erweiterten Nähwirkverfahren. In: *Beton- und Stahlbetonbau*. 106 (2011), 1, S. 21-30 (doi: 10.1002/best.201000072)
- [4] HAUSDING, J.; LORENZ, E.; ORTLEPP, R.; LUNDAHL, A.; CHERIF, C.: Application of stitch-bonded multi-pplies made by using the extended warp knitting process – Reinforcements with symmetrical layer arrangement for concrete. In: *The Journal of the Textile Institute*. 102 (2011), 8, S. 726-738
- [5] KLEICKE, R.; HAUSDING, J.; CHERIF, C.; LORENZ, E.; ORTLEPP, R.: Research regarding the use of stitch-bonded and leno woven non-crimp fabrics in textile reinforced concrete. In: BRAMESHUBER, W. (Hrsg.): *2nd International Conference on Textile Reinforced Concrete (ICTRC) 2010. Bagnoux : RILEM Publications S.A.R.L., 2010*
- [6] KOECKRITZ, U.; CHERIF, CH.; WEILAND, S.; CURBACH, M.: In-Situ Polymer Coating of Open Grid Warp Knitted Fabrics for Textile Reinforced Concrete Application. In: *Journal of Industrial Textiles* (2010), doi:10.1177/1528083709102938, (<http://jit.sagepub.com/content/40/2/157.full.pdf+html>)
- [7] SEIDEL, A.; LEPENIES, I.; ENGLER, TH.; CHERIF, CH.; ZASTRAU, B.: Aspects of Creep Behavior of Textile Reinforcements for Composite Materials. *The Open Materials Science Journal* (2009) 3, pp. 67-79 (DOI: 10.2174/1874088X00903010067) <http://www.bentham.org/open/tomsj/articles/V003/67TOMSJ.pdf>
- [8] SEIDEL, A., YOUNES, A.; ENGLER, TH.; CHERIF, CH.: On the mechanical behavior of carbon and glass fiber filament yarns under long-term load. Vortrag / *ACI 2010 Spring Convention, Chicago, Illinois (USA), March 21-25, 2010*

b) Andere Veröffentlichungen

keine.

c) Patente

keine.

A1
Cherif

5.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM TEILPROJEKT A3

5.1.1 Konstitutive Beziehungen für multiaxial beanspruchten Textilbeton

5.1.2 Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Bernd W. Zastrau

Geburtsdatum: 30.04.1951

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Mechanik und Flächentragwerke
Helmholtzstr. 10
01069 Dresden

Telefon: (03 51) 463-3 53 69 / -3 35 08

Telefax: (03 51) 463-3 72 00

E-Mail: Bernd.Zastrau@tu-dresden.de

5.2 ENTWICKLUNG DES TEILPROJEKTS

5.2.1 Bericht

Kenntnisstand bei der letzten Antragstellung

Die Arbeiten in diesem Teilprojekt befassten sich in den zurückliegenden Phasen mit der Simulation des uniaxialen Zugtragverhaltens von textilbewehrtem Beton. Hierzu wurde ein hierarchisches Materialmodell eingeführt, welches den heterogenen Verbundwerkstoff auf drei verschiedenen auflösenden Strukturebenen betrachtet. Auf der Mikroebene werden die Rovings in Einzelfilamente aufgelöst und deren Interaktionen berücksichtigt, womit in Verbindung mit der Verbundbeschreibung der Filamente untereinander sowie mit der Matrix ein effektives Rovingverhalten ermittelt werden kann. Auf der Mesoebene werden Rovings als Ganzes abgebildet, wobei hier das auf der Mikroebene gewonnene effektive Rovingverhalten angesetzt werden kann. Auf dieser Ebene lässt sich mit Abbildung von Matrixrissbildung und Rovingversagen das makroskopische Materialverhalten simulieren, was zu einer verschmierten Materialbetrachtung führt, mit welcher ein Bauteil auf der Makroebene betrachtet werden kann. Diese drei Strukturebenen wurden zur Entwicklung eines Mikro-Meso-Makro-Prognosemodells in einem Simulationsalgorithmus für uniaxiale Zugbeanspruchung zusammengefasst [8], welches die typischen Schädigungs- und Versagensmechanismen auf den zugeordneten Strukturebenen abbildet. Dabei werden das Reißen der Einzelfilamente, das Reißen der im Querschnitt ungleichmäßig beanspruchten Multifilamentgarne und die Verbunddegradation innerhalb des Roving sowie zwischen Roving und Matrix abgebildet. Der Entwicklungsstand des Modells erlaubt die Simulation von Filamentauszugsversuchen (TP A5), Rovingauszugsversuchen (TP A2) und Dehnkörperversuchen (TP B1). Zur Kalibrierung der Modellparameter können die in den genannten Teilprojekten experimentell gewonnenen Messdaten herangezogen werden. Die hierbei zu identifizierende Verbundbeziehung $\tau(s)$ zwischen übertragbarer

Verbundspannung τ und Schlupf s kann allerdings aufgrund der vorliegenden Experimentaldaten nur indirekt ermittelt werden, da dabei nur äußere Kraft-Auszugsweg-Beziehungen aufgezeichnet und keine Verbundspannungen innerhalb des Bauteils gemessen werden können. Die Annahme einer Verbundbeziehung ermöglicht eine Simulation der zugehörigen Kraft-Auszugsweg-Beziehung. Durch Variation der angenommenen Verbundbeziehung bis zum Übereinstimmen der errechneten und gemessenen Kraft-Auszugsweg-Abhängigkeit kann eine Näherungslösung für die Verbundbeziehung zwischen Filament und Matrix iteriert werden. Bei der Behandlung von Multifilamentgarnen gilt es zu berücksichtigen, dass der Verbund der Filamente untereinander nicht dem direkten Verbund zwischen Filament und Matrix gleicht und tendenziell geringere Schubspannungen übertragen werden können. Diese Zusammenhänge bewirken ein ungleichmäßiges Spannungsprofil im Roving, wobei die äußersten intakten Filamente höheren Spannungen ausgesetzt sind. Zur Abbildung des demnach von außen nach innen verlaufenden Rovingquerschnittsversagens sind daher zwei Faktoren im Modell einzuarbeiten gewesen. Zur Berücksichtigung der im Rovinginneren geringeren übertragbaren Verbundspannungen wurde eine Verbundabminderungsfunktion D_τ eingeführt, welche ausgehend von der idealen übertragbaren Verbundspannung zwischen Filament und Matrix jene zwischen Filamenten untereinander festlegt und für den verbleibenden Verbundumfang angesetzt wird. Gleichzeitig tritt bei dem sukzessiven Versagen der Filamente eine Verringerung des noch intakten Rovingquerschnitts auf, welche durch eine Querschnittsschädigungsfunktion D_A beschrieben wurde. Die Einbindung der Schädigungsevolution erlaubte es nunmehr auch, das uniaxiale Materialverhalten unter zyklischen Beanspruchungen abzubilden.

Ziele und Ergebnisse der letzten Forschungsperiode

Zielstellung bei der Weiterführung des Teilprojekts in der 4. Phase war es vor allem, neben den uniaxialen Spezialfällen ein verallgemeinertes Modell zur Behandlung mehrdimensionaler Probleme zu entwickeln. Diesem sollte die mesoskopische Beschreibung des Verbundmaterials zugrunde gelegt werden, wobei das effektive Rovingverhalten ebenfalls anhand mikromechanischer Modelle ermittelt werden sollte. Effiziente Strukturmodelle basierend auf Finite-Elemente-Diskretisierungen sollten entwickelt und angewendet werden.

Mesoskopisches Modell

Als Modellierungsgrundlage wurde ein Finite-Elemente-Modell erzeugt, welches sich zur Wahrung von Vergleichsmöglichkeiten an der Geometrie der zu diesem Zeitpunkt bereits umfangreich geprüften Probekörper des Teilprojekts B1 orientierte. Die Modellierung erfolgte entsprechend der Zielsetzung auf der mesoskopischen Strukturebene. Mit dem Ziel, zu einem späteren Zeitpunkt auch sukzessives Versagen der eingelegten Bewehrungslagen abbilden zu können, wurde auch der Aufbau des Probekörpers in Dickenrichtung im Modell eingearbeitet. Dazu bilden mehrere Lagen finiter Volumenelemente die Feinbetonmatrix, während die Rovings der Textilgelege durch darin angeordnete finite Stabelemente repräsentiert werden. Zur Untersuchung verschiedener Belastungsverhältnisse und Bewehrungsorientierungen wurde zur Modellgenerierung ein Script entwickelt, welches in der Lage ist, die entsprechenden Finite-Elemente-Netze parameterabhängig zu erzeugen. In Bild 1 ist ein auf diese Weise generiertes Netz dargestellt; die Ausschnittsvergrößerung verdeutlicht die Auflösung der Bewehrungslagen in Dickenrichtung.

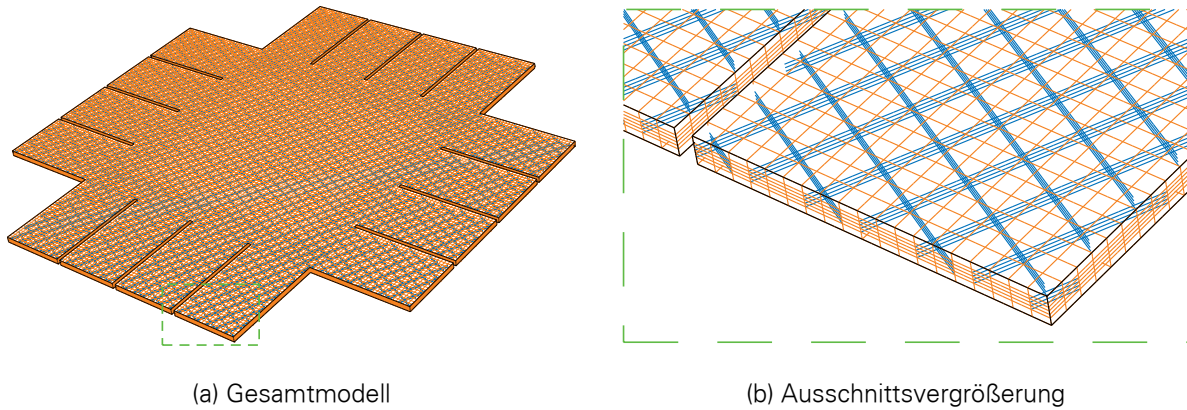
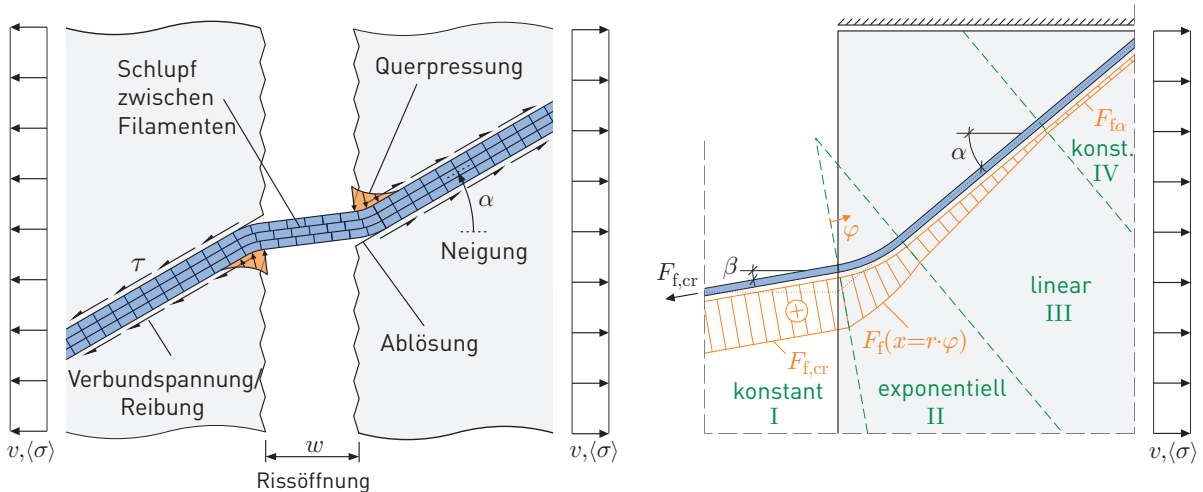


Bild 1: Mesoskopisches Finite-Elemente-Modell mit beispielhafter Bewehrungsorientierung

Analytische Betrachtung des effektiven Rovingverhaltens

Nach der Erzeugung dieses Modells galt es, das effektive Tragverhalten der mesoskopisch modellierten Rovings zu ermitteln, um dieses im dargestellten Modell zu implementieren. Von wesentlichem Interesse ist dabei das Verhalten der Rovings bei der Überbrückung von Matrixrissen. Experimentelle Untersuchungsergebnisse im Teilprojekt B1 zeigten deutlich, dass bei biaxialer Beanspruchung Risse unter verschiedenen Winkeln bezüglich der Bewehrungsrichtungen auftreten, was die grundsätzliche Annahme von zur Bewehrung orthogonalen Rissen, wie es bei der uniaxialen Modellierung weitgehend statthaft war, hier nicht zulässt. Sobald Richtungsabweichungen zwischen Bewehrungsorientierung und Rissöffnungsrichtung auftreten, werden die rissüberbrückenden Rovings zwangsläufig umgelenkt, wodurch sich eine Vielzahl zusätzlicher Aspekte ergibt, die bei der Beschreibung des mehraxialen (hier speziell biaxialen) Materialverhaltens berücksichtigt werden müssen. Dazu zählen vor allem Einflüsse, die sich aus der schrägen Überbrückung von Rissen durch Rovings ergeben und das Rovingtragverhalten beeinflussen, was auf mikromechanischer Ebene untersucht werden kann.



(a) Illustration zu berücksichtigender Effekte bei schräger Rissüberbrückung

(b) Normalkraftverlauf im Roving im Riss-, Umlenkungs- und Verankerungsbereich sowie im Bereich gleicher Roving- und Matrixdehnung

Bild 2: Rissüberbrückung durch einen Roving mit ungleicher Rissöffnungs- und Bewehrungsrichtung

In Bild 2a sind die wesentlichen Effekte, die im Weiteren verfolgt wurden, dargestellt. Die infolge der Umlenkwirkung auftretende Querpressung kann die in diesem Bereich übertragbaren Verbundspannungen beeinflussen. Durch Ansatz einer mit zunehmender Querpressung linear ansteigenden übertragbaren Verbundspannung

$$\tau(\bar{\sigma}(x)) = \tau_0 + k_{\bar{\sigma}} \bar{\sigma}(x) \quad (1)$$

mit τ_0 Grundwert der übertragbaren Verbundspannung
 $k_{\bar{\sigma}}$ Verbundparameter
 $\bar{\sigma}(x)$ Querpressung

kann für den Roving-Normalkraftverlauf im Bereich einer kreisbogenförmig angenommenen Umlenkung (vgl. Bereich II in Bild 2b) die Beziehung

$$F_f(x) = -\tau_0 r b_f k_{\bar{\sigma}}^{-1} + (F_f(x_0) + \tau_0 r b_f k_{\bar{\sigma}}^{-1}) e^{-u k_{\bar{\sigma}} (x-x_0)/(r b_f)} \quad (2)$$

mit b_f wirksame Rovingauflagebreite der Pressungsfläche
 r Krümmungsradius der Rovingumlenkung
 u wirksamer Verbundumfang
 $F_f(x_0)$ Anfangswert der Normalkraft am Umlenkungsbeginn

gewonnen werden, welche auch für nicht-kreisbogenförmige Umlenkungen in guter Näherung angewendet werden kann, wenn eine Diskretisierung in kreisbogenförmige Abschnitte vorgenommen wird. Im sich anschließenden geraden Einbindungsbereich erfolgt eine Kraftübertragung vom Roving in die Matrix (vgl. Bereich III in Bild 2b). Da dieses Problem der Verbundbeschreibung der uniaxialen Modelle entspricht, wird darauf hier nicht näher eingegangen. Der Endwert $F_{f\alpha}$ der Rovingkraft stellt sich in dem Bereich ein, in dem kein Schlupf mehr auftritt und demnach die Dehnungen in Roving und Matrix gleich sind. Dieser Randwert lässt sich anhand einer Dehnungstransformation [9] bestimmen, woraus sich das Verhältnis

$$k_{\alpha} = F_{f\alpha}/F = \frac{(1+\nu_m)(2\nu_m-1)^2 \cos^3 \alpha \rho}{2\nu_m \left(2\nu_m(\nu_m-1) - \frac{E_m}{E_f} + 1 \right) \rho + (1-2\nu_m)(1-\nu_m) \left((1-\rho) \frac{E_m}{E_f} + \rho \right)} \quad (3)$$

mit $F_{f\alpha} = \sigma_{f\alpha 3} A_{f\alpha}$ Rovingnormalkraft
 $F = \langle \sigma \rangle (A_f + A_m)$ äußere Belastung
 ν_m, E_m Querdehnzahl und E-Modul der Matrix
 ρ, E_f Faservolumengehalt, E-Modul des Roving

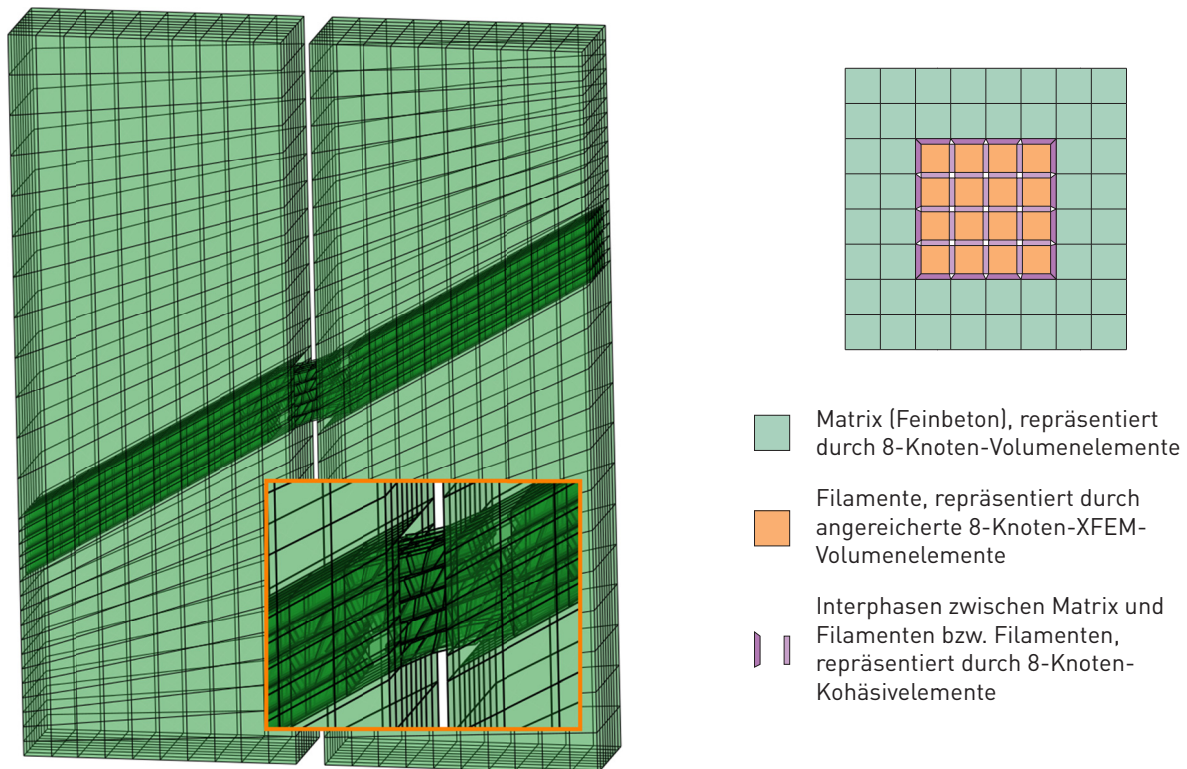
ergibt.

Numerische Untersuchungen

Neben der analytischen Behandlung des effektiven Rovingverhaltens wurden auch numerische Modellierungen erzeugt, um vergleichende Betrachtungen anzustellen. Nach Tastversuchen anhand ebener Modelle wurde die Situation der Rissüberbrückung dreidimensional modelliert, wie es in Bild 3 dargestellt wird. Insbesondere die Mitwirkung der Betondeckung auf die Tragmechanismen war bei einer ebenen Modellierung nicht realistisch abbildbar. Ausgehend von einem bereits vorhandenen Matrixriss wurde der dargestellte Ausschnitt entsprechend Bild 3a vernetzt. Der



Rovingquerschnitt wurde dabei zunächst vereinfachend rechteckig angenommen, um zugunsten der Identifizierung und Behebung eventueller Probleme eine ausreichend übersichtliche Modellstruktur zu bewahren. Zur Abbildung sukzessiven Filamentversagens wurden zur Repräsentation der Filamente im Modell angereicherte Volumenelemente im Sinne der erweiterten Finite-Elemente-Methode (XFEM) verwendet (vgl. Bild 3b), worauf hingegen bei der Matrix aufgrund der unmittelbaren Nähe zum Riss verzichtet wurde. Die Verbundinterphasen werden durch Kohäsivelemente repräsentiert, deren Materialverhalten mithilfe ermittelter Verbundbeziehungen beschrieben werden kann. Die Ausschnittsvergrößerung in Bild 3a zeigt gerissene Elemente bei fortgeschrittener Rissöffnung einer Testrechnung. Die Rissorientierungen erscheinen allerdings zunächst nicht plausibel, zumal die im Modell vorhandene ideale Symmetrie zu einer unrealistischen Versagenskinematik führt. Alternativ zur Verbundbeschreibung durch diskrete Kohäsivelemente wurden in einem weiteren Modell oberflächenbasierte Kohäsivzonen verwendet, was eine Vereinfachung der Netzstrukturierung ermöglicht, jedoch aus bisweilen ungeklärten Gründen nicht ohne Abbruch berechnet werden kann. Die Fortführung der Untersuchungen zur Weiterentwicklung dieser Modellierungen ist daher weiterhin Gegenstand laufender Forschungsarbeit.



(a) Gesamtmodell in verformter Situation mit gerissenen Einzelfilamenten (b) Prinzipieller Modellaufbau im Querschnitt mit Angabe der verwendeten Elementtypen

Bild 3: Mikromechanisches XFEM-Modell zur Simulation des effektiven Rovingverhaltens bei schräger Rissüberbrückung

Probleme und Schwierigkeiten

Ein nicht unerhebliches Problem bei der Durchführung des Teilprojekts im geplanten Umfang stellte ein Personalwechsel dar, der naturgemäß den Rückgriff auf bereits erreichte Fortschritte erschwerte und eine neuerliche Einarbeitungsphase unumgänglich machte. Bei der Bearbeitung des Projekts und den verbundenen näheren Untersuchungen, speziell in Bezug auf die angedachte

Modellerweiterung zur Abbildung mehrdimensionaler Probleme, zeigten sich einige Effekte und Teilprobleme, die zuvor schwer abschätzbar waren und in Teilen bei der letzten Antragstellung in Umfang und Tragweite unterschätzt wurden [3]. Insbesondere die gegenüber der uniaxialen Betrachtung fehlende Kenntnis der Rissrichtungen bezüglich der Bewehrungs- und Belastungsrichtungen stellt für eine vergleichbar einfache diskrete Modellbildung ein bedeutendes Hindernis dar. Die Berechnungen der dargestellten und weiteren Finite-Elemente-Modelle scheiterten oft an numerischen Schwierigkeiten der nichtlinearen und diskontinuierlichen Probleme. Mangelnde Konvergenz und Stagnation der Berechnung durch bis auf null abnehmende maximale Lastinkremente endeten zumeist im Abbruch der Berechnung kurz nach der Initiierung eines ersten Risses.

Zusätzlich erbrachte Leistungen

In Kooperation mit dem Teilprojekt D4 wurden Vergleichsrechnungen zu in Großversuchen geprüften textilverstärkten Platten durchgeführt. Dabei wurden anhand der simulierten Last-Verformungs-Beziehung sowohl Traglast als auch Verformung prognostiziert. Hierzu wurde ein Simulationswerkzeug entwickelt, welches aus beliebigen Teilquerschnitten und Materialien zusammengesetzte Balken- und Plattenquerschnitte erfassen kann, wobei die Vorgabe des Materialverhaltens durch effektive einaxiale Spannungs-Dehnungs-Beziehungen erfolgen kann, wie sie bei der Durchführung von Experimenten an den Einzelkomponenten üblicherweise aufgezeichnet werden.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

Referierte Veröffentlichungen:

- [1] BEYER, F.; ZASTRAU, B. W.: Predicting the Uniaxial Material Properties of TRC and Implications for a Biaxial Model. In: *Proceedings of the ACI Fall 2010 Convention Pittsburgh (Textile Reinforced Concrete – Modern Developments)*, 2010 (zur Veröffentlichung angenommen).
- [2] BEYER, F.; ZASTRAU, B. W.; JESSE, D.; JESSE, F.: On the Load Bearing Behavior of Textile Reinforced Concrete under Biaxial Loading. In: *Proceedings of the International RILEM Conference of Material Science (MatSci), Volume I: 2nd ICTRC Textile Reinforce Concrete*, 2010.
- [3] BEYER, F.; ZASTRAU B. W.: Aspekte der Modellierung des Tragverhaltens von Textilbeton unter biaxialer Beanspruchung. In: *Proceedings of the 6th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS6)*, 2011 (zur Veröffentlichung angenommen).

Vorträge auf wesentlichen Fachkongressen:

- [4] ZASTRAU, B. W.; BEYER, F.: Biaxially Loaded Textile Reinforced Concrete Structures with Inclined Crack Bridging. *IV European Conference on Computational Mechanics (ECCM)*, Paris, 2010.
- [5] ZASTRAU, B. W.; BEYER, F.: Fracture Behaviour of Textile Reinforced Concrete under Biaxial Loading Conditions, *37th Solid Mechanics Conference (SolMech)*, Warszawa, 2010.
- [6] BEYER, F.; ZASTRAU, B. W.; JESSE, D.; JESSE, F.: On the Load Bearing Behavior of Textile Reinforced Concrete under Biaxial Loading, *2nd International Conference on Textile Reinforced Concrete (ICTRC)*, Aachen, 2010.

- [7] ZASTRAU B. W.; BEYER, F.; RICHTER, M.: Predicting the Uniaxial Material Properties of TRC and Implications for a Biaxial Model, *ACI Fall 2010 Convention*, Pittsburgh, 2010.

Sonstige Literatur:

- [8] LEPENIES, I.: *Zur hierarchischen und simultanen Multi-Skalen-Analyse von Textilbeton*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2007
- [9] RICHTER, M.: *Entwicklung mechanischer Modelle zur analytischen Beschreibung der Materialeigenschaften von textildbewehrtem Feinbeton*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2005

A3

Zastrau

1.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM TEILPROJEKT A5

1.1.1 Faser- und Grenzschichtdesign mit Polymeren

1.1.2 Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. habil. Edith Mäder

Geburtsdatum: 02.07.1948

Dienstanschrift: Leibniz-Institut für Polymerforschung e. V.

Hohe Straße 6

01069 Dresden

Telefon: (0351) 4658-305

E-Mail: emaeder@ipfdd.de

Entwicklung des Teilprojekts

1.1.3 Bericht

Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Nach dem Aufbau der Glasfaserspinnanlage am IPF Dresden war es möglich, eigene Schichten für AR-Glasfasern zu entwickeln [1]. Besonders geeignet erwiesen sich als Filmbildner höher molekulare Epoxidharzdispersionen und eine Mischung aus Aminosilanen (Anbindung der carboxylierten Styren-Butadiene) sowie Alkylsilanen als Haftvermittler. Durch die chemische Kopplung von Schichten mit kompatiblen Polymerbeschichtungen gelang es, die Dauerhaftigkeit wesentlich zu erhöhen sowie die Rovingzugfestigkeit als auch das Tragverhalten von AR- und Carbonrovings im Verbund deutlich zu verbessern. Voruntersuchungen zum Einsatz von Nanomaterialien in der Schlichte sowie Beschichtung ließen die Schlussfolgerung zu, dass diese durch eine Barrierewirkung in der Grenzschicht zu einer Erhöhung der Dauerhaftigkeit führen können. Außerdem bewirkten die Nanomaterialien in ersten Tests eine Verbesserung des Verformungsverhaltens in der Grenzschicht, so dass weiterführende Untersuchungen dazu einen wesentlichen Bestandteil der letzten Förderperiode bildeten. Um die mit der Oberflächenmodifizierung durch Nanomaterialien zu erreichenden multifunktionalen Effekte experimentell umfassend charakterisieren zu können, wurde eine enge Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt und A6 (MECHTCHERINE) angestrebt. Die Verbesserung der Faser-Matrix-Haftung durch die Applikation neu entwickelter Schlichte- und Beschichtungsrezepturen wurde anhand von Einzelfaserauszugversuchen an kommerziellen sowie selbst gesponnenen AR-Glasfasern nachgewiesen. Untersuchungen zum Verhalten der Grenzschichten unter Zug-Druck-Wechselbelastung sowie Mikroermüdungsversuche sind aus der Literatur nicht bekannt. Um die Aufklärung der Wirkmechanismen zu komplettieren wurden deshalb mikromechanische Untersuchungen an Einzelfaser-Modellverbunden unter zyklischer Beanspruchung notwendig.

Weiterhin war zum Zeitpunkt der letzten Antragstellung offen, in welchem Umfang flammhemmende Effekte durch die Kombination von Nanomaterialien in der Polymerbeschichtung mit

Flammschutzmitteln auf Basis anorganischer Stickstoff- und Phosphorverbindungen zu erreichen sind. Zahlreiche Arbeiten aus der Literatur beschreiben den Einsatz von Schichtsilikaten zum Zweck der Flammhemmung in verschiedenen Polymermatrices [3],[4]. Untersuchungen zum Flammverhalten textiler AR-Glasstrukturen mit Polymerbeschichtungen unter Einsatz von Nanopartikeln werden in der Literatur nicht beschrieben.

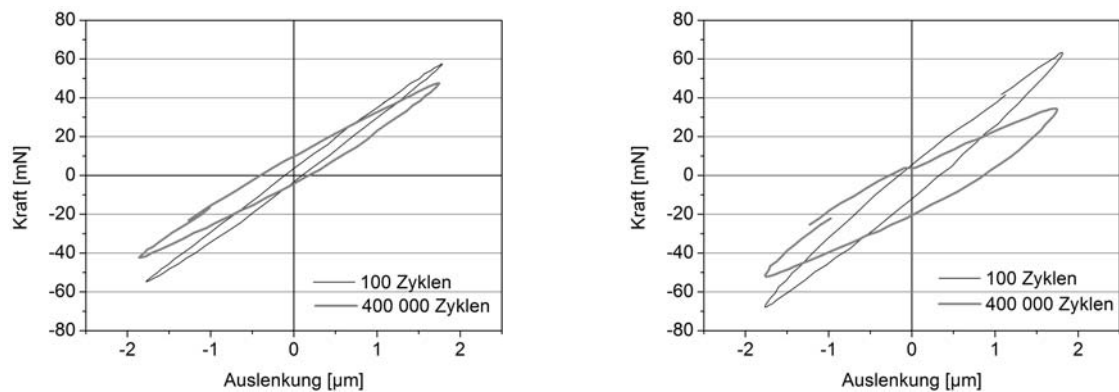
Um das Alterungsverhalten/die Dauerhaftigkeit von glasfaserbewehrten Betonstrukturen zu beschreiben, existieren in der Literatur verschiedene Modelle, z. B. [2]. In wie weit sich diese Modelle zur Beschreibung der Lebensdauer von AR-Glasstrukturen in Betonverbunden eignen, auf die zusätzlich eine Polymerbeschichtung aufgebracht wurde, war nicht bekannt. Voruntersuchungen waren bisher nur an polymerbeschichteten AR-Glasrovings nach Lagerung in NaOH-Lösung durchgeführt worden.

Ergebnisse sowie angewandte und neu entwickelte Methoden

In der dritten Bearbeitungsphase wird durch das Einbringen von Nanopartikeln in die bereits erfolgreich eingesetzten Schichten bzw. Beschichtungen die Oberflächenmorphologie der alkali-resistenten Glasfasern gezielt variiert. Durch das Einbringen von Carbon Nanotubes in die Schichte wurde eine signifikante Erhöhung der Filamentfestigkeit erreicht [5],[6]. Die Untersuchung der Faseroberfläche mittels Rasterkraftmikroskopie (AFM) zeigte die nanoskaligen Veränderungen der Oberflächenstruktur durch Nanoclaypartikel in Abhängigkeit von der verwendeten Styrol-Butadien-Dispersion. Im Fall gut dispergierter und eingebetteter Nanoclaypartikel konnte eine verbesserte Alkaliresistenz nachgewiesen werden, andernfalls dominiert der hydrophile Charakter der Claypartikel die Glasfaseroberflächen [7]. In Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt A6 (MECHTCHERINE) wurden Untersuchungen zum Leistungsvermögen von Betonverbunden an Glasfilamentgarnen mit unterschiedlichen Nanoclay-Gehalten durchgeführt. Die Ergebnisse des unterbewehrten Zugversuches zeigten die angestrebte Verschiebung der maximalen Faserauszugkraft zu geringeren Rissweiten. Die Gefügeuntersuchungen weisen auf einen steigenden Anteil an CSH-Phasen mit zunehmendem Nanoclay-Gehalt in der Grenzschicht hin. Dadurch findet eine intensivere Anbindung zwischen beschichteten Filamenten und Betonmatrix statt, wodurch bereits bei geringen Rissweiten eine Spannungsübertragung ermöglicht wird. Es wird davon ausgegangen, dass die Claypartikel Kristallisationskeime für Hydratationsprodukte darstellen und so das dichte Betongefüge hervorrufen [8]. AR-Glasfasern mit multiwalled carbon nanotubes (MWCNT) Netzwerken wurden als multifunktionale Grenzschichtensensoren [9] zur in-situ Detektion der elektrischen Widerstandsänderung parallel zu Kraft-Dehnungs-Untersuchungen sowie in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte untersucht.

Die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Arbeiten zur Entwicklung von Polymerbeschichtungen für AR-Glasfasern wurden in der dritten Antragsphase auf Carbonrovings übertragen. Dabei zeigte sich die Entwicklung von Beschichtungen auf Epoxidharzbasis als besonders zielführend. Mit den entwickelten Beschichtungen wurde nicht nur die Rovingzugfestigkeit stark erhöht (doppelte Zugfestigkeit für Tenax HTS mit Beschichtung auf Epoxyester-Basis [7]), sondern auch das Leistungsvermögen im Betonverbund signifikant verbessert. Das Auftreten des Kraftmaximums bei geringen oder hohen Rissweiten kann über die Steifigkeit der Epoxidharzbeschichtung gezielt variiert werden [8].

An Eigenbau-Messplätzen des IPF wurden mikromechanische Untersuchungen zur Charakterisierung des Grenzschichtverhaltens unter zyklischer Beanspruchung an Einzelfaser-Modellverbunden durchgeführt. In Bild 1 sind die Hysteresekurven bei einer sinusförmigen Zug-Druck-Belastung für geschichtete AR-Glasfasern sowie AR-Glasfasern mit zusätzlicher Polymerbeschichtung (vernetztes Styrol-Butadien-Copolymer) dargestellt. Die Modellverbunde mit geschichteten Glasfasern (Schichte auf Epoxidharzbasis) zeigen enge Hystereseschleifen (hoher elastischer Anteil) sowie eine leichte Abnahme der maximalen Kraft mit zunehmender Zyklenzahl, was auf eine geringe Ermüdung der Grenzschicht hinweist. Das Aufbringen der Beschichtung resultiert in einer Aufweitung der Hysteresekurven entsprechend der Energiedissipation aufgrund des viskoelastischen Verhaltens des Styrol-Butadiens [10].



(a) geschichtete AR-Glasfaser

(b) geschichtete AR-Glasfaser mit Polymerbeschichtung

Bild 1: Hysteresekurven bei sinusförmiger Beanspruchung (Frequenz 10 Hz; Amplitude 1,7 μm) nach 100 sowie 400 000 Belastungszyklen

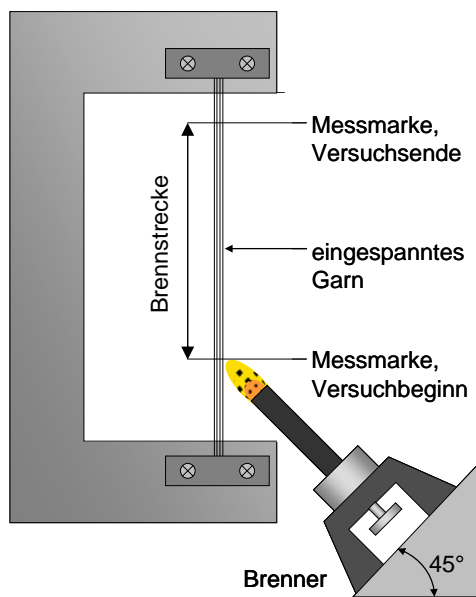
Der Einfluss verschiedener Nanopartikel und Flammschutzmittel auf das Flammverhalten beschichteter AR-Glasfilamentgarne wurde in einem umfangreichen Versuchsprogramm untersucht (Tabelle 1). Für die Ermittlung des Brandverhaltens von polymerbeschichteten Verstärkungsfasern existiert keine Norm. Daher wurde in Anlehnung an die Vorschrift UL94 für Kunststoffe das Brandverhalten an jeweils 50 vertikal eingespannten Proben untersucht (Bild 1). Darüber hinaus wurden thermogravimetrische und mikrokalorimetrische Untersuchungen an Beschichtungsfilmen durchgeführt, um die Zersetzungstemperaturen bzw. die mittlere Wärmefreisetzung zu bestimmen. Zur Beschreibung der Brennbarkeit wurde die Durchbrennquote (DBQ) definiert. Sie bezieht sich auf eine festgelegte Brennstrecke (in [cm]) und gibt prozentual die Anzahl der Proben an, die über diese Strecke brannten (Beispiel: DBQ(15)= 42 %; 42 % der Proben brannten über eine Strecke von 15 cm, bei 58 % der Proben trat vor dem Erreichen der 15 cm-Marke ein Erlöschen ein). Grundsätzlich wiesen Beschichtungssysteme auf Epoxidharzbasis eine geringere Brennbarkeit auf als Beschichtungen auf Styrol-Butadien-Basis. Weiterhin zeigte die Brennbarkeit in den Flammversuchen eine starke Abhängigkeit vom Typ und der Feinheit des Glasfilamentgarnes, wobei die Proben mit der niedrigsten Feinheit (IPF ARG 2/2 120 tex) die geringste Brennbarkeit zeigten. Die Wirksamkeit der eingesetzten Flammschutzmittel ist stark abhängig von der Konzentration,

Tabelle 1: Übersicht der eingesetzten Materialien (bei Variation des Massenanteils) zur Untersuchung des Flammverhaltens beschichteter AR-Glasfilamentgarne

Material	Typ/ Bemerkungen
Glasfilamentgarn	IPF ARG 2/2 (120 tex) IPF ARG 2/2 (600 tex) VET ARG (640 tex)
Gelege	VET ARG (640 tex), Kettfaden-/Schussfadenabstand: 7 mm/10 mm, PP-Wirkfaden
Polymerdispersion	Styrol-Butadien-Basis (P2) Epoxidharz-Basis (C6)
Flammschutzmittel	flammhemmende Wirkung basiert auf: <ul style="list-style-type: none"> ▪ stickstoffhaltigem Phosphorsäuresalz ▪ anorganischen Stickstoff- und Phosphorverbindungen ▪ org./anorg. Stickstoff- und Phosphorverbindungen
Flammschutzadditiv	<ul style="list-style-type: none"> ▪ bromhaltigen Verbindungen
Nanopartikel	organisch modifizierter Montmorillonit unmodifizierter Natrium-Montmorillonit Layered Double Hydroxides (LDH)

jedoch wird durch höhere Konzentrationen nicht zwingend eine bessere Flammhemmung erzielt. Für das Beschichtungssystem auf Styrol-Butadien-Basis führte das Flammschutzmittel auf Basis anorganischer Stickstoff- und Phosphorverbindungen zu den geringsten DBQ. Bedingt durch dieses Flammschutzmittel konnte die DBQ von IPF ARG 2/2 (120 tex) mit Beschichtung P2 von DBQ(20)=42% auf DBQ(20)=2% gesenkt werden. Das Aufbringen des gleichen Flammschutzmittels auf VET ARG (640 tex) führte jedoch kaum zu einer Verringerung der DBQ (DBQ(20) für VET ARG mit P2 beträgt 100 %; mit Flammschutzmittel 98 %). Durch die Kombination von Flammschutzmitteln und Nanopartikeln wurde eine bessere Flammhemmung erzielt als durch den alleinigen Einsatz von Flammschutzmitteln. Durch das Zufügen von unmodifizierten Natrium-Montmorilloniten wurde die DBQ von VET ARG (640 tex) von DBQ(20)=100% auf DBQ(20)=84% verringert. Für die Epoxidharzbeschichtung wurde eine Verbesserung der Flammhemmung mit dem Flammschutzmittel auf org./anorg. Stickstoff- und Phosphorverbindungen erreicht. Die DBQ für IPF ARG 2/2 (120) tex wurde von 2% bis auf 0% bzw. für VET ARG (640 tex) von 73 % auf 32 % reduziert. Der Zusatz von org. modifizierten sowie von unmodifizierten Natrium-Montmorilloniten führte nicht zu einer Flammhemmung; in einigen Kombinationen wurde sogar eine Brandförderung beobachtet, was auf eine verschlechterte Filmbildung durch die Nanopartikel zurückgeführt wird.

Zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit von AR-Glasfasern wurden detaillierte Untersuchungen bezüglich des Einflusses der Glaszusammensetzung, der Zusammensetzung der Korrosionslösung sowie der Oberflächenmodifizierung durchgeführt. Es wurde nachgewiesen, dass sich die Korro-



(a) Schema des Flammversuches



(b) eingespannte Garnprobe im Flammversuch

Bild 2: Vertikaler Flammversuch in Brennkammer PLASTICS HVU (Fa. Atlas FIRE SCIENCE PRODUCTS)

sionsmechanismus von Glasfasern in NaOH-Lösung und in abfiltrierter Zementlösung grundlegend voneinander unterscheiden [11]. Weiterhin wurde eine Übereinstimmung der Ergebnisse der Zugversuche von in Zementlösung gealterten, unterschiedlich beschichteten Rovings und gealterten Betonverbunden mit entsprechender Verstärkung festgestellt, wobei Epoxidharzbeschichtungen höhere Dauerhaftigkeiten als Styrol-Butadien-Beschichtungen aufwiesen [12].

Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Die nanothermische Analyse konnte nur bei Glasübergangstemperaturen $>50^{\circ}\text{C}$ eingesetzt werden [6].

Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Das TP A5 (MÄDER) bildet durch die Entwicklung von Schichten und Beschichtungen das Bindeglied zwischen der textilen Flächenbildung des TP A1 (CHERIF) und der Baustoffforschung im TP A6 (MECHTCHERINE). Eine aus den Untersuchungen hervorgegangene Polymerdispersion für Carbonrovings wurde TP A1 (CHERIF) zum Auftrag auf textile Gelegestrukturen zur Verfügung gestellt. Durch die Zusammenarbeit mit TP A6 (MECHTCHERINE) konnten die Einflüsse von Nanopartikeln auf die Ausbildung der Gefügestruktur sowie das Verbundverhalten aufgeklärt werden. Zur Bestimmung von Materialgesetzen wurden die experimentellen Daten quasistatischer sowie zyklischer Versuche an Einzelfaser-Modellverbunden an A3 (ZASTRAU) sowie B3 (HÄUßLER-COMBE) zur Verfügung gestellt.

Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Im SFB 532 an der RWTH Aachen wurden ebenfalls Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit durchgeführt (Arbeitsgruppe PROF. RAUPACH). Die daraus abgeleiteten Modelle führen die Abnahme des Leistungsvermögens von Betonverbunden auf eine Abnahme der Glasfilamentfestigkeit aufgrund von Spannungsrisskorrosion zurück [2]. Die beschleunigte Alterung von Betonverbunden mit Glasfilamentgarnen unterschiedlicher Oberflächenmodifizierungen innerhalb des SFB 528 deuten darauf hin, dass die Abnahme des Arbeitsvermögens der Betonverbunde maßgeblich auf Gefügeveränderungen sowie Degradation der Beschichtung zurückzuführen ist [12].

Literatur

- [1] EHRENTRAUT, W.; PLONKA, R.; MÄDER, E.; GAO, S.-L.: Pilotanlage zum Erspinnen alkaliresistenter Glasfasern. *Technische Textilien/Technical Textiles* 48 (2005), S. 22-24, E23-E25
- [2] ORLOWSKY, J.: Zur Dauerhaftigkeit von AR-Glasbewehrung in Textilbeton. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 558, Beuth-Verlag Berlin, 2005
- [3] CAMINO, G.; TARTAGLIONE, G.; FRACHE, A.; MANFERTI, C.; COSTA, G.: Thermal and combustion behaviour of layered silicate-epoxy nanocomposites. *Polymer Degradation and Stability* 90 (2005), Nr. 2, S. 354-362
- [4] SCHARTEL, B.; KNOLL, U.; HARTWIG, A.; PÄTZ, D.: Phosphonium-modified layered silicate epoxy resins nanocomposites and their combinations with ATH and organo-phosphorus fire retardants. *Polymer for Advanced Technologies* 17 (2006), NR. 4, S. 281-293

1.1.4 Projektrelevante eigene Publikationen

- a) Arbeiten, die in Publikationsorganen mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung zum Zeitpunkt der Antragstellung erschienen oder endgültig angenommen sind, und Buchveröffentlichungen
- [5] GAO, S.-L.; MÄDER, E.; PLONKA, R.: Nanocomposite coatings for healing surface defects of glass fibers and improving interfacial adhesion. *Composites Science and Technology* 68 (2008), S. 2892-2901
- [6] GAO, S.-L.; MÄDER, E.: Nano Reinforcements in Surface Coatings and Composite Interphases. In: REDDY, B. S. R. (Editor): *Advances in nanocomposites – synthesis, characterization and industrial applications*, Rijeka, Intech 2011 – ISBN 978-953-307-165-7
- [7] SCHEFFLER, C.; GAO, S.-L.; PLONKA, R.; MÄDER, E.; HEMPEL, S.; BUTLER, M.; MECHTCHERINE, V.: Interphase modification of alkali-resistant glass fibres and carbon fibres for textile reinforced concrete I: Fibre properties and durability. *Composites Science and Technology* 69 (2009), S. 531-538
- [8] SCHEFFLER, C.; GAO, S.-L.; PLONKA, R.; MÄDER, E.; HEMPEL, S.; BUTLER, M.; MECHTCHERINE, V.: Interphase modification of alkali-resistant glass fibres and carbon fibres for textile reinforced concrete II: Water adsorption and composite interphases. *Composites Science and Technology* 69 (2009), S. 905-912

- [9] GAO, S.-L.; ZHUANG, R.-C.; ZHANG, J.; LIU, J.; MÄDER, E.: Glass Fibers with Carbon Nanotube Networks as Multifunctional Sensors. *Advanced Functional Materials* 20 (2010), S. 1885-1893
- [10] BRODOWSKY, H.; JENSCHKE, W.; MÄDER, E.: Characterization of interphase properties: Microfatigue of single fibre model composites. *Composites Part A* 41 (2010), S. 1579-1586
- [11] SCHEFFLER, C.; FÖRSTER, T.; MÄDER, E.; HEINRICH, G.; HEMPEL, S.; MECHTCHERINE, V.: Ageing of alkali-resistant glass and basalt fibers in alkaline solutions: Evaluation of the failure stress by Weibull distribution function. *Journal of Non-Crystalline Solids* 355 (2009) 2588-2595
- [12] SCHEFFLER, C.: Zur Beurteilung von AR-Glasfasern in alkalischer Umgebung. Dissertation, Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, 2009

A5
Mäder

5.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM TEILPROJEKT A6

5.1.1 Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Entwicklung der Matrices und zur Verbesserung des Faser-Matrix-Verbundes von textilbewehrten Betonen

5.1.2 Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine

Geburtsdatum: 18. 09.1964

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen

Institut für Baustoffe

Helmholtzstraße 10

01069 Dresden

Telefon: 0351 – 463 36311

Email: mechtcherine@tu-dresden.de>

5.2 ENTWICKLUNG DES TEILPROJEKTS

5.2.1 Bericht

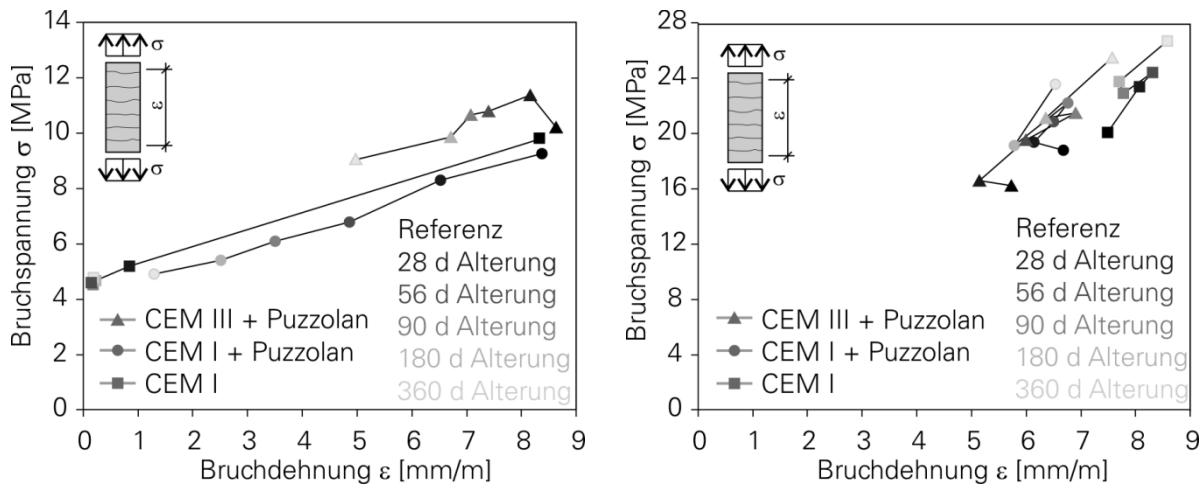
Ergebnisse sowie angewandte und ggf. neu entwickelte Methoden

Bei der Einbettung textiler Bewehrungsstrukturen in Beton findet aufgrund der dichten Packung der Filamente im Multifilamentgarn und den demgegenüber „ungünstigen“ Größenverhältnissen der Bindemittelbestandteile des Feinbetons nur eine unvollständige Durchdringung des Multifilamentgarnes mit Bindemittelleim statt. Als Folge sind die Verbundintensitäten zwischen den Filamenten über den Querschnitt des Multifilamentgarnes ungleichmäßig verteilt: Filamente am äußeren Rand des Garnes werden von zahlreichen Hydratationsprodukten umschlossen, Filamente im Inneren des Garnes verbleiben zunächst frei von Bindemittelbestandteilen oder deren Reaktionsprodukten. Eine anschauliche Beschreibung dieser Phänomene ist mit Hilfe des Haftbrückenmodells möglich [5, 8].

Im Verlauf der langandauernden Hydratation des bindemittelreichen Feinbetons werden mit zunehmendem Alter fortgesetzt Hydratationsprodukte gebildet und über die Lösungsphase an den Grenzflächen zu den Filamenten des Bewehrungsgarnes abgeschieden [3, 4]. Die Morphologie dieser Hydratationsprodukte wird von zahlreichen Faktoren bestimmt: Neben der Zusammensetzung des Bindemittels sowie der Temperatur und Feuchte sind auch die Oberflächeneigenschaften der Filamente von Bedeutung [5, 6, 10].

Aufgrund der Größenverhältnisse zwischen den Filamenten und den Hydratationsprodukte ist deren Struktur von entscheidender Bedeutung für die Qualität des Verbundes zwischen Filament und zementgebundener Matrix [5]. Mit zunehmendem Alter stattfindende Veränderungen an den einzelnen Filament-Matrix-Interfaces können in ihrer Summe zu dramatischen Veränderungen

beim rissüberbrückenden Lastabtrag des Multifilamentgarnes führen und damit das Materialverhalten des Verbundwerkstoffes maßgeblich beeinflussen (Bild 1, [3 - 6, 10]).



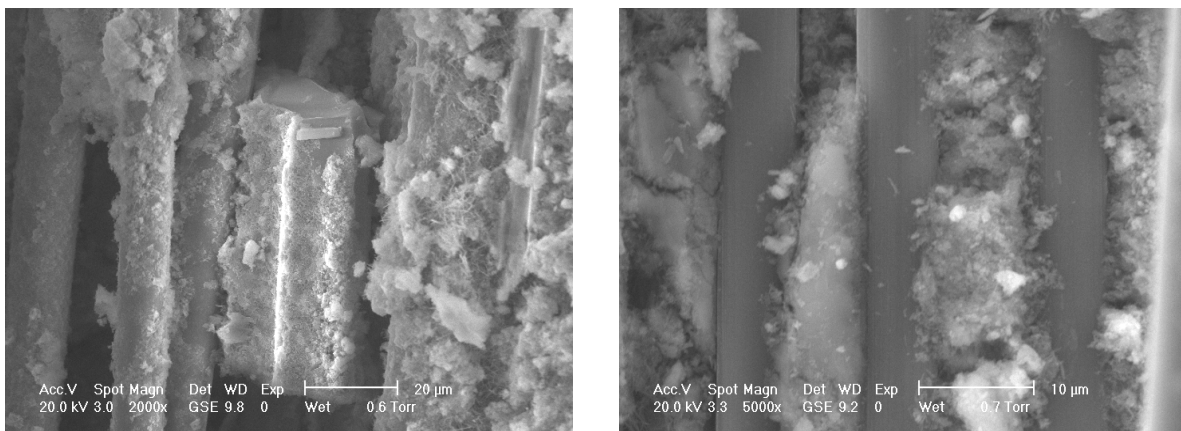
a) b)
Bild 1: Zugfestigkeit und Bruchdehnung beschleunigt gealterter Textilbetonproben mit Bewehrung aus a) AR-Glas oder b) Carbon in Abhängigkeit von der Matrixzusammensetzung und Expositionsdauer [10]

Beim Einsatz von AR-Glas-Multifilamentgarnen als Grundelemente der textilen Bewehrung erweitert sich das skizzierte Problemfeld um das der Korrosionsbeständigkeit des Bewehrungsmaterials selbst. Glas ist im alkalischen Milieu, wie es im Beton vorliegt, nicht beständig. Mit einer Modifikation der Glaszusammensetzung durch die Zugabe von Metalloxiden kann eine erhöhte Beständigkeit des Glaskörpers gegenüber alkalischem Angriff erreicht und der Auflösungsprozess sogar im hochalkalischen Milieu sehr deutlich verzögert werden [5]. Vollständig inert gegenüber derartigen Schädigungen kann Glas aber niemals sein. Kohlefasern zeigen dagegen keine Schädigungsreaktionen im alkalischen Milieu [10].

Aus technologischen Gründen und um die textile Verarbeitbarkeit zu ermöglichen, wird bei der Multifilamentgarn-Herstellung auf die Filamente eine dünne Polymerschicht, die Schlichte, aufgetragen. Die Zusammensetzung dieser nur wenige nm dicken Schicht [5] ist u.a. auch auf den künftigen Einsatzzweck der Faser abgestimmt. Filamente aus AR-Glas für den Einsatz im Beton erhalten eine Schlichte, die den Verbund zwischen Filamenten und zementgebundener Matrix sichert sowie die Filamentoberfläche zumindest zeitweilig vor Korrosion schützt [5]. Auf Carbonfasern werden derzeit keine betonspezifischen Schichten aufgetragen; diese Fasern sind bislang für den Einsatz in polymergebundenen Matrices ausgestattet.

Zur verbesserten Ausnutzung des Garnquerschnittes werden die Bewehrungstextilien oft mit einer nachträglichen Imprägnierung beschichtet. Diese durchdringt das Multifilamentgarn weitgehend und verbessert den Verbund zwischen den inneren und äußeren Filamenten [1, 2]. Damit verschiebt sich aber auch die Kontaktzone von der Filamentoberfläche zur Grenzfläche zwischen nachträglicher Beschichtung und zementgebundener Matrix. Die neue Interphase ist aufgrund der Schichtdicke und der stofflichen Zusammensetzung der Beschichtungspolymere weniger steif als die Interphase zwischen Hydratationsprodukten und Filamenten und unterliegt im feuchten alkalischen Milieu zudem Quell-, Schwind- und Alterungsprozessen [2].

Bei der Bewertung des Leistungsvermögens und der Dauerhaftigkeit von Materialverbänden aus Feinbetonen und AR-Glas-Multifilamentgarnen sind daher stets Auswirkungen der Bindemittelhydratation auf die Struktur des einzelnen Filament-Matrix-Interfaces bzw. der Garn-Matrix-Interphase, Aspekte der Korrosion des AR-Glases im (hoch)alkalischen Milieu des Betons sowie Auswirkungen der Filamentschichten bzw. Garnbeschichtungen auf beide Prozesse zu berücksichtigen [1, 5]. Die große Vielfalt möglicher Bindemittelkompositionen, verschiedener AR-Glaszusammensetzungen und variierender Schlichte- und Beschichtungsformulierungen führen zu einem Problem mit hoher Komplexität. Beispielsweise zeigt Bild 2 die Interphasenstruktur von AR-Glas- bzw. Carbongarnen bei Einbettung in eine CEM I-Matrix [10]. Die deutlich grob strukturierte Morphologie führt bei AR-Glas zu einem nahezu vollständigen Verlust der Tragfähigkeit, wohingegen bei Carbonfaserverbänden das Leistungsvermögen durch gleichmäßig fein und homogen verteilte Hydratationsprodukte in vollem Umfang erhalten bleibt.



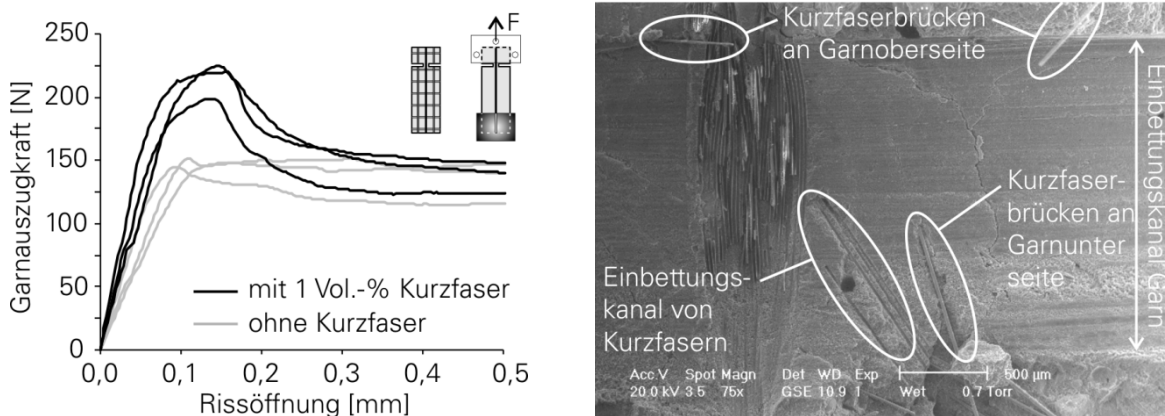
- a) Interphase zwischen AR-Glasfaser und CEM I – Matrix. Die Abscheidung von grobkristallinem Portlandit zwischen den Filamenten ist eine Ursache für große Einbußen bei der Tragfähigkeit.
- b) Interphase zwischen Carbonfasern und CEM I-matrix. Die feingliedrigen Hydratationsprodukte garantieren auch in hohem Alter eine uneingeschränkte Tragfähigkeit.

Bild 2: Morphologie der Interphasen zwischen CEM-Matrix und a) AR-Glasgarn sowie b) Carbonfasergarn nach 360 Tagen beschleunigter Alterung

Die hohe spezifische Tragfähigkeit textilbewehrter Betone kann i.d.R. erst bei großen Dehnungen (Grenzzustand der Tragfähigkeit) abgerufen werden, da die spezifische Verbundsituation im Garnquerschnitt erst bei größeren Rissweiten zu einer weitgehenden Aktivierung auch der inneren Filamente führt [5]. Beim Einsatz nachträglich beschichteter Multifilamentgarne ist zwar die Filamentauslastung über dem Garnquerschnitt homogener, aufgrund der geringen Steifigkeit der Beschichtungspolymere und damit der Interphase zwischen Multifilamentgarn und Matrix [2] kann dennoch keine substantielle Verbesserung des Lastabtrages bei geringen Dehnungen bzw. Rissweiten erreicht werden.

Durch die Zugabe von Kurzfasern zur Matrix kann eine deutliche Anhebung sowohl der Erst- rissspannung als auch des Rissbildungsplateaus erreicht werden (Bild 3a). Die große Kontaktfläche der über das Matrixvolumen gleichmäßig verteilten Kurzfasern wirkt sich hier positiv aus, da die Kurzfasern die Rissausbreitung in der Matrix behindern und so deren Zugfestigkeit verbessern und die Sprödigkeit vermindern. Darüber hinaus intensivieren die Kurzfasern den Verbund zwischen Bewehrungsgarn und Matrix, indem sie eine „Vernadelung“ und damit Bewehrung sowie Versteifung der Interphase bewirken (Bild 3b). Auf diese Weise bilden die textile Bewehrung und die

Kurzfasern ein hybrides Bewehrungssystem [9]. Vor und während der Rissbildung und bei sehr kleinen Rissbreiten sind vor allem die Kurzfasern aktiv. Der Dispergierungsgrad, die Material- und Oberflächeneigenschaften sowie die Schnittlänge der Kurzfasern bestimmen in entscheidendem Maß, bis zu welchen Rissöffnungen sie den rissüberbrückenden Lastabtrag dominieren [9]. Mit zunehmender Rissbreite nimmt die Kurzfaserverwirkung ab, während die textile Bewehrung ihr großes Leistungsvermögen voll entfalten kann [9]. Stoffgesetzliche Formulierungen zur Beschreibung der vielfältigen Wechselwirkungen in Textilbetonen mit Kurzfasern sind Gegenstand aktueller Arbeiten, die im Rahmen einer Dissertation auch nach Ende der Finanzierung des SFB 528 behandelt werden.



(a) Garnzugkraft-Rissweiten-Kurven für Matrices mit und ohne Kurzfasernzugabe.

(b) Einbettung von Kurzfasern in der Interphase zwischen Multifilamentgarn und Matrix.

Bild 3: Auswirkungen der Interaktion von Kurzfasern und textiler Bewehrung sowie Anzeige spezifischer Verbundphänomene

In dieser Arbeit wird auch der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf textilbewehrte Betone mit und ohne Kurzfasernzugabe untersucht. Im betrachteten Dehnratespektrum nehmen mit steigender Verzerrungsrate die Zugfestigkeit und Energieabsorption zu, die Bruchdehnung sinkt. Die grundlegenden Interaktionsmechanismen zwischen Kurzfasern und textiler Bewehrung bleiben bestehen [7].

Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Die Untersuchung des Schwind- und Kriechverhaltens der Matrices mit und ohne Zugabe von SRA und SAP konnte aus Zeitgründen nicht im geplanten Umfang abgeschlossen werden. Diese Arbeiten werden jedoch nach dem Ende der SFB-Förderung fortgesetzt und zu Ende geführt.

Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

- TP A1 (Cherif): Bereitstellung von Bewehrungsgarnen und Textilien ohne und mit maschineller nachträglicher Beschichtung für Experimente zum Verbundverhalten und zur Dauerhaftigkeit, Untersuchungen zur Homogenität und Eindringtiefe nachträglicher Garnbeschichtungen.
- TP A5 (Mäder): Enge Zusammenarbeit bei der Verbesserung und Anpassung von Garnbeschichtungen; Bereitstellung von in einem teilmechanisierten Prozess beschichteten Multifilamentgarnen.

lamentgarnen aus z.T. eigener Herstellung; Bewertung der Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit des Verbundes zur Matrix, Beurteilung der Beständigkeit der Beschichtungen.

- TP B5 (Ortlepp), B6 (Richter): Unterstützung der Arbeiten zur Charakterisierung der Interaktion von textiler Bewehrung und in der Matrix verteilten Kurzfasern mit experimentellen Untersuchungen und theoretischen Formulierungen.
- TP B1 (Jesse), D4 (Curbach), D5 (Mechtcherine), D6 (Curbach/Cherif), T6 (Curbach/Schach): Diskussion von Problemen bei der Matrixoptimierung, Hilfestellungen bei der Anpassung von Matrices für spezielle Anwendungen.
- TP A3 (Zastrau), B3 (Häußler-Combe), TP E3 (Sickert), E4 (Kaliske/Graf): Bereitstellung von experimentellen Ergebnissen zur Modellentwicklung und -verifikation.
- TP Y1 (Maas): Unterstützung von Experimenten durch photogrammetrische Messungen und zugehörige Datenanalysen.

Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Im SFB 532 an der RWTH Aachen werden ebenfalls Untersuchungen zur Matrixoptimierung und zum Kurzfasereinsatz (TP C1), zu Auswirkungen von Faserbeschichtungen (TP B4) sowie zur Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit des Faser-Matrix-Verbundes (TP D5) vorgenommen. Die Ergebnisse in den sich überschneidenden Arbeitsfeldern stimmen in den grundsätzlichen Aussagen mit den Resultaten des TP A6 im SFB 528 überein bzw. ergänzen diese. Jedoch weichen sowohl die verwendeten Materialien als auch die angewendeten Untersuchungsmethoden z.T. deutlich voneinander ab. Bei der Interpretation der Ergebnisse werden ebenfalls unterschiedliche Akzente gesetzt.

In der Arbeitsgruppe von Prof. Toledo (UFRJ, Brasilien) werden Verbundwerkstoffe aus textilen Naturfaserbewehrungen mit und ohne nachträgliche Beschichtung in hochgradig alkaliengepufferten Matrices erforscht. Infolge der grundlegend unterschiedlichen Textilkonfiguration ist ein Vergleich der Ergebnisse nicht zielführend.

In der Arbeitsgruppe von Prof. Mobasher (ASU, USA) werden ausgehend von experimentellen Arbeiten stoffgesetzliche Formulierungen für textilbewehrte Betone entwickelt. Die Ergebnisse bestätigen und ergänzen die entsprechenden Resultate im TP A6.

Der Einsatz von Kurzfasern in feinkörnigen Betonen wird u.a. in den Arbeitsgruppen von Prof. Li (University of Michigan, USA) und Prof. Karihaloo (Cardiff University, GB) experimentell und theoretisch erforscht. Deren Modellierungsansätze bildeten einen Ausgangspunkt für die stoffgesetzlichen Formulierungen zur Interaktion von textiler Bewehrung und Kurzfasern im TP.

Die Forschungsergebnisse des TP zur Matrixkonfiguration, zum Verbundverhalten und zur Dauerhaftigkeit textilbewehrter Betone wurden auch außerhalb des SFB 528 für weiterführende Produktentwicklungen genutzt (z.B. Entwicklung einer Materialkombination für eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, Anpassung von Matrices für anwenderspezifische Herstellungstechniken etc.).

Literatur

- [1] SCHEFFLER, C., GAO, S.-L., PLONKA, R., MÄDER, E., HEMPEL, S., BUTLER, M., MECHTCHERINE, V.: Interphase modification of alkali-resistant glass fibres and carbon fibres for textile reinforced

concrete I: Fibre properties and durability. *Composites Science and Technology* 69 (2009), 531-538.

- [2] SCHEFFLER, C., GAO, S.-L., PLONKA, R., MÄDER, E.; HEMPEL, S., BUTLER, M., MECHTCHERINE, V.: Interphase modification of alkali-resistant glass fibres and carbon fibres for textile reinforced concrete II: Water adsorption and composite interphases. *Composites Science and Technology* 69 (2009), 905-912.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Arbeiten, die in Publikationsorganen mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung zum Zeitpunkt der Antragstellung erschienen oder endgültig angenommen sind, und Buchveröffentlichungen

- [3] BUTLER, M., MECHTCHERINE, V., HEMPEL, S.: Experimental investigations on the durability of fibre-matrix interfaces in textile-reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites* 31 (2009), pp. 221-231, doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.02.005.
- [4] BUTLER, M., MECHTCHERINE, V., HEMPEL, S.: Auswirkungen der Matrixzusammensetzung auf die Dauerhaftigkeit von Betonen mit textilen Bewehrungen aus AR-Glas. *Beton- und Stahlbetonbau* 104 (2009), 485 - 495, doi: 10.1002/best.200900003.
- [5] BUTLER, M.: *Zur Dauerhaftigkeit von Verbundwerkstoffen aus zementgebundenen Matrices und alkaliresistenten Glasfaser-Multifilamentgarnen*. Dissertation am Institut für Baustoffe, Technische Universität Dresden, (2009).
- [6] BUTLER, M., MECHTCHERINE, V., HEMPEL, S.: Durability of textile-reinforced concrete made with AR glass fibre - Effect of the matrix composition. *Materials and Structures* 43 (2010), 1351 - 1368, doi: 10.1617/s11527-010-9586-8.
- [7] SILVA, F., BUTLER, M., MECHTCHERINE, V., ZHU, D., MOBASHER, B.: Strain rate effect on the tensile behaviour of textile-reinforced concrete under static and dynamic loading. *Materials Science and Engineering A* 528 (2011) 3, 1727 - 1734 - doi: 10.1016/j.msea.2010.11.014.
- [8] BUTLER, M., HEMPEL, S., MECHTCHERINE, V.: Modelling of ageing effects on crack-bridging behaviour of AR-glass multifilament yarns embedded in cement-based matrix. *Cement and Concrete Research* 41 (2011), 403 - 411, doi:10.1016/j.cemconres.2011.01.007.

b) Andere Veröffentlichungen

- [9] BARHUM, R.; MECHTCHERINE, V.: Effect of short fibers on the behavior of textile reinforced concrete under tensile loading. In: REINHARDT, H.-W., PARRA-MONTESINOS, G. (eds): *Proc. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC 6)*, Ann Arbor, June 19-22, (2011), 471 - 478.
- [10] BUTLER, M.; HEMPEL, S.; MECHTCHERINE, V.: Zeitliche Entwicklung des Verbundes von AR-Glas- und Kohlenstofffaser- Multifilamentgarnen in zementgebundenen Matrices. In: Curbach, M., Jesse, F. (Hrsg.): *Textile Reinforced Structures: Proc. 4th Colloquium on Textile Reinforced*

Structures (CTRS4), Dresden, 3. - 5. Juni, Dresden, (2009), 213-226 - ISBN 978-3-86780-122-5
URN: urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244045698955-31655

c) Patente, gegliedert nach angemeldet und erteilt.

Keine.

A6

Mechtcherine

A6

Mechtcherine

A6

Mechtcherine

5.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM TEILPROJEKT B1

5.1.1 Experimentelle Ermittlung des Tragverhaltens von textilbewehrtem Beton

5.1.2 Projektleitung

Gastprof. Dr.-Ing. Frank Jesse

Geburtsdatum: 19.2.1971

Dienstanschrift: Brandenburgische Technische Universität Cottbus

Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung

Lehrstuhl Massivbau

Konrad-Wachsmann-Allee 2

Postfach 10 13 44

03013 Cottbus

Telefon: (0355) 69-28 24

Email: Frank.Jesse@tu-cottbus.de

5.2 ENTWICKLUNG DES TEILPROJEKTS

5.2.1 Bericht

Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Unter **einaxialer Zugbeanspruchung** zeigt textilbewehrter Beton ähnlich wie Stahlbeton die Zustände I (ungerissen), IIa (mehrfache Rissbildung) und IIb (abgeschlossene Rissbildung). Ein Zustand III (Fließen der Bewehrung) kann wegen fehlender plastischer Eigenschaften der Bewehrungsmaterialien nicht beobachtet werden. Für kompakte, homogene Bewehrungen existieren in der Literatur zahlreiche Modelle, mit denen sich der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen darstellen lässt. Die Verwendung von Filamentgarnen und daraus hergestellten textilen Bewehrungen führt zu charakteristischen Besonderheiten im Tragverhalten des textilbewehrten Betons, die diese Modelle nicht erfassen:

- *Ungerissener Zustand (Zustand I)*: Die Steifigkeit wird bei unidirektionaler Faserbewehrung durch den ideellen Elastizitätsmodul mit befriedigender Genauigkeit erfasst. Bei textiler Bewehrung ist ein signifikanter, steifigkeitsreduzierender Einfluss der Querräden zu berücksichtigen.
- *Erstriss (Übergang Zustand I/IIa)*: Nach der Elastizitätstheorie gilt für den Verbundwerkstoff das Überschreiten der Zugbruchdehnung der Matrix ϵ_{mu} als Risskriterium. Bei Fasergehalten bis 5 Vol.-% ist der Einfluss auf die Erstrissspannung σ_{r1} marginal. Durch Rissunterdrückung kommt es mit steigendem Fasergehalt V_f zu einem Anstieg der Erstrissspannung σ_{r1} . Die Querräden der textilen Bewehrungen können in Radialrichtung aufgrund der losen Filamente kaum Kräfte übertragen und bewirken eine Querschnittsschwächung, diese wiederum eine Reduzierung der Erstrissspannung σ_{r1} . Welcher dieser beiden Effekte do-

minierend ist, ist noch unzureichend geklärt. In praktisch relevanten Fällen dominiert meist die Querschnittsschwächung.

- *Mehrfache Rissbildung (Zustand IIa)*: Die Querfäden schwächen den Matrixquerschnitt und verursachen bei Belastung zunächst eine Lokalisierung der Risse an den Querfäden (primäre Rissbildung). Bei ausreichend leistungsfähigem Verbund können dann auf einem höheren Spannungsniveau weitere Risse (Sekundärrisse) entstehen. Die nacheinander auftretenden Phasen der Rissbildung führen regelmäßig zu ausgeprägten Nichtlinearitäten der Spannungs-Dehnungs-Beziehung.
- *Ende der Rissbildung (Übergang Zustand IIa–IIb)*: Das Spannungsniveau beim Erreichen des abgeschlossenen Rissbildes σ_{rn} liegt etwa bei der 1,2fachen Erstrissspannung σ_{r1} . Die zugehörigen Dehnungen sind stark vom Faservolumengehalt V_f abhängig. Sie sinken mit zunehmendem V_f exponentiell. Bei gemischter Primär- und Sekundärrissbildung kann σ_{rn} meist nicht eindeutig bestimmt werden.
- *abgeschlossenes Rissbild (Zustand IIb)*: Nach Abschluss der Rissbildung öffnen sich die Risse gleichmäßig. Die Spannungs-Dehnungs-Beziehung verläuft nahezu perfekt linear bis zum Bruch. Gegenüber der theoretischen Steifigkeit $E_f V_f$ wird ein Defizit beobachtet, das durch den Beiwert k_B beschrieben werden kann. Als physikalische Ursache wurden mehrere Effekte vermutet, darunter Welligkeit, Randfilamentversagen und Verbundschädigung.
- *Bruchzustand*: Der Bruch erfolgt grundsätzlich spröde, d. h. ohne Vorankündigung. In einigen Fällen kündigt sich der Bruch kurz vorher akustisch durch Filamentbrüche und im Materialverhalten durch einen Steifigkeitsrückgang an. Eine Systematik ist jedoch nicht erkennbar. Die erreichte Festigkeit σ_{fu} ist von geometrischen Faktoren (Anzahl der Rovings, Form der Rovings), statistischen Materialeigenschaften (Verteilung der Filamentfestigkeit), der Lastumlagerung bei Filamentversagen (lokal, global) abhängig. Derartige, für spröde Materialien typische Skalierungseffekte wurden in Zusammenarbeit mit B3 (Häußler-Combe) und B4 (Proske) an Faserbündelmodellen untersucht. Danach kann eine Beschichtung durch Verbesserung des Verbundes zwischen den Filamenten die nutzbare Festigkeit steigern und die Varianz reduzieren. Der experimentelle Nachweis zeigte teilweise erhebliche Festigkeitszuwächse durch die in A5 (Mäder) entwickelten Beschichtungen.

Unter **zweiachsender Zugbeanspruchung** zeigt Textilbeton eine anisotrope Spannungs-Dehnungs-Beziehungen aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften von Kett- und Schussrichtung. Zusätzliche beobachtete Phänomene im Tragverhalten sind:

- *Spannungs-Dehnungs-Verhalten*: Mit steigender Querzugspannung nimmt die Erstrissspannung kontinuierlich ab. Bei starkem Querzug beträgt die Abminderung der Rissspannung bei AR-Glas max. 15% (in Kettrichtung) bzw. 20% (in Schussrichtung). Das Verhältnis von Erstrissspannung σ_{r1} und Spannung bei abgeschlossenem Rissbild σ_{rn} liegt wie bei einachsiger Belastung bei ca. 1,2. Ein Einfluss der Querzugbeanspruchung auf das Verhältnis σ_{rn}/σ_{r1} wurde nicht festgestellt. Risse in Querrichtung senken das Rissspannungsniveau insgesamt. Auf die Zugversteifung im Zustand IIb (Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen, tension stiffening) ist kein Einfluss erkennbar. Die geringe Versuchsanzahl und die großen Streuungen erschweren allerdings belastbare Aussagen. Das durch k_B beschriebene Stei-

figkeitsdefizit nimmt zu, sobald in der betrachteten Hauptrichtung bewehrungsparallele Risse entstehen.

- *Versagen/Versagensformen*: Das Versagen geht prinzipiell von den Entlastungsfugen an den Lasteinleitungszähnen aus. Der Vergleich zur einaxialen Referenzfestigkeit zeigt auch bei $\sigma_1/\sigma_2 = 1/0$ eine etwa 15% geringere Festigkeit. Dies indiziert einen nicht vernachlässigbaren Einfluss der Probengeometrie auf die Bruchlast. Untersuchungen zum Einfluss der Randstörung sollten diesen Einfluss klären. Ein signifikanter Einfluss des Spannungs-Verhältnisses auf die Festigkeit war nicht erkennbar.

Ergebnisse sowie angewandte und ggf. neu entwickelte Methoden

- *Einflussfaktoren auf das Tragverhalten von Textilbeton unter Zugbeanspruchung*: Die genannten Einflussfaktoren können experimentell nicht getrennt werden, da sich die Parameter praktisch nicht unabhängig verändern lassen. Durch eine Parameterstudie mit Hilfe numerischer Simulationsverfahren in Kooperation mit B3 (Häußler-Combe) konnte gezeigt werden, dass das Steifigkeitsdefizit im Zustand IIb neben dem Filamentversagen durch folgende Mechanismen herbeigeführt wird [[1]]: a) Filamentgruppen im Faserbündelkern mit geringer Verbundfestigkeit, z. B. aus ungleichmäßiger Imprägnierung; b) Welligkeit der Fasern. Welligkeit führt zu „negativem“ Tension Stiffening. Tension Softening führt zwar zu einer Ausrundung des Übergangsbereichs zur abgeschlossenen Rissbildung, hat aber im weiteren Belastungsverlauf aufgrund der geringen Bruchenergien des Feinbetons keinen signifikanten Einfluss.
- *Entwicklung neuer Textilien*: Mit Hilfe von Dehnkörperversuchen konnte das Potential der im TP A1 (Cherif) und TP T1 (Cherif) und TP T6 (Cherif) entwickelten Nadelversatztechnik und Textilien aus Heavy-Tow Carbonfasern nachgewiesen werden.
- *Aufbau und Qualität der Dehnkörperversuch*: In einer umfangreichen Versuchsreihe konnte gezeigt werden, dass sich die Einspannbedingungen der Proben auf die gemessene Festigkeit auswirken Unterschieden von bis zu 15 % führen [[2]]. Die statistische Analyse ergab allerdings keine Hinweise, dass das Versagen an der Einspannstelle signifikante Auswirkungen auf die gemessene Festigkeit hat [[2]], so dass diese Proben entgegen früherer Annahmen nicht verworfen werden müssen. Numerische Simulationen in Kooperation mit B3 (Häußler-Combe) bestätigen die Messungen qualitativ [[3]]. Speziell konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Einspannung für praxisübliche imprägnierte Strukturen zurückgeht [[6]]. Umfangreiche Ringversuche, haben im RILEM TC TDT zu der Entscheidung geführt, den entwickelten Dehnkörperversuch für die Ermittlung von Materialkennwerten am Textilbeton zu empfehlen [1]. Die Veröffentlichung der Empfehlung ist für Ende 2011 geplant.
- *Aufbau und Qualität zweiaxialer Zugversuch*: Für den im TP B1 entwickelten Versuchsstand zur zweiaxialen Beanspruchung von scheibenförmigen Proben wurde mit flächiger fotogrammetrischer Verformungsmessung gezeigt, dass das Prüfergebnis durch materielle und geometrische Randstörungen beeinflusst wird [[4]]. In zusätzliche Versuchsserien (zusätzlich zum beantragten Arbeitsprogramm) wurde der Einfluss quantifiziert [[1]]. Er ist signifikant, kann aber bei der Auswertung der Versuche berücksichtigt werden.

- *Tragverhalten unter zweiaxialer Zugbeanspruchung:* Für den Übergang vom Zustand I in den Zustand IIa (Rissbildung) zeigt sich eine sinkende Erstrissspannung mit steigender Querkzugbeanspruchung [[5]]. Für den weiteren Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Beziehung war kein Einfluss der Querkzugspannung feststellbar. Insbesondere war bei Carbon kein Einfluss bewehrungsparalleler Risse auf das Verformungsverhalten erkennbar. Daraus kann geschlossen werden, dass auch bei zweiaxialer Zugbeanspruchung Stoffgesetze verwendet werden können, die unter einaxialer Beanspruchung entwickelt wurden [[1]].

Bei Verwendung von Textilien aus Carbon war die Dehnsteifigkeit spannungsabhängig und bis Faserspannung von etwa 1000 N/mm² signifikant geringer als der theoretische Wert sowie teilweise mit der Delamination parallel zur Textilebene verbunden. Letztere ist mit starkem Verformungswachstum verbunden. Nach derzeitigem Kenntnisstand werden Steifigkeitsanstieg und Delamination einem hochgradig spannungsabhängigen Abbau der herstellungsbedingten Welligkeit der Textilien zugeschrieben. Durch die Imprägnierung findet der Abbau der Welligkeit erst bei einem entsprechenden Spannungsniveau statt. Bei Textilien aus AR-Glas konnte dieses Phänomen nicht beobachtet werden, vermutlich weil das erforderliche Spannungsniveau in den Garnen nicht erreicht wird, oder die Welligkeit nicht signifikant ist [[1]]. Diese Erkenntnisse waren Anlass für die derzeit im Transferprojekt T7 (Cherif) betriebenen Entwicklungsarbeiten für Textilien mit Heavy-Tow Carbonfasern.

Zusätzliche Versuchsreihen (zusätzlich zum beantragtem Arbeitsprogramm) wurden zum Einfluss der Orientierung der Bewehrung zur Lastrichtung durchgeführt. Für die beobachtete orientierungsabhängige Festigkeit wurde ein mathematisches Modell entwickelt, das eine Trennung von versuchsbedingten Einflüssen (Probenbreite, effektiver Bewehrungsgrad) und materialbedingter Einflüsse gestattet [[1]]. Die Festigkeit von Carbonfasern zeigt eine deutlich stärkere Richtungsabhängigkeit als das bei AR-Glas der Fall ist. Weiterhin wurden Verzerrungen in Scheibenebene erfasst und dokumentiert [[1]].

- *Dauerstandfestigkeit, Langzeitverhalten:* Für die Beurteilung der Dauerstandfestigkeit und Dauerschwingfestigkeit wurde für Textilien aus Carbon eine erste Versuchsreihe zur Konstruktion der Wöhler-Linie durchgeführt. Die Veröffentlichung der Ergebnisse steht noch aus.
- *Bemessungsmodelle für die Ingenieurpraxis:* Auf der Grundlage Versuchsdatenbank aus TP B1 konnten erstmals (und zusätzlich zum beantragten Forschungsprogramm) langfristige Festigkeitsvariationen am Textilbeton untersucht werden. Anhand der statistischen Datenanalyse und den mit einer Zuverlässigkeitsanalyse erster Ordnung (FORM) ermittelten Teilsicherheitsbeiwerten wurde in Kooperation mit TP E4 (Sickert) gezeigt, dass der langfristige Variationsbereich der Festigkeit aus wirtschaftlichen Überlegungen unterhalb eines Variationskoeffizienten von 12 % sein sollte [[7]]. Teilweise wurden wesentlich höhere Variationskoeffizienten festgestellt. Die Ursachenanalyse dauert an und soll wichtige Hinweise für die weitere technologische Entwicklung beim textilen Herstellungsprozess liefern.

Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

- Die hohe Auslastung der Maschinenkapazitäten im Otto-Mohr-Laboratorium führte beim Arbeitsschritt Dauerstandfestigkeit / Langzeitverhalten zu zeitlichen Verschiebung und ei-

ner Reduktionen des Versuchsprogramms. Die Prüfmaschine war bis dahin durch das TP D6 (Curbach/Cherif) dauerhaft belegt, andere geeignete Maschinen nicht vorhanden. Als Ausgleich wurden detaillierte Versuche zur Eignung des zweiaxialen Versuchsaufbaus und zur Bedarfsdeckung in den TP D4 (Curbach) und T3 (Curbach) detaillierte Untersuchungen zum zweiaxialen Tragverhalten mit verschiedenen Strukturen aus Carbon durchgeführt.

- Vorversuche und detailliertere Überlegungen zum kombinierten Zug-Schub-Beanspruchung führten zu dem Schluss, dass das Versuchsziel mit dem geplanten Versuchsaufbau nicht erreicht werden kann. Stattdessen wurde mit dem vorhandenen Versuchsstand mit gedrehter Bewehrung gearbeitet, um die praxisrelevanten Belastungsfälle versuchstechnisch abzudecken.

Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Unterstützung von A1 (Cherif), T1 (Cherif) und T9 (Cherif) bei der Entwicklung von textilen Bewehrungen und geeigneten Beschichtungen durch Durchführung von Dehnkörperversuchen, Ergebnisbewertung und Ableitung von Empfehlungen für die Konstruktion der textilen Bewehrung; Untersuchungen zum zweiaxialen Tragverhalten durch Kombination experimenteller Daten und numerischer Simulation in Kooperation mit A3 (Zastrau); Detaillierte Aufklärung des Tragverhaltens von Textilbeton und Analyse des einaxialen Dehnkörperversuchs gemeinsam mit B3 (Häußler-Combe) durch Kombination von experimentellen Arbeiten und Simulationen mit der FE-Methode; Durchführung von Standardversuchen zur Ermittlung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens und Bereitstellung von Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für die Projekte B5 (Ortlepp), D4 (Curbach), D6 (Curbach/Cherif), T6 (Curbach/Schacht); Untersuchungen zu Festlegung von Teilsicherheitsbeiwerte für semiprobabilistische Sicherheitskonzepte in Kooperation mit E4 (Sickert);

Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Der im TP B1 entwickelten einaxialen Dehnkörperversuchs wurden in weltweiten Ringversuchen mit 8 Laboren aus 7 Ländern für geeigneter befunden als der im SFB532 entwickelte Versuchsaufbau. Im Ergebnis wird der im TP B1 entwickelte Dehnkörperversuch als Empfehlung des TC TDT des RILEM standardisiert. Die *RILEM Recommendation* liegt im Entwurf vor [1].

Untersuchungen zum zweiaxialen Tragverhalten wurden im SFB532, TP D4 (Hegger) in geringem Umfang für Spannungsverhältnisse $\sigma_1/\sigma_2 = 0; 0,5; 1$ durchgeführt. Der in Dresden entwickelte Versuchsstand ist dem überlegen, da er jedes beliebige Spannungsverhältnis σ_1/σ_2 im Zugbereich realisieren kann, nachweislich geringere Randstörungen aufweist und die Auswirkungen der Randstörungen bekannt sind. Das Versuchsprogramm in Dresden ist umfangreicher, umfasst Materialien aus AR-Glas und Carbon und variiert Belastung und Orientierung der Textilien.

Sonstige Publikationen

1. RILEMTC 232-TDT (2010) Uniaxial tensile test—test method to determine the load bearing behavior of tensile specimens made of Textile Reinforced Concrete. Entwurf vom Juli 2011 (Veröffentlichung in Vorbereitung)
2. JESSE, D.; JESSE, F.: Tragverhalten von Textilbeton unter zweiaxialer Zugbeanspruchung. In: CURBACH, M.; JESSE, F. (Hrsg.): *Textile Reinforced Structures: Proceedings of the 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung*. Technische Universität Dresden, 2009, S. 129-144

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Rezensierte Veröffentlichungen und Buchveröffentlichungen

- [1] HARTIG, J.; JESSE, F.; HÄUßLER-COMBE, U.: Influence of different mechanisms on the constitutive behaviour of textile reinforced concrete. In: CURBACH, M.; JESSE, F. (Hrsg.): *Textilbeton - Theorie und Praxis: Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung*. Dresden : TU Dresden, 2009, S. 157-168
- [2] JESSE, F.; SCHICKTANZ, K.; CURBACH, M.: Obtaining Characteristic Material Strength of Textile Reinforced Concrete (TRC) from Laboratory Tests. In: ANSHORI DJAUSAL; FIKRI ALAMI; ANTOINE E. NAAMAN (Hrsg.): *9th International Symposium on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites (Ferro-9), 18-20 May 2009, Bali, Indonesia*. Badar Lampung, Indonesia : The University of Lampung, 2009, S. 305-318
- [3] HARTIG, J.; JESSE, F.; HÄUßLER-COMBE, U.: Evaluation of Experimental Setups for Determining the Tensile Strength of Textile Reinforced Concrete. In: BRAMESHUBER, W. (Hrsg.): *2nd ICTRC - Textile Reinforced Concrete: Proceedings of the International RILEM Conference on Material Science (MatSci) - Volume 1*. RWTH Aachen : RILEM, 2010, S. 117-127
- [4] JESSE, D.; JESSE, F.: Qualitative Bewertung des Versuchstandes zur Untersuchung des zweiachsialen Tragverhaltens von textilbewehrtem Beton. In: CURBACH, M.; JESSE, F. (Hrsg.): *Textile Reinforced Structures: Proceeding of the 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung*. Technische Universität Dresden, 2009, S. 115-128
- [5] JESSE, D.; JESSE, F.; EHLIG, D.; CURBACH, M.: Behaviour of Textile Reinforced Concrete (TRC) under Biaxial Tension. In: *ACI Fall 2010 Convention, Pittsburgh, 24.-28.10.2010.*, 2010
- [6] HARTIG, J.; JESSE, F.; SCHICKTANZ, K.; HÄUßLER-COMBE, U.: Influence of experimental setups on the apparent uniaxial tensile load-bearing capacity of Textile Reinforced Concrete specimens. *Materials and Structures* – zur Veröffentlichung angenommen am 29.08.2011
- [7] SICKERT, J.-U.; SCHWITEILO, K.; JESSE, F.: Statistische Auswertung der Bruchspannung einachsialer Zugversuche an Textilbeton – Vorschläge für Teilsicherheitsbeiwerte. CURBACH, M.; ORTLEPP, R. (Hrsg.): *Textilbeton in Theorie und Praxis. Tagungsband zum 6. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS6), Berlin, 19.+20.9.2011*. Dresden : Technische Universität Dresden, 2011, S. 141-155

b) Andere Veröffentlichungen

- [1] JESSE, D.: *Tragverhalten von textilbewehrtem Beton unter zweiachsialer Zugbeanspruchung*. Dissertation, Fakultät Bauingenieurwesen, Technische Universität Dresden, 2011, 515 S.

c) Patente, gegliedert nach angemeldet und erteilt

Keine.

B1

Jesse

B1

Jesse

5.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM TEILPROJEKT B3

5.1.1 Numerische Untersuchungen zum Tragmechanismus von Filamentgarnen in einer Betonmatrix

5.1.2 Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe

Geburtsdatum: 12.07.1955

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen

Institut für Massivbau

Helmholtzstraße 10

01069 Dresden

Telefon: 0351 – 463-39586

Email: ulrich.haeussler-combe@tu-dresden.de

5.2 ENTWICKLUNG DES TEILPROJEKTS

5.2.1 Bericht

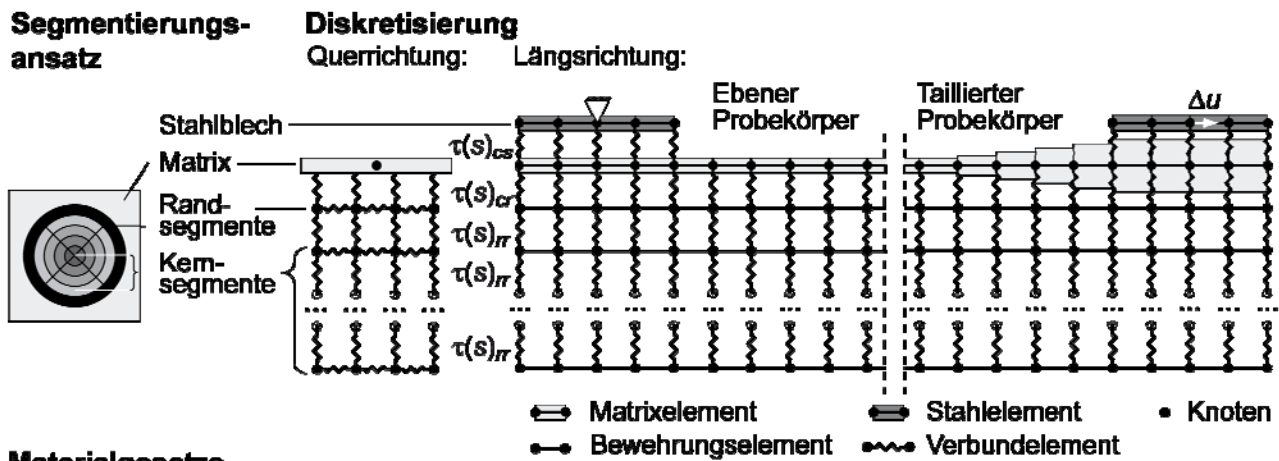
Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Textilbewehrter Beton zeigt aufgrund der Heterogenität der Bewehrung und der Matrix sowie des damit verbundenen nichtlinearen Materialverhaltens bereits unter reiner Zugbelastung ein komplexes Tragverhalten. Daraus resultiert die Problematik, dass die Ursachen des makroskopisch beobachtbaren Tragverhaltens, z.B. in Form von Kraft-Verformungsbeziehungen, allein aus experimentellen Untersuchungen am Verbundwerkstoff in vielen Fällen nicht abschließend erklärbar sind. Auch experimentelle Untersuchungen auf der mikroskopischen Betrachtungsebene, z.B. durch Filamentauszugversuche, können nur einen begrenzten Beitrag zur Klärung des makroskopisch beobachtbaren Tragverhaltens des Verbundwerkstoffs liefern, da in diesen Experimenten die Heterogenität weitgehend eliminiert wird. Die Entstehung neuer makroskopischer Eigenschaften eines Systems aus dem Zusammenwirken einzelner Mechanismen wird auch als Emergenz bezeichnet. Der einzig zugängliche Weg zum Verständnis derartiger Mechanismen und deren Wirkung ist oft die Modellbildung. Aus der vorherigen Förderperiode stand dem Teilprojekt das grundsätzliche mechanische Modell und die numerische Diskretisierung im Rahmen der Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Verfügung [6]. Es zeigte sich jedoch, dass einige Effekte noch nicht abbildbar oder erklärbar waren, obwohl das grundsätzliche Zugtragverhalten des textilbewehrten Betons bestehend aus dem ungerissenen Zustand, dem Zustand der Rissbildung und dem Zustand der abgeschlossenen Rissbildung bis zum Bruch vom Modell reproduziert werden konnte. Zu diesen Effekten zählten die negative Zugversteifung, welche mit einer Welligkeit der Bewehrung erklärt wurde, und das Steifigkeitsdefizit im Zustand der abgeschlossenen Rissbildung, für das eine letztlich schlüssige Erklärung noch fehlte. Darüber hinaus wurde vermutet, dass die

räumliche Streuung der Materialeigenschaften einen Einfluss auf das Zugtragverhalten des Verbundwerkstoffs hat. Das vorhandene Modell sollte entsprechend erweitert werden, um diese Effekte berücksichtigen zu können.

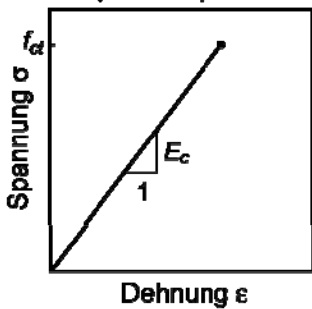
Ergebnisse sowie angewandte und ggf. neu entwickelte Methoden

Das numerische Modell zur Beschreibung des einaxialen Zugtragverhaltens, siehe Bild 1, besteht aus einaxialen Stabelementen, die in Reihe angeordnet sind und das einaxiale Tragverhalten der Matrix und der Bewehrung beschreiben. Diese Stabelementketten sind an übereinstimmenden Knoten mit Verbundelementen, die wie Schubfedern wirken und für Kraftübertragung zwischen den Stabelementen sorgen, gekoppelt. Die Heterogenität der Bewehrung wird durch eine Querschnittsunterteilung in Segmente berücksichtigt, siehe Bild 1. Die Heterogenität der Matrix wird bei der Geometrie der Diskretisierung vernachlässigt.

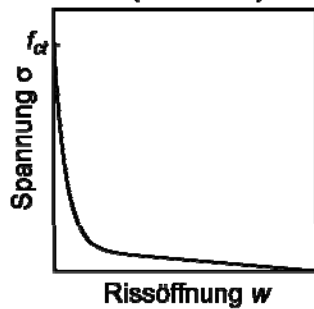


Materialgesetze

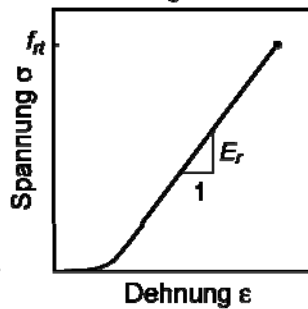
Materialgesetz für die Matrix (vor Riss):



Materialgesetz für die Matrix (nach Riss):



Materialgesetz für die Bewehrung:



Verbundgesetze τ(s):

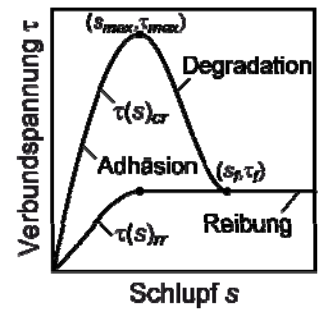


Bild 1: Segmentmodell, Material- und Verbundgesetze

Zur Modellierung der Welligkeit der Bewehrung wird das sonst linear-elastische Materialgesetz mit begrenzter Zugfestigkeit f_{rl} durch einen Bereich mit einem anfänglich verringerten Elastizitätsmodul E_r erweitert, siehe Bild 1. Das Materialverhalten der Matrix wird vor Erreichen der Zugfestigkeit f_{ct} als linear-elastisch angenommen. Das Nachbruchverhalten, welches durch Zugfestigkeit charakterisiert ist, wird durch eine Spannungs-Dehnungsbeziehung basierend auf der mathematischen Beschreibung der Spannungs-Rissöffnungsbeziehungen nach Remmel [1] abgebildet, siehe Bild 1. Zur Regularisierung im Rahmen der FEM kommt der Rissbandansatz nach Bažant & Oh [2] zum Einsatz. Für den Fall der Entlastung im Entfestigungsbereich wird eine For-

mulierung basierend auf dem Konzept der Schädigungsmechanik verwendet. Durch die Verwendung von Stabelementketten kann somit die Mehrfachrissbildung in Textilbetondehnkörpern und das sukzessive Versagen der Bewehrung bei Überschreitung der Zugfestigkeit mit dem Modell abgebildet werden.

Der Verbund zwischen der Matrix und der Bewehrung, modelliert durch die Verbundelemente, wird durch nichtlineare Verbundspannungs-Schlupfbeziehungen beschrieben. Dabei wird zwischen Zuständen der Adhäsion, der Verbunddegradation und Reibung unterschieden. Die Übergänge zwischen den Zuständen sind durch charakteristische Wertepaare (τ_{max}, s_{max}) und (τ_f, s_f) definiert. Zwischen diesen Stützstellen wird abschnittsweise mit kubischen Hermite-Polynomen nach Fritsch & Carlson [3] interpoliert. Im Fall der Entlastung werden in den Verbundgesetzen plastische Verformungen angenommen. Um auch das Auszugverhalten der Bewehrung abbilden zu können, enthält das Modell einen Algorithmus zur Ermittlung der Verbundfläche in Abhängigkeit des Auszugs der Bewehrungselemente an freien Enden der Matrixstabelementkette und der entstehenden Matrixrisse [9], [10].

Die Materialeigenschaften der Matrix und der Bewehrung weisen räumliche Streuungen auf. Diese werden im Modell durch Zufallsfelder basierend auf der Karhunen-Loève-Transformation simuliert [4]. Dieser Ansatz ermöglicht die Berücksichtigung der Umgebung eines Materialpunktes auf den Wert der modellierten Eigenschaft anhand einer sogenannten Korrelationslänge. Damit lassen sich glatte, räumlich streuende Verteilungen von Materialeigenschaftswerten erzeugen. Häufig ist zudem eine Abhängigkeit zwischen unterschiedlichen Materialeigenschaften, eine sogenannte Kreuzkorrelation, einzubeziehen. Dies wird mit dem Ansatz von Vořechovský [4] berücksichtigt. Die beschriebenen materiellen Nichtlinearitäten führen zu nichtlinearen Gleichungssystemen, welche sich mit inkrementell-iterativen Verfahren lösen lassen. Dafür wird die Belastung schrittweise aufgebracht und in jedem Belastungsschritt der Gleichgewichtszustand mit der BFGS-Methode in Kombination mit einem Line-Search-Verfahren ermittelt [5].

Das Modell wurde auf eine Vielzahl von Problemstellungen angewendet. Untersuchungen zu Filamentauszugversuchen [9], [10] zeigten, dass das Modell in der Lage ist, durch inverse Analyse die Verbundcharakteristiken aus den gemessenen Kraft-Verformungsbeziehungen zu ermitteln. Dafür muss der experimentelle Versuchsaufbau bestimmte Anforderungen erfüllen. Es ist beispielsweise notwendig, die freie Filamentlänge zwischen der Austrittsstelle aus der Matrix und der Stelle der Lastaufbringung extrem klein zu gestalten, da sonst sogenannte Snap-Back-Effekte einen Teil der Verbundgesetzmäßigkeiten maskieren. Darüber hinaus wurden zahlreiche Parameterstudien durchgeführt [10]. Wie bereits beschrieben ist die Relevanz der Ergebnisse für das Tragverhalten des Verbundwerkstoffs jedoch relativ gering, da in diesem Versuchstyp die Heterogenität als wesentliche Eigenschaft des Verbundwerkstoffs weitgehend eliminiert ist.

Das Modell fand ebenfalls Anwendung zur Simulation von Garnauszugversuchen [9], [10], in der das sukzessive Versagen der Multifilamentgarne das Tragverhalten des Probekörpers wesentlich prägt. Dafür war eine sehr feine Diskretisierung der Bewehrungsgarne im Sinne des Segmentierungsansatzes erforderlich. Die Untersuchungen zeigten, dass das Modell auch bei einer sehr großen Anzahl von Freiheitsgraden numerisch stabil ist. Die langen Rechenzeiten schränkten jedoch die Anwendbarkeit des Modells ein. Es konnte daher mit der qualitativen Reproduktion der wesentlichen Lastabtragungs- und Versagensmechanismen nur die prinzipielle Eignung des Modells zur Beschreibung von Garnauszugversuchen nachgewiesen werden.

Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen bildeten die sogenannten Dehnkörperversuche, in denen der praxisrelevante Fall des Verbundwerkstoffs mit überkritischem Bewehrungsgrad, multipler Rissbildung der Matrix und dem Zustand der abgeschlossenen Rissbildung betrachtet wird. Die Untersuchungen zeigten, dass für eine realitätsnahe Simulation der multiplen Matrixrissbildung die Einbeziehung räumlich streuender Materialeigenschaft wichtig ist [10], [12]. Die räumliche Streuung der Matrixzugfestigkeit f_{ct} sorgt für allmählich steigende Bruchspannungen im Zustand der multiplen Rissbildung, die bei deterministischer Betrachtung durch konstante Spannungsniveaus gekennzeichnet ist. Einen ähnlichen aber weniger stark ausgeprägten Effekt hat auch die räumliche Streuung des Elastizitätsmoduls der Matrix E_c .

Der Effekt der Zugfestigung der Matrix beeinflusst das Tragverhalten des textildbewehrten Betons im Wesentlichen nur bei höheren Bewehrungsgraden ($> 2\%$) und im Zustand der Rissbildung [10], [11]. Im Zustand der abgeschlossenen Rissbildung stellen sich trotz der relativ geringen Rissabstände recht schnell Rissbreiten ein, die nur noch geringe bis keine Spannungsübertragung in der Matrix über den Riss zulassen. Dies ist durch den relativ geringen Absolutwert der Bruchenergie des verwendeten Feinbetons zu erklären. Dies bedeutet auch, dass eine Vernachlässigung der Zugfestigung der Matrix nur zu kleinen Fehlern bei Berechnungen im Grenzzustand der Traglast führt. Hingegen ist für Berechnungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit z.B. hinsichtlich Rissbreiten eine Einbeziehung der Zugfestigung empfehlenswert.

Im Zustand der abgeschlossenen Rissbildung zeigt textildbewehrter Beton in der Regel ein Verhalten, das mit einfachen Modellvorstellungen nicht abschließend erklärbar ist. So ist häufig eine sogenannte negative Zugversteifung, d.h. eine konstante Vergrößerung der Verformungen des Verbundwerkstoffs bei einem Anstieg der Kraft-Verformungsbeziehung entsprechend der Bewehrungssteifigkeit, zu beobachten. Als Ursache konnte durch die numerischen Untersuchungen eindeutig die Welligkeit der Bewehrung identifiziert werden [8], [10], was vorhergehende Überlegungen bestätigte.

Ein weiterer Effekt im Zustand der abgeschlossenen Rissbildung ist ein geringerer Anstieg der Kraft-Verformungsbeziehung des Verbundwerkstoffs als entsprechend der nominellen Steifigkeit der nackten Bewehrung zu erwarten ist. Für diesen Effekt wurde bisher keine letztlich schlüssige Erklärung gefunden. Die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen legen den Schluss nahe, dass mehrere Ursachen für den Effekt verantwortlich sind [10]. Eine Hauptursache ist die Welligkeit der Bewehrung, welche in Kombination mit der über den Garnquerschnitt unterschiedlichen Verbundqualität zu einer verzögerten Aktivierung der Filamente führt. Der Welligkeitseffekt verringert sich mit steigender Last und wird dann durch ein sukzessives Versagen der Filamente kompensiert. Es spielen jedoch noch weitere Mechanismen eine Rolle, die aber im Wesentlichen nur den Übergang zwischen den Zuständen der Rissbildung und der abgeschlossenen Rissbildung beeinflussen. Dazu gehören die Verbundeigenschaften zwischen Matrix und Bewehrung sowie die Zugfestigung der Matrix.

Die bisher vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf Belastung durch extern aufgebrachte Kräfte. Das Modell ermöglicht aber auch die Untersuchung von Auswirkungen durch eingeprägte Verformungen, wie z.B. Temperatur- oder Schwinddehnungen [13]. Dabei bestanden vor allem im Zusammenhang mit Carbonbewehrung, die im Gegensatz zur Matrix im Bereich der Raumtemperatur einen negativen Temperatureausdehnungskoeffizienten in Faserrichtung besitzt, Bedenken, dass die entgegengesetzten Verformungen zwischen Matrix und Bewehrung zu erheblicher Verbunddegradation führen. Diese Zweifel wurden durch die numerischen Untersuchungen nicht be-

stätigt. Aufgrund des geringen Absolutwerts des Temperatureausdehnungskoeffizienten von Carbon, der zwei Größenordnungen kleiner als der der Matrix ist, sind die Relativverformungen und die Verbunddegradation gering.

Neben den Untersuchungen zum mechanischen Verhalten des Verbundwerkstoffs wurde das Modell auch für die Analyse entsprechender Versuchsaufbauten eingesetzt [7], [10]. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass für den im SFB 528 verwendeten Versuchsaufbau mit einer reibungs-basierten Lasteinleitung auf die Dehnkörper künstliche Einflüsse resultierend aus dem Versuchsaufbau weitgehend eliminiert sind. Hingegen führen andere, außerhalb des SFBs benutzte Versuchsaufbauten häufig zu Spannungskonzentration im Bereich der Lasteinleitung, z.B. durch den Einsatz starrer Klebeverbindungen, die für eine künstliche Verringerung der Traglast sorgen.

Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms ergaben sich aus der mikromechanischen Natur des verwendeten Modells zwei Problemfelder. Dies war zum Ersten die erheblich steigende Rechen-dauer bei zunehmender Verfeinerung der Bewehrungsdiskretisierung, die im Rahmen dieses Pro-jekts eine detailliertere Untersuchung des Trag- und Versagensverhaltens der Garnauszugversu-che behinderte. Das zweite Problemfeld ergibt sich aus Unsicherheiten bezüglich der stochasti-schen Eingangsgrößen für die räumliche streuende Modellierung der Materialeigenschaften. Trotz plausibler Annahmen verbleiben hier Unsicherheiten.

Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Enge Kooperationen bestanden zu den experimentell-orientierten Teilprojekten A1 (Cherif), A5 (Mäder), B1 (Jesse) und A6 (Mechtcherine). Das Teilprojekt A1 (Cherif) stellte dabei Daten zu den Materialeigenschaften der Bewehrungsfasern und -garne zur Verfügung. Die experimentellen Er-gebnisse zu Filamentauszugversuchen des Teilprojekts A5 (Mäder) und Garnauszugversuchen des Teilprojekts A6 (Mechtcherine) wurden zur Validierung des Modells genutzt. Eine enge Zusam-menarbeit fand mit dem Teilprojekt B1 (Jesse) statt, welches neben Versuchsdaten zu Dehnkör-perversuchen die Materialeigenschaften der Matrix zur Verfügung stellte.

Enge Kooperation bestand zudem zu den theoretisch-orientierten Teilprojekten A3 (Zastrau), B6 (Richter), D2 (Kaliske/Graf) und E3 (Sickert). Mit den Teilprojekten A3 (Zastrau) und B6 (Richter) bestand reger Austausch hinsichtlich der Modellierung an der Schnittstelle Mikro- und Meso-ebene, wobei das Teilprojekt B3 (Häußler-Combe) z.B. Spannungsprofile in der Bewehrung als Eingangsgrößen für die Mesomodelle zu Verfügung stellte. Mit dem Teilprojekt E3 (Sickert) fand eine enge Zusammenarbeit bei der Modellierung räumlich streuender Materialeigenschaften statt. Mit den Teilprojekten D2 (Kaliske/Graf) und A3 (Zastrau) wurde außerdem die Leistungsfähigkeit verschiedener Modellierungsansätze auf der Makroebene diskutiert.

Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Vergleichbare theoretische Untersuchungen zum Tragverhalten von in einer Betonmatrix eingebet-teten Multifilamentgarnen wurden vor allem im SFB 532 an der RWTH Aachen durchgeführt. So wurde im Teilprojekt D3 (Hegger) des SFB 532 ein ähnliches Modell entwickelt, welches sich je-doch auf die Unterteilung der Bewehrungsgarne in eine Randschicht und einen Kernbereich be-schränkte, die beide direkt an die Matrix gekoppelt sind. Dies schränkt eine feinere Diskretisie-

rung, wie sie mit dem hier entwickelten Segmentmodell möglich ist, stark ein. Im Teilprojekt D7 (Meskouris) des SFB 532 wurde außerdem ein mikromechanisches Modell basierend auf einem Faserbündelmodell entwickelt, welches auf das Tragverhalten von Multifilamentgarnen an einem einzelnen Matrixriss fokussiert ist. Durch Kombination mit einem analytischen Modell, für das das mikromechanische Modell mittlere Dehnungen zu vorgegebenen Spannungswerten liefert, kann auch das mittlere Zugtragverhalten des Verbundwerkstoffs bestimmt werden. Dieses Modell extrapoliert also das Verhalten des Verbundwerkstoffs aus dem Verhalten eines einzelnen Risses. Damit können im Gegensatz zum hier entwickelten Modell Effekte, wie sie z.B. durch räumliche Streuungen von Materialeigenschaften resultieren, nicht abgebildet werden.

Sonstige Literatur

- [1] REMMEL, G.: Zum Zug- und Schubtragverhalten von Bauteilen aus hochfestem Beton. DAFStb Heft 444 (1994), Beuth, Berlin
- [2] BAŽANT, Z.P.; OH, B.H.: Crack band theory for fracture of concrete. *Materials & Structures*, 16 (1983), S. 155-177
- [3] FRITSCH, F.N.; CARLSON, R.E.: Monotone Piecewise Cubic Interpolation. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 17 (1980), S. 238-246
- [4] VOŘECHOVSKÝ, M.: Simulation of simply cross correlated random fields by series expansion methods. *Structural Safety*, 30 (2008) 4, S. 337-363
- [5] MATTHIES, H.; STRANG, G.: The solution of non-linear finite element equations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 14 (1979), S. 1613-1626

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

Arbeiten der 4. Förderperiode, die in Publikationsorganen mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung zum Zeitpunkt der Antragstellung erschienen oder endgültig angenommen sind, und Buchveröffentlichungen

- [6] HARTIG, J.; HÄUßLER-COMBE, U.; SCHICKTANZ, K.: Influence of bond properties on the tensile behaviour of Textile Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Composites* 30 (2008), 10, S. 898–906
- [7] HARTIG, J.; JESSE, F.; SCHICKTANZ, K.; HÄUßLER-COMBE, U.: Influence of experimental setups on the apparent uniaxial tensile load-bearing capacity of Textile Reinforced Concrete specimens. *Materials and Structures* (2011), (zur Veröffentlichung angenommen)
- [8] HARTIG, J.; JESSE, F.; HÄUßLER-COMBE, U.: Influence of different mechanisms on the constitutive behaviour of textile reinforced concrete. In: CURBACH, M.; JESSE, F. (Hrsg.): *Textilbeton – Theorie und Praxis: Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung*, Dresden. Dresden: Technische Universität Dresden, 2009, S. 157-168
- [9] HARTIG, J.; HÄUßLER-COMBE, U.: A model for the uniaxial tensile behaviour of textile reinforced concrete (TRC) covering effects at the micro and meso scales. In: MECHTCHERINE, V.; KALISKE,

M. (Hrsg.): *Fracture and Damage of Advanced Fibre-reinforced Cement-based Materials*. Freiburg: Aedificatio Publishers , 2010, S. 213-221

- [10] HARTIG, J.U.: *Numerical investigations on the uniaxial tensile behaviour of Textile Reinforced Concrete*. Dresden: Technische Universität Dresden, Dissertation (gleichzeitig: *Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden - KID*, Heft 23), 2011

Andere Veröffentlichungen

- [11] HARTIG, J.; HÄUßLER-COMBE, U.; KITZIG, M.: Effect of matrix tension softening on the uniaxial tensile behaviour of Textile Reinforced Concrete. In: SMOJVER, I.; SORIC, J. (Hrsg.): *Proceedings of the 6th International Congress of Croatian Society of Mechanics (ICCSM)*, Dubrovnik, 30.9.-2.10.2009. Zagreb: Croatian Society of Mechanics, 2009, S. 46 (Book of Abstracts) & CD of full papers
- [12] HARTIG, J.; HÄUßLER-COMBE, U.: A model for the uniaxial tensile behaviour of Textile Reinforced Concrete with a stochastic description of the concrete material properties. In: BICANIC, N.; DE BORST, R.; MANG, H.; MESCHKE, G. (Hrsg.): *Computational Modelling of Concrete Structures, Proceedings of the EURO-C 2010 in Rohrmoos/Schladming*. London: Taylor & Francis, 2010, S. 153-162
- [13] HARTIG, J.; HÄUßLER-COMBE, U.: A model for Textile Reinforced Concrete under imposed uniaxial deformations. In: BORKOWSKI, A.; LEWINSKI, T.; DZIERZANOWSKI, G. (Hrsg.): *Proceedings of 19th International Conference on Computer Methods in Mechanics (CMM 2011)*. Warsaw: Warsaw University of Technology, 2011, S. 207-208 (Book of Short Papers) & Paper No. 133 CD of full papers

B3

Häußler-Combe

5.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM TEILPROJEKT B5

5.1.1 Verbundtragverhalten der textilen Bewehrung und Grundlagenuntersuchungen zu konstruktiven Bewehrungsdetails

5.1.2 Projektleitung

Dr.-Ing. Regine Ortlepp

Geburtsdatum: 10.11.1975

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen

Institut für Massivbau

Helmholtzstraße 10

01069 Dresden

Telefon: 0351 – 463 353 04

Telefax: 0351 – 463 37289

Email: Regine.Ortlepp@tu-dresden.de

5.2 ENTWICKLUNG DES TEILPROJEKTS

5.2.1 Bericht

Zusammenfassung

Im Hinblick auf die Anwendung des im Rahmen des SFB 528 erforschten Werkstoffes Textilbeton zur Verstärkung und Instandsetzung bestehender Bauwerke stellen die im Rahmen des Teilprojektes B5 durchgeführten Untersuchungen zum Tragverhalten der textilbewehrten Verstärkungsschichten im Bereich von konstruktiven Detailpunkten einen wichtigen Schritt zur Anwendungsreife des Materials dar. Ein funktionierender Verbund ist hierbei die Grundlage für das statische Zusammenwirken der einzelnen Verstärkungskomponenten. Besonders in Endverankerungs- und Übergreifungsbereichen ist hierbei eine einwandfreie Lasteinleitung und -übertragung ohne Verbundschädigungen erforderlich. Im Rahmen des abgeschlossenen Teilprojektes B5 erfolgten daher umfassende experimentelle und analytische Untersuchungen zur Erforschung der maßgebenden Versagensmechanismen sowie zur Beschreibungen des Tragverhaltens von Textilbetonverstärkungen im Bereich von Endverankerungen und Übergreifungsstößen. Die sich daraus ergebenden Vorgaben zur Konfiguration und Verbesserung des Textil-Matrix-Systems tragen zu einer effektiveren und sicheren Nutzung des Verbundbaustoffes bei.

Die Grundvoraussetzung für die Beurteilung des Verbundverhaltens textiler Bewehrungen in Textilbeton ist hierbei die Kenntnis der jeweiligen zwischen Bewehrungstextil und Feinbetonmatrix wirkenden Verbundkräfte. Zur Beschreibung des Verbundverhaltens wurde daher ein geeigneter Versuchsaufbau zur Durchführung von unsymmetrischen Auszugsversuchen an textilen Bewehrungsstrukturen entwickelt. Anhand der hieraus experimentell bestimmten Kraft-Rissöffnungs-Beziehungen kann nachfolgend die zugehörige Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung (VSB) des jeweiligen Garn-Matrix-Systems mittels eines analytischen Modells berechnet werden. Diese,

unter Berücksichtigung der maßgeblichen Einflussfaktoren der textilen Verarbeitung ermittelten Verbundkennwerte, bilden nachfolgend die Grundlage der rechnerischen Untersuchungen zum Tragverhalten im Bereich der untersuchten konstruktiven Detailpunkte.

Hinsichtlich der Vermeidung eines Versagens in Endverankerungsbereichen von Bauteilverstärkungen aus textilbewehrtem Beton wurden bereits im Teilprojekt C1 umfangreiche Untersuchungen zur Erforschung der Versagensarten Delamination, Altbetonversagen und der Zerstörung der Verbundfuge durchgeführt. Besonders bei Textilien aus Carbongarnen werden jedoch aufgrund der sehr hohen Garnzugfestigkeiten die maßgebenden Endverankerungslängen verstärkt durch ein Auszugsversagen der Garne bestimmt. Aus diesem Grund erfolgten im Rahmen des Teilprojektes B5 experimentelle und analytische Untersuchungen zur Klärung der Kraftübertragung in Endverankerungsbereichen im Grenzzustand des Garnauszugs. Aufbauend auf die ermittelten VSB des jeweiligen Garn-Matrix-Systems wurde ein analytisches Modell zur Berechnung der erforderlichen Endverankerungslängen vorgestellt. Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse ist nun unter Beachtung der jeweiligen Garnzugkraft der textilen Bewehrung sowie der Ergebnisse für flächige Versagensarten eine umfassende rechnerische Bestimmung der Endverankerungslängen von Textilbetonverstärkungsschichten möglich.

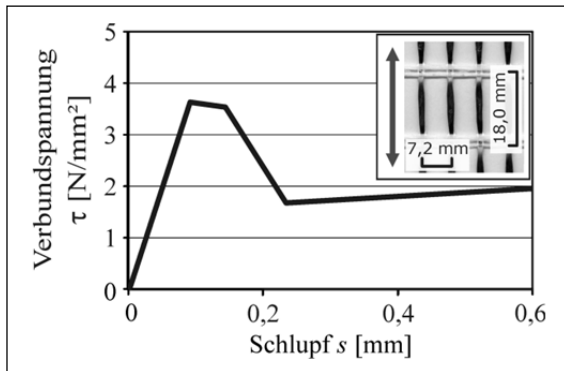
Durch die experimentellen und analytischen Forschungen zum Tragverhalten von Übergreifungsstößen konnten wesentliche Grundlagen für die rechnerische Bestimmung und die sichere Ausführung der Stoßbereiche in Verstärkungen und Bauteilen aus Textilbetonbauteilen gelegt werden. Mit der Überprüfung der Tragfähigkeit entsprechend konstruierter Übergreifungsstöße an verstärkten Bauteilen wurde der Anschluss zu den im Projektbereich D durchgeführten Untersuchungen zur Bauteilverstärkung hergestellt. In Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt B6 durchgeführte unabhängige numerische Untersuchungen bestätigen die dargestellten Zusammenhänge.

Die im Rahmen des Teilprojektes B5 gewonnenen Erkenntnisse wurden in Pilotprojekten zur Ausführung von Verstärkungen aus Textilbeton erfolgreich umgesetzt.

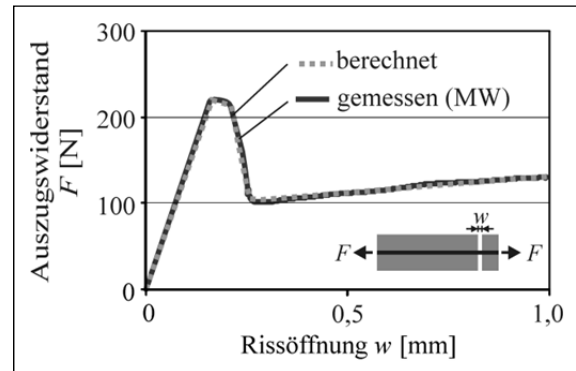
Untersuchungen zum Verbund textiler Bewehrungen in Textilbeton

Die Grundvoraussetzung für die Beurteilung des Verbundverhaltens textiler Bewehrungen in Textilbeton ist die Kenntnis der jeweiligen zwischen Garn und Matrix wirkenden Verbundkräfte. Aufgrund des großen Einflusses der textilen Verarbeitung auf die Verbundeigenschaften sind hierbei jedoch die am unverarbeiteten Einzelgarn bestimmten Ergebnisse nicht ohne weiteres auf textile Strukturen übertragbar. Daher wurde, aufbauend auf dem in KRÜGER [10] beschriebenen Probekörper, ein geeigneter Versuchsaufbau zur Durchführung von unsymmetrischen Auszugsversuchen an textilen Bewehrungsstrukturen entwickelt (LORENZ/ORTLEPP [1], [2]). Die verwendeten kleinformatischen plattenförmigen Probekörper können mit dem Laminier- oder Sprühverfahren unter Laborbedingungen wie auch im Rahmen der Qualitätsüberwachung bei Verstärkungsmaßnahmen mit Textilbeton hergestellt werden. Dadurch ist eine direkte Beachtung herstellungsbedingter Einflüsse auf die Verbundeigenschaften von Textilbetonbauteilen als Einzelbauteil oder Verstärkungsschicht erreichbar. Der Probekörper wurde so konfiguriert, dass eine nachfolgende analytische Bestimmung von Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen anhand der in den Textilauszugsversuchen experimentell bestimmten Kraft-Rissöffnungs-Beziehungen möglich ist. So kann durch die Probekörperform ein gezieltes Auszugsversagen im Bereich der einseitig kurzen Verbundlänge sichergestellt werden. Während sich hier die unterschiedlichen Bereiche der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung ausbilden können, wird im ausreichend verankerten langen Probenteil im Re-

gelfall nur der als elastisch angenommene Bereich des Haftverbundes aktiviert. Das in LORENZ/ORTLEPP [2] gezeigte Verfahren ermöglicht hierbei durch die analytische Modellierung des Verbundtragverhaltens des Probekörpers eine vereinfachte rechnerische Bestimmung der VSB carbonbewehrter beschichteter Filamentgarne. Ein verbessertes erweitertes Modell für größere Einbindelängen und textile Bewehrungen mit geringeren Dehnsteifigkeiten (AR-Glas) wird in LORENZ [9] gezeigt. Mit Hilfe einer einfachen Parametervariation der Stützstellen kann nachfolgend die Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung (Bild 1a) direkt anhand der experimentell ermittelten Kraft-Rissöffnungs-Beziehungen (Bild 1b) bestimmt werden.



(a) Analytisch berechnete Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung (VSB)



(b) Experimentell bestimmte Kraft-Rissöffnungs-Beziehung

Bild 1: Ergebnisse der Verbunduntersuchungen

Der entwickelte Auswertalgorithmus der Textilauszugsversuche ermöglicht folglich in Verbindung mit dem gezeigten Berechnungsverfahren eine zuverlässige Überprüfung des äußeren Verbundverhaltens beschichteter textiler Gelege und Einzelgarne. Die analytisch bestimmten VSB bilden nachfolgend die Grundlage zur rechnerischen Bestimmung der Endverankerungs- und Übergreifungslängen textiler Bewehrungen in Bauteilen und Verstärkungsschichten aus Textilbeton.

Endverankerung textiler Bewehrungen in Textilbeton

Nach ORTLEPP [11] können im Endverankerungsbereich von Bauteilverstärkungen mit textilbewehrtem Beton verschiedene Versagensmechanismen maßgebend werden. Hierzu wurden im Teilprojekt C1 umfangreiche Untersuchungen zur Erforschung der drei flächigen Versagensarten durch Delamination, Altbetonversagen sowie einer Zerstörung der Verbundfuge zwischen Fein- und Altbeton durchgeführt. Besonders bei Textilien aus Carbons Garnen werden jedoch aufgrund der sehr hohen Garnzugfestigkeiten die erforderlichen Lasteinleitungslängen verstärkt durch den Auszug der Filamentgarne aus dem Feinbeton bestimmt. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Teilprojektes B5 umfangreiche experimentelle und analytische Untersuchungen zur Klärung der Kraftübertragung in Endverankerungsbereichen im Grenzzustand des Garnauszugs durchgeführt. Die Versuche erfolgten unter Berücksichtigung variierender Bewehrungsgrade an unterschiedlich konfigurierten beschichteten textilen Gelegen aus Carbon und AR-Glas. Die experimentellen Untersuchungen wurden aufbauend auf Schub- und Endverankerungsversuchen von ORTLEPP [11] mit dem u. a. in LORENZ/ORTLEPP [3], [4] beschriebenen Versuchsaufbau durchgeführt. Eine umfassende Darstellung der Versuchsergebnisse ist in LORENZ/ORTLEPP [1], [4] und LORENZ [9] gezeigt. In Bild 2 sind hierzu beispielhaft die experimentell bestimmten Versagenslasten für ein- und zweilagig, in Prüfrichtung carbonbewehrte Textilbetonproben unter Variation der Endver-

ankerungslängen gegenübergestellt. In den Versuchen konnten allgemein zwei unterschiedliche Versagensmechanismen beobachtet werden. Während hier bei Verankerungslängen von ≤ 125 mm und maximal verankerbaren Garnzugkräften kleiner als die Garnbruchkraft ein Garnauszug zu beobachten war, konnte bei Verankerungslängen von ≥ 150 mm bei allen untersuchten Proben ein Versagen durch Garnriss festgestellt werden. Die maximal verankerbaren Kräfte variieren dann in Abhängigkeit von der Streuung der maximalen Garnzugkräfte.

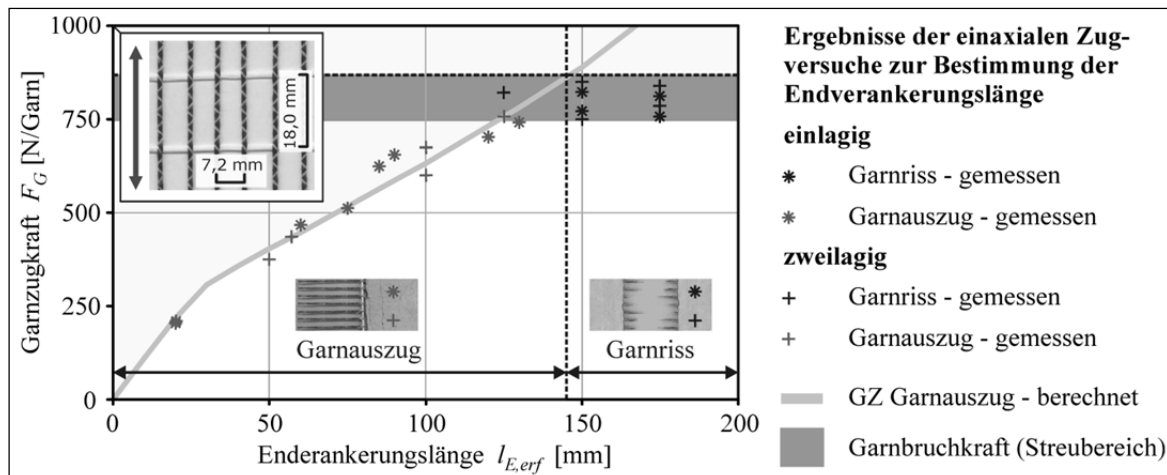


Bild 2: Gegenüberstellung der analytischen und experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung der Enderankerungslänge im Grenzzustand des Garnauszuges

Die Größe der Enderankerungslängen wird im Grenzzustand des Garnauszuges direkt durch die Größe der Verbundkräfte beeinflusst. Vergrößerungen der Verbundkräfte zwischen Garn und Matrix, z. B. durch eine Erhöhung des Beschichtungsgrades der textilen Bewehrung, führen wie in LORENZ/ORTLEPP [3] und ORTLEPP/LORENZ [6] dargestellt, zu Verkürzungen der erforderlichen Enderankerungslängen. Die Größe der Enderankerungslängen im Grenzzustand des Garnauszuges ist hierbei unabhängig von der Lagenanzahl der textilen Bewehrung. Dies ist unter anderem in LORENZ/ORTLEPP [4] und LORENZ [9] gezeigt.

Neben den beschriebenen umfangreichen experimentellen Untersuchungen wurden analytische Betrachtungen zur rechnerischen Bestimmung der Enderankerungslängen textiler Bewehrungen in Verstärkungsschichten und Bauteilen aus Textilbeton im Grenzzustand des Garnauszuges durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten unter Verwendung des in LORENZ/ORTLEPP [3] dargestellten Berechnungsalgorithmus. Nach der experimentellen Analyse des Verbundverhaltens des jeweiligen Textil-Matrix-Systems mittels der in LORENZ/ORTLEPP [1] und [2] dargestellten Textilauszugsversuche im ersten Schritt folgt im zweiten Schritt die bereits beschriebene analytische Modellierung der zugehörigen abschnittsweise linearen VSB nach LORENZ/ORTLEPP [2]. Im dritten Schritt kann nun mit Hilfe eines LORENZ/ORTLEPP [4] und [5] gezeigten separaten Modells, aufbauend auf in RICHTER [12] beschriebene, abschnittsweise geschlossene Beziehungen zwischen Auszugskraft und Auszugslänge, die zur Verankerung einer entsprechenden Garn- bzw. Textilauszugskraft erforderliche Enderankerungslänge berechnet werden. Bei einer Gegenüberstellung der experimentell und analytisch bestimmten Enderankerungslängen für das in Bild 2 untersuchte textile Gelege ist eine gute Übereinstimmung der Versagenslasten und der jeweils zugehörigen Verankerungslängen erkennbar. Zur Vermeidung eines Versagens durch Garnauszug kann folglich bei voller Ausnutzung der Zugtragfähigkeit die hier erforderliche Enderankerungslänge mit ca. 145 mm

festgelegt werden. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen bestätigten die theoretisch getroffenen Annahmen. Die beschriebenen Zusammenhänge wurden durch eine Vielzahl weiterer Untersuchungen für unterschiedlich konfigurierte textile Gelege aus Carbon und AR-Glas bestätigt (u. a. LORENZ/ORTLEPP [1] und LORENZ [9]). Mit Hilfe der in LORENZ/ORTLEPP [1], [4] dargestellten Zusammenhänge kann somit für textile Bewehrungen im Grenzzustand des Garnauszuges die jeweilige erforderliche Endverankerungslänge in Abhängigkeit von der Garnzugkraft bestimmt werden. In LORENZ [9] wird zudem ein vereinfachtes ingenieurmäßiges Modell zur analytischen Bestimmung der Endverankerungslängen dargestellt.

Mit Hilfe der gefundenen Beziehungen ist nun im Gesamtkontext unter Beachtung der in ORTLEPP [11] beschriebenen Berechnungsansätze zur Vermeidung eines Delaminations- und Altbetonversagens eine umfassende rechnerische Bestimmung der Endverankerungslängen textilbewehrter Verstärkungsschichten aus Feinbeton möglich. Die minimale Endverankerungslänge wird hierbei vom größten Einzelwert der genannten Versagensarten bestimmt. In Bild 3 sind exemplarisch für das in Bild 2 beschriebene biaxiale textile Gelege die rechnerisch erforderlichen Endverankerungslängen unter Beachtung der in LORENZ/ORTLEPP [4] und ORTLEPP [11] beschriebenen Verbundversagensmechanismen dargestellt. Für das gezeigte Carbondextil in Textilbetonverstärkungen mit einer und zwei Lagen textiler Bewehrung wird demnach ein Versagen durch Garnauszug maßgebend. Mit steigender Zugkraft der textilbewehrten Verstärkungsschicht ist jedoch allgemein ein Anstieg der erforderlichen Endverankerungslängen zur Vermeidung eines Versagens durch Delamination und Altbetonversagen erkennbar.

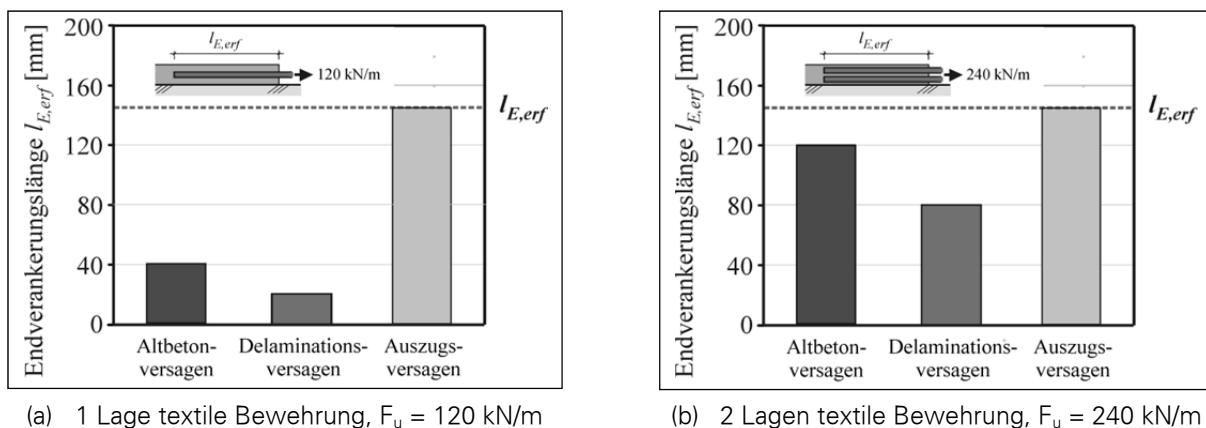


Bild 3: Vergleich der Versagensmechanismen im Endverankerungsbereich

Weitere Untersuchungen zur Wirksamkeit hoch tragfähiger Endverankerungen textiler Bewehrungsstrukturen in Form von Zusatzbeschichtungen, Bewehrungszulagen sowie haken- und schlaufenförmigen Verankerungselementen sind in LORENZ/ORTLEPP [3] und ORTLEPP/LORENZ [6] beschrieben. Es konnten bei Verwendung der genannten Verankerungsmethoden allgemein deutliche Verringerungen der Endverankerungslängen textiler Bewehrungen in Textilbeton nachgewiesen werden. Die Berechnungsmodelle im Grenzzustand des Garnauszuges sind auch hier anwendbar. Zur Bestimmung der Tragfähigkeit der haken- und schlaufenförmigen Verankerungselemente wurden zudem experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung der Garnzugfestigkeit unter Querdruck für Carbon- und AR-Glasgarne durchgeführt. Anhand der ermittelten Ergebnisse kann unter Beachtung des Versagenspunktes eine analytische Bestimmung der Tragfähigkeit der haken- und schlaufenförmigen Verankerungselemente erreicht werden (LORENZ [9]). Es ist jedoch zu

bemerken, dass bei Verwendung der beschriebenen Verankerungselemente zur Verkürzung der Endverankerungslängen die im Verankerungsbereich eingeleiteten Verbundkräfte deutlich ansteigen und dadurch eine Erhöhung der Wahrscheinlichkeit eines Delaminationsversagens oder eines Versagens des Altbetonuntergrundes resultiert. Dies sollte im Hinblick auf die Vermeidung eines Delaminationsversagens wie in LORENZ ET AL. [7] und HAUSDING ET AL. [8] beschrieben bei der Konfiguration der textilen Bewehrungen berücksichtigt werden.

Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse und Modelle ist nun unter Beachtung der jeweiligen Garnzugkraft der textilen Bewehrung im Beton sowie der Ergebnisse für flächige Versagensarten die Voraussetzung für eine umfassende rechnerische Bestimmung der Endverankerungslängen textilbewehrter Verstärkungsschichten aus Feinbeton, in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Bewehrungstextils geschaffen. Die dargestellten Zusammenhänge bilden daher eine wesentliche Grundlage für die Endverankerung von Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton.

Übergreifung textiler Bewehrungen in Textilbeton

Bei Verstärkungsmaßnahmen mit Textilbeton, wie u. a. in SCHLADITZ ET AL. [16] beschrieben, sind im Regelfall Übergreifungsstöße innerhalb der textilen Bewehrungslagen nicht zu vermeiden. Die Übergreifungsstöße in Textilbetonverstärkungen werden aufgrund des flächigen Aufbaus der textilen Gelege sowie der lagenweisen Herstellung des Verbundwerkstoffs im Regelfall als zweilagige Stöße ausgeführt. Für das Funktionieren der Textilbetonverstärkungen ist hierbei in den Stoßbereichen eine sichere Kraftübertragung zwischen den einzelnen Verbundbaustoffen sicherzustellen. Im Rahmen der Untersuchungen zur Prüfung des Tragverhaltens von Textilbetonbauteilen im Übergreifungsbereich wurde daher in Anlehnung an einaxiale Zugversuche (Dehnkörperversuche) nach JESSE [13] wie in LORENZ/ORTLEPP [5] beschrieben ein einaxialer Zugversuch mit einem Übergreifungsstoß in Probenmitte entwickelt. Durch eine symmetrische Anordnung der Bewehrungslagen im Probekörper können hierbei die durch den Versatz der Bewehrungslagen der Textilbetonschicht entstehenden, delaminationsfördernden Querkzugspannungen im Stoßbereich berücksichtigt werden. Im Rahmen der Untersuchungen des Teilprojektes B5 erfolgten experimentelle und analytische Untersuchungen an unterschiedlich konfigurierten Textil-Matrix-Systemen mit textilen Gelegen aus Carbon und AR-Glas unter Variation der maßgebenden Einflussparameter. Nach LORENZ ET AL. [7] können demnach in Textilbetonschichten hinsichtlich eines Verbundversagens unterschiedliche Versagensarten auftreten. Im Bereich der Übergreifungsstöße werden wie in LORENZ/ORTLEPP [5] beschrieben zwei verschiedene Mechanismen des Verbundversagens maßgebend. Zum einen kann es zu einem Verbundversagen durch Auszug der Garne aus der Feinbetonmatrix, zum anderen zu einer Spaltrissbildung/Delamination in Textilebene innerhalb des Übergreifungsstoßes kommen.

In Bild 4 sind hierzu beispielhaft aus LORENZ/ORTLEPP [5] die experimentell im Grenzzustand des Garnauszuges bestimmten Übergreifungslängen für das bereits in Bild 2 gezeigte biaxiale textile Gelege dargestellt. Vergleichend werden die Ergebnisse der in LORENZ /ORTLEPP [4] beschriebenen experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung der Endverankerungslängen gegenübergestellt. Die Übergreifungs- und Endverankerungsversuche erfolgten hierbei in einer Serie mit dem identischen Textil-Matrix-System. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur experimentellen Bestimmung der Übergreifungslängen zeigen im Grenzzustand des Garnauszuges allgemein eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Versuche zur Bestimmung der Endverankerungslängen. Die beobachteten Versagensmechanismen entsprechen denen eines Versagens im End-

verankerungsbereich. Zur Vermeidung eines Versagens durch Garnauszug können folglich bei voller Ausnutzung der Zugtragfähigkeit die erforderlichen Übergreifungs- und Endverankerungslängen mit ca. 145 mm für das hier exemplarisch untersuchte Textil festgelegt werden. Dies lässt den Schluss zu, dass im Grenzzustand des Garnauszuges die Verteilung der Verbundspannungen über die beidseitigen Verankerungsbereiche des Übergreifungsstoßes in Folge der Rissbildung innerhalb der Übergreifungsstöße im Vergleich zur Verbundspannungsverteilung im Endverankerungsbereich nur unwesentlich beeinflusst wird. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Übergreifungslängen der textilen Bewehrung in Textilbetonbauteilen dem 1,0-fachen Wert der Endverankerungslänge entsprechen. Diese Beziehung wurde in weiteren Untersuchungen für unterschiedlich konfigurierte textile Gelege aus Carbon und AR-Glas bestätigt (LORENZ/ORTLEPP [5] und LORENZ [9]).

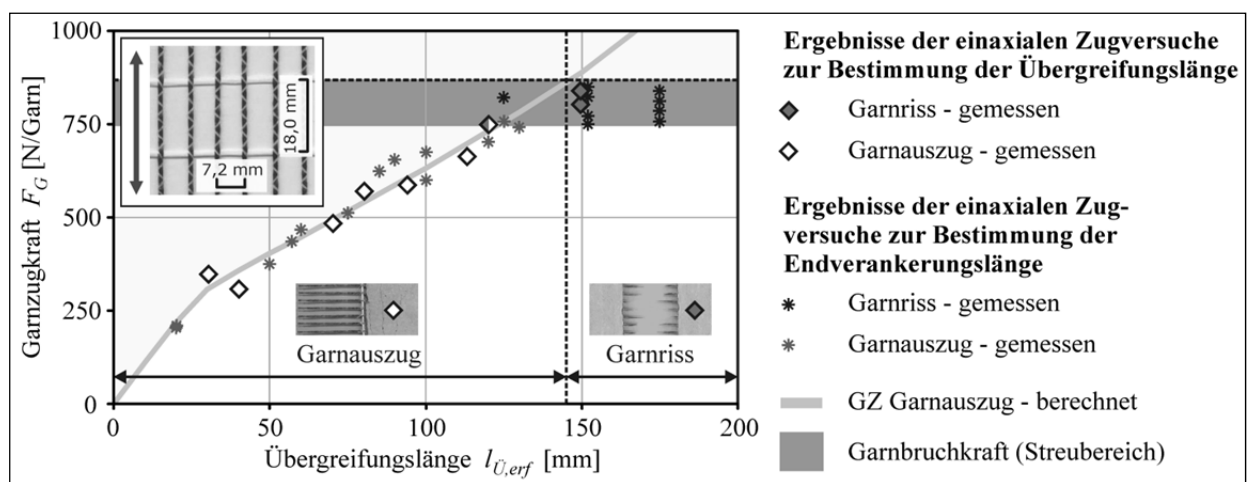


Bild 4: Gegenüberstellung der analytischen und experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung der Übergreifungslänge im Grenzzustand des Garnauszuges

Aufbauend auf der Erkenntnis der im Grenzzustand des Garnauszuges nahezu identischen Verteilung der Verbundspannungen in den Übergreifungs- und Endverankerungsbereichen zugbeanspruchter Textilbetonbauteile kann demnach, wie in LORENZ/ORTLEPP [5] gezeigt, die analytische Berechnung der Übergreifungslängen mit den im Rahmen der Untersuchungen zur Bestimmung der Endverankerungslängen gezeigten Zusammenhängen erfolgen. Bei Betrachtung der in Bild 4 dargestellten Gegenüberstellung der experimentell bestimmten Versagenslasten mit den jeweils zugehörigen analytisch berechneten Werten ist folglich eine gute Übereinstimmung erkennbar. Anhand der beschriebenen Zusammenhänge können demnach im Grenzzustand des Garnauszuges für beliebige multilineare Formen der VSB die erforderlichen Endverankerungs- und Übergreifungslängen in Abhängigkeit von der zugehörigen Garn- bzw. Textilizugkraft bestimmt werden. Im Rahmen des Teilprojektes B6 durchgeführte, unabhängige numerische Untersuchungen bestätigen die hier dargestellten Ergebnisse und Zusammenhänge.

Im Gegensatz zu einem Versagen im Grenzzustand des Garnauszuges, welches sich im Regelfall durch eine deutliche Vergrößerung der Rissöffnungen am Beginn und Ende des Übergreifungsstoßes ankündigt und eine entsprechende Resttragfähigkeit nach Beginn des Garnauszugs aufweist kann es im Grenzzustand der Delamination/Spaltrissbildung zu einem plötzlichen Versagen des Stoßbereiches kommen. Die versagensauslösenden Querkraftkräfte, welche durch die Krafteinleitung und Übertragung innerhalb des Übergreifungsstoßes entstehen resultieren hier

primär aus dem Versatzmoment in Folge des Abstandes der Bewehrungslagen, den wirkenden Verbundkräften zwischen Garn und Matrix sowie den in LORENZ ET AL. [7] beschriebenen Umlenkkraften auf den Beton in Folge eines nicht gestreckten Einbaus der Filamentgarne in die Matrix (LORENZ [9]). Wird die Querkraftfestigkeit des Betons in der Ebene der textilen Bewehrung überschritten, entstehen am Beginn des Übergreifungsstoßes zunächst kleine Spaltrisse, welche teilweise schlagartig oder bereits bei geringen Lastzunahmen immer weiter in den Übergreifungsbereich hineinwandern und anschließend zum Versagen führen. Die verbundschädigende Spaltrissbildung resultiert dann, wie in Bild 6 exemplarisch gezeigt, in einer deutlichen Erhöhung der erforderlichen Übergreifungslängen. Während für das hier beispielhaft dargestellte delaminationsgefährdete textile Gelege im Grenzzustand des Garnauszuges eine erforderliche Endverankerungslänge von ca. 80 mm nachgewiesen wurde, konnte im Grenzzustand der Delamination selbst bei einer Steigerung der vorhandenen Übergreifungslängen um 310 % keine sichere Übertragung der Garnbruchkräfte der textilen Bewehrung erreicht werden. Ein Delaminationsversagen der Übergreifungsstöße sollte daher grundsätzlich, wie in LORENZ ET AL. [7] beschrieben durch die zielgerichtete Abstimmung des verwendeten Faser-Matrix-Systems vermieden werden. In LORENZ [9] ist hierzu ein analytischer Berechnungsansatz unter Beachtung der genannten Einflussfaktoren dargestellt. Die Ergebnisse der analytischen Untersuchungen sind in Bild 5 den gemessenen Werten gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung.

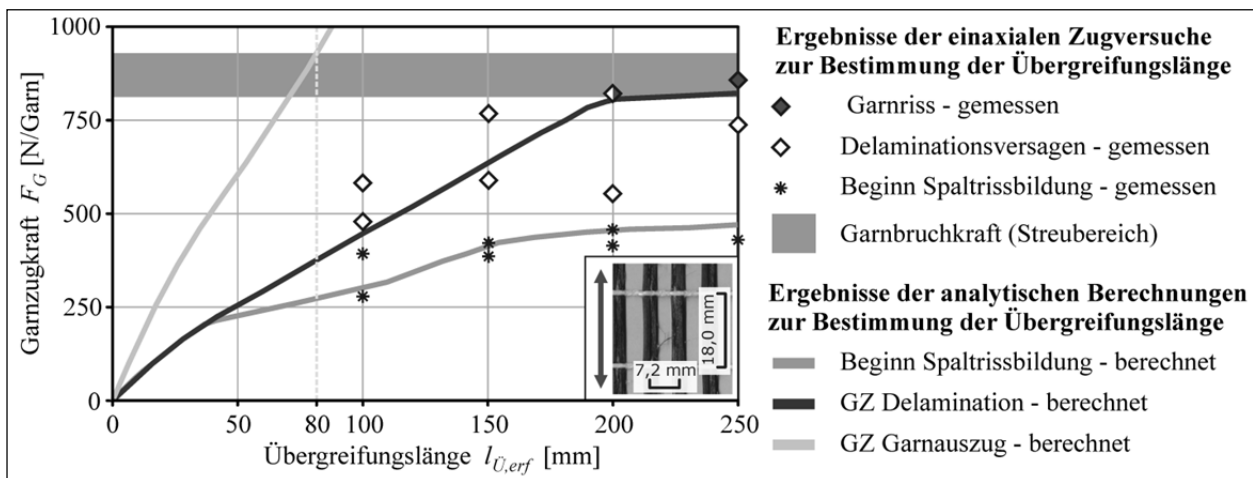


Bild 5: Gegenüberstellung der analytischen und experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung der Übergreifungslänge im Grenzzustand der Delamination

Eine umfassende Darstellung der experimentellen Prüfungen sowie der Berechnungsansätze zur Vermeidung eines Delaminations- und Auszugsversagens in Übergreifungsbereichen textiler Bewehrungen in Textilbetonbauteilen ist in LORENZ [9] gezeigt.

Zur Überprüfung der Tragfähigkeit der anhand der Untersuchungen an einaxialen Übergreifungsversuchen konstruierten Stöße sowie zur Sicherstellung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf verstärkte Bauteile wurden Vier-Punkt-Biegeversuche an einlagig textilbetonverstärkten Stahlbetonplatten mit einem Übergreifungsstoß der textilen Bewehrung in Plattenmitte durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Bild 6 dargestellt. Die Berechnung der im Bauteilversuch erreichten Versagenslasten der textilen Bewehrung erfolgte hierbei anhand der jeweiligen experimentell bestimmten Bruchmomente mit dem in SCHLADITZ, LORENZ & CURBACH [14] gezeigten Verfahren. Weiterhin sind vergleichend die Ergebnisse der zugehörigen einaxialen Übergreifungs-

versuche gegenübergestellt. Durch die Verwendung eines aufbauend auf die Untersuchungen zum Delaminationsverhalten in Übergreifungsbereichen nach LORENZ ET AL. [7] konfigurierten Textil-Matrix-Systems wurde eine sichere Übertragung der Zugkräfte im Übergreifungsbereich ohne Spaltrissbildung, Delamination und Verbundschädigungen nachgewiesen. Neben den signifikanten Steigerungen der Biegetragfähigkeit der einlagig textilbetonverstärkten Bauteile um ca. 150 % im Vergleich zu unverstärkten Stahlbetonplatten konnten die in LORENZ/ORTLEPP [5] vorgestellten Methoden zur Bestimmung der Übergreifungslängen verifiziert werden.

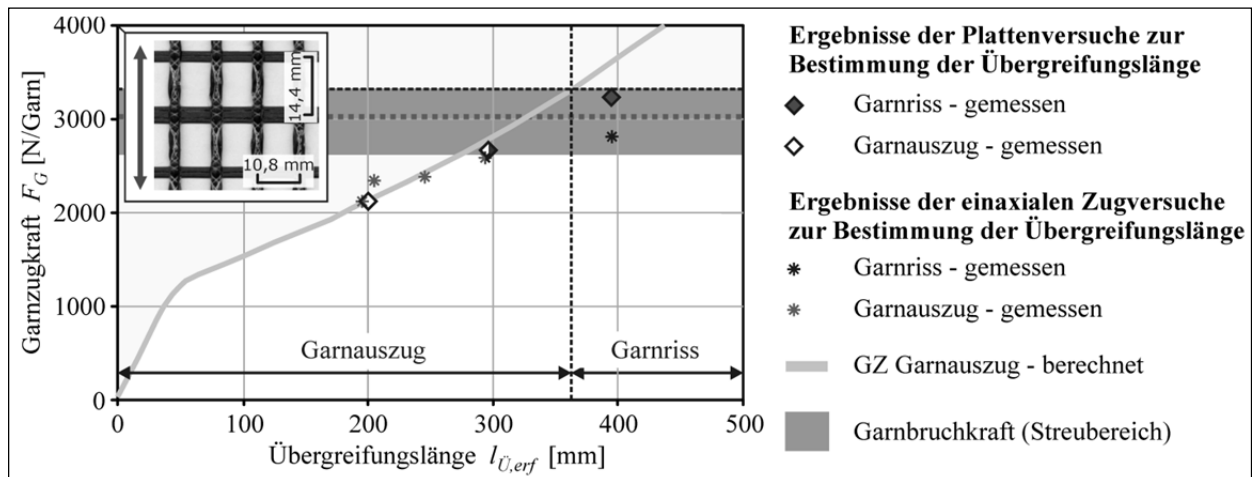


Bild 6: Ergebnisse der Bauteilversuche zur Bestimmung der Übergreifungslänge

Es ist eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse der einaxialen Übergreifungsversuche mit den in den Plattenversuchen ermittelten Werten festzustellen.

Mit den im Rahmen des Teilprojektes B5 durchgeführten experimentellen und analytischen Untersuchungen konnten demnach wesentliche Grundlagen für eine rechnerische Bestimmung und sichere Ausführung von Übergreifungen textiler Bewehrungen innerhalb von Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton geschaffen werden.

Betondeckungen

Die statisch erforderlichen Betondeckungen für textile Bewehrungen in Textilbeton können gemäß den durchgeführten theoretischen Untersuchungen unter Beachtung der jeweiligen Verbundspannungen (u. a. LORENZ/ORTLEPP [1], [2]) und Garngeometrien (LORENZ ET AL. [7]) unter Annahme einer Plastifizierung des Betonzugringes aufbauend auf in SCHENKEL [15] vorgestellte Modelle ermittelt werden. Anhand von einaxialen Zugversuchen nach JESSE [13] erfolgten hierzu experimentelle Untersuchungen für verschiedene Textil- und Matrixkonfigurationen. Die Untersuchungen bestätigen unter Berücksichtigung der in LORENZ ET AL. [7] vorgestellten Verbundversagensmöglichkeiten die berechneten Werte. In Abhängigkeit von den variierenden Eingangsgrößen ergeben sich demnach für übliche im Rahmen des SFB 528 verwendete textile Gelege statisch erforderliche Betondeckungen von 1 bis 3 mm. Es ist jedoch durch eine gezielte Konfiguration des Textil-Matrix-Systems wie in LORENZ ET AL. [7] beschrieben ein komplettes Ablösen der Betondeckungen durch Delamination und Spaltrissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung zu vermeiden. Für eine detailliertere Beschreibung der Ergebnisse wird auf LORENZ [9] verwiesen.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

- [1] LORENZ, E.; ORTLEPP, R.: Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung der Verankerungslänge der textilen Bewehrung in der Feinbetonmatrix. In: CURBACH, M.; JESSE, F. (Hrsg.): *Textile Reinforced Structures: Proceedings of the 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 03.-05.06.2009*. SFB 528, Technische Universität Dresden, D-01062 Dresden: Eigenverlag – ISBN 978-3-86780-122-5, 2009, S. 491, 502 - URL: urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244049857647-62309.
- [2] LORENZ, E.; ORTLEPP, R.: Bond Behavior of textile reinforcements - development of a Pull-out test and modelling of the respective Bond versus slip relation. In: PARRA-MONTESINOS, G.J.; REINHARDT, H. W.; NAAMAN, A. E. (Hrsg.): *Sixth International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC6), Ann Arbor, 19.-22.6.2011*. Springer, 2011, S. 463–470.
- [3] LORENZ, E.; ORTLEPP, R.: Basic research on the anchorage of textile reinforcement in cementitious matrix. In: *9th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-9), Sydney, 13.-15.07.2009*. Book of Abstracts - ISBN 978-0-9806755-0-4, 2009, S. 136.
- [4] LORENZ, E.; ORTLEPP, R.: Anchoring Failure Mechanisms of Textile Reinforced Concrete Strengthening of RC Structures. In: *Proceedings of the ACI Fall 2010 Convention Pittsburgh (Textile Reinforced Concrete – Modern Developments), 2010* (zur Veröffentlichung angenommen).
- [5] LORENZ, E.; ORTLEPP, R.: Untersuchungen zur Bestimmung der Übergreifungslängen textiler Bewehrungen aus Carbon in Textilbeton (TRC). In: CURBACH, M.; ORTLEPP, R. (Hrsg.): *Textilbeton in Theorie und Praxis: Tagungsband zum 6. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS6) in Berlin am 19. und 20.9.2011*. Eigenverlag, 2011, S. 85–102.
- [6] ORTLEPP, R.; LORENZ, E.: Anchoring of textile reinforcements in a fine-grained concrete matrix. In: KUCZMA, M.; WILMANSKI, K.; SZAJNA, W. (Hrsg.): *Proceedings of the 18th International Conference on Computer Methods in Mechanics CMM2009, Zielona Góra, 18.-21.05.2009*. The University of Zielona Góra Press, 2009, S. 347-348.
- [7] LORENZ, E.; ORTLEPP, R.; HAUSDING, J.; CHERIF, C.: Effizienzsteigerung von Textilbeton durch Einsatz textiler Bewehrungen nach dem erweiterten Nähwirkverfahren. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011) 1, S. 21-30 - DOI: 10.1002/best.201000072.
- [8] HAUSDING, J.; LORENZ, E.; ORTLEPP, R.; LUNDAHL, A.; CHERIF, C.: Application of stitch-bonded multiplies made by using the extended warp knitting process: reinforcements with symmetrical layer arrangement for concrete. In: *The Journal of the Textile Institute* 102 (2011) online first publication, S. 1-13 - DOI: 10.1080/00405000.2010.515729.

5.2.3 Publikationen anderer Autoren

- [9] LORENZ, E.: *Untersuchungen zur Endverankerung und Übergreifung textiler Bewehrungen in Verstärkungsschichten aus Textilbeton*, Dresden: Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Dissertation, 2012 (in Vorbereitung).
- [10] KRÜGER, M.: *Vorgespannter textilbewehrter Beton*, Universität Stuttgart, Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Dissertation 2004.

- [11] ORTLEPP, R.: *Untersuchungen zur Verbundverankerung textilbewehrter Feinbetonverstärkungsschichten für Betonbauteile*. Dresden, Technische Universität, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau, Dissertation, 2007.
- [12] RICHTER, M.: *Entwicklung mechanischer Modelle zur analytischen Beschreibung der Materialeigenschaften von textilbewehrtem Feinbeton*. Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Mechanik und Flächentragwerke, Dissertation, 2004.
- [13] JESSE, F.: *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix*. Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau, Dissertation, 2004.
- [14] SCHLADITZ, F.; LORENZ, E.; CURBACH, M.: Biegetragfähigkeit von textilbetonverstärkten Stahlbetonplatten. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011) 6, S. 377-384 - DOI: 10.1002/best.201100002.
- [15] SCHENKEL, M.: *Zum Verbundverhalten von Bewehrung bei kleiner Betondeckung*, Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1998.
- [16] SCHLADITZ, F.; LORENZ, E.; JESSE, F.; CURBACH, M.: Verstärkung einer denkmalgeschützten Tonnenschale mit Textilbeton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 104 (2009) 7, S. 432-437 - DOI: 10.1002/best.200908241.

B5

Ortlepp

5.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM TEILPROJEKT B6

5.1.1 Übertragungsverhalten von Roving zu Roving und Endverankerung textiler Strukturen

5.1.2 Projektleitung

Dr.-Ing. Mike Richter

Geburtsdatum: 13.08.1972, Deutsch

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen

Institut für Mechanik und Flächentragwerke

Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden

Telefon: (03 51) 463-3 27 60

Telefax: (03 51) 463-3 72 00

E-Mail: mike.richter@tu-dresden.de

5.2 ENTWICKLUNG DES TEILPROJEKTS

5.2.1 Bericht

Zusammenfassung

Die kontinuumsmechanische Untersuchung der Lastübertragungsmechanismen zwischen den Rovings im textilbewehrten Feinbeton trägt wesentlich zum Gesamtverständnis des mechanischen Verhaltens des Verbundmaterials bei. Neben der Erfassung der gegenseitigen Beeinflussung sich kreuzender Rovings (Garne) erfordert insbesondere die mechanische Modellierung und numerische Simulation von Bewehrungsstößen und Endverankerungen die Kenntnis dieser Übertragungsmechanismen. Die numerischen Simulationen sollen u. a. zeigen, welche Endverankerungslängen und welche Übergreifungslängen an Bewehrungsstößen erforderlich sind und wie die Querbewehrung die Rissbildung beeinflusst.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden zunächst Modellierungsmöglichkeiten zur Analyse der Schädigungsmechanismen im Textilbeton (textile reinforced concrete, TRC) unter Zugbelastung untersucht. Die wesentlichen Schädigungsmechanismen sind dabei die Rissbildung in der Betonmatrix und der sich daran anschließende Rovingauszug, wobei insbesondere einer möglichst realitätsnahen Modellierung und Simulation der Rissüberbrückung infolge der Rovings eine entscheidende Bedeutung beigemessen wurde. Eine erste Abschätzung dieser rissüberbrückenden Wirkung auf den Beanspruchungszustand und die Verformungen an Rissen in TRC wurde, basierend auf bruchmechanischen Methoden, in [1][2][4] mittels analytischer Ansätze durchgeführt. Aufbauend auf diesen Voruntersuchungen erfolgte anschließend die Entwicklung geeigneter dreidimensionaler heterogener mechanischer Modelle zur Berechnungen der notwendigen Verankerungs- sowie Übergreifungslängen der Textilbewehrung im TRC mittels finiter-Elemente. Die verwendeten Finite-Element-Modelle berücksichtigen die unterschiedlichen Schädigungsmechanis-

men, welche in den entsprechenden experimentellen Untersuchungen (insbesondere Teilprojekte A2, B1, B5) beobachtet wurden. Zur Identifikation erforderlicher Material- und Modelparameter wurden die Ergebnisse aus den experimentell orientierten Teilprojekten herangezogen. Ein besonderes, bei der Antragstellung nicht vorhersehbares Problem bestand darin, dass sich nach etwa der Hälfte der über insgesamt drei Jahre laufenden Förderperiode dieses Teilprojektes die damalige wissenschaftliche Mitarbeiterin entschied, eine andere berufliche Laufbahn einzuschlagen. Die geförderte Stelle musste wieder neu besetzt werden, was die Umsetzung des geplanten Arbeitsprogramms wesentlich erschwerte.

Schädigungsmechanismen in TRC unter einaxialer Zugbelastung

Charakteristisch für TRC unter Zugbeanspruchung ist eine ausgeprägte mehrfache Rissbildung. Diese Makro-Risse werden durch die Rovings überbrückt, welche infolge der Zugbeanspruchung aus der Betonmatrix gezogen werden. Damit handelt es sich hier um eine Kombination von zwei Bruchmechanismen, dem Reißen der Feinbetonmatrix und dem Rovingauszug. Beide Bruchmechanismen werden im Finite-Elemente-Modell berücksichtigt [5]. Die Modellierung der dreidimensionalen heterogenen Struktur erfolgt auf der Mesoebene. Sowohl das Verbundverhalten zwischen Matrix und Roving, als auch die Rissbildung im Feinbeton wird über Kohäsivzonen modelliert. Die Rissbildung im Beton wird durch eine diskrete Rissmodellierung abgebildet, d.h. alle potentiellen Risse werden als Doppelflächen modelliert, welche über eine Kohäsivschicht miteinander verbunden sind [5]. Bild 1 zeigt die Beziehung zwischen mittlerer Spannung und mittlerer Dehnung als Vergleich der Ergebnisse aus der Finite-Elemente-Simulation und dem zugehörigen Versuch, durchgeführt im Teilprojekt B5. Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse, was die Anwendbarkeit des entwickelten und im weiteren verwendeten mechanischen Modells bestätigt.

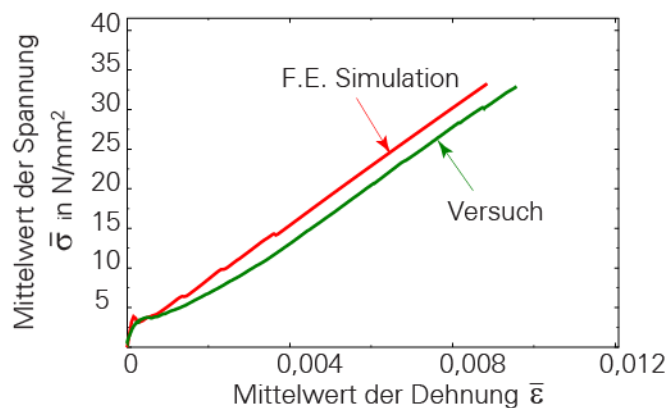


Bild 1: Beziehung zwischen mittlerer Spannung und mittlerer Dehnung für einen TRC-Dehnkörperversuch mit mehrfacher Rissbildung

Untersuchung der Endverankerung textiler Bewehrungen

Die Verankerung der Bewehrung im TRC ist ein wichtiges konstruktives Detail. Entscheidend für die Verankerung ist der Mechanismus der Spannungsübertragung zwischen den Rovings und der Feinbetonmatrix. Für ein gutes Verständnis des Spannungsübertragungsverhaltens und der im Versuch beobachteten Schädigungsmechanismen wurde ein dreidimensionales heterogenes Finite-Elemente-Modelle entwickelt [6], das alle Komponenten des TRC auf der Mesoebene berück-

sichtigt und die relevanten Schädigungsmechanismen Matrixrissbildung und Rovingauszug erfasst. Die auf Basis dieses Modells durchgeführten numerischen Simulationen liefern nicht nur Aussagen zu resultierenden Kräften und mittleren Verschiebungen, wie sie an Versuchskörpern gemessen werden, sondern auch viele weitere Detailergebnisse, die zu einem besseren Verständnis der Spannungsübertragungs- und Schädigungsmechanismen bei der Verankerung textiler Bewehrungen beitragen, wie die Spannungsverteilung in der Matrix und im Matrix-Roving-Verbund[3][6]. Die im Teilprojekt B5 durchgeführten Versuche zeigen zwei unterschiedliche Versagensarten, den vollständigen Rovingauszug und das Rovingversagen durch Reißen der Bewehrung bei noch nicht vollständig abgelöstem Verbund. Dabei richtet sich die Versagensart nach der Größe der Verankerungslänge, d. h., die maximale Zugkraft F_{max} wird durch die maximal im Verankerungsbereich übertragbare Verbundkraft $F_{V,max}$ beschränkt, es sei denn, die Garnbruchfestigkeit $F_{G,max}$ ist erreicht. In den durchgeführten numerischen Simulationen werden die Bruchmechanismen, die durch die Matrixrissbildung und den Garnauszug repräsentiert sind, unter Verwendung des Kohäsivzonenmodells berücksichtigt [3][5]. Bild 2 zeigt die berechneten Verschiebungen im numerischen Versuchskörper: die Gesamtverschiebung \bar{u}_z (entspricht dem experimentell gemessenen Maschinenweg), die Rissöffnung am vordefinierten Erstriss (im Experiment durch einen Sägeanschnitt) w sowie die (im Experiment ebenfalls gemessene) Gesamt-längenänderung dl in einem Messbereich der Länge 200 mm , in dem mehrere Rissbildungen beobachtet werden.

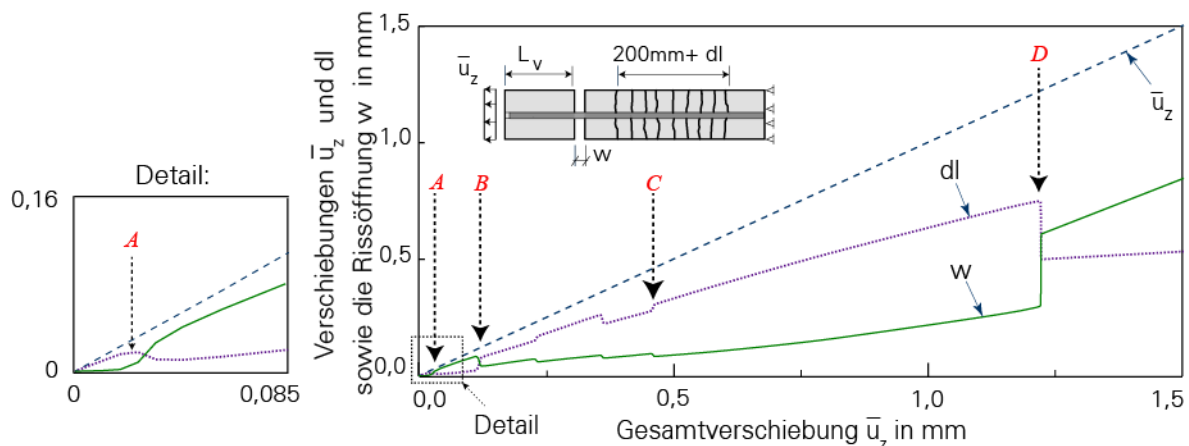


Bild 2: Berechnete Gesamtverschiebung \bar{u}_z , Rissöffnung w , und Längenänderung im Mehrfachrissbereich dl beim Bewehrungsauszug im Verankerungsbereich

Die im Bild 2 dargestellten Verschiebungsgrößen ermöglichen ein gutes Verständnis der Schädigungsmechanismen in der Zugprobe; so lassen sich zum Beispiel folgende wesentliche Punkte identifizieren:

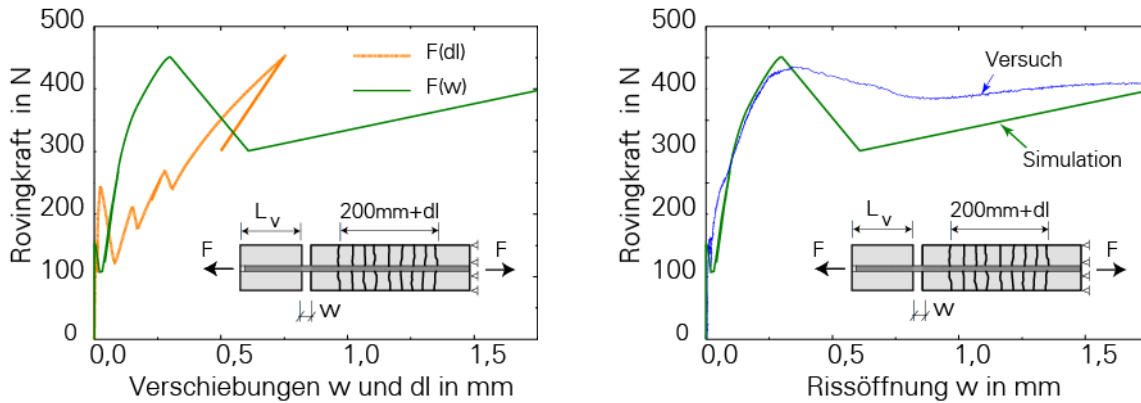
A: Die maximale Matrixzugfestigkeit am vordefinierten Riss, bei w , ist erreicht.

B bis C: Mehrfache Matrixrissbildung in der Zugprobe.

D: Vollständiges Versagen des Matrix-Roving-Verbundes entlang der gesamten Verankerungslänge L_v ; der Roving wird am freien Ende in die Zugprobe hineingezogen.

Bild 3(a) zeigt die Rovingkraft-Rissöffnung-Beziehung $F(w)$ sowie die Rovingkraft-Längenänderungs-Beziehung $F(dl)$ und Bild 3(b) zeigt den Vergleich zwischen numerischer Simulation und Experiment für $F(w)$ Grund für die Abweichung nach 5b Erreichen der maximalen Kraft ist, dass in

der numerischen Simulation die im zugehörigen Experiment umgesetzte Verankerung zwischen dem Versuchskörper und der Prüfmaschine über geklemmte Stahlbleche nicht modelliert ist. Eine Diskretisierung dieser Verankerung ist möglich, erfordert aber weitere Angaben zu den Klemmbedingungen, wie dem Anpressdruck und den Haft- und Reibbeiwerten.



(a) Numerische Simulationsergebnisse

(b) Vergleich zwischen Experiment und Simulation

Bild 3: Beziehungen zwischen Rovingkraft und Rissöffnung, $F(w)$, sowie zwischen Rovingkraft und Längenänderung, $F(dl)$, für eine Verankerungslänge $L_v=60\text{ mm}$

Um die erforderliche Verankerungslänge für ein ausgewähltes textiles Gelege zu bestimmen, werden unterschiedliche Verankerungslängen untersucht. Bild 4 zeigt die ermittelte maximale Rovingkraft in Abhängigkeit von der Verankerungslänge im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen. Für das untersuchte Gelege wurde eine mindestens erforderliche Verankerungslänge von $L_{v,erf} \approx 145\text{ mm}$ ermittelt. Für kleinere Verankerungslängen wird das Textil ausgezogen und die Tragfähigkeit der Bewehrung kann somit nicht ausgenutzt werden. Größere Verankerungslängen führen zu keiner weiteren Steigerung der Tragfähigkeit [3].

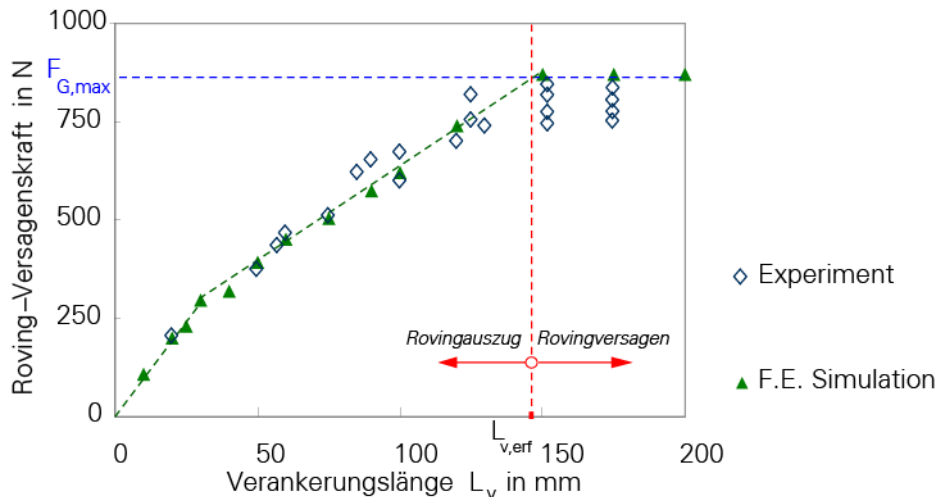
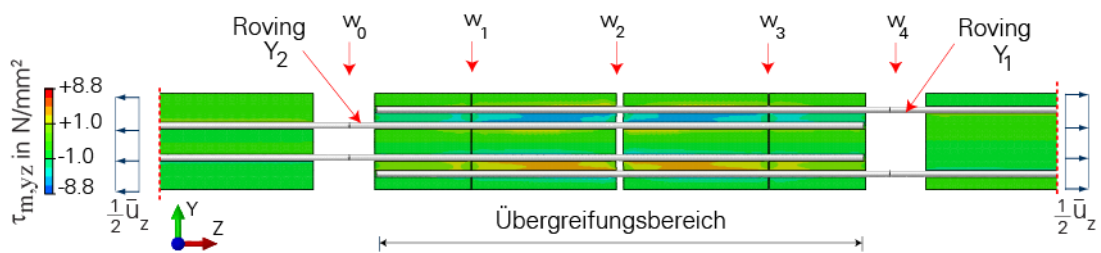


Bild 4: Abhängigkeit der maximale übertragbaren Rovingkraft von der Verankerungslänge und Bestimmung der erforderlichen Mindest-Verankerungslänge $L_{v,erf}$

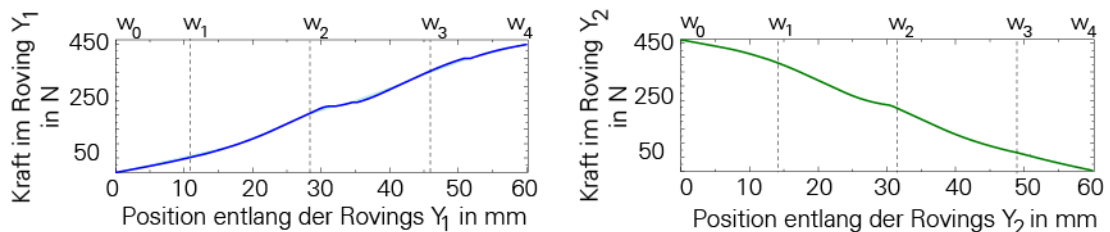
Untersuchung von Übergreifungsstößen bei textilen Bewehrungen

Die praktische Anwendung von TRC erfordert auch die Kenntnis der erforderlichen Übergreifungslängen der textilen Bewehrung. Basierend auf den bisher gewonnenen Erkenntnissen erfolgt jetzt die mechanische Modellierung und numerische Simulation von Übergreifungsstößen [3]. Bild 5 zeigt das verwendete dreidimensionale heterogene Finite-Elemente-Modell für die Simulation des

entsprechenden Versuchsaufbaus im Teilprojekt B5. Das auf der Mesoebene formulierte mechanische Modell berücksichtigt die auch in Versuchen beobachteten wesentlichen Mechanismen Matrixrissbildung, Rovingauszug am Riss und Risssschließung bei lokaler Entlastung [6]. Je nach Übergreifungslänge können wieder um zwei Versagensarten maßgebend werden: der vollständige Rovingauszug und das Reißen des Rovings, d. h., die maximale Zugkraft F_{max} wird durch die maximal im Verbundbereich übertragbare Kraft $F_{V,max}$ beschränkt, solange die Garnbruchfestigkeit $F_{G,max}$ noch nicht erreicht ist. Bild 5 zeigt die Verläufe der Normalkräfte in den Rovings Y_1 und Y_2 für eine Übergreifungslänge von $L_{Ü} = 60 \text{ mm}$ und eine symmetrisch aufgebrachte Längenänderung von $\Delta l = \bar{u}_z = 0,63 \text{ mm}$.



(a) Verformte Geometrie und Schubspannung ($\tau_{m,yz}$) in der Feinbetonmatrix



(b) Normalkraftverläufe in den Rovings Y_1 und Y_2 bei einer Endverschiebung von $\bar{u}_z = 0,63 \text{ mm}$

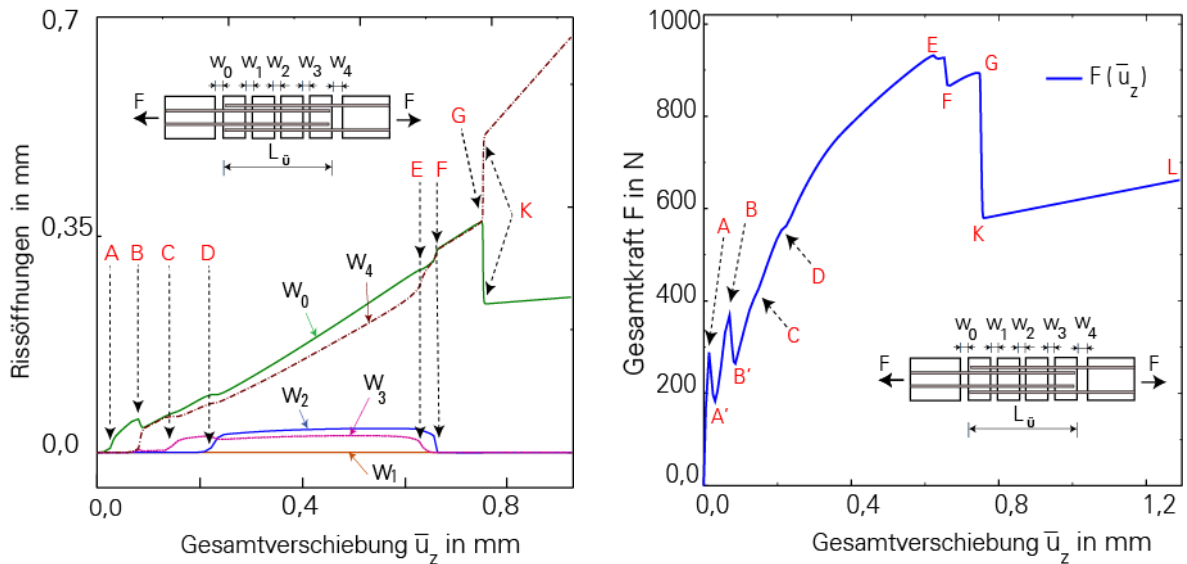
Bild 5: Finite-Elemente-Simulation zur Bestimmung der erforderlichen Übergreifungslänge $L_{Ü, erf}$ im textilbewehrten Feinbeton

Bild 6(a) zeigt die Entwicklung der im Laufe der Belastungssteigerung eintretenden Matrixrisse in Abhängigkeit von der aufgebrachten Endverschiebung \bar{u}_z und im Bild 6(b) ist die zugehörige Kraft-Verschiebungs-Beziehung $F(\bar{u}_z)$ dargestellt. In Bezug auf die im Bild 6 markierten Punkte kann die Schädigungsentwicklung wie folgt charakterisiert werden[3] [6]:

- A: Grenze des linear-elastischen Bereiches; Beginn der Rissöffnung w_0 .
- A bis A': Ausbreitung des Risses w_0 ; der Punkt A' entspricht der vollen Separation der Rissflächen.
- B: Initiierung des Risses w_4 .
- C, D: Initiierung der Risse w_2 bzw. w_3 .
- E: Beginn des Risssschließens an den Rissen w_2 und w_3 .
- F: Die inneren Risse w_1 , w_2 und w_3 sind vollständig geschlossen; und die resultierende Kraft steigt geringfügig an

G,K: An den freien Rovingenden ist die maximale Verbundfestigkeit im Matrix-Roving-Interface erreicht; das freie Rovingende wird in die Matrix hineingezogen und die resultierende Kraft fällt sprunghaft ab (bis zum Punkt K).

K bis L Auszug des Roving unter Reibung, wobei die übertragbare Reibungsspannung beim textilen Gelege mit steigender Relativverschiebung ansteigt, siehe auch Bild 3(b).



(a) Entwicklung der Rissöffnungen w_i in Abhängigkeit von der aufgebrachtten Endverschiebung (b) Verlauf der resultierenden Kraft in Abhängigkeit von der aufgebrachtten Endverschiebung

Bild 6: Rissentwicklung an einem Übergreifungsstoß mit der Übergreifungslänge $L_{\bar{u}} = 60 \text{ mm}$

Es wird noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass sich infolge des beidseitigen Sägeschnittes an der Stelle des Erstrisse w_0 das Model nicht symmetrische verhält und für die hier dargestellte Übergreifungslänge der Riss w_1 nahezu geschlossen.

Um die erforderliche Mindestübergreifungslänge für ein ausgewähltes Textil zu bestimmen, werden im Rahmen einer Parametervariation unterschiedliche Übergreifungslängen untersucht. Bild 7 zeigt die maximal übertragbare Rovingkraft in Abhängigkeit von der vorhandenen Übergreifungslänge $L_{\bar{u}}$. Die numerischen Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den experimentell im Teilprojekt B5 ermittelten Werten. Für das untersuchte Textil wurde eine erforderliche Mindestübergreifungslänge von $L_{\bar{u}, \text{erf}} \approx 150 \text{ mm}$ ermittelt, um die Tragfähigkeit der Bewehrung vollständig auszunutzen [3][6].

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die vorgestellten mechanischen Modelle die Bestimmung der erforderlichen Endverankerungs- und Übergreifungslängen für verschiedenste textile Bewehrungsstrukturen und Materialkombinationen unter Beachtung der wesentlichen Nichtlinearitäten und Schädigungsmechanismen ermöglichen.

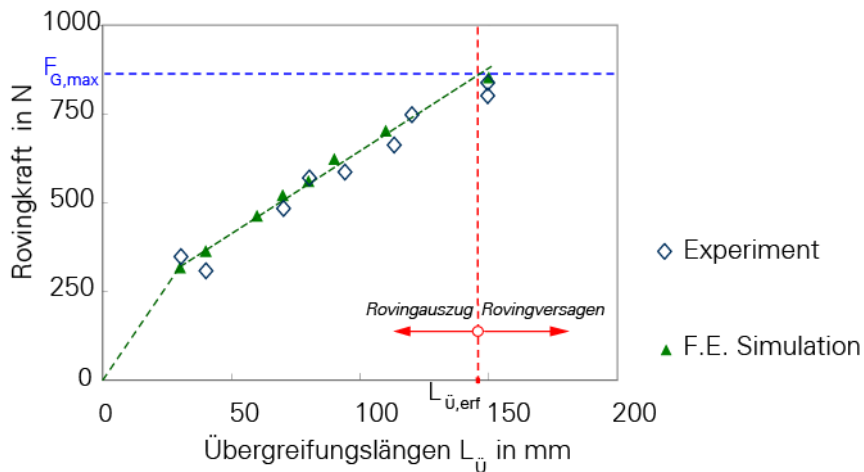


Bild 7: Abhängigkeit der maximalen Rovingkraft von der Übergreifungslänge und Bestimmung der erforderlichen Mindest-Übergreifungslänge $L_{\ddot{U}, erf}$

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Rezensierte Veröffentlichungen und Buchveröffentlichungen

- [1] BAYER, D.; RICHTER, M.: Zur Anwendung bruchmechanischer Konzepte für die Modellierung der rissüberbrückenden Wirkung von Rovings. In: CURBACH, M. (HRSG.); JESSE, F. (HRSG.): Proceedings of „4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4)“, Dresden, 2009, S. 325-336.
- [2] RICHTER, M.; BAYER, D.: On the crack opening in textile reinforced concrete with regard to fiber bridging. In: Proceedings of „The International RILEM Conference on Material Science (MatSci)“, Aachen, 2010.
- [3] AZZAM, A.; RICHTER, M.: Investigation of stress transfer behaviour in textile reinforced concrete with application to reinforcement overlapping and development lengths. In: Proceedings of „6th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS6)“, Berlin, 2011 (zur Veröffentlichung angenommen).

b) Andere Veröffentlichungen

- [4] RICHTER, M.; BAYER, D.: On the calculation of crack opening displacements in fiber reinforced composites under plane loading. In: *PAMM*, Vol. 9, Issue 1, 2010, S. 405-406.
- [5] AZZAM, A.; RICHTER, M.: Modeling and simulation of multiple cracking in textile reinforced concrete using fracture mechanics approaches. In: *PAMM*, 2011 (zur Veröffentlichung angenommen).

B6

Richter

5.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM TEILPROJEKT C1

5.1.1 Untersuchungen zum Verbundtragverhalten zwischen Altbeton und textilbewehrtem Beton

5.1.2 Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach

Geburtsdatum: 28.09.1956

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen

Institut für Massivbau

Helmholtzstraße 10

01069 Dresden

Telefon: 0351 – 463 376 60

Telefax: 0351 – 463 37289

Email: Manfred.Curbach@tu-dresden.de

5.2 ENTWICKLUNG DES TEILPROJEKTS

5.2.1 Bericht

Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Die Verankerung textilbewehrter Feinbetonverstärkungsschichten konnte in den vorangegangenen Förderperioden weitgehend geklärt werden. So waren z.B. bereits Aussagen über die Verbundei-
gnung der textilen Strukturen auf der Basis experimenteller Haftzuguntersuchungen an textilbe-
wehrten Feinbetonproben möglich. Diese Erkenntnisse ermöglichten eine Charakterisierung der
Textilien hinsichtlich ihrer Eignung zur Verstärkung.

Das Verbundtragverhalten unter Schubbeanspruchung bildet den Kern der Untersuchungen im
Teilprojekt C1. Als Ergebnis der in den vorangegangenen Förderperioden durchgeführten Schub-
versuche lag eine Bestimmungsgleichung zur Berechnung der Verankerungslänge in Abhängigkeit
von der Größe der zu verankernden Zugkraft bereits vor, womit Grenzlinien für unterschiedlich
beschaffene Textilien angegeben werden können, woraus sich ein unterer Mindestwert für das
optimale Textil zur wirtschaftlichen Ausnutzung der Verbundtragfähigkeit der Textilschicht ableitet.
Diese Beziehungen waren jedoch für vorwiegend ruhende Beanspruchungen und im Wesentli-
chen auf der Basis von Textilbetonverstärkungen mit nachträglich beschichteten AR-Glas-Textilien
ermittelt worden. Bis zum Zeitpunkt der Antragstellung hatten bereits Untersuchungen mehrfa-
cher Be- und Entlastung für Glasfasertextilien gezeigt, dass diese keinen ungünstigen Einfluss auf
die Verbundfestigkeit ausübt, weil die Zugtragfähigkeit der Verstärkungsschicht bei Beweh-
rungstextilien aus AR-Glas durch wiederholte Belastung negativ beeinflusst wird.

Somit war die Frage offen geblieben, inwieweit die für AR-Glas-Textilstrukturen gewonnenen Er-
gebnisse auf Carbonfasertextilien übertragbar sind.

Während im Haftzugversuch die Übertragbarkeit bereits verifiziert worden war, hatten die Faserzugversuche an Carbonfasertextilien einen großen Einfluss des *inneren* Verbundes zwischen Filamentgarn und Feinbetonmatrix auf die Verankerungslänge der Verstärkungsschicht gezeigt. Bezüglich der Verbundtragfähigkeit unter Schubbeanspruchung wurde zum Zeitpunkt der Antragstellung vermutet, dass die Ergebnisse übertragbar sind, weil es sich hauptsächlich um materialunabhängige, geometrische Abhängigkeiten handelt. Die Richtigkeit dieser Hypothese sollte durch experimentelle Schubuntersuchungen an verschiedenen Carbonfasertextilstrukturen überprüft werden. Noch unbekannt war ebenfalls das Verbundverhalten von mit Carbonfasertextilien bewehrtem Beton unter mehrfacher Be- und Entlastung. Da hier sowohl andere Materialeigenschaften als bei AR-Glasfilamentgarnen vorliegen, handelte es hierbei um eine wesentliche zu untersuchende Fragestellung.

Im Rahmen einer für 1 Jahr beantragten Auslauffinanzierung sollten die in der 3. Förderperiode begonnenen Untersuchungen zum Verbund zwischen Altbetonuntergrund und textilbewehrter Feinbetonverstärkung mit Carbonfasern sollen zu Ende geführt und auf Verbunduntersuchungen unter mehrfacher Be- und Entlastung ausgedehnt werden.

Ergebnisse und Methoden unter Hinweis auf die Publikationen aus dem Teilprojekt

Die Phänomene des *inneren* Verbundes wurden in der 4. Förderperiode eingehend im Rahmen des Teilprojektes B5 untersucht.

Die Verbunduntersuchungen der Verstärkungsschicht mit Carbonfasertextilien zum Altbeton wurden in dem vorhandenen Versuchsaufbau für die Schubversuche durchgeführt [1]. Die Arbeiten konzentrierten sich hierbei auf den Vergleich der Verbundversagensmechanismen in der Ebene der textilen Carbonbewehrung im Vergleich zu dem bereits bekannten Verhalten bei einer textilen AR-Glasfaserbewehrung. Die experimentellen Untersuchungen konzentrierten sich dabei auf textile Carbonfaserstrukturen, die sich in den Filamentgarnauszugsversuchen der 3. Förderperiode als geeignet erwiesen hatten.

Zur Verifizierung des Einflusses des wirksamen Flächenanteiles in der Ebene der textilen Bewehrung wurden begleitende Haftzugversuche ohne Altbetonuntergrund mit denselben textilen Strukturen durchgeführt. Die Ermittlung des zugehörigen wirksamen Flächenanteiles der textilen Strukturen erfolgt mit Hilfe des ebenfalls im Rahmen des Teilprojektes entwickelten Flächenermittlungsverfahrens [2].

Die Untersuchungen haben ergeben, dass die für AR-Glastextilien ermittelten Beziehungen zur Bestimmung der Verankerungslänge für den Versagensgrenzfall Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung auf Carbontextilien vergleichbarer Tragfähigkeit (Fasern bis 800tex) wie vermutet übertragbar sind. Aufgrund der Beschaffenheit der Carbonfasern wird jedoch bei ausreichend großer „Maschenweite“ und technisch sinnvollen Ausnutzungsgraden der textilen Bewehrung ein Versagen des *inneren* Verbundes zuerst eintreten [3], [4]. Im Umkehrschluss bedeutet

das, dass der Versagensgrenzfall Delamination in den meisten Fällen nicht maßgebend wird [5], [6], wie auch die Untersuchungen im Teilprojekt B5 bestätigen.

Weitere Untersuchungen wurden zum Einfluss einer nicht ruhenden Belastung auf die Tragfähigkeit einer Endverankerung der Textilbetonschicht zum Altbetonuntergrund durchgeführt. Dazu wurden Verbundprobekörper mit einem Carbontextil unter ruhender (Referenz) als auch nicht ruhender Beanspruchung mit einer Variation der Verankerungslänge geprüft, bis ein Überschreiten der Zugtragfähigkeit der textildbewehrten Verstärkungsschicht eintrat und damit die erforderliche Verankerungslänge ermittelt. Es wurde dazu eine zyklische Belastung mit 5000 Lastwechseln als Schwellbelastung von 65% bis 95% der Gebrauchslast aufgebracht und die Probekörper danach auf ihre Resttragfähigkeit geprüft (Bild 1). Die Bruchlast wurde dabei als 1,75faches der Gebrauchslast angenommen und vorher im statischen Versuch ermittelt.

Der Vergleich der so ermittelten Verankerungslängen ergab, dass von den statisch zu den dynamisch geprüften Probekörpern (65%-95% Gebrauchslast) keine Zunahme der Verankerungslänge zu verzeichnen ist. Auch wurde unter diesem Belastungsregime kein Wechsel der Versagensarten beobachtet, wie ursprünglich befürchtet wurde.

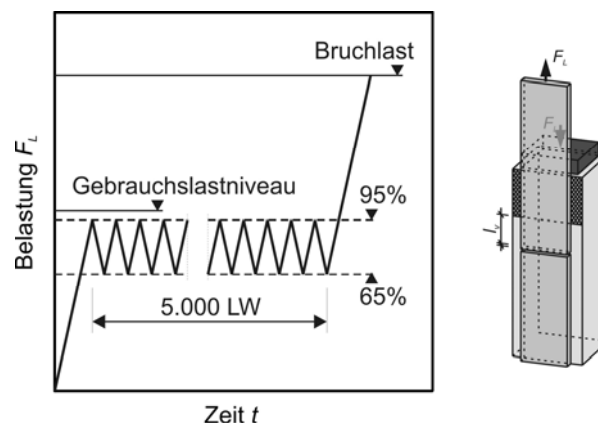


Bild 1: Belastungsregime der dynamischen Versuche

Durch eine ungeplante höhere Belastung der Proben in einigen Versuchen (siehe Abschnitt Probleme und Schwierigkeiten) auf ca. 80% der Bruchlast, also weit oberhalb des Gebrauchslastniveaus (140%) wurde festgestellt, dass bei einer erhöhten Zugbeanspruchung in der Verstärkungsschicht eine zunehmende Schädigung eintritt. Das Versagen veränderte sich dabei von einem Versagen im Altbeton (Bild 2a) in Richtung eines Versagens durch Faserauszug (Bild 2b). Bezugnehmend auf die Ergebnisse aus dem Teilprojekt B5 lässt sich dieses durch ein Überschreiten des Haftverbundes zwischen Filamentgarn und Feinbetonmatrix (*innerer* Verbund) bei zu großen Schlupfwerten, welche aus einer zu hohen Belastung resultieren, erklären. Resümierend ist festzustellen, dass bei einer zyklische Belastung eine Begrenzung der maximal aufnehmbaren Zugkraft der Verstärkungsschicht sichergestellt sein muss, um eine zunehmende Verbundschädigung auszuschließen. Auf der sicheren Seite liegend sollte dabei das Gebrauchslastniveau nicht überschritten werden.



(a) Verbundversagen im Altbeton



(b) Versagen des inneren Verbundes durch Faserauszug infolge Schädigung

Bild 2: in den Schubversuchen beobachtete Verbundversagensarten

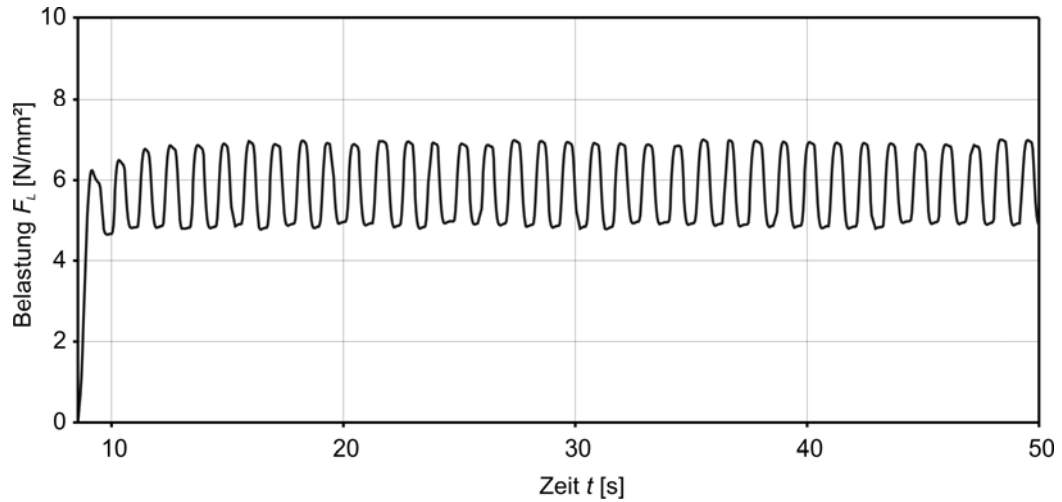
Die Ergebnisse aus dem Teilprojekt bilden eine wesentliche Grundlage für die Anwendung des Materials Textilbeton zur Verstärkung von Betonbauteilen [7], [8].

Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

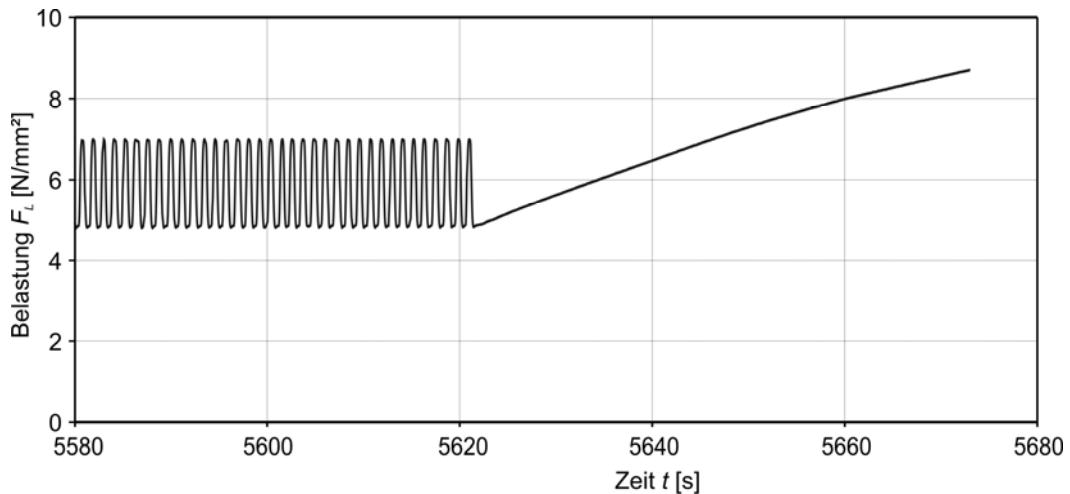
Aufgrund der Möglichkeiten bei der Einstellung der Prüfmaschine war es nicht möglich, das im Bild 1 dargestellte Belastungsregime tatsächlich zu erreichen. Bei den ersten Versuchen, eine zyklische Belastung aufzubringen, übersteuerte die Maschine derart, dass bereits beim Anfahren des ersten Belastungszyklus die Bruchlast erreicht wurde. Durch Einstellen eines sanfteren Anfahrens der Umlenkpunkte im Belastungsregime konnte dieses Problem gelöst werden. Durch das damit verbundene Anfahren und Bremsen ergab sich ein eher sinusförmiger Verlauf der zyklischen Belastung (Bild 3a) sowie effektiv eine wesentlich geringere Belastungsgeschwindigkeit als geplant. Des Weiteren konnte die Belastungsgeschwindigkeit zur Prüfung der Resttragfähigkeit nicht separat eingestellt werden, sodass die Laststeigerung dort langsamer vonstatten ging als beim Anfahren (Bild 3b).

Wenngleich sich eine zyklische Belastung nunmehr aufbringen ließ, musste nach einigen Versuchen festgestellt werden, dass die Maschine weiterhin übersteuerte und somit weit mehr Last als die geplanten 95% der Gebrauchslast aufgebracht wurde. Eine weitere Korrektur der Einstellungen behob das Problem.

Die Untersuchungen im Teilprojekt C1 wurden mit Carbondtextilien üblicher Feinheit (bis 800 tex) durchgeführt. Im Zuge der Entwicklung einer neuen Generation textiler Strukturen auf der Basis von Carbon Fiber Heavy Tows (CFHT) hat sich gezeigt, dass diese ein deutlich verändertes Trag- und vor allem Verbundverhalten aufweisen. CFHT-Garne mit Feinheiten über 3.000 tex verfügen über eine deutlich höhere Lastkapazität, was sich wiederum in einer höheren Verbundbeanspruchung äußert. Für diese Materialklasse sind demzufolge dringend Erweiterungen der bisher vorhandenen Berechnungsansätze zur Ermittlung der Verbundtragfähigkeit angezeigt.



(a) Versuchsbeginn



(b) Versuchsende

Bild 3: tatsächliches Belastungsregime am Beispiel von Versuch C1-T-56-15

Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Die zur Verstärkung erforderlichen Textilien wurden vom TP A1 (Cherif) gefertigt und zur Verfügung gestellt. Bezüglich der aufnehmbaren Lasten in der Verstärkungsschicht wurde auf die Ergebnisse aus dem Teilprojekt B1 (Jesse) zurückgegriffen. Eine besonders intensive Kooperation bestand mit dem Teilprojekt B5 (Ortlepp), dessen Inhalte aus den zusätzlichen offenen Fragestellungen zum *inneren* Verbund des Teilprojektes C1 in der vorangegangenen Förderperiode abgeleitet worden waren. Die im Teilprojekt B5 gewonnenen Erkenntnisse flossen direkt in die Auswertungen des Teilprojektes C1 ein. Ebenso wurden die hier festgestellten Beobachtungen an das Teilprojekt B5 zwecks weiterer Auswertung weiter gegeben. Die bisherige intensive Kooperation mit dem Teilprojekte C2 konnte leider nicht fortgesetzt werden, da dieses Teilprojekt in der 4. Förderperiode nicht mehr bewilligt worden war.

Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Nach Wissen des Teilprojektleiters gibt es zum Verbundtragverhalten von geschichteten glas- oder carbonfaserbewehrten Verstärkungsstrukturen mit mineralischer Basis außer den an der TU Dresden durchgeführten keine vergleichbaren Untersuchungen.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Rezensierte Veröffentlichungen und Buchveröffentlichungen

- [1] BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M.: Anchoring of shear strengthening for T-beams made of TRC. In: *Materials and Structures* 41 (2008), Nr. 2, S. 407–418 – doi: 10.1617/s11527-007-9254-9
- [2] ORTLEPP, R.: The effective area of an adhesive bond of textile reinforced concrete. In: CEB-FIP (Hrsg.); JCI (Hrsg.); CONCRETE SOCIETY (Hrsg.): *Concrete: 21st Century Superhero – Building a sustainable future, London, 22.–24.6.2009*. – London : emap networks, 2009 – Book of Abstracts and CD-ROM
- [3] ORTLEPP, R.: Anchorage Length for Textile Reinforced Concrete. In: *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL PROTECTION* 1 (2011), 3 – ISSN 2224-7777
- [4] ORTLEPP, R.: Development Length for Textile Reinforced Concrete – Determination of development lengths of textile reinforcement in fine concrete. In: *The International Workshop on Civil Engineering and Urban Planning (WCEUP 2011), Hangzhou, 26.7.–28.7.2011*. – ISBN 978-1-61284-772-6 (DVD: ISBN 978-1-61284-773-3)
- [5] ORTLEPP, R.; BRÜCKNER, A.; LORENZ, E.: Verbundversagensmechanismen im Verankerungsbereich von textilbewehrten Feinbetonverstärkungsschichten. In: CURBACH, M. (Hrsg.), JESSE, F. (Hrsg.): *Textile Reinforced Structures : Proceedings of the 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.-5.6.2009*. SFB 528, Technische Universität Dresden, D–01062 Dresden : Eigenverlag, 2009, S. 433–446 – ISBN 978-3-86780-122-5
- [6] ORTLEPP, R.; LORENZ, E.: *Anchoring of textile reinforcements in a fine-grained concrete matrix*. In: Kuczma, M.; Wilmanski, K.; Szajna, W. (Hrsg.): *Proceedings of the 18th International Conference on Computer Methods in Mechanics CMM2009, Zielona Góra, 18.-21.05.2009*. The University of Zielona Góra Press, 2009, S. 347-348.

b) Andere Veröffentlichungen

- [7] CURBACH, M.; ORTLEPP, R.; SCHEERER, S.; FRENZEL, M.: Verstärken mit Textilbeton – Weg von der Vision zur Anwendung. In: *Der Prüflingenieur* 39 (2011) 10
- [8] CURBACH, M.; ORTLEPP, R.: Leichtes Bauen mit ultrahochfesten und Textilbetonen. In: *Bauforschung und Baupraxis*, Heft 10: „Wie wollen wir in Zukunft bauen?“ – Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger, Dresden, 19.04.2011. Technische Universität Dresden, D–01062 Dresden : Eigenverlag, 2011, S. 17–22 – ISBN 978-3-86780-216-1

- c) Patente
- keine.

C1
Curbach

5.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM TEILPROJEKT D2

5.1.1 Numerische Simulation des Tragverhaltens textilverstärkter Bauwerke

5.1.2 Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske

Geburtsdatum: 22.07.1960

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke
Helmholtzstraße 10
01069 Dresden

Telefon: (0351) 463-343 86

Email: michael.kaliske@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf

Geburtsdatum: 12.03.1953

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke
Helmholtzstraße 10
01069 Dresden

Telefon: (0351) 463-341 72

Email: wolfgang.graf@tu-dresden.de

5.2 ENTWICKLUNG DES TEILPROJEKTS

5.2.1 Bericht

Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Im Teilprojekt D2 werden seit der 1. Förderperiode numerische Verfahren zur Simulation des Tragverhaltens textilverstärkter Stahl- und Spannbeton-Konstruktionen entwickelt. Ziel der 2. Förderperiode war es, die Modelle und Algorithmen bis zu einem Stand zu entwickeln, dass zyklische Belastung, dynamische Belastung, lokale Schädigung sowie Phänomene des physikalisch nichtlinearen Verhaltens des Stahlbetons und des Textilbetons bei gleichzeitiger Erfassung geometrischer Nichtlinearitäten und des rheologischen Verhaltens zuverlässig bei praxisrelevanten Tragwerken erfasst werden können.

Im Multi-Referenzebenen-Modell (MRM) wird der Verbund zwischen Altkonstruktion und textilbewehrter Verstärkungsschicht mit einem Interface und zugeordneter Verbundspannungs-

Relativverschiebungs-Abhängigkeiten auf der Makroebene modelliert. Risse, die parallel zur Referenzebene verlaufen, werden dem Interface zugeordnet.

Eine wesentliche Erkenntnis der Forschung nach den ersten beiden Förderperioden in Aachen und Dresden war die Erkenntnis, dass Datenunschärfe bei textilverstärkten Stahlbeton-Konstruktionen einen signifikanten Einfluss hat. Aus den vorliegenden Versuchsdaten folgt, dass die Datenunschärfe mit dem Unschärfemodell Fuzzy-Zufälligkeit adäquat beschrieben werden kann.

Zur Erfassung der Datenunschärfe wurde in der 3. Förderperiode die Methode der Fuzzy-Stochastischen Finiten Elemente (FSFEM) eingesetzt und die numerische Simulation um die dynamische Analyse von Tragwerken aus Textilbeton erweitert. Auf der Basis eines unscharfen gemischt hybriden Energiefunktionals wurde ein erweitertes FSMRM-Element entwickelt.

In der 3. Förderperiode kamen auch beschichtete Textilien und Carbonfasern als textile Bewehrung zum Einsatz. Das für unbeschichtete Textilien aus AR-Glas entwickelte Modell aus Textilstoffgesetz, dehnungsabhängiger Schädigungsfunktion und Tension Stiffening wurde auf die neuen Bewehrungsmaterialien übertragen und um eine dehnungsabhängige Schlupffunktion erweitert.

Für die Erfassung beliebig über den Querschnitt verteilter Risse im MRM, die parallel zur Referenzebene verlaufen, wurde ein Meso-Makro-Interaktionsmodell entwickelt. Zur Berücksichtigung der Modellunschärfe im Mesomodell, wurde dieses als Fuzzy-Mesomodell konzipiert. Auf der Basis des fuzzy-stochastischen HELLINGER-REISSNER-Funktionals wurde ein isoparametrisches gemischt hybrides fuzzy-stochastisches 3D-Element formuliert.

Zur besseren Beurteilung des Langzeitverhaltens und der Dauerhaftigkeit wurde das Verhalten des Feinbetons und der textilen Verstärkung viskoelastisch und viskoplastisch modelliert. Dabei wurde vorausgesetzt, dass die tertiäre Kriechphase vernachlässigt werden kann. In der 3. Förderperiode wurde bei zeitabhängiger Belastung das Kriechen mit einem fraktionalen Stoffgesetz beschrieben. Als rheologisches Modell wurde eine Reihenschaltung aus einem fraktionalen KELVIN-Körper und einem fraktionalen NEWTON-Körper eingesetzt.

Für Gesamtstabilitätsuntersuchungen textilverstärkter Stahlbeton-Tragwerke wurde in der 3. Förderperiode die physikalisch nichtlineare Analyse auf der Basis des MRM um die geometrisch nichtlineare Analyse erweitert. Die Erweiterung der MRM-Steifigkeitsmatrix um geometrisch nichtlineare Anteile basiert auf einem modifizierten HELLINGER-REISSNER-Funktional.

Ergebnisse sowie angewandte und neu entwickelte Methoden

Die hier dargestellten Ergebnisse orientieren sich am Finanzierungsantrag für die Periode 2008/2 - 2011/1. In den ausgewählten zitierten Veröffentlichungen sind wesentliche Ergebnisse dokumentiert.

In der 3. Förderperiode wurde die FSFEM zur dynamischen Analyse von Textilbeton-Faltwerken eingesetzt. Zur numerischen Zeitschrittintegration wurde dabei ein implizites Verfahren nach NEWMARK verwendet, das als Einwirkungen beliebige Last-Zeit-Abhängigkeiten erfassen kann. In der 4. Förderperiode wurde die Zeitschrittintegration um zwei explizite Verfahren erweitert. Mit der zentralen Differenzenmethode und dem expliziten NEWMARK-Operator können Beschleunigungs-Zeit-Abhängigkeiten als Einwirkungen berücksichtigt werden. Für die dynamische Analyse kompakter Tragstrukturen wurde die Massenmatrix für das hybride 3D-Element mit eingebetteter Bewehrung entwickelt [8].

Tragwerksprozesse für Textilbeton-Tragwerke bildeten einen Schwerpunkt in der 4. Förderperiode. Jedes Tragwerk unterliegt während seiner Nutzungsdauer vielfältigen stetigen und unstetigen Veränderungen, z.B. variierende Belastungen, Umwelteinflüsse oder Materialveränderungen. Diese Veränderungen sind zeitabhängig, d.h. sie besitzen Prozesscharakter und beeinflussen die Tragwerkssicherheit und die Lebensdauer. Die Methode des numerischen Tragwerksmonitoring wurde mit dem Ziel angewendet, die Veränderungen des Tragverhaltens zu erfassen, Schädigungen zu quantifizieren und ggf. erforderliche Verstärkungsmaßnahmen zu planen [3].

Die Tragwerksprozesse sind durch Unschärfe gekennzeichnet. Unterschieden wird zwischen stochastischer Unschärfe, informeller Unschärfe und lexikalischer Unschärfe. Stochastische Unschärfe auf der Basis statistischer Daten wird durch die Unschärfecharakteristik Zufälligkeit beschrieben, informelle und lexikalische Unschärfe durch die Unschärfecharakteristik Fuzziness. Die unscharfen Tragwerksprozesse werden als Fuzzy-Prozesse oder als Fuzzy-stochastische Prozesse modelliert.

Diese neu entwickelte Methodik wurde auf eine textilverstärkte Struktur unter dynamischer Belastung angewandt und in [6] und [12] veröffentlicht.

Für die Simulation des Tragverhaltens kompakter Strukturen wurden die in der 3. Förderperiode konzipierten isoparametrischen gemischt hybriden 3D-Elemente (8-Knoten) weiterentwickelt [6]. Die Bewehrung wird nach dem Rebar-Konzept als eingebettete Bewehrung modelliert. Damit werden zum einen die Schwächung der Betonmatrix durch die Bewehrung im Modell berücksichtigt und zum anderen die Steifigkeit insbesondere stark bewehrter Bauteile korrekt ermittelt. Für die Modellierung textilverstärkter kompakter Stahlbeton-Bauteile wurden zwei Varianten untersucht:

1. Komplette Modellierung mit 3D-Elementen
2. Modellierung der dünnen Verstärkungsschichten mit hybriden Faltelementen und Kopplung von 3D- und Faltelementen mit speziellen Interface-Elementen

Die im Vergleich zu den Abmessungen der Stahlbetonbauteile sehr dünnen Verstärkungsschichten führen bei der Modellierungsvariante 1 zu sehr feinen FE-Netzen mit vielen Freiheitsgraden, die den numerischen Aufwand stark erhöhen. Die Modellierungsvariante 2 mit speziellen Interface-Elementen (3 bzw. 6 Freiheitsgrade je Knoten) wird bevorzugt.

Einen weiteren Schwerpunkt in der 4. Förderperiode bildete die numerische Begleitung der im Teilprojekt D4 durchgeführten Großversuche. Dabei wurde die fuzzy-stochastische Tragwerksana-

lyse ohne Kenntnis der Versuchsergebnisse durchgeführt. Die ersten Ergebnisse für textilverstärkte Platten wurden in [10] veröffentlicht. Die Ergebnisse der numerischen Prognose stimmen sehr gut mit den Versuchen überein.

Die im Teilprojekt entwickelten Methoden kamen auch bei der Dimensionierung der textildbewehrten Verstärkungsschicht für die Tonnenschale in Zwickau zum Einsatz [7].

Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Aufgrund der Kürzung der beantragten Personalmittel wurde auf die gleichzeitige Erfassung von geometrischer und physikalischer Nichtlinearitäten und auf die Fortentwicklung des belastungsorientierten Master-Slave-Modells für den Verbund verzichtet. Die geometrischen Nichtlinearitäten hatten bei den bisherigen Anwendungsrechnungen und bei den Großversuchen keinen signifikanten Einfluss.

Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Die aus dem Teilprojekt B1 übernommenen Spannungs-Dehnungs-Abhängigkeiten der Dehnkörper lieferten Informationen zum Verhalten des textildbewehrten Feinbetons nach der Rissbildung (tension stiffening, Schädigung der Textilrovings). Die die Materialwerte des Feinbetons wurden ebenfalls vom Teilprojekt B1 übernommen.

Mit dem Teilprojekt D4 wurde bei den Großversuchen und Anwendungsberechnungen eng kooperiert. Die Simulationsergebnisse wurden für die Auslegung der Verstärkungsschichten zur Verfügung gestellt. Mit den Ergebnissen der Versuche konnten die numerischen Modelle validiert werden.

Die modellfreie Materialbeschreibung des Langzeitverhaltens von Textilbeton wurde vom Teilprojekt E4 übernommen und in das Multi-Referenzebenen-Modell implementiert, siehe [1].

Für die sicherheitszielorientierte Bemessung im Teilprojekt E3 wurde die nichtlineare deterministische Grundlösung erweitert und bereitgestellt.

Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Im Teilprojekt D3 des SFB 532 in Aachen wird ein Microplane-Modell mit richtungsabhängiger Schädigungsfunktion entwickelt, um das Verhalten von ebenen und gekrümmten Bauteilen aus textildbewehrtem Beton zu beschreiben [14].

Textilbewehrte Mörtelschichten werden für die Verstärkung von Mauerwerk unter Erdbebenbeanspruchung entwickelt. Numerische Modelle zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens textilverstärkten Mauerwerks werden in [13] beschrieben

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Rezensierte Veröffentlichungen und Buchveröffentlichungen

- [1] FREITAG, S.; STEINIGEN, F.; GRAF, W.; KALISKE, M.: Numerical Long-Term Simulation of TRC Strengthened RC Structures. In: BRAMESHUBER, W. (ed.): *Proceedings of the International RILEM Conference on Material Science (MatSci) – Volume I, 2nd International Conference of Textile Reinforced Concrete (ICTRC)*. RWTH Aachen, Bagneux : RILEM Publications S.A.R.L., 2010, pp. 319–329
- [2] STEINIGEN, F.; GRAF, W.; KALISKE, M.: Numerical modelling of textile strengthened RC structures including a smeared crack approach. In: MECHTCHERINE, V.; KALISKE, M. (eds.): *Fracture and Damage of Advanced Fibre-reinforced Cement-based Materials*, Aedificatio Publishers, Freiburg, 2010, pp. 223-230
- [3] GRAF, W.; JENKEL, C.; PANNIER, S.; SICKERT, J.-U.; STEINIGEN, F.: Numerical structural monitoring with the uncertainty model fuzzy randomness. *International Journal of Reliability and Safety* 3 (2009) 1/2/3, pp. 218-234
- [4] GRAF, W.; KALISKE, M.; HOFFMANN, A.; SICKERT, J.-U.; STEINIGEN, F.: Computational models for textile reinforced concrete structures. In: GHAFoori, N. (ed.): *5th International Structural Engineering and Construction Conference (ISEC-05)*, Las Vegas, 2009. London : Taylor & Francis/Balkema, pp. 589-594
- [5] GRAF, W.; SICKERT, J.-U.; STEINIGEN, F.: Numerical simulation of structures using generalized models for data uncertainty. In: BREBBIA, C.A.; CARLOMAGNO, G.M. (eds.): *Computational Methods and Experimental Measurements XIV* Southampton : WIT Press, 2009, pp. 511-521
- [6] MÖLLER, B.; GRAF, W.; SICKERT, J.-U.; STEINIGEN, F.: Fuzzy random processes and their application to dynamic analysis of structures. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems (MCMDS)* 15 (2009) 6, pp. 515-534 – doi: 10.1080/13873950903375338
- [7] STEINIGEN, F.; GRAF, W.; HOFFMANN, A.; KALISKE, M.: Nachträglich textilverstärkte Stahlbetontragwerke - Strukturanalyse mit unscharfen Daten. In: CURBACH, M., JESSE, F. (Hrsg.): *Textile Reinforced Structures : Proceedings of the 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung*, Dresden, SFB 528, Technische Universität Dresden, D-01062 Dresden : Eigenverlag, 2009, S. 301-312 URN: urn:nbn:de:bsz:14-ds-1244047124333-78222

b) Andere Veröffentlichungen

- [8] STEINIGEN, F.; SICKERT, J.-U.; GRAF, W.; KALISKE, M.: Fuzzy and fuzzy stochastic methods for the numerical analysis of reinforced concrete structures under dynamical loading. In: PAPADRAKAKIS, M.; LAGAROS, N.D.; FRAGIADAKIS M. (eds.): *ECCOMAS Thematic Conference on*

Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN2011), Corfu, 2011. Volltext (17 S.), CD-ROM

- [9] KALISKE, M.; GRAF, W.; HOFFMANN, A.: Modellierung der Schädigungen und Inkompatibilitäten in der Tragwerksanalyse. In: HOFSTETTER, G.; BEER, G.; THEINER, Y.; DÜNSER, C. (Hrsg.), Baustatik-Baupraxis 11, Universität Innsbruck, TU Graz, 2011, Bericht, S. 171-178
- [10] SICKERT, J.-U.; STEINIGEN, F.; GRAF, W.; KALISKE, M.: Numerische Simulation textilbetonverstärkter Plattenstrukturen. In: *Anwendertagung Leichter bauen - Zukunft formen*, Dresden, 2010, TUDALIT-Magazin S.14, Volltext (21 S.) CD-ROM
- [11] SICKERT, J.-U.; GRAF, W.; STEINIGEN F.: Structural dynamics under consideration of imprecise probability. In: PAPADRAKAKIS, M.; LAGAROS, N.D.; FRAGIADAKIS M. (eds.): *ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN2009)*, Rhodos, 2009. p. 186, Volltext (11 S.), CD-ROM
- [12] STEINIGEN, F.; GRAF, W.; KALISKE, M.; SICKERT, J.-U.: Numerical monitoring of textile reinforced concrete structures. In: TOPPING, B.H.V.; PAPADRAKAKIS, M. (eds.): 9th Internat. Conference on Computational Structures Technology, Athens, 2008. Proceedings, Civil-Comp Press : Stirlingshire, 2008, p. 183, Volltext (12 S.), CD-ROM

c) Patente

keine

5.2.3 Sonstige Literatur

- [13] FUGGINI, C.; CHATZI, E.; ZANGANI, D.; MESSERVEY T.B.: Innovative multifunctional reinforcement technology for masonry buildings: numerical validation and damage detection investigation. In: PAPADRAKAKIS, M.; LAGAROS, N.D.; FRAGIADAKIS M. (eds.): *ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN2011)*, Corfu, 2011. Volltext (17 S.), CD-ROM
- [14] SCHOLZEN, A.; CHUDOBA, R.; HEGGER, J.: Damage based modeling of planar textile-reinforced concrete structures. In: BRAMESHUBER, W. (ed.): *Proceedings of the International RILEM Conference on Material Science (MatSci) – Volume I, 2nd International Conference of Textile Reinforced Concrete (ICTRC)*. RWTH Aachen, Bagneux : RILEM Publications S.A.R.L., 2010, pp. 283–291

D2

Kaliske / Graf

D2

Kaliske / Graf

5.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM TEILPROJEKT D4

5.1.1 Verstärkung von normalkraft- und torsionsbeanspruchten Bauteilen mit textilbewehrtem Beton

5.1.2 Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach

Geburtsdatum: 28.09.1956

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen

Institut für Massivbau

Helmholtzstraße 10

01069 Dresden

Telefon: 0351 – 463 376 60

Telefax: 0351 – 463 37289

Email: Manfred.Curbach@tu-dresden.de

Entwicklung des Teilprojekts

5.1.3 Bericht

Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Verstärkung für Normalkraft

Die in der dritten Förderperiode durchgeführten Untersuchungen zur Normalkraftverstärkung an Stahlbetonstützen hatten belegt, dass die Tragfähigkeit durch die zusätzlich aufgebrachte Verstärkungsschicht maßgeblich gesteigert werden kann. Diese Traglaststeigerung ergibt sich zum einen aus der Querschnittserhöhung infolge der zusätzlich aufgebrachten Schicht und zum anderen aus einer Umschnürungswirkung der textilbewehrten Verstärkungsschicht. Während die Umschnürungswirkung bei runden Stützen rechnerisch nachvollziehbar war, konnte der Umschnürungseffekt bei den rechteckigen Stützen auf Grund der ungünstigeren Geometrie bis dahin noch nicht in zufriedenstellender Weise aktiviert werden.

Um eine effektive Umschnürungswirkung auch bei eckigen Stützen zu erzielen, sind bestimmte Geometrieanforderungen wie z.B. Mindestradien zu stellen, wie sie auch für CFK-Sheets existieren. Jedoch war die experimentelle Datenbasis, auf die sich solche Werte gründen, zum Antragszeitpunkt relativ dünn besetzt. Der Fokus der Untersuchungen in der vierten Förderperiode lag deshalb auf einer detaillierten Untersuchung des Einflusses der Ausrundungsradien der Eckbereiche auf die Tragfähigkeit der Verstärkung sowie auf der Verwendung von Carbontextilien, da sie eine größere Steifigkeit als AR-Glastextilien aufweisen.

Verstärkung für Torsion

In der dritten Förderperiode wurde mit grundlegenden Untersuchungen zur Torsionsverstärkung an unterbewehrten Bauteilen mit einem Druckstrebenwinkel von 45° begonnen. Die hierfür notwendige Planung und Bemessung der Probekörper sowie die Entwicklung, Herstellung und Prü-

fung des Versuchsstandes waren zum Zeitpunkt der Antragstellung bereits abgeschlossen. Die ersten Versuche belegten, dass die Torsionstragfähigkeit der Bauteile durch die zusätzlich aufgebraachte Verstärkungsschicht maßgeblich verbessert werden kann. Aus den Versuchen der vierten Förderperiode sollten u. a. klare Aussagen zur Verstärkungswirkung von Bauteilen mit einem von 45° abweichenden Druckstrebenwinkel gewonnen werden. Ebenso sollte der Einfluss der Bauteilgeometrie (Seitenverhältnisse b/h) auf die Verstärkungswirkung untersucht werden.

Großversuche

Zum Abschluss der 4. Förderperiode und gleichzeitig als Höhepunkt der Arbeiten im SFB 528 waren mehrere Großversuche geplant. Es sollten die in den vorangegangenen Förderperioden sowie in den unterschiedlichsten Teilprojekten gewonnenen Erkenntnisse und aufgestellten Bemessungsmodelle gebündelt und zur Prognose der abschließenden Versuche angewendet werden. An diesen Prognosen sollten neben dem Teilprojekt D4 (Curbach) auch die numerischen Teilprojekte A3 (Zastrau) und D2 (Kaliske/Graf) beteiligt sein. Das hierfür vorgesehene mehrstufige Versuchsprogramm mit verschiedenen Bauteilgruppen (großformatige Platten, Plattenbalken und Stützen) sollte durch das Teilprojekt D4 (Curbach) betreut werden. Die Großversuche sollten neben den entwickelten Verstärkungsmethoden die Möglichkeiten der rechnerischen Vorhersage des Tragverhaltens aufzeigen und damit abschließend den erfolgreichen Verlauf der Grundlagenforschung im SFB 528 belegen.

Ergebnisse und Methoden unter Hinweis auf die Publikationen aus dem Teilprojekt

Verstärkung für Normalkraft

Im Teilprojekt D4 erfolgten gezielte Untersuchungen zum Einfluss der Stützengeometrie [5]. Bei einer konstanten Probekörperhöhe von $h=300\text{mm}$ erfolgte eine Variation der Ausrundungsradien vom Quadrat mit einem Querschnitt von $a \times a = 150 \times 150\text{mm}$ bis zum Kreis mit einem Durchmesser von 150mm . Weitere Versuche dienten der Untersuchung von Maßstabeffekten. Es wurden sowohl der Einfluss des Verhältnisses zwischen Ausrundungsradius und Kantenlänge als auch der Einfluss des Radius bei gleichen Geometrieverhältnissen erfasst. An allen Geometrien wurden weitere Einflüsse wie der des Fasermaterials und des Faserquerschnitts untersucht sowie zur Einordnung der erzielten Ergebnisse vergleichende Untersuchungen mit verschiedenen CFK-Sheets durchgeführt [6]. Die Tragfähigkeitsabnahme der AR-Glas- und Carbonfasern infolge eines kleiner werdenden Umlenkradius wurde separat an einem eigens dafür entwickelten Versuchsstand geprüft.

Einfluss der Geometrie auf die Umschnürungswirkung:

Die Tragfähigkeit nimmt bei allen mit Textilbeton verstärkten Stützen zu [6]. Die erzielten Laststeigerungen sind das Ergebnis des Einflusses von Umschnürung und der vorhandenen Feinbetonschicht. Bei der Laststeigerung zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit von der Querschnittsgeometrie (Bild 1, [7]). Mit einer zunehmenden Annäherung der Querschnittsform an einen Kreis erhöht sich der Anteil der Umschnürung und somit der Effekt einer gesteigerten Tragfähigkeit. Die Erhöhung der Steifigkeit des Bewehrungsmaterials verstärkt den Effekt und ist somit in der Serie D (Carbon Fiber Heavy Tow) am deutlichsten zu erkennen.

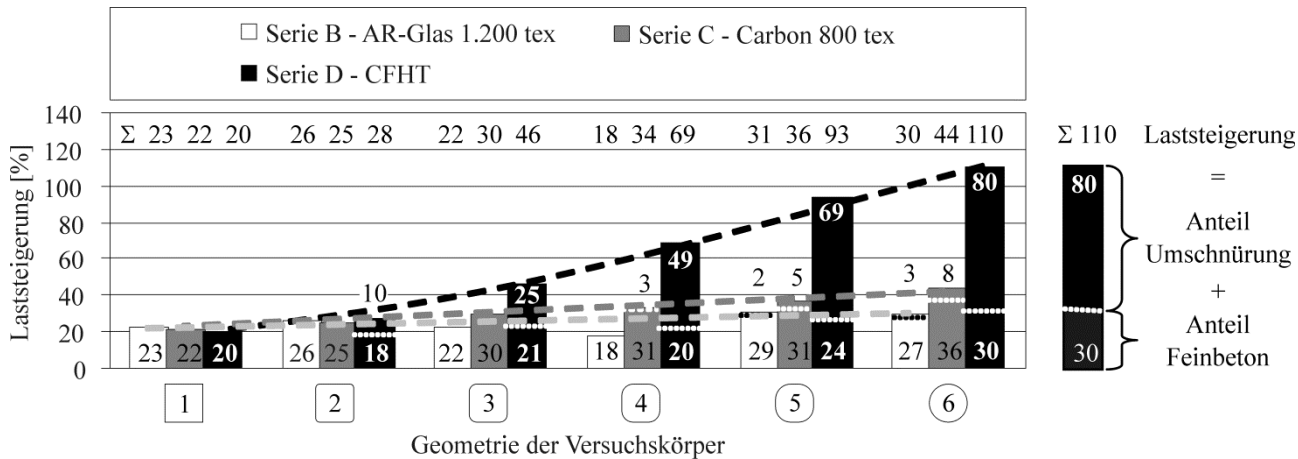


Bild 1: Einfluss der Kantenausrundung auf die Tragfähigkeitssteigerung aus [7]

Während Untersuchungen an Multifilamentgarnen der textilen Bewehrungsstrukturen einen deutlichen überproportionalen Traglastabfall bei Ausrundungsradien unter 10-20mm ergaben (Bild 2), zeigen die Stützenversuche keinen sprunghaften Anstieg ab einem bestimmten Ausrundungsradius, sondern einen eher stetigen Anstieg der Effektivität der Umschnürung (Bild 1), so dass ein Mindestausrundungsradius nicht sinnvoll angegeben werden kann.

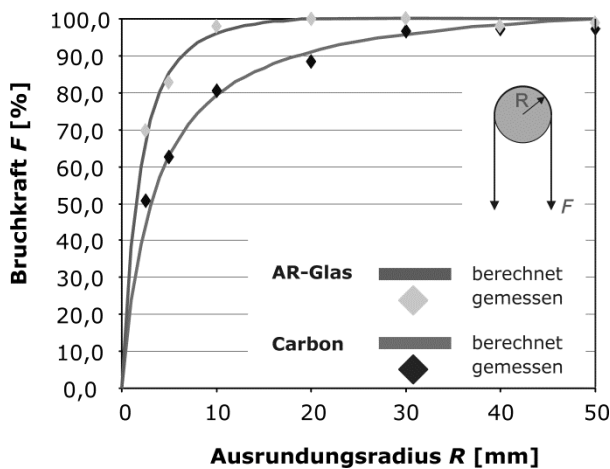


Bild 2: Einfluss des Ausrundungsradius auf die Tragfähigkeit von Multifilamentgarnen

Die Ergebnisse zeigen zu einen, dass vor allem die freie Kantenlänge zwischen den Ausrundungsradien und der mit abnehmender Kantenlänge zunehmende Bewehrungsgrad der Verstärkungsschicht einen entscheidenden Einfluss auf die erreichbare Traglaststeigerung haben [6]. Zum anderen zeigen die Ergebnisse eine zunehmende Wirksamkeit der Umschnürung mit der Verkleinerung der zu umschnürenden Kernquerschnittsfläche und dem daraus resultierendem Anstieg des Bewehrungsgrades im Verhältnis zur Betonfläche [7].

Einfluss des Fasermaterials und des Verstärkungsgrades:

Die Erhöhung der Steifigkeit der textilen Verstärkung führt zu deutlichen Steigerungen der Tragfähigkeit. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass das Fasermaterial bei gleicher Steifigkeit nur einen kleinen Einfluss auf die erzielbaren Traglaststeigerungen hat [7]. Zum Vergleich des Verstär-

kungssystems Textilbeton mit bereits bekannten Verstärkungsmethoden für Stützen wurden Versuche mit CFK-Sheets zwei verschiedener Hersteller durchgeführt [7].

Um die volle Umschnürungswirkung der Carbond Textilien bzw. -sheets ausnutzen zu können, sind jedoch enorme axiale Stauchungen notwendig, die in der Praxis jedoch nicht tolerierbar sind. Bei einer Grenzstauchung von 1% (siehe Wang & Hsu [1]) zeigen die Ergebnisse von Textilbeton und CFK-Verstärkung nur noch geringe Differenzen. Im Gegensatz zu CFK-Verstärkungen wird die mit abnehmendem Eckausrundungsradius und sich vergrößernder freien Seitenlänge verringernde Effektivität der Umschnürung im Textilbeton durch eine Beteiligung des Feinbetons am Lastabtrag sogar etwas ausgeglichen. Dies führt dazu, dass die erzielten Laststeigerungen bei Kantenausrundungen von <30mm bei Textilbeton über denen von CFK-Sheets liegen (Bild 3, [7]).

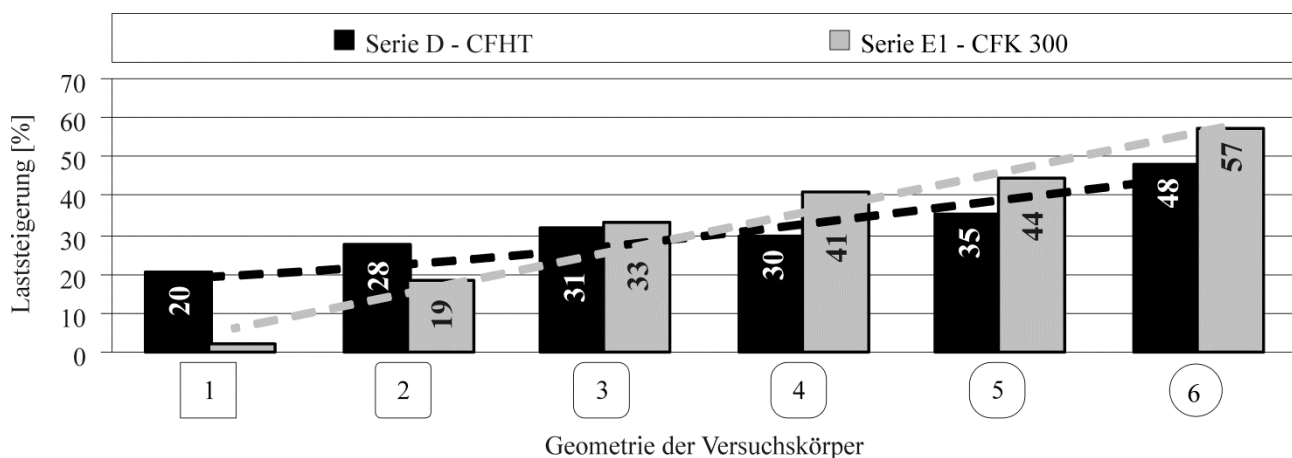


Bild 3: Vergleich der Tragfähigkeitssteigerung für TRC und CFK bei 1,0 % axialer Stauchung aus [7]

Basierend auf dem Berechnungsalgorithmus von Triantafillou et al. [4] und den eigenen experimentellen Versuchsergebnissen wurde ein einfaches Berechnungsmodell zur Vorhersage der Tragfähigkeit der mit Textilbeton umschnürten Betonstützen entwickelt [7], welches in Kombination zuvor entwickelten Normalkraftmodell aus [2] auch der Vorhersage der Tragfähigkeit der Großversuche diene.

Verstärkung für Torsion

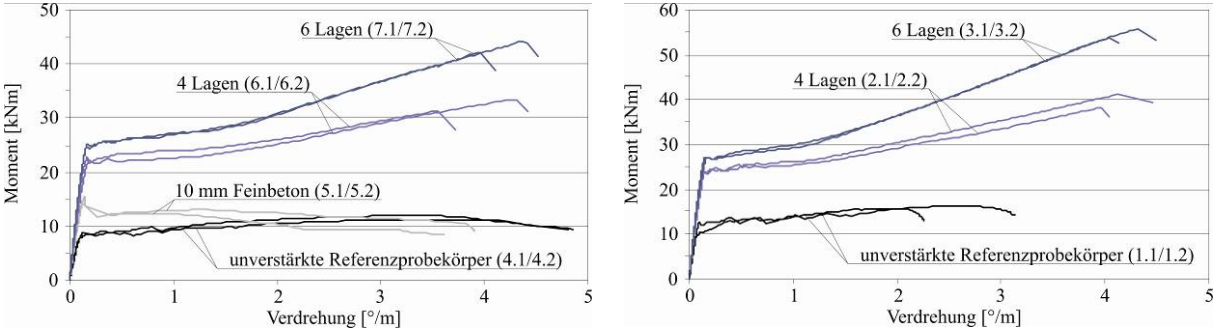
Zur Untersuchung des Torsionstragverhaltens von textilbetonverstärkten Stahlbetonbauteilen wurden u. a. Torsionsversuche an Bauteilen mit runden und quadratischen Querschnitten durchgeführt [8]. Die Probekörper besaßen einheitlich eine Länge von 2,05m. Die runden Probekörper hatten einen Durchmesser von 30cm. Die Betondeckung betrug 1,5cm, so dass die Bügelbewehrung über einen Innendurchmesser vom 25,8cm ($30 - 2 \times 1,5 - 2 \times 0,6$) verfügte. Für die Untersuchung der quadratischen Querschnitte wurden Probekörper mit einer Seitenlänge von 25cm und 28cm verwendet. Die Ecken wurden mit einem Radius von 3cm ausgerundet.

Als textile Bewehrung wurde ein Gelege aus AR-Glas verwendet, in welchem die Multifilamentgarne mit einer Feinheit von 1.200tex in einem Winkel von $\pm 45^\circ$ und einem Abstand von 10,8mm angeordnet sind. Die textile Bewehrung wurde mit ihrer Längsrichtung (Herstellungsrichtung) parallel zur Stabachse der Probekörper angeordnet. Somit wurde die Bewehrung nur in Querrichtung

überlappt. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus dem Teilprojekt B5 [3] liegen alle vorhandenen Übergreifungslängen über dem Mindestmaß der Übergreifungslänge.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass durch die Textilbetonverstärkung die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit deutlich verbessert werden kann. anhand der Momenten-Verdrehungs-Abhängigkeiten (Bild 4) ist ersichtlich, dass die verstärkten Probekörper bereits im Zustand I eine höhere Steifigkeit (Bild 4a) als die unverstärkten Probekörper haben und der Übergang vom Zustand I in den Zustand II mit zunehmender Lagenanzahl bzw. Dicke der Verstärkungsschicht bei höheren Torsionsmomenten erfolgt. Der Übergang in den Zustand II erfolgt mit textiler Bewehrung bei einem deutlich größeren Torsionsmoment. Die Risse bildeten sich unabhängig von der Art der Verstärkung im Winkel von ca. 45° zur Stabachse aus.

Im Zustand II zeigten die mit Textilbeton verstärkten Probekörper, abhängig von der Anzahl der textilen Bewehrungslagen, eine deutlich höhere Steifigkeit. Die Torsionstragfähigkeit steigt mit zunehmender Lagenanzahl der textilen Bewehrung. Die Probekörper mit Feinbeton und ohne textile Bewehrung zeigen, dass eine Verstärkung ausschließlich mit Feinbeton die Torsionstragfähigkeit nicht erhöht.



(a) Quadratischer Querschnitt mit a=25cm

(b) Kreisquerschnitt mit d=30cm

Bild 4: Momenten-Verdrehungs-Abhängigkeiten aus [9]

Neben einer Steigerung der Tragfähigkeit wurde auch eine Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit erreicht. Im Zustand II sinken die Verformungen der verstärkten Probekörper bei gleichem Torsionsmoment mit zunehmender Lagenanzahl (Bild 4). Die Textilbetonverstärkung bewirkt ein deutlich feineres und gleichmäßigeres Rissbild (Bild 5).



(a) unverstärkt

(b) verstärkt

(c) Detail, verstärkt

Bild 5: Exemplarische Rissbilder aus [9]

Für die Torsionstragfähigkeit der Textilbetonverstärkung wurde ein modifiziertes Stabwerkmodell entwickelt, welches schräge, im Winkel von 45° umlaufende Zugstreben besitzt [9]. Der Vergleich zwischen den experimentell und rechnerisch ermittelten Werten zeigt dabei eine gute Übereinstimmung.

Großversuche

Im Rahmen des Teilprojektes D4 wurden die bereits im Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Großversuche konzipiert [10] und die Vorhersageberechnungen der verschiedenen mitwirkenden Teilprojekte koordiniert. Es wurden großformatige Stahlbetonplatten, große Stahlbetonstützen sowie Plattenbalken für die Querkraftverstärkung hergestellt, verstärkt und nach dem Vorliegen der Prognosewerte aus den numerischen Teilprojekten im Labor auf ihre Tragfähigkeit geprüft [10]. Die Verstärkung erfolgte in allen Fällen mit Carbon – bei den Platten und Stützen mit CFHT-Garnen (3.500tex) in 0° -Richtung und bei den Querkraftbalken mit 800tex in 45° -Richtung (siehe [10], [11], [12]). Vor der Prüfung wurden neben der numerischen Prognose in den Teilprojekten A3 (Zastrau) und D2 (Kaliske/Graf) auch mithilfe der in den Massivbau-Teilprojekten D1, D4, T3 und T6 (Curbach) entwickelten Berechnungsansätze Vorhersagewerte für die Tragfähigkeit der verstärkten und unverstärkten Bauteile berechnet [10], [11], [12]. Die Vergleiche zwischen den Vorhersagewerten aus den beteiligten Teilprojekten und Messergebnissen wurden bereits im Abschnitt 2.1.1 des Abschlussberichtes vorgestellt.

Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Die Umsetzung eines Radienzugversuchs an Probekörpern aus Textilbeton gestaltete sich als sehr schwierig. Aus diesem Grunde wurde für die Untersuchung der umlenkradienabhängigen Zugfestigkeit ein Versuchsaufbau für aus textilen Strukturen herausgelöste Garne entwickelt und für die Untersuchungen verwendet. Anhand von Textilzugversuchen im Versuchsstand aus dem TP B1 (Jesse) wurde die Übertragbarkeit der an den Textilgarnen gemessenen Bruchlasten im Vergleich zu der Bruchlast der Textilbetonzugkörper geprüft und nachgewiesen.

Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Die zur Verstärkung erforderlichen Textilien wurden vom TP A1 (Cherif) gefertigt und zur Verfügung gestellt. Die Versuchsergebnisse der TPe B1 (Jesse), B5 (Ortlepp) und C1 (Curbach) flossen in die Auswertung der eigenen Versuche ein. Die ermittelte Spannungs-Dehnungs-Beziehung der Dehnkörper in einaxialer und zweiaxialer Belastungsrichtung bildete die Grundlage zur Beschreibung der Verstärkungswirkung. Den Teilprojekten A3 (Zastrau) und D2 (Kaliske /Graf), die sich mit der numerischen Simulation der Verstärkung beschäftigten, wurden die Messwerte für Nach- und Vergleichsrechnung zur Verfügung gestellt. Im Rahmen der Großversuche wurden die Eingangsgrößen für die Simulation (Geometrie- und Materialkennwerte) den numerischen Teilprojekten zur Verfügung gestellt. Im Gegenzug wurden die Ergebnisse der numerischen Berechnung als Vorhersagewerte vor der Prüfung der Probekörper an das TP D4 (Curbach) übermittelt.

Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Triantafillou et al. [4] haben Versuche zur Umschnürungswirkung von TRM (textile reinforced mortar) unter Verwendung eines kommerziellen Carbontextils an kurzen Stützen durchgeführt. In Anlehnung an die Berechnungsansätze für umschnürende CFK-Verstärkungen wurde ein empirisches Berechnungsmodell entwickelt. Der Anteil der Längskraftübertragung in der TRM-Verstärkungsschicht wird in diesem Modell nicht berücksichtigt. Zur Verstärkung von torsionsbeanspruchten Bauteilen mit textilbewehrtem Beton gibt es nach Wissen des Antragstellers keine vergleichbaren Untersuchungen.

Publikationen anderer Autoren

- [1] WANG, Y.-C., HSU K.: Design of FRP-wrapped reinforced concrete columns for enhancing axial load carrying capacity. *Composite Structures* 82(2008)1, pp 132–139.
- [2] ORTLEPP, R.; CURBACH, M.: Verstärken von Stahlbetonstützen mit textilbewehrtem Beton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 104 (2009), Nr. 10, S. 681–689 – doi: 10.1002/best.200900034
- [3] LORENZ, E. UND ORTLEPP, R.: Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung der Verankerungslänge der textilen Bewehrung in der Feinbetonmatrix. In: CURBACH, M. (Hrsg.), JESSE, F. (Hrsg.): *Textile Reinforced Structures: Proceedings of the 4nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.-5.6.2009*. S. 491-502
- [4] TRIANTAFILLOU, T.C., PAPANICOLAOU, C.G., ZISSIMOPOULOS, P., LAORDEKIS, T.: Concrete Confinement with Textile-Reinforced Mortar Jackets. *ACI Structural Journal* 103(2006)1, pp 28–37.

5.1.4 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Rezensierte Veröffentlichungen und Buchveröffentlichungen

- [5] ORTLEPP, R.; LORENZ, A.; CURBACH, M.: Column strengthening with TRC: Influences of the column geometry onto the confinement effect. In: *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2009, Article ID 493097, doi:10.1155/2009/493097
- [6] ORTLEPP, R.; LORENZ, A.; CURBACH, M.: Geometry Effects onto the Load Bearing Capacity of Column Heads Strengthened with TRC. In: CEB-FIP (Hrsg.): *The 2011 fib Symposium: Concrete Engineering for Excellence and Efficiency, Prague, 8.6.–10.6.2011*. – Book of Abstracts and CD-ROM, Bd. 2, S. 1193–1196 – ISBN 978-80-87158-29-6
- [7] ORTLEPP, R.; LORENZ, A.; CURBACH, M.: Umschnürungswirkung textilbewehrter Verstärkungen im Lasteinleitungsbereich von Stützen in Abhängigkeit von der Geometrie. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), Nr. 7, S. 490–500 – doi: 10.1002/best.201100018
- [8] SCHLADITZ, F.; CURBACH, M.: Torsion tests on textile-reinforced concrete strengthened specimens. *Materials and Structures Online First* (2011) – doi: 10.1617/s11527-011-9746-5
- [9] SCHLADITZ, F.; CURBACH, M.: Torsionsversuche an textilbetonverstärkten Stahlbetonbauteilen. *Beton- und Stahlbetonbau* 104 (2009), Nr. 12, S. 835-843 – doi: 10.1002/best.200900043

- [10] BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; SCHLADITZ, F.; CURBACH, M: Großversuche zur Prüfung der Vorhersagefähigkeit der im SFB 528 entwickelten Rechenmodelle. In: CURBACH, M. (Hrsg.); ORTLEPP, R. (Hrsg.): *Textilbeton in Theorie und Praxis: Tagungsband zum 6. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS6), Berlin, 19.–20.9.2011*. TU Dresden : Eigenverlag, 2011, S. 413-428
- [11] SCHLADITZ, F.; LORENZ, E.; CURBACH, M.: Biegetragfähigkeit von textilbetonverstärkten Stahlbetonplatten. *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), Nr. 6, S. 377-384 – doi: 10.1002/best.201100002
- [12] ORTLEPP, R.; SCHLADITZ, F.; CURBACH, M.: Textilbetonverstärkte Stahlbetonstützen. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), Nr. 9, S. 640–648 – doi: 10.1002/best.201100017

b) Andere Veröffentlichungen
keine.

c) Patente
keine.

D4
Curbach

D4

Curbach

5.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM TEILPROJEKT D5

5.1.1 *Korrosionsschutz von Beton- und Stahlbetonbauteilen bei Instandsetzung und Verstärkung mit textilibewehrtem Beton*

5.1.2 *Projektleitung*

Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine

Geburtsdatum 18.09.1964

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baustoffe
Helmholtzstrasse 10
01069 Dresden

Telefon: (03 51) 463-363 11

Telefax: (03 51) 463-372 68

E-Mail: mechtcherine@tu-dresden.de

5.2 ENTWICKLUNG DES TEILPROJEKTS

5.2.1 *Bericht*

Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Für eine praxistaugliche und zielsichere Anwendung textilibewehrter Betone zur Verstärkung bzw. Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen sind Kenntnisse zu deren schützenden Wirkung gegenüber chemischen und physikalischen Angriffen unabdingbar. Bisherige Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von TRC (engl.: Textile Reinforced Concrete) beschränkten sich auf die Beständigkeit von AR-Glasfasern im alkalischen Milieu und auf die Dauerhaftigkeit des Faser-Matrix-Interfaces sowie deren Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffes[1]. Zur Dauerhaftigkeit des Gesamtsystems, bestehend aus textilibewehrter Verstärkungsschicht und zu verstärkendem Beton- bzw. Stahlbetonbauteil waren somit keine verlässlichen Aussagen möglich. Sowohl für gerissene als auch ungerissene Bereiche der textilibewehrten Verstärkungsschicht lagen weder zum Permeations- und Diffusionsverhalten gegenüber Flüssigkeiten und Gasen noch zur Wasseraufnahme sowie zum Eindringen bzw. zur Bindung von Chloriden und Sulfaten hinreichende Erkenntnisse vor.

Im Teilprojekt sollte der Widerstand textilibewehrter Betone gegenüber betriebsbedingten Expositionen untersucht werden, insbesondere der Transport von Flüssigkeit und Gasen durch TRC. Den Schwerpunkt der Untersuchungen bildeten daher Experimente an ungerissenen und gerissenen TRC-Schichten zur Erfassung und Charakterisierung der Permeation von Flüssigkeiten und Gasen sowie Kapillar- und Diffusionsvorgängen. Die Variationsparameter waren so gewählt, dass ein umfassendes Bild über das spezifische Materialverhalten gewonnen werden konnte. Sie schlossen die Art der textilen Bewehrung (AR-Glas, Carbon, Beschichtung von Rovings), die Matrixzusam-

menetzung sowie die Rissbreite und -verteilung ein. Besondere Beachtung sollte dabei dem Stofftransport in den zahlreichen, feinen Rissen belasteter TRC-Verstärkungen unter Berücksichtigung von gegebenenfalls eintretenden und nachzuweisenden Selbstheilungseffekten der Matrix gelten. Dazu waren an den Proben gezielt Rissbilder einzustellen, die charakteristischen Risszuständen aus spezifischen Betriebsbeanspruchungen entsprechen.

Ergebnisse sowie angewandte und ggf. neu entwickelte Methoden

Untersuchungen zum Transportverhalten an Dehnkörpern

Bei den Versuchsreihen wurden Rezepturen vom TP A6 (Mechtcherine) zur Verfügung gestellt. Zur Anwendung kamen eine puzzolanreiche Matrix M1 auf Basis von CEM III Zement (Verwendung von AR-Glas Bewehrung) und eine alkalireichere Matrix M7 auf Basis von CEM I Zement (Verwendung von Carbondtextilien). Für die Untersuchungen zum Transport- und Rissbildungsverhalten wurden symmetrisch bewehrte 4lagige Dehnkörper mit beidseitig definierter Oberflächenqualität und hinreichender Formstabilität hergestellt [8]. Die geometrischen Parameter (Maschenweite 7,2 mm) der Bewehrung waren konstant, variiert wurden die Feinheit (ARG 1280 tex / 2400 tex, Carbon 800 tex) sowie der Beschichtungs- und Kurzfasernanteil (0, 0,2 und 0,5 Vol.-%).

Charakterisierung der Rissentwicklung

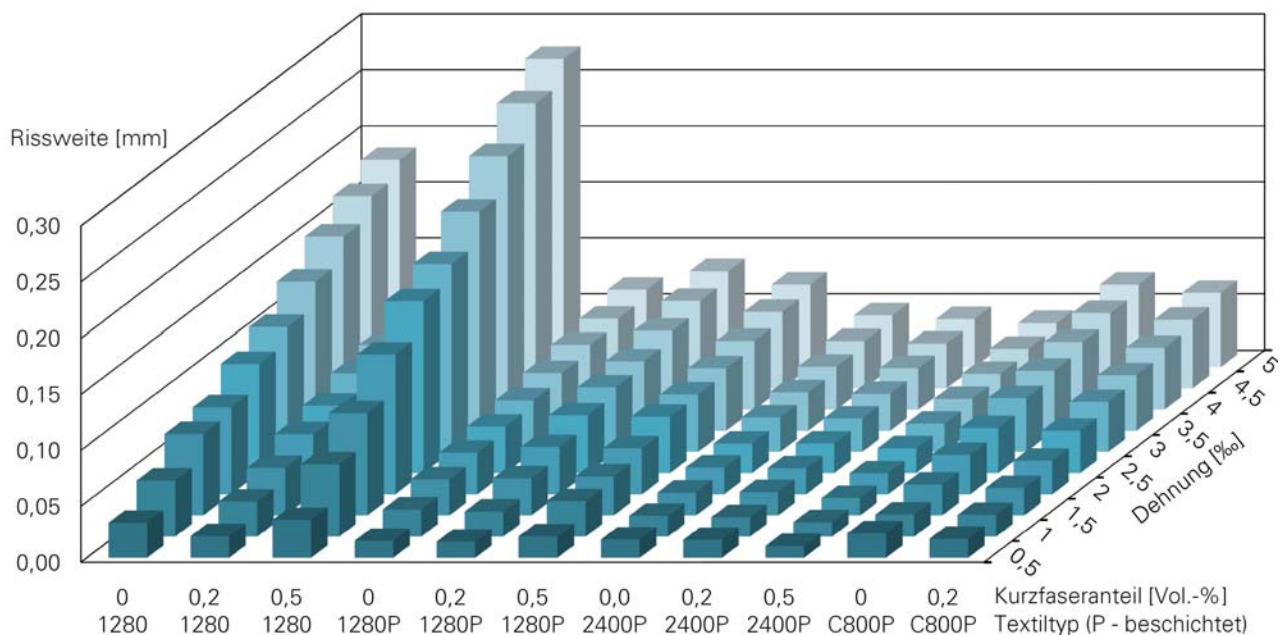


Bild 1: Entwicklung der mittleren Rissweite von Dehnkörpern mit ausgewählten Bewehrungskonfigurationen

Bild 1 zeigt zusammenfassend das Rissbildungsverhalten von Dehnkörpern mit ausgewählten Bewehrungskonfigurationen, erfasst mit Hilfe der digitalen Nahbereichsfotogrammetrie durch die Unterstützung des TP Y1 (Maas). Die dehnungsabhängige Entwicklung der Rissweite (und der Rissanzahl) wird primär durch die Textilfeinheit bestimmt. Höhere Feinheiten (d.h. hoher Bewehrungsgehalt) haben eine deutlich feinere Risscharakteristik zur Folge (vgl. die Zahlen für TRC-Proben mit 1280 tex und 2400 tex). Eine Beschichtung der Textilien verbessert zusätzlich den Faser-Matrix-Verbund und trägt ebenfalls zur feineren Rissbildung bei. Weiterhin vorteilhaft ist die Zugabe geringer Anteile von AR-Glaskurzfasern mit 9 mm Länge. Höhere Anteile (0,5 Vol.-%) ha-

ben jedoch teilweise eine ungünstige Auswirkung auf die Gefügestruktur und das Rissbildungsverhalten (Bsp. Dehnkörper mit 1280 tex), was auf eine schlechtere Verarbeitbarkeit solcher Matrices zurückzuführen ist. Die höchste Rissdichte und die geringste mittlere Rissbreite konnten bei den Dehnkörpern 2400 tex Bewehrung und Polymerbeschichtung sowie Kurzfaserteilen von 0,5 Vol.-% erreicht werden. Bei einer Dehnung von beispielsweise 5 ‰ werden ca. 130 Risse pro Meter bei einer mittleren Breite von ca. 40 µm beobachtet.

Kapillare Wasseraufnahme

Der Einfluss der Textilbeschichtung und der Vordehnung wird am Beispiel von gerissenen vorbelasteten TRC-Prüfkörpern im kapillaren Saugversuch orthogonal zur Plattenoberfläche von in [7] aufgezeigt. Bei gleichartig konfigurierten Plattenprüfkörpern mit 2400 tex Textilien führte eine Polymerbeschichtung von ca. 5 M.-% zu einer Halbierung des kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten. Bei Proben mit einer bleibenden Dehnung von 1,1 ‰ bis 1,3 ‰ (100 bis 117 Risse/Meter) im gerissenen Zustand (Vordehnung bis 4 ‰) wurde eine Erhöhung der Wasseraufnahme um das 1,8-Fache im Vergleich zur unbelasteten, ungerissenen Probe festgestellt [7]. Die vorbelasteten Proben mit den 1280 tex-Garnen zeigten nur eine Erhöhung um das 1,4-Fache, aufgrund eines geringeren Zwickelvolumens in den Rovings.

Diffusionsverhalten

Das Diffusionsverhalten gegenüber Wasserdampf wird bei ungerissenem TRC im Wesentlichen von dem verwendeten Matrixsystem beeinflusst. Die unbewehrte puzzolanreiche Matrix M1 besitzt ein sehr dichtes Gefüge und weist eine Diffusionswiderstandszahl im Mittel von 822 auf. Im Vergleich dazu wird bei der Portlandzement Matrix M7 nur ein Wert von 260 erreicht. In Kombination mit textiler Bewehrung wird mit steigendem Bewehrungsanteil (Garnfeinheit) der Diffusionswiderstand verringert. Bei 4lagiger Bewehrung mit dem 2400 tex Textil (unbeschichtet) erfolgt eine Reduzierung der Diffusionswiderstandszahl auf 355 für die Matrix M1. Bedeutsam ist ebenfalls die Textilbeschichtung. Beispielsweise erreicht eine TRC-Probe mit der beschichteten 1280 tex-Variante einen Widerstand von 619. Bei Einsatz des offenen 1280 tex-Textils wird hingegen nur ein Wert von 361 erreicht.

Permeabilität gegenüber Flüssigkeiten und Gasen

Zur Beurteilung des Permeabilitätsverhaltens gegenüber Sauerstoff und Wasser in Abhängigkeit der Risscharakteristik bei beliebigen Dehnungszuständen wurde eine Messzelle entwickelt, die die Bestimmung der Permeabilität von Plattenprüfkörpern in situ unter axialer Zugbeanspruchung gestattet [5]. Damit ist es möglich den Volumenstrom eines Permeats während einer Belastung bzw. Verformung integral über eine größere Probenfläche zu messen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ein höherer Bewehrungsgehalt (Feinheit) sowie auch eine Verbesserung des Verbundverhaltens durch Polymerbeschichtung des Textils eine feinere Risscharakteristik zur Folge haben. Eine Steigerung der Rissanzahl führt zu einer Verringerung der Rissbreiten und daraus resultierend werden die Transportraten von Sauerstoff und Wasser merklich vermindert. Grundsätzlich bewirkt eine Dehnungssteigerung (Rissaufweitung) eine überproportionale Zunahme der Permeabilität. Dieser Effekt wird besonders deutlich bei Dehnungsstufen oberhalb von 2 ‰ (Bild 2). Zur Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit in Abhängigkeit der Dehnung bzw. mittleren Rissweite wurde ein analytisches Modell, basierend auf der Annahme einer laminaren Strömung zwischen zwei glatten parallelen Wandungen, für die Verhältnisse in TRC entwickelt.

Zur Untersuchung von Selbstheilungseffekten wurde ein Teil der Proben in der wassergefüllten Messzelle belassen und in Zeitintervallen von 7 Tagen einer Permeabilitätsmessung unterzogen. Bereits nach 14 Tagen Wasserkontakt verringerte sich der Durchfluss auf unter 50 % des Anfangswertes. Nach weniger als 35 Tagen konnte bei allen untersuchten Varianten kein Durchfluss mehr bei einem Prüfdruck von 100 kPa bestimmt werden (Bild 3). Um Quelleffekte auszuschließen wurden an den getrockneten Proben anschließend Sauerstoffpermeabilitätsmessungen durchgeführt. Die Permeabilität reduzierte sich auf Werte, die vergleichbar waren mit den Werten, welche an ungerissenen Proben vor der Erstbelastung bestimmt worden waren [5]. Die dominierende Ursache der Selbstabdichtung ist eine irreversible Querschnittsreduzierung der Risse durch die Neubildung kristalliner Strukturen. Größere Risse werden vorwiegend durch die Bildung von Calciumcarbonat gefüllt. Die Nachhydratation von unhydratisierten Bindemittelbestandteilen scheint vor allem bei Mikrorissen mit Weiten $< 10 \mu\text{m}$ als bedeutsam für die Abdichtung. Details zu Messergebnissen und Versuchsanordnungen werden anhand ausgewählter repräsentativer Dehnkörpervarianten ausführlich in [5], [6] und [7] beschrieben.

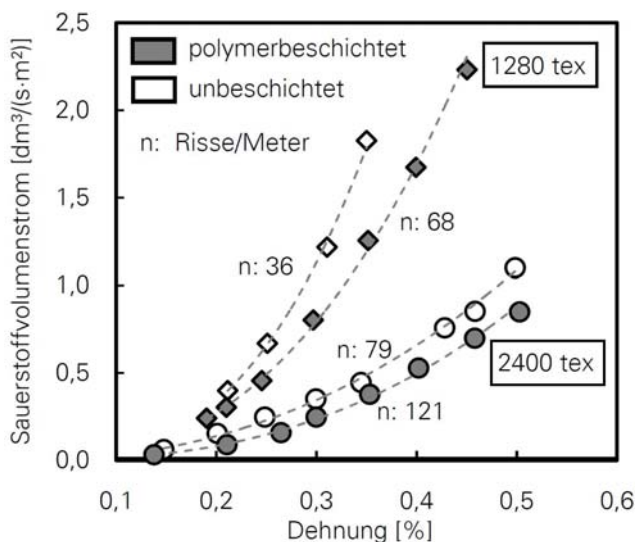


Bild 2: Einfluss der Dehnung auf den Sauerstoffvolumenstrom in TRC bei 3 kPa Druckdifferenz (gerissen)

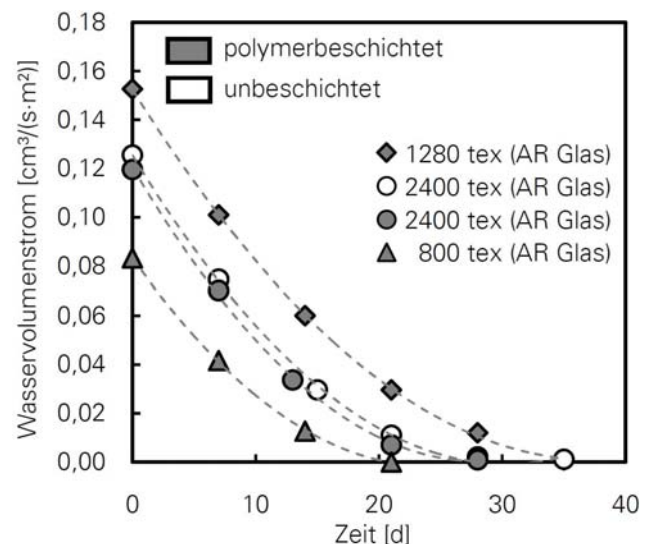


Bild 3: Zeitabhängige Reduzierung der Wassertransportraten durch TRC (gerissen)

Untersuchungen zu ausgewählten Expositionen

Das Verhalten gegenüber ausgewählten Expositionen erfolgte an TRC verstärkten stabstahlbewehrten Betonplatten mit 4lagigem Bewehrungsaufbau der TRC-Schicht (analog Dehnkörper). Die Platten wurden im 4-Punkt-Biegezugversuch durch eine gezielte Überdehnung vorgeschädigt, so dass sich nach dem Entlasten der Platten eine für Stahlbeton bzw. TRC-Verstärkung typische und dem Gebrauchszustand vergleichbare Rissöffnung auf der Zugseite einstellte.

Frost-Tausalz-Widerstand

Bei der Überprüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes nach dem CDF-Verfahren im Alter von 56 Tagen (TRC-Schicht) an gerissenen und ungerissenen Verbundprüfkörpern mit CEM I-Matrix und Carbontextil wurde der in Deutschland für herkömmlichen Beton geltende Grenzwert von 1500 g/m^2 nach 28 Frost-Tau-Zyklen etwas überschritten. Die ungerissenen Proben wiesen eine Abwitterung der Verstärkungsschicht im Mittel von 1678 g/m^2 auf, während die gerissenen Pro-

ben mit 1724 g/m² nur einen geringfügig höheren Verlust erlitten. Ablösungen oder Gefügelockerungen innerhalb der Verstärkungsschicht konnten nicht beobachtet werden. Zukünftige CIF-Untersuchungen sollen ergänzend Aufschluss über die innere Schädigung geben. Lösungsansätze zur Steigerung der Widerstandsfähigkeit gegenüber der hohen Beanspruchung des CDF-Verfahrens bestehen im Einsatz von LP-Bildern in der Matrix der Verstärkungsschicht. Ein Nachweis hierzu ist noch zu erbringen.

Karbonatisierung

Das Verhalten gegenüber Karbonatisierung wird maßgeblich durch die Bindemittelbasis bestimmt. Bei der Bestimmung der Karbonatisierungstiefe der im Normklima gelagerten Proben, erzielte im Vergleich die alkalireiche Matrix M7 aufgrund des höheren Kalziumhydroxid-Bildungspotentials den geringsten Fortschritt (Karbonatisierungskoeffizient 2,6 mm/√a). Der Karbonatisierungskoeffizient der puzzolanischen M1 Matrix hingegen wies einen Wert von 5,0 mm/√a auf. Die Zugabe von Kurzfasern kann auftragstechnologisch bedingt zu einem weniger dichten Gefüge führen und damit die Karbonatisierung gegenüber der faserfreien Matrix um bis zu 20 % erhöhen.

Feuchtetransport in Verbundproben

Die Feuchtebewegung mit hoher Ortsauflösung wurde im kapillaren Saugversuch an vorgeschädigten Normalbetonproben und mit TRC verstärkten Verbundproben qualitativ und quantitativ als Funktion der Zeit sowie mit Hilfe der Neutronenradiographie am PAUL-SCHERRER-INSTITUT verfolgt. Bild 4 zeigt exemplarisch die zeitliche Entwicklung der Feuchteprofile als Mittelwert über die Probenbreite von 100 mm. In der Verbundprobe besitzen die vorhandenen Risse im Normalbeton kaum Bedeutung für den Saugvorgang. Das Riss- und Porensystem der Matrix von der überdeckenden TRC-Schicht der Verbundprobe sind wesentlich feiner. Das kapillare Saugvermögen der großen Risse im Normalbeton kann nicht aktiviert werden, da nicht hinreichend Wasser durch die Verstärkungsschicht zur Verfügung gestellt wird. Im Normalbeton findet somit hauptsächlich eine Ausbreitung über das Porensystem statt. Insgesamt wird in der gerissenen Verbundprobe der kapillare Saugprozess bzw. Sättigungsvorgang durch die TRC-Schicht deutlich verzögert.

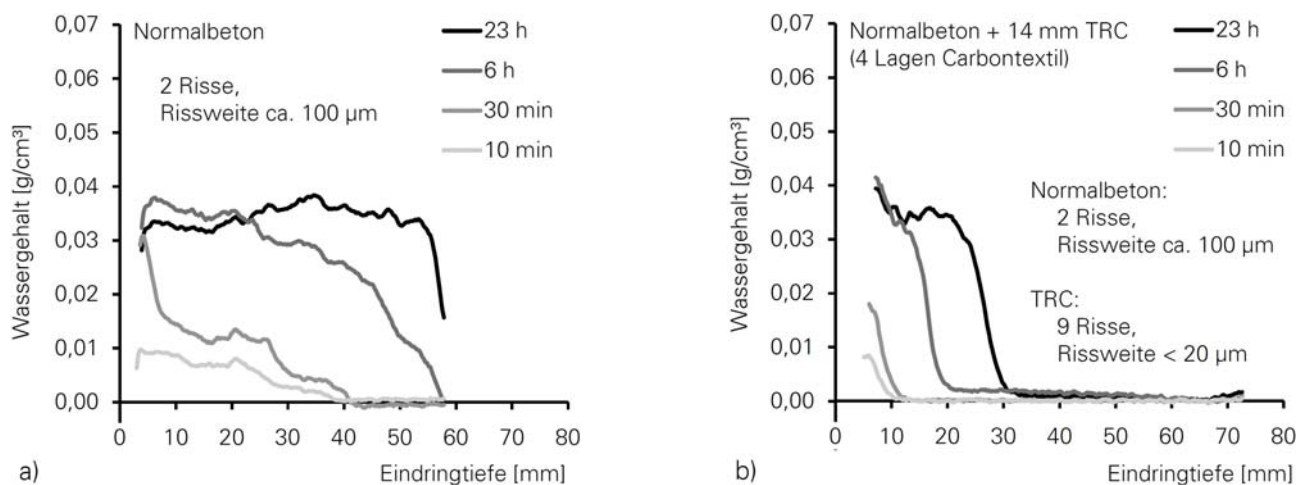


Bild 4: Feuchteprofile von einem gerissenen Prüfkörper aus a) Normalbeton und b) TRC verstärktem Normalbeton

Chlorid- und Sulfatpenetration

Nach einer Einlagerungsdauer von 180 Tagen in 3%iger NaCl-Lösung konnte an vorbelasteten Verbundproben (Normalbeton + 4 Lagen Carbontextil) im Diffusionsversuch in Anlehnung an DIN EN 13396 ab einer Tiefe von 8 mm im Normalbeton keine Erhöhung der Chloridkonzentration festgestellt werden. Auch die photometrische Bestimmung der wasser- und säurelöslichen Sulfatanteile nach 250 Tagen Einlagerungsdauer in einer Sulfatlösung (6.000 mg/l) ergab keine Veränderung der Sulfatkonzentration gegenüber dem Ausgangszustand.

Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Die Einstellung der Rissbreiten an entlasteten Proben gestaltete sich aufgrund der elastischen Rückverformung schwierig. Es war eine große Probenanzahl notwendig, um repräsentative Risszustände zu erreichen ohne unzulässige Gefügeschädigungen hervorzurufen. Die geplanten Kernspinresonanzmessungen zur Feuchteverteilung wurden nicht ausgeführt, da damit keine zufriedenstellende Ortsauflösung erzielt werden kann. Als erfolgreich erwies sich die Neutronenradiographie am PAUL-SCHERRER-INSTITUT, die hierfür in das Versuchsprogramm aufgenommen wurde.

Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Das TP A1 (Cherif) stellte Bewehrungsgarne bereit, mit denen die Experimente zur Einstellung und Charakterisierung des Rissbildes sowie zum Transportverhalten und Verhalten unter betriebsbedingten Expositionen durchgeführt wurden. Von dem TP A6 (Mechtcherine) wurden Rezepturempfehlungen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des Verbundes zur Matrix und der Dauerhaftigkeit der verwendeten textilen Bewehrungsstrukturen sowie unter Beachtung des Schwind- und Rissverhaltens und des Frostwiderstandes übernommen. Mit den TP B1 (Jesse), C1 (Curbach) und T6 (Curbach) wurden Probleme zum Verbundverhalten zwischen Altbeton und Verstärkungsschicht diskutiert und Hinweise zur Applikation der TRC-Schicht ausgearbeitet. Vom TP Y1 (Maas) wurde die Entwicklung eines Mess- und Auswerteverfahrens zur Charakterisierung des Rissbildungsverhaltens von Dehnkörpern sowie des Rissbildes mittels der digitalen Nahbereichsfotogrammetrie vorgenommen. Dies betraf vor allem die Erfassung von Ort und Zeit der Rissentstehung sowie die Rissbreitenbestimmung bei den Dehnkörperversuchen.

Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt gibt es außerhalb des SFB keine vergleichbaren Arbeiten zu Transportmechanismen von flüssigen und gasförmigen Medien durch ungerissene und gerissene textilbewehrte Betonschichten. DESMETTRE ET AL [2] entwickelten einen Versuchsaufbau zur Messung der Wasserpermeabilität an axial belasteten Stahlbetonproben. LEPECH ET AL [3] zeigen den Abfall des Wasserpermeabilitätskoeffizienten an vorgedehnten gerissenen hochduktilen Kurzfaserbetonen im Langzeitverhalten und weisen dabei ausgeprägte Selbstheilungseffekte nach. Einen Überblick über Testmethoden zur Untersuchung des Einflusses der mechanischen Belastung auf die Permeabilität von Betonen stellen HOSEINI ET AL[4] dar.

Sonstige Literatur

- [1] BUTLER, M., MECHTCHERINE, V., HEMPEL, S.: Durability of textile-reinforced concrete made with AR glass fibre - Effect of the matrix composition. *Materials and Structures* 43 (2010), pp. 1351-1368
- [2] DESMETTRE, C., CHARRON J.-P.: Novel water permeability device for reinforced concrete under load, *Materials and Structures* (2011), DOI 10.1617/s11527-011-9729-6
- [3] LEPECH, M.D., LI, V.C.: Water permeability of engineered cementitious composites, *Cement & Concrete Composites* 31 (2009), pp. 744–753
- [4] HOSEINI, M., BINDIGANAVILE, V., BANTHIA, N.: The effect of mechanical stress on permeability of concrete: A review, *Cement & Concrete Composites* 31 (2009), pp. 213–220

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

- a) Arbeiten, die in Publikationsorganen mit einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung zum Zeitpunkt der Antragstellung erschienen oder endgültig angenommen sind:
- [5] MECHTCHERINE, V., LIEBOLDT, M.: Permeation of water and gases through cracked textile reinforced concrete, *Cement Concrete Comp* (2011), doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.04.001.
 - [6] LIEBOLDT, M., MECHTCHERINE, V.: Transport of Liquids and Gases through Textile Reinforced Concrete. In: Proceedings of International *RILEM Conference on Material Science, volume I: Textile Reinforced Concrete (2nd ICTRC)*, W. Brameshuber (Ed.), RILEM Proceedings PRO 77, RILEM Publications S. A. R. L., Bagneux (France), pp. 343-351, 2010.
 - [7] LIEBOLDT, M., MECHTCHERINE, V.: Multiple cracking in textile reinforced Concrete and its effect on the transport of water and gases. In: Proceedings of the *Second International Symposium on Service Life Design for Infrastructure – SLD 2010*, 4-6 October 2010, Delft, The Netherlands, RILEM Publications S.A.R.L., pp.107-114, 2010.
 - [8] LIEBOLDT, M., BARHUM, R., MECHTCHERINE, V.: Effect of cracking on transport of water and gases in textile reinforced concrete. In: *Proceedings of 8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures – CONCREEP-8*, T. Tanabe et.al. (ed.), Taylor & Francis Group, London, pp. 199-205, 2008.
 - [9] BARHUM, R., LIEBOLDT, M., MECHTCHERINE, V.: Transport of water and gases in crack-free and cracked textile reinforced concrete. In: *Proceedings of International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II – ICCRRR 2008*; 24.-26. November Cape Town, South Africa, M. G. Alexander, H. Beushausen, F. Dehn, P. Moyo (ed.), Taylor & Francis Group, London, pp. 111-112, 2008.
 - [10] LIEBOLDT, M., MECHTCHERINE, V.: Medientransport durch Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton. *Textilbeton – Theorie und Praxis, Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung*. Dresden, 3. - 5. Juni 2009, TU Dresden, SFB 528, Hrsg. M. Curbach und F. Jesse, S.185-196, 2009.

D5

Mechtcherine

D5

Mechtcherine

D5

Mechtcherine

5.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM TEILPROJEKT D6

5.1.1 *Versagensmechanismen von textilbewehrtem Beton unter Hochtemperaturbeanspruchung*

5.1.2 *Projektleitung*

Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach (federführend)
Geburtsdatum: 28.09.1956
Dienstanschrift: Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Massivbau
Helmholtzstr. 10
01069 Dresden
Telefon: (03 51) 463-376 60
Telefax: (03 51) 463-372 89
E-Mail: Manfred.Curbach@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Chokri Cherif
Geburtsdatum: 24.05.1966
Dienstanschrift: Institut für Textil- und Bekleidungstechnik
Technische Universität Dresden
Helmholtzstrasse 10
01069 Dresden
Telefon: (03 51) 463-393 00
Fax: (03 51) 463-393 01
E-Mail: chokri.cherif@tu-dresden.de

5.2 ENTWICKLUNG DES TEILPROJEKTS

5.2.1 *Bericht*

Die Kenntnis über das Brandverhalten von Stahlbetonkonstruktionen mit einer Textilbetonverstärkung stellt eine wichtige Grundlage für deren ingenieurmäßige Bemessung dar. Da das Tragverhalten der verstärkten Konstruktionen vor allem auch vom Hochtemperaturverhalten des Textilbetons bestimmt wird, wurden umfangreiche Versuche zur experimentellen Ermittlung der mechanischen Kennwerte des Verbundwerkstoffes Textilbeton und der textilen Bewehrung unter Hochtemperaturbeanspruchung durchgeführt.

Im Fokus der Untersuchungen am **Institut für Textil- und Bekleidungstechnik** stehen die überwiegend für textile Betonbewehrungen eingesetzten Carbonfilamentgarne. Aufbauend auf den Stand der Technik zu deren bisherigen Einsatzbereichen unter Normalklima bis hin zu Temperaturen von maximal 200 °C bis 300 °C wurden in den Untersuchungen schwerpunktmäßig die Temperaturbereiche bis zu etwa 700 °C analysiert. Zu Beginn des Projektes existierten diesbezüglich noch keine hinreichend aussagekräftigen Daten, und es lagen bisher kaum Erkenntnisse über die thermische Barrierewirkung der polymeren Garnbeschichtung und deren Einfluss auf die Zugfestigkeit der Garne vor.

Um detaillierte Aussagen zur Temperaturabhängigkeit von Festigkeit und Elastizität der untersuchten Materialien ableiten zu können, wurde ein Versuchsstand konzipiert und technisch umgesetzt. Die Erwärmung des Garnes erfolgt dabei über eine Infrarot-Heizeinrichtung, die in eine Zugprüfmaschine Zwick Z 100 integriert wurde. Damit ist es erstmalig möglich, zugkraftbelastete Garne unter definierter Temperaturbeanspruchung zu untersuchen. Nähere Angaben zum Versuchsaufbau, den Randbedingungen, den eingesetzten Materialien und den Meßmethoden sind in [1] zu finden.

Neben den mechanischen Untersuchungen wurden die getesteten Carbon- und AR-Glasfaserrovings auch auf chemischer und physikalischer Ebene analysiert. Für die AR-Glasfilamentgarne wurde dabei deren Erweichungstemperatur bei ca. 600 °C bis 650 °C identifiziert, d.h. ab diesem Temperaturbereich ist keine nennenswerte Festigkeit des Garnes mehr vorhanden. Bei den Carbonfilamentgarnen wurden TGA-Analysen unter atmosphärischen Bedingungen (d.h. unter Luft-sauerstoff) durchgeführt. Diese zeigten deren beginnende temperaturabhängige Masseverluste ab etwa 400 °C bis 500 °C, bei Temperaturen von etwa 700 °C waren die Prüfkörper aufgrund der Oxidation nahezu vollständig zersetzt. Analoge Versuche unter Stickstoffatmosphäre hingegen zeigten deren Beständigkeit bis zu den maximalen Prüftemperaturen von 1000 °C. Sowohl die zugmechanischen als auch die chemisch-physikalischen Untersuchungen wurden unter verschiedenen Aufheizraten durchgeführt, mit denen die im Bauteil vorhandenen Temperaturprofile in Höhe der textilen Bewehrungslage entsprechend den an der Bauteiloberfläche einwirkenden thermischen Beanspruchungen nachgebildet wurden.

Bei den getesteten Carbonfilamentgarnen wurden unter Ausnutzung deren elektrischer Leitfähigkeit außerdem auch Untersuchungen durchgeführt, die Hochtemperaturbeanspruchung im Garn über eine Widerstandserwärmung zu realisieren. Dabei zeigte sich, daß ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der angelegten elektrischen Spannung und der Temperatur im Fadeninneren besteht. Die Einflüsse von Garnfeinheit und Fadenlänge wurden analysiert und entsprechend berücksichtigt.

Einen weiteren Schwerpunkt der Arbeiten bildeten die Untersuchungen verschiedener Beschichtungsmittel und deren Auswirkung auf die Hochtemperaturbeständigkeit der Probekörper. Neben der im SFB 528 eingesetzten Beschichtung eines carboxyliertes Styrol-Butadien-Copolymerisates in wässriger Dispersion (kurz: Styrolbutadien) wurden spezielle hochtemperaturbeschichtungen entwickelt und auf ihre Eignung analysiert. Dazu wurden die Carbonfilamentgarne mit neuartigen hochtemperaturbeständigen Polymeren beschichtet. In dieser Arbeit wurden „Tenax®-EHTS40 F13“ Carbonfilamentgarne als Substrate und „KiON® HTT 1800 (Polysilazan), Silikophen P80/MPA (Polysiloxan) und Silres K (Methyl Silikonharz)“ als Beschichtungsmittel verwendet. Für die Verdünnung der Polymere wurde Essigester benutzt, siehe [2], [3]. Die Beschichtungsformulierungen und Auflagemassenprozente sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Beschichtungsrezepturen und Auflage im Prozent

Rezept	Polymer Typ	Polymer Gew. %	Ester Gew. %	Auflage %
R1	KiON® HTT1800 (Polysilazan)	9	91	4,6 ± 0,3
R2	Silres K (Methylsilikonharz)	15	85	5,3 ± 0,5
R3	Silikophen P80/MPA (Polysiloxan)	10	90	8,8 ± 0,7

Die Einzelfadenbeschichtung wurde mittels Foulardverfahren, ohne Abquetschen, in der Labor-Beschichtungsanlage "Coatema Basecoater BC32" kontinuierlich appliziert. Die Durchlaufgeschwindigkeit betrug 0,5 m/min. Die Trocknung erfolgte bei einer Temperatur von 205 °C mit einer Verweilzeit von 2 min für alle drei Rezepturen. Nach der Beschichtung waren die Proben zum Nachweis der Leistungsfähigkeit charakterisiert.

In den Zugversuchen unter den verschiedenen Temperaturen liefern die gemessenen Versuchsergebnisse in Form von aufgebrachtener Zugkraft und zugehöriger Längenänderung die Spannungs-Dehnungs-Diagramme der getesteten Garne. Aus den so ermittelten Arbeitslinien ergeben sich die Zugfestigkeiten und die Dehnsteifigkeiten, d.h. E-Modul, unter den geprüften Temperaturen. Die abnehmenden Festigkeitseigenschaften spiegeln damit die Schädigung der Garne unter den jeweiligen Temperaturen im Vergleich zu den Referenzwerten bei 20 °C Normtemperatur wider [4].

Bei allen Versuchen wurde festgestellt, daß die Zugfestigkeiten und Dehnsteifigkeiten mit steigenden Temperaturen tendenziell abnehmen. Bei den unbeschichteten Carbonfilamentgarnen beginnt der Festigkeitsabfall allmählich ab Temperaturen von etwa 300 °C, der Versagensbereich liegt aufgrund der einsetzenden Oxidation bei 400 °C je nach Heizrate zwischen 450 °C und 600 °C. Die unbeschichteten AR-Glasfilamentgarne zeigen bis etwa 400 °C nahezu unveränderte Festigkeiten, oberhalb dieser Temperatur setzt eine rapide Schädigung ein, siehe [5]. Neben den Zugversuchen unter atmosphärischen Bedingungen wurden die Carbonfilamentgarne auch in inerte Atmosphäre (Stickstoff) geprüft. Dabei wurden deutlich größere Zugfestigkeiten bei höheren Temperaturen erreicht. Bei einer maximalen Prüftemperatur von 700 °C war nur ein geringer Festigkeitsverlust festzustellen, da der für die Oxidation benötigte Sauerstoff nicht vorhanden war. Im Falle der beschichteten Garne mit Styrolbutadien beginnt die Festigkeitsabnahme bei ca. 50 °C deutlich früher als bei den unbeschichteten Garnen, und zwar gleichermaßen bei Carbon- und AR-Glasfaserrovings [1]. Als Erklärung hierfür ist die mit einsetzender Zersetzung der Beschichtung (ab 200 °C) entstehende Oxidationswärme zu sehen, die zu einer zusätzlichen Schädigung der Prüfkörper und somit zu einem frühzeitigeren Versagen führt, siehe Bild 1. Die Zersetzung der Beschichtung im o.g. Temperaturbereich wurde auch anhand einer chemischen Analyse der erkennbar freiwerdenden Oxidationsgase verifiziert.



Bild 1: Verfärbung der beschichteten AR-Glasfilamentgarne infolge der steigenden Temperatur

Bessere Ergebnisse wurden mit den speziell entwickelten Hochtemperaturbeschichtungen nach Tab. 1 erzielt. Diese erhöhen nicht nur die Zugfestigkeit gegenüber den unbeschichteten Garnen, sondern zeigen auch ein deutlich verbessertes Hochtemperaturverhalten gegenüber den mit Styrolbutadien beschichteten Proben. Bei etwa 500 °C sind noch immer etwa 30 % bis 40 % der originalen Festigkeit bei 20 °C vorhanden. Die mit Polysiloxan und Methylsilikonharz beschichteten Proben zeigen ein besseres Verhalten als die allein mit Polysilazan beschichteten Proben bei höheren Temperaturen. Aufgrund der Verbesserung der Filament-Filament Reibung/Adhäsion durch die Beschichtung erhöht sich die Festigkeit des Filamentbündels. Nähere Informationen zu den Ergebnissen sind in [2] und [3] dargestellt.

Zu den Zugfestigkeitsprüfungen wurden an den neu entwickelten Beschichtungen auch Thermogravimetrische Analysen an den Carbonfilamentgarnen zum Masseverlust durchgeführt. Ab 300 °C beginnt allmählich die Oxidation der unbeschichteten Proben. Bei 700 °C beträgt der Masseverlust mehr als 15 %, die Tragfähigkeit des Garnes ist dabei nicht mehr gegeben. Bei den mit Polysilazan und Methylsilikonharz beschichteten Proben beginnt die Oxidation bei ca. 600 °C, jedoch ist der Masseverlust im Vergleich zur unbeschichteten Probe deutlich geringer.

Zur Applikation der Einzelfadenbeschichtung auf großflächige Gelegestrukturen wurden die entwickelten Beschichtungsrezepturen sowie die Prozessparameter wie Trocknungstemperatur, Trocknungszeit und Beschichtungsgehalt auf den Multiaxial-Nähwirkautomat MALIMO 1202 übertragen. Die großen Herausforderungen bestehen dabei darin, die erforderliche Gleichmäßigkeit des Beschichtungsauftrages über die gesamte Arbeitsbreite des Geleges sicher zu stellen und die Parameter Trocknungstemperatur und -zeit so zu optimieren, dass es nicht zum Schmelzen des polymeren Wirkfadens kommt. Durch eine geeignete Anlagenkonfiguration, bestehend aus der Beschichtungseinheit und dem Trocknungsmodul auf Basis von Infrarotstrahlern und die gelegespezifische Einstellung der Produktionsgeschwindigkeit ist es gelungen, beschichtete Gelegestrukturen in der geforderten hohen Qualität herzustellen. Die gefertigten Strukturen wurden zur Weiterverarbeitung in Textilbeton-Verbundbauteilen eingebaut und im Brandversuch erfolgreich auf ihre Eignung getestet.

Am **Institut für Massivbau** erfolgten experimentelle und numerische Untersuchungen zum Hochtemperaturverhalten von textilbewehrten Betonbauteilen.

An *Textilbeton verstärkten Stahlbetonplatten* mit Abmessungen von 180 × 60 × 10 cm³ wurden bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) Brandversuche durchgeführt (siehe Bild 2). Sie erfolgten im Vier-Punkt-Biegeversuch mit einseitiger Beflammung der verstärkten Zugzone nach der Einheitstemperaturkurve (ISO 834) und dienten der Ermittlung von Temperaturprofilen, Verformungen und Tragfähigkeiten. Dabei haben die verstärkten Stahlbetonplatten bei 65 % der Gebrauchslast der Brandbelastung mehr als 60 Minuten standgehalten. Bei 100 % Gebrauchslast kam es nach einer Branddauer von 55 Minuten und bei 130 % Gebrauchslast nach 30 Minuten zu einem Zugversagen der textilen Verstärkungsschicht. Bei während des Brandes unbelasteten bzw. gering belasteten Platten lagen die im Anschluss ermittelten Resttragfähigkeiten zwischen 65 % und 70 % der Bruchlast (30 Minuten Branddauer) bzw. bei 50 % der Bruchlast (60 Minuten Branddauer) (siehe Bild 3). Damit ist eine Klassifizierung der Textilbeton verstärkten Platten nach DIN EN 1992-1-2 in R60 gegeben und zeigt, dass mit einer Verstärkungsmaßnahme mittels Textilbeton eine deutliche Erhöhung der Traglast von Stahlbetonplatten möglich ist und dabei die ursprüngliche Feuerwiderstandsklassifizierung der unverstärkten Konstruktion erhalten bleibt [6], [7].

Des Weiteren geben die Brandversuche einen Aufschluss über die Temperaturfeldentwicklung in Textilbeton verstärkten Stahlbetonplatten. Es zeigte sich, dass die Verstärkungsschicht in ihrer Schutzwirkung für die Betonstahlbewehrung einer Betondeckung aus Normalbeton identischer Dicke gleichwertig ist. Es traten keine Abplatzungen auf. Die Temperaturen in der Verstärkungsschicht erreichten nach einer Branddauer von 40 Minuten etwa 400 °C und nach 60 Minuten etwa 600 °C, was einer Heizrate von 10 K/min entspricht [8], [9].

Um ein umfassendes Verständnis zur Interaktion zwischen der textilen Bewehrung und der Stahlbewehrung sowie der Versagensmechanismen während des Brandes zu gewinnen, erfolgten zusätzlich Dehnkörper- und Verbundversuche an Probekörpern aus Textilbeton im Hochtemperaturbereich.

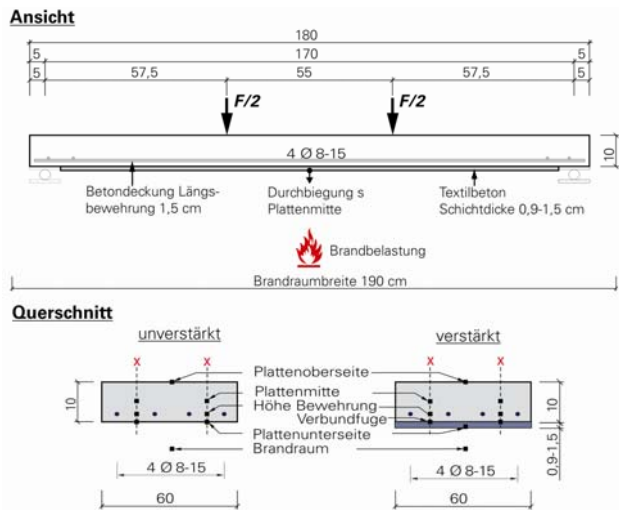


Bild 2: Statisches System und Messtechnik für die Brandversuche

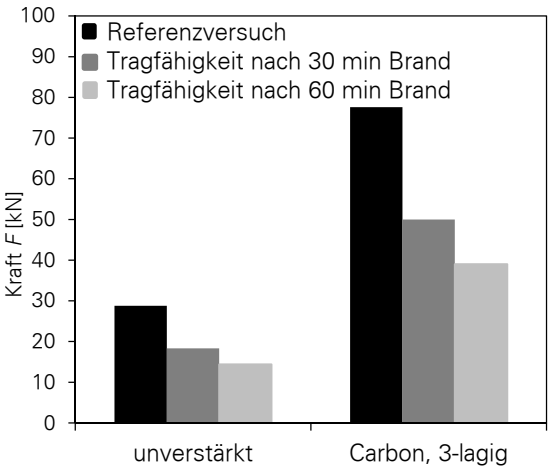


Bild 3: Gegenüberstellung Tragfähigkeit der Platten vor und nach der Brandbelastung

Dehnkörperversuche bei Probekörpertemperaturen bis 650 °C ergaben Spannungs-Dehnungs-Linien sowie Informationen über die verschiedenen temperaturabhängigen Verformungsanteile aus elastischer sowie plastischer Dehnung (spannungsabhängig), thermischer Dehnung und Kriechdehnung (spannungs- und zeitabhängig). Das Versuchsprogramm umfasste dafür stationäre und instationäre Zugversuche bei einer Heizrate von 2 K/min oder 10 K/min [10] und unter der Einheitstemperaturkurve nach ISO 834 [11]. Die textile Bewehrung aus Carbon wurde sowohl unbeschichtet als auch mit einer wässrigen, auf selbstvernetzenden, carboxylierten Styrol-Butadien-Copolymeren basierenden Dispersion beschichtet untersucht. Der Beschichtungsgehalt betrug dabei 7,5 Masseprozent oder 18 Masseprozent. Die Erwärmung erfolgte mittels Infrarotstrahler und die Verformungen wurden mittels Photogrammetrie gemessen. Der Versuchsstand ist in Bild 4 dargestellt.

Hinsichtlich des Zugtragverhaltens von Textilbeton konnte festgestellt werden, dass bis Temperaturen von 400 °C die Zersetzung der verwendeten Polymerbeschichtung ausschlaggebend ist. So zeigen unbeschichtete Carbontextilien in diesem Temperaturbereich nur geringfügige Abweichungen gegenüber Versuchen unter Normaltemperatur, wohingegen beschichtete Textilien an Tragfähigkeit verlieren. Dabei nimmt der Traglastverlust mit steigendem Beschichtungsgehalt zu. Die

Tragfähigkeit beschichteter Textilien liegt mit 400 °C geringfügig unterhalb der unbeschichteter, womit der durch die Beschichtung gewonnenen Traglastgewinn wieder verloren geht (siehe Bild 5). Ein Einfluss der Heizrate war in diesem Temperaturbereich nicht erkennbar.

Oberhalb von 400 °C bewirkt die einsetzende Oxidationsreaktion des Carbons mit steigender Temperatur einen zunehmenden Tragfähigkeitsverlust. Bei einer Temperatur von ca. 650 °C sinkt sie unter 25 % der Tragfähigkeit bei Normaltemperatur ab. Die Heizrate beeinflusst dabei die Brandwiderstandsdauer.

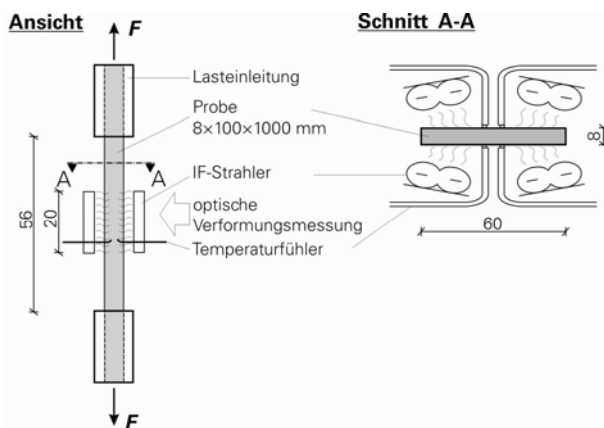


Bild 4: Statisches System und Messtechnik der Dehnkörperversuche

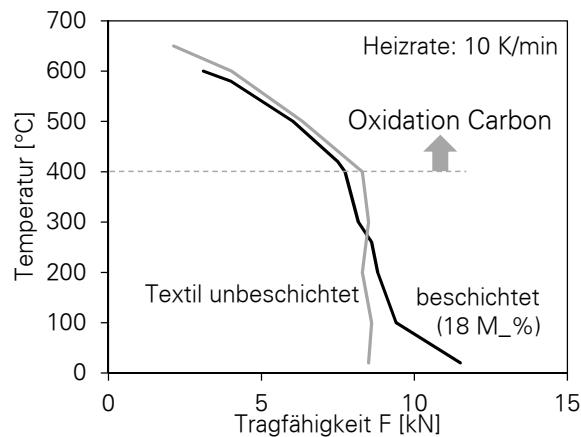


Bild 5: Tragfähigkeit der Dehnkörper unter Temperaturbelastung

Die Beschichtung für einen besseren Verbund zwischen Filament-Filament sowie Filament-Matrix und damit zur Steigerung der Tragfähigkeit und Verringerung von Übergreifungs- sowie Verankerungslängen verliert bereits ab Temperaturen von 50 °C deutlich an Wirkung. Dies zeigten Pull-Out-Tests unter Temperaturbelastung bis 500 °C unter Aufstellung von temperaturabhängigen Schubspannung-Schlupf-Beziehungen (siehe Bild 6 und 7).

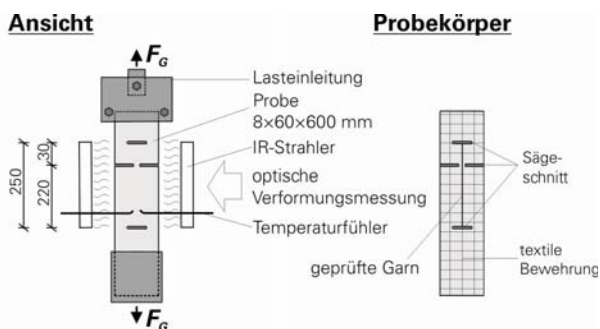


Bild 6: Statisches System und Messtechnik für die Pull-Out-Tests

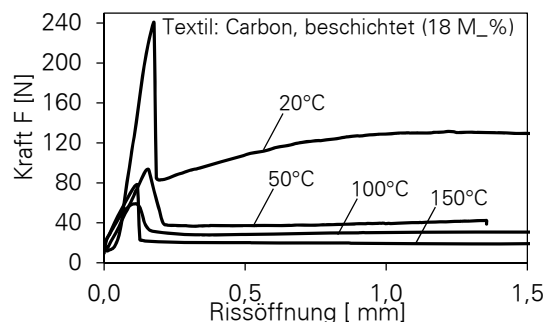


Bild 7: Kraft-Rissöffnung-Linien unter verschiedenen Temperaturen

Die experimentellen Untersuchungen lieferten somit Informationen über den Einfluss einer Temperaturbelastung auf das Trag- und Verformungsverhalten der textilen Verstärkungsschicht in Abhängigkeit von der Temperaturfeldentwicklung sowie der statischen Belastung [12]. Diese Messdaten ergeben, in Anlehnung an DIN EN 1992-1-2, temperaturabhängige Abminderungsfaktoren, welche für eine Heißbemessung von verstärkten Stahlbetonkonstruktionen mit Textilbeton verwendet werden können. Aufbauend auf die im SFB entwickelten Berechnungsverfahren für verstärkte Bauteile unter Biegebelastung [13] sollen die Modelle in der Dissertation von Dipl.-Ing. Daniel Ehlig (Institut für Massivbau) für Brandbeanspruchung erweitert werden.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Rezensierte Veröffentlichungen und Buchveröffentlichungen

- [1] YOUNES, A.; SEIDEL, A.; ENGLER, TH.; CHERIF, CH.: Materialverhalten von AR-Glas- und Carbon-filamentgarnen unter Dauerlast- sowie unter Hochtemperatureinwirkung. In: CURBACH, M. (Hrsg.); JESSE, F. (Hrsg.): *Textilbeton Theorie und Praxis: Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung*, Dresden, 3.-5. Juni 2009. SFB 528, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden : Eigenverlag, 2009, S. 1-16 (<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-ds-1242131966147-30706>)
- [2] SHAYED, M. A.; CHERIF, CH.; HUND, R.; D. CHENG, T.; OSTEROD, F.: Carbon and glass fibers modified by polysilazane based thermal resistant coating. *Textile Research Journal* 80 (2010)11, DOI: 10.1177/0040517509357648, pp. 1118-1128
- [3] YOUNES, A.; ENGLER, TH.; SEIDEL, A.; ABU SHAYED, M.; HUND, R.; CHERIF, CH.: Hochtemperaturverhalten von Glas- und Carbonfilamentgarnen für den Einsatz als Textilbewehrungsstrukturen in Betonbauteilen. In: *48. Chemiefasertagung Dornbirn*, Dornbirn, Österreich, 16.-18. September 2009. CD-ROM
- [4] YOUNES, A.; SEIDEL, A.; ENGLER, TH.; CHERIF, C.: Effects of high temperature and long term stress on the material behavior of high performance fibers for composites. In: *World Journal of Engineering* 7(4) (2010), S. 309-315
- [5] YOUNES, A.; HUFNAGL, E.; ENGLER, TH.; SEIDEL, A.; CHERIF, CH.: High temperature and long term behaviour of glass and carbon filament yarns for composite applications. In: *Proceedings of the 17th Annual International Conference on Composites / Nano Engineering (ICCE 17)*, Hawaii, USA, July 26-31, 2009
- [6] HOTHAN, S.; EHLIG, D.: Hochtemperaturverhalten von Stahlbetonplatten mit Textilbetonverstärkung. In: CURBACH, M. (Hrsg.): *Textile Reinforced Structures: Proceedings of the 6th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS6) und zur 4. Anwendertagung*, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, 19.-20.9.2011
- [7] EHLIG, D.; HOTHAN, S.: RC Slabs Strengthened with Textile Reinforced Concrete Subjected to Fire. *2nd International RILEM Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure*, Delft, Netherland, October 5-7, 2011
- [8] EHLIG, D.; JESSE, F.; CURBACH, M.: Textilbeton verstärkte Platten unter Brandbelastung. *Beton- und Stahlbetonbau* 105 (2010) 2, S. 102-110 – doi:10.1002/best.200900069
- [9] EHLIG, D.; JESSE, F.; CURBACH, M.: RC slabs with Textile Reinforced Concrete (TRC) Strengthening under Fire Loading. *3rd International fib Congress*, Washington, D.C., May 29 – June 2, 2010. Paper 307 – DVD-Rom
- [10] EHLIG, D.; JESSE, F.; CURBACH, M.: High Temperatures Tests on Textile Reinforced Concrete (TRC) Strain Specimens. In: BRAMESHUBER, W. (ed.): *2nd International Conference on Textile Reinforced Concrete (ICTRC2010), Proceedings of the International RILEM Conference on Material Science (MatSci)*. RWTH Aachen. 6.-10.09.2010, RILEM Publications S.A.R.L., Vol. 1, pp. 141-151

[11] EHLIG, D.; JESSE, F.; CURBACH, M.: Textile Reinforced Concrete (TRC) Strain Specimens under High Temperatures. In: ALDEA, C.-M. (Hrsg.): *Proceedings of the ACI 2010 Spring Convention*, Chicago, 21.-25.03.2010., 2010

[12] EHLIG, D.: Textilbeton verstärkte Platten unter Brandbelastung. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 51. Forschungskolloquium des DAfStb*. Kaiserslautern, 2010

b) Andere Veröffentlichungen

[13] SCHLADITZ F.; FRENZEL, M.; EHLIG D.: Bending load capacity of reinforced concrete slabs with textile reinforced concrete. *Journal of Engineering Structures* – zur Veröffentlichung angenommen

c) Patente

Keine

D6

Curbach / Cherif

D6

Curbach / Cherif

5.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM TEILPROJEKT E3

5.1.1 *Beurteilung des Sicherheitsniveaus textilverstärkter Bauwerke und sicherheitszielorientierte Bemessung*

5.1.2 *Projektleitung*

Dr.-Ing. Jan-Uwe Sickert

Geburtsdatum: 21.02.1972

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden

Fakultät Bauingenieurwesen

Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke

Helmholtzstraße 10

01069 Dresden

Telefon: (0351) 463-332 34

Email: jan-uwe.sickert@tu-dresden.de

5.2 ENTWICKLUNG DES TEILPROJEKTS

5.2.1 *Bericht*

Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Die Bemessung textildbewehrter Verstärkungsschichten kann vorteilhaft mit numerischen Methoden so erfolgen, dass ein vorgegebenes Sicherheitsniveau während der geplanten Restnutzungsdauer eingehalten wird. Für diese Aufgabe ist das zeitabhängige Sicherheitsniveau mit unscharfen Maßen (Sicherheitsmaßen) zu quantifizieren. Voraussetzung sind die Erfassung der Datenunschärfe bei der Beschreibung des sich verändernden Zustands und adäquate Modelle zur Beschreibung des Tragverhaltens. Das unscharfe Tragverhalten der Verstärkungsschichten ist ebenfalls zu erfassen. Infolge des begrenzten Umfangs der Datenbasis liegt neben der materialinhärenten Variabilität (aleatorische Unschärfe) ein Informationsdefizit (epistemische Unschärfe) vor. Die vorliegende Datenbasis bildet 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). Die mathematischen Modelle erlauben Variabilität und Informationsdefizit zu erfassen und separat auf Strukturantworten abzubilden. Das vorhandene Informationsdefizit ist damit im Ergebnis sichtbar.

Für die Bewertung der zeitabhängigen Tragwerkssicherheit auf der Basis unscharfer Wahrscheinlichkeiten wurden in den ersten drei Förderperioden grundlegende Algorithmen entwickelt. Im Ergebnis wird das zeitabhängige Sicherheitsniveau mit dem Fuzzy-Sicherheitsindex und der Fuzzy-Versagenswahrscheinlichkeit bewertet. Kern der Berechnungsalgorithmen ist die Fuzzy-

stochastische Finite-Elemente-Methode (FSFEM). Da die erforderlichen Berechnungen numerisch sehr aufwendig sind, sollten in der 4. Förderperiode Methoden zur Effizienzsteigerung entwickelt werden.

Seit der 3. Förderperiode wurden numerische Methoden zur sicherheitszielorientierte Bemessung mit direkter Lösung des inversen Problems entwickelt. Für diese Aufgabe wurden Clustermethoden eingesetzt, mit denen sogenannte Entwurfsteilräume spezifiziert werden. Als Entwurfsziel wurden Sicherheitsmaße verwendet. In der 4. Förderperiode war die Methodik auf alternative Entwurfsziele z.B. (Rest-)Lebensdauer und Robustheit zu erweitern sowie Fuzzy-Clustermethoden einzusetzen.

In der 3. Förderperiode wurden Methoden zur Bewertung der Robustheit des Sicherheitsniveaus entwickelt. Das entwickelte Robustheitsmaß basiert auf der Erweiterung der SHANNONSchen Entropie für Fuzzy-Größen. Auf dieser Grundlage sollte in der 4. Förderperiode ein verallgemeinertes Robustheitsmaß entwickelt werden. Dazu war es notwendig, Unschärfemaße für Fuzzy- und Fuzzy-Zufallsgrößen zu entwickeln.

Neben der direkten Lösung der Entwurfsaufgabe bietet die Fuzzy-Optimierung der textilen Verstärkung die Möglichkeit auch bei Datenunschärfe gezielt nach effizienten Entwürfen zu suchen. Die Methoden zur Fuzzy-Optimierung sollten in der 4. Förderperiode fortentwickelt werden.

Weitere Hauptpunkte waren die Erweiterung der unscharfen Datenbasis und die Sicherheitsbeurteilung unter besonderer Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit.

Ergebnisse sowie angewandte und neu entwickelte Methoden

Die Darstellung der Ergebnisse konzentriert sich auf die Förderperiode II/2008-I/2011. Die Ergebnisse wurden in zahlreichen Veröffentlichungen dokumentiert – die Literaturliste im Abschnitt 1.2.2 enthält die wesentlichen Beiträge. Weitere Beiträge zu nationalen und internationalen Konferenzen dienten der breiten Diskussion der neu entwickelten Methoden zur Sicherheitsbeurteilung mit Fuzzy-Zufallsgrößen, zur Fuzzy-Optimierung und zur Robustheitsbewertung. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Akzeptanz für die Anwendung generalisierter Unschärfemodelle zur Beschreibung von Variabilität und Informationsdefizit (aleatorische und epistemische Unschärfe) stark gestiegen ist.

Die Sicherheitsbeurteilung textilverstärkter Stahlbeton-Tragwerke mit einer Vorgeschichte ist stets eine Einzelfallbeurteilung. Zur Lösung dieser Aufgabe wurden bis zur 3. Förderperiode Algorithmen und Methoden entwickelt. Im Ergebnis wird die Sicherheit mit der zeitabhängigen Fuzzy-Versagenswahrscheinlichkeit bewertet. Kern der Methoden sind numerische Analysen mit unscharfen Daten. Für diese Analysen wurden modellbasierte, modellfreie und hybride Vorgehen entwickelt, siehe [3]. Das modellbasierte Vorgehen beinhaltet die Fuzzy-Stochastische Finite-Elemente-Methode (FSFEM), die in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt D2 entwickelt wurde. Das modellfreie Vorgehen wurde zusammen mit dem Teilprojekt E4 entwickelt. Es eignet sich insbesondere für Aufgaben, bei denen die vorhandenen Informationen nicht für eine zuverlässige

Spezifikation zutreffender Modelle ausreichen. Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches trifft dies insbesondere für die Langzeiteigenschaften von Textilbeton zu. Das Langzeitverhalten wird deshalb modellfrei mit rekurrenten neuronalen Netzen beschrieben.

Das Zusammenführen der modellbasierten und modellfreien Methoden resultiert in hybriden Algorithmen. Insbesondere der Einsatz künstlicher neuronaler Netze zur Beschreibung der Antwortflächen als Ersatz für das FE-Modell hat entscheidend zur Effizienzsteigerung der fuzzy-stochastischen Sicherheitsbeurteilung beigetragen, siehe z.B. [3], [4]. Neben der globalen Approximation der Antwortfläche wurden „maßgeschneiderte“ Lösungen zur lokalen Approximation entwickelt. Mit der lokalen Approximation in der Umgebung des Bemessungspunktes (wahrscheinlichster Versagenspunkt) können wirklichkeitsnahe Aussagen zur Sicherheit gemacht werden. Die Anwendbarkeit der Methoden auf baupraktische Aufgaben wurde anhand der Beurteilung des Tonnendachs des neuen Finanzamtes Zwickau gezeigt.

Zur Erfassung der Dauerhaftigkeit von (Textil-)Beton in der zeitabhängigen Sicherheitsbeurteilung wurde ein hybrides Vorgehen entwickelt, bei dem rekurrente neuronale Netze als Materialmodell innerhalb der FSFEM eingesetzt werden. In Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt E4 wurde ein Analysealgorithmus für das Training und die Prognose bei unscharfen Daten entwickelt.

Die Beurteilung und Bewertung der Langzeiteigenschaften von Tragwerken erfordert ein Monitoring. Für das Monitoring stehen experimentelle und numerische Methoden zur Verfügung. Insbesondere das numerische Monitoring erlaubt neben der Beurteilung des aktuellen Zustandes von Tragwerken auch eine Prognose des zukünftigen Verhaltens [6], [8]. Zur Bewertung werden unscharfe Schädigungsindikatoren und die zeitabhängige Fuzzy-Versagenswahrscheinlichkeit genutzt. Im Ergebnis können quantitative Aussagen zur (Rest-)Lebensdauer gemacht werden.

Der Entwurf von textilbewehrten Verstärkungsschichten wird meist von mehreren (teilweise konträren) Entwurfszielen, wie z.B. Sicherheit, Robustheit, Restlebensdauer und Kosten, geleitet. Diese Entwurfsziele werden als Zielfunktionen formuliert, die von variierbaren Entwurfsvariablen abhängen. Für den Textilbeton wurden die Entwurfsvariablen spezifiziert, die bei der Sicherheitsbeurteilung mit modellbasierten Algorithmen berücksichtigt werden können, siehe [5].

Die Betrachtung der zeitabhängigen Sicherheit textilverstärkter Tragwerke führt auf die sicherheitszielorientierte Bemessung. Zur Lösung der sicherheitszielorientierten Bemessung wurden effiziente numerische Strategien entwickelt und angewendet. Für diskrete Entwurfsaufgaben, wie z.B. die Bestimmung der Anzahl textiler Lagen, eignet sich die Variantenuntersuchung. Alle möglichen Varianten werden systematisch untersucht und das erhaltene Sicherheitsmaß verglichen. Bei mehreren diskreten und bei kontinuierlichen Entwurfsvariablen kann die Bemessungsaufgabe mit einer gezielten Maximierung der Sicherheit gelöst werden. Für Textilbeton-Verstärkungen wurden Entwurfsstrategien auf der Basis von Optimierungsverfahren entwickelt, die eine Berücksichtigung von Fuzzy-Zufallsgrößen erlauben. Insbesondere wurde darauf geachtet, dass die Unschärfe der Entwurfsvariablen berücksichtigt werden kann. Sowohl die Zielfunktion als auch die Nebenbedingungen können als unscharfe Funktionen formuliert werden.

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 Clusteranalyse wird verwendet um zulässige Entwurfsteilräume in Abhängigkeit von den Entwurfsvariablen zu detektieren. Dabei wird von Punkten (Entwürfen) ausgegangen, für die das Sicherheitsniveau bekannt ist. Die Zuordnung der Punkte zu den Entwurfsteilräumen ist unscharf. In der 4. Förderperiode wurden deshalb Fuzzy-Clustermethoden implementiert. Die Algorithmen und Anwendungsbeispiele sind z.B. in [1] und [2] enthalten.

Alternativ kann eine robustheitsbasierte Bemessung durchgeführt werden [1], [2]. Für die Bewertung der Robustheit fehlen jedoch etablierte Quantifizierungsmethoden, wie sie für die Zuverlässigkeit verfügbar sind. Meist werden lediglich qualitativ Konstruktionsregeln angegeben. Für die Entwicklung robustheitsbasierter Entwurfsmethoden wurde deshalb ein weitgehend verallgemeinertes Robustheitsmaß entwickelt. Das Maß widerspiegelt das Ziel, dass eine robuste Struktur auf alle möglichen Einwirkungen moderat reagieren sollte. Je mehr unterschiedliche Einwirkungen berücksichtigt werden, desto aussagekräftiger ist das erhaltene Ergebnis. Eine weitere Anforderung, die das entwickelte Robustheitsmaß erfüllt, ist dessen Unabhängigkeit vom Unschärfemodell der Eingangsdaten. Das Vorgehen der Robustheitsbewertung wurde u.a. in [3] und [7] veröffentlicht. es wurde beispielartig für den Entwurf einer Textilbeton-Verstärkung angewendet. In einer Variantenuntersuchung wurden die optimale Anordnung der Textilien unter Maximierung der Robustheit ermittelt.

Zur Gewährleistung der Unabhängigkeit des Robustheitsmaßes vom Unschärfemodell der Daten wurden unscharfe Maße für Fuzzy-Größen und Fuzzy-Zufallsgrößen entwickelt. Für Zufallsgrößen wird die SHANNONSche Entropie eingesetzt. Für Fuzzy-Größen wurden Unschärfemaße gewählt, die die Fläche oder die Varianz der Zugehörigkeitsfunktion bewerten. Diese Maße können durch die Anwendung der Scharparameterdarstellung auch für Fuzzy-Zufallsgrößen angewendet werden. Neben der Bewertung der Unschärfe ist der Abstand der Tragwerksantwort vom Grenzzustand maßgebend. Für die Bestimmung des Abstandes einer Fuzzy-Größe oder einer Zufallsgröße wurden brauchbare Maße definiert.

Der Aufwand der numerischen Entwurfsmethoden hängt maßgeblich von der Anzahl der unscharfen Eingangsgrößen ab. Mit einer gezielten Konzentration auf die maßgebenden Größen kann die Effizienz entscheidend gesteigert werden. Die Auswahl der maßgebenden Größen erfolgt i.d.R. mit Sensitivitätsanalysen [5]. Für diese Aufgabe wurden varianz- und netzbasierte Methoden entwickelt. Bekannten varianzbasierten Methoden zur Detektion linearer Abhängigkeiten wurden mit dem SOBOL-Index für Nichtlinearitäten erweitert. Der numerische Aufwand wurde durch den Einsatz neuronaler Netze begrenzt. Bei den netzbasierten Verfahren werden direkt Informationen aus einem künstlichen neuronalen Netz gewonnen, mit dem eine Tragwerksantwort approximiert wird. Beispielsweise bieten die Gewichte der Neuronen Informationen zur Sensitivität der Eingangsgrößen. Neben der globalen Sensitivität, bei der eine gemittelte Aussage resultiert, kann die

Aussagekraft der Ergebnisse durch lokale Sensitivitätsmaße verstärkt werden. Insbesondere mit einer lokalen Betrachtung in der Umgebung des Bemessungspunktes können Fehlentscheidungen bei der Auswahl der Eingangsgrößen vermieden werden.

Für die zutreffende Bewertung der Sicherheit textilverstärkter Stahlbeton-Tragwerke ist eine kontinuierliche Anpassung der unscharfen Datenbasis erforderlich. Das heißt, das Tragverhalten neuer oder modifizierter Materialien muss experimentell untersucht und mit unscharfen Größen quantifiziert werden. Dazu wurden insbesondere die Ergebnisse ein- und zweiachsender Zugversuche (Teilprojekt B1) bewertet. Die resultierenden unscharfen Größen (Zugfestigkeit, tension stiffening, Bruchlast) sind die Grundlage für die Materialmodelle für Textilbeton im MRM (Teilprojekt D2).

Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Wegen der geringen Anzahl praktischer Anwendungen von Textilbetonverstärkungen mussten zum Testen der Methoden und Algorithmen teilweise akademische Beispiele verwendet werden. Bei den Anwendungsbeispielen Schale Schweinfurt, Schale Zwickau, Kaufhausdecken wurde aktiv mitgewirkt.

Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Aus den Teilprojekten A1 und B1 wurden Daten zu unscharfen Eingangsvariablen bereitgestellt, die bei der Sicherheitsbeurteilung benötigt werden.

Die Ergebnisse der unscharfen Datenanalyse wurden dem Teilprojekt D2 übergeben und in das Multi-Referenzebenen-Modell implementiert. Mit der Modellierung der unscharfen Eingangsgrößen wurde die numerische Analyse (Nachrechnung) der Großversuche unterstützt. Die Methoden der Fuzzy- und fuzzy-stochastischen Analyse wurden dem Teilprojekt E4 zur Verfügung gestellt.

Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Die Akzeptanz für die Anwendung generalisierter Unschärfemodelle im Entwurfsprozess ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Parallel nahm die Zahl der Veröffentlichungen zu zuverlässigkeitsbasierten und robustheitsbasierten Entwurfsmethoden stark zu. Vergleichbare Arbeiten für die Kombination derartiger Entwurfsmethoden mit generalisierten Unschärfemodellen, wie im TP E3 entwickelt, sind nicht bekannt. Für die Robustheit von Tragwerken werden meist nur qualitative Aussagen getroffen. Bekannte Robustheitsmaße berücksichtigen lediglich die Streuungen oder das Versagensrisiko und basieren auf stochastischen Modellen.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Rezensierte Veröffentlichungen und Buchveröffentlichungen

- [1] 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

- [2] MÖLLER, B.; LIEBSCHER, M.; PANNIER, S.; GRAF, W.; SICKERT J.-U.: An inverse solution of the lifetime-oriented design problem. In: *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance 7* (2011), pp. 325–340
- [3] SICKERT, J.-U.; FREITAG, S.; GRAF, W.: Prediction of uncertain structural behaviour and robust design. *International Journal for Reliability and Safety* 5 (2011), pp. 358–377
- [4] 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
- [5] SICKERT, J.-U.; PANNIER, S.; GRAF, W.; KALISKE, M.: Efficient Numerical Reliability Based Design of TRC Strengthening Layers for Complex Structures. In: BRAMESHUBER, W. (ed.): *Proceedings of the International RILEM Conference on Material Science (MatSci) – Volume I, 2nd International Conference of Textile Reinforced Concrete (ICTRC)*. RWTH Aachen, Bagnex : RILEM Publications S.A.R.L., 2010, pp. 307–318
- [6] GRAF, W.; JENKEL, C.; PANNIER, S.; SICKERT, J.-U.; STEINIGEN, F.: Numerical structural monitoring with the uncertainty model fuzzy randomness. *International Journal of Reliability and Safety* 3 (2009) 1/2/3, pp. 218–234
- [7] SICKERT, J.-U.; PANNIER, S.; GRAF, W.; JENKEL, C.: Robustness assessment of structures incorporating generalized uncertainty models. IN: FURUTA, H.; FRANGOPOL, D.M.; SHINOZUKA, M. (eds.): *Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems, Proceedings of the 10th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR2009)*. London : Taylor & Francis, p. 111, Volltext (8 S.), CD-ROM
- b) Andere Veröffentlichungen
- [8] JENKEL, C.; GRAF, W.; PANNIER, S.; SICKERT, J.-U.: Structural health monitoring under consideration of uncertain data. In: *7. LS-DYNA Forum 2008, Bamberg*. Kap. F-I, pp. 1–10

- c) Patente
keine

E3

Sickert

5.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM TEILPROJEKT E4

5.1.1 Numerische Langzeitprognose von Veränderungen an textilverstärkten Konstruktionen

5.1.2 Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske

Geburtsdatum: 22.07.1960

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke
Helmholtzstraße 10
01069 Dresden

Telefon: (0351) 463-343 86

Email: michael.kaliske@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf

Geburtsdatum: 12.03.1953

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke
Helmholtzstraße 10
01069 Dresden

Telefon: (0351) 463-341 72

Email: wolfgang.graf@tu-dresden.de

5.2 ENTWICKLUNG DES TEILPROJEKTS

5.2.1 Bericht

Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

Im Teilprojekt E4 werden seit der 3. Förderperiode (07 / 2005) numerische Verfahren zur Langzeitprognose der Werkstoffeigenschaften textilverstärkter Konstruktionen entwickelt. Die Prognosealgorithmen zur Verarbeitung von Messreihen mit Echtzeitdaten und zeitgerafften Daten basieren auf neuronalen Netzen und auf zeitraffenden Verfahren. Die Ziele der 4. Förderperiode wurden aus dem Gesamtziel des Teilprojekts E4 und den bereits in der vorangegangenen Förderperiode erreichten Ergebnissen abgeleitet. Gesamtziel ist die numerische Langzeitprognose von Veränderungen textilverstärkter Konstruktionen unter Berücksichtigung der Datenunschärfe.

Nur in Einzelfällen können zeitabhängige Veränderungen während der gesamten Nutzungsdauer einer textilverstärkten Konstruktion experimentell verfolgt werden. Im SFB 528 liegen experimen-

telle Daten zu zeitabhängigen Veränderungen vor, die nur über sehr kurze Zeiträume im Vergleich zur angestrebten Nutzungsdauer beobachtet wurden. Die vorliegenden Daten sind unscharf und teilweise unter zeitraffenden Bedingungen ermittelt worden.

Für die Prognose der Werkstoffeigenschaften textilbewehrter Betonkonstruktionen auf der Basis von Messreihen mit Echtzeitdaten wurden in der 3. Förderperiode Verfahren mit künstlichen neuronalen Netzen entwickelt. Dazu wurden neuronale Netze mit *feed-forward* Architektur verwendet (*focused time lagged feed-forward perceptrons*). Diese Netze bestehen aus mehreren Schichten (Eingabeschicht, mehrere verdeckte Schichten und Ausgabeschicht). In den Neuronen des Netzes werden Signale berechnet, die über synaptische Verbindungen an nachfolgende Neuronen weitergeleitet werden. Eingangssignale sind vorangegangene Messwerte einer Zeitreihe. Aus diesen Messwerten wird der folgende Wert der Zeitreihe berechnet (rekursive Mehrschrittprognose).

Zur Prognose der Werkstoffeigenschaften textilbewehrter Konstruktionen auf der Basis von Messreihen mit zeitgerafften Daten (unter beschleunigenden, künstlichen Versuchsbedingungen gewonnen) wurden in der 3. Förderperiode zeitraffende stochastische Verfahren entwickelt. Zur Wahrung der Allgemeingültigkeit wurde eine nichtparametrische Formulierung der Beschleunigungsfunktionen auf der Basis neuronaler Netze entwickelt, die das gesamte Spektrum der Sonderfälle umfasst und wesentlich leistungsfähiger ist als parametrische und semi-parametrische Modelle. Diese Formulierung kann direkt auf die Versuchsergebnisse angewandt werden, ohne dass eine (künstliche) Modellwahl zur Funktionsbeschreibung (z.B. Funktionsansatz) und eine damit verbundene Gültigkeitseinschränkung erforderlich wird. Ausgangspunkt ist die empirische Verteilungsfunktion eines Merkmals, die aus den Versuchsdaten aufgestellt wird.

Zur Anwendung der rekursiven Mehrschrittprognose und der zeitraffenden Verfahren bestehen keine Einschränkungen hinsichtlich der Art der Messgrößen (Geometrie, Festigkeit usw.) und hinsichtlich der Ursache für deren zeitliche Veränderung (z.B. mechanische oder chemische Einwirkungen). Wegen des gewählten modellfreien Ansatzes ist die Anwendbarkeit nicht eingeschränkt.

Ergebnisse sowie angewandte und neu entwickelte Methoden

Die hier dargestellten Ergebnisse orientieren sich am Finanzierungsantrag für die Periode 2008/2 - 2011/1. In den ausgewählten zitierten Veröffentlichungen sind die wesentlichen Ergebnisse dokumentiert. Neben den aufgeführten Veröffentlichungen ist insbesondere die Mitherausgabe (Beck, J. L.; Graf, W.; Katafygiotis, L.) eines *special issue* zum Thema *Computational Intelligence in Structural Engineering and Mechanics* in der Fachzeitschrift *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* zu erwähnen (Ausgabe 5, 2010). Die Ergebnisse des Teilprojekts wurden auch auf zahlreichen nationalen und internationalen Tagungen präsentiert und diskutiert.

In der 3. Förderperiode wurden numerische Prognosealgorithmen entwickelt, die eine Prädiktion der Veränderungen an textilverstärkten Konstruktionen unter zeitkonstanten Einwirkungen ermöglichen. Diese Algorithmen wurden in der 4. Förderperiode auf die Erfassung von Lastumlagerungen zwischen den Komponenten textilverstärkter Konstruktionen unter zeitkonstanter und unter zeitveränderlicher Belastung erweitert. Zur Prognose von Strukturantworten unter quasi-statisch

wirkender Belastung wurden Algorithmen neuronaler Netze weiterentwickelt. Diese Netze wurden erstmals zur Verarbeitung unscharfer Eingangs- und Ergebnisgrößen aufbereitet. Mit unscharfen Daten trainierte neuronale Netze ermöglichen die Reproduktion der Unschärfe und eine unscharfe Prognose der Strukturantworten.

Kern der letzten Förderperiode war die Entwicklung rekurrenter neuronaler Netze für zeitveränderliche Fuzzy-Größen, siehe Bild 1. Diese Netze basieren auf einer in [12] beschriebenen Netzarchitektur und bestehen aus einer Eingabeschicht, mehreren verdeckten Schichten und einer Ausgabeschicht.

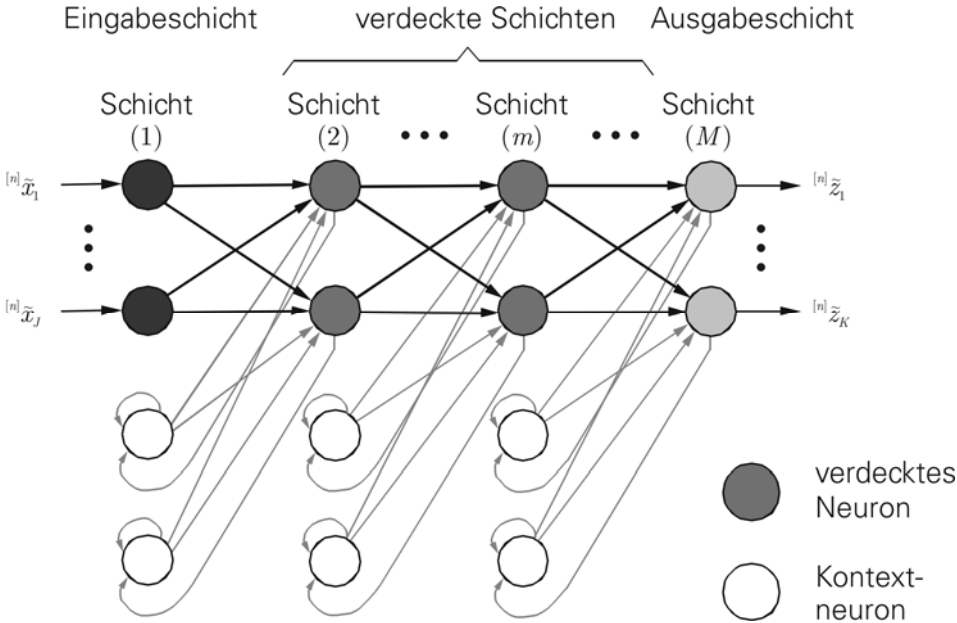


Bild 1: Rekurrentes neuronales Netz für Fuzzy-Größen

Unschärfe zeitveränderliche Tragwerkparameter werden als Fuzzy-Prozesse, d.h. von der Zeit τ abhängige Fuzzy-Funktionen, modelliert. Unschärfe Tragwerks- bzw. Materialparameter sind mit einer Tilde gekennzeichnet. Die Fuzzy-Prozesse werden in äquidistante Zeitschritte $n = 1, \dots, N$ diskretisiert. In den Eingabeneuronen werden die unscharfen Tragwerkseinwirkungen bzw. Materialbeanspruchungen ${}^{[n]}\tilde{x}_1$ bis ${}^{[n]}\tilde{x}_j$ des Zeitschritts n erfasst. Die unscharfen Eingabegrößen werden über Synapsen an die nachfolgenden Schichten weitergegeben. In den verdeckten Neuronen erfolgt eine nichtlineare unscharfe Signalverarbeitung. Die Ausgabegrößen des rekurrenten neuronalen Netzes im Zeitschritt n sind die Tragwerks- bzw. Materialantworten ${}^{[n]}\tilde{z}_1$ bis ${}^{[n]}\tilde{z}_k$. Die Berücksichtigung der Geschichtsabhängigkeit der aktuellen Antworten, d.h. die Abhängigkeit von vorangegangenen Einwirkungen bzw. Beanspruchungen, erfolgt durch zeitverzögerte interne Rückkopplungen in so genannten Kontextneuronen.

Mit diesen neuartigen rekurrenten neuronalen Netzen für Fuzzy-Größen gelingt die Abbildung von Fuzzy-Prozessen der Tragwerkseinwirkungen bzw. Materialbeanspruchungen $\tilde{x}(\tau)$ auf Fuzzy-Prozesse der Tragwerks- bzw. Materialantworten $\tilde{z}(\tau)$. In [8] werden für diese mathematische Abbildung deterministische Netzparameter verwendet. Erweiterungen für a priori zu wählende un-

scharfe Netzparameter bzw. während des Trainings modifizierbare unscharfe Netzparameter wurden in [2] bzw. [4] eingeführt. Damit sind drei Arten der mathematischen Abbildung (Mapping) unscharfer Prozesse möglich, siehe auch [2]:

- Typ-1-Mapping

$$\underline{\tilde{x}}(\tau) \mapsto \underline{\tilde{z}}(\tau) \tag{1}$$

- Typ-2-Mapping

$$\underline{x}(\tau) \mapsto \underline{\tilde{z}}(\tau) \tag{2}$$

- Typ-3-Mapping

$$\underline{\tilde{x}}(\tau) \mapsto \underline{\tilde{z}}(\tau) \tag{3}$$

Im Rahmen modellfreier Tragwerksanalysen lassen sich, von unscharfen Eingangsdaten ausgehend, die Langzeiteigenschaften textilverstärkter Konstruktionen mit den trainierten Netzen unscharf prognostizieren. Für die Signalberechnung der Netze wird vorteilhaft die Fuzzy-Arithmetik angewendet.

Rekurrente neuronale Netze für Fuzzy-Größen können auch mit Daten aus Dehnkörperversuchen unter zeitveränderlichen Belastungen trainiert werden. Unscharfe Spannungs-Verzerrungs-Zeit-Abhängigkeiten können aus unscharfen Versuchsdaten identifiziert werden. In [7] sind spannungs- bzw. verzerrungsbezogene Vorgehensweisen dargestellt. Die Signalberechnung muss mit einer α -Level-Optimierung erfolgen, um die Netze im Rahmen der fuzzy-stochastischen bzw. Fuzzy-Tragwerksanalyse einsetzen zu können, siehe [3, 6]. Die Netze wurden zur Beschreibung des Langzeitverhaltens von Textilbeton in das Multi-Referenzebenen-Modell des Teilprojekts D2 integriert.

Aus den Ergebnissen des Teilprojekts in der 3. Förderperiode ist erkennbar, dass die Langzeiteigenschaften des Textilbetons häufig von verschiedenen Einwirkungen abhängen. Deshalb wurde das entwickelte modellfreie zeitraffende Verfahren so erweitert, dass unterschiedliche gleichzeitig wirkende beschleunigende Einwirkungen (z.B. Temperatur, Feuchtigkeit und mechanische Belastung) berücksichtigt werden können. Zur Erfassung gleichzeitiger, auch interaktiver Abhängigkeiten mehrerer Einflussgrößen auf die Werkstoffeigenschaften wurde das zunächst eindimensional entwickelte zeitraffende Verfahren, siehe [10], auf die gleichzeitige Berücksichtigung mehrerer Beschleunigungsvariablen erweitert.

Durch eine weitere Modifikation des modellfreien zeitraffenden Verfahrens für Degradationsprozesse ist auch die Prognose der zeitlichen Änderung einzelner Materialparameter möglich. Dazu wird die Degradation unter realen Bedingungen aus zeitgerafften Versuchsergebnissen (Degradation unter beschleunigenden Bedingungen) prognostiziert. Der Degradationsprozess wird vorteilhaft modellfrei mit rekurrenten neuronalen Netzen formuliert.

Die Ergebnisse der in der 4. Förderperiode erweiterten modellfreien Verfahren wurden mit Ergebnissen parametrischer Modelle verifiziert. Die rekurrenten neuronalen Netze für Fuzzy-Größen wurden an Stoffmodellen mit nachlassendem Gedächtnis getestet. Dazu wurden fraktionale rheologische Elemente verwendet, siehe [2, 7].

Umfangreiche numerische Studien wurden durchgeführt. In [8, 11] werden Ergebnisse der Langzeitprognose von Verschiebungen textilbeton verstärkter Platten infolge zeitveränderlicher Einwirkungen gezeigt. Rekurrente neuronale Netze können auch zur Prognose der Tragwerksantworten unter verschiedenen Lasten angewendet werden, siehe [2]. Durch Tragwerksmonitoring kann das prognostizierte Langzeitverhalten von Verstärkungen aus Textilbeton mit dem tatsächlich eingetretenen Materialverhalten verglichen werden. Daten aus dem Monitoring können als *update* genutzt werden. Damit wird eine adaptive Prognose des weiteren Langzeitverhaltens ermöglicht, siehe [7, 9].

Mit Daten aus Dehnkörperversuchen unter zeitveränderlicher Belastung können neuronale Netze trainiert werden, um nichtlineare zeitabhängige Werkstoffcharakteristiken zu beschreiben. In [3, 5] ist die Anwendung rekurrenter neuronaler Netze in Kombination mit dem Multi-Referenzebenen-Modell des Teilprojekts D2 gezeigt. Damit wird das Langzeitverhalten textilverstärkter Konstruktionen prognostiziert.

Im *state-of-the-art review* [1] werden Anwendungen der entwickelten rekurrenten neuronalen Netze für Fuzzy-Größen für modellfreie und hybride fuzzy-stochastische Tragwerksanalysen gezeigt.

Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

Die ursprünglich geplante Betrachtung unscharfer Messwerte als Punktmenge hat sich insbesondere für zeitveränderliche Größen als ungeeignet erwiesen. Vorteilhafter ist die gewählte Beschreibung zeitveränderlicher Messwerte als Fuzzy-Prozesse.

Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Aus den Teilprojekten A6 und B1 wurden Daten aus Langzeitversuchen bereitgestellt, die zum Training der entwickelten rekurrenten neuronalen Netze für Fuzzy-Größen benötigt werden.

Die modellfreie Materialbeschreibung des Langzeitverhaltens von Textilbeton wurde an das Teilprojekt D2 übergeben und in das Multi-Referenzebenen-Modell implementiert, siehe [6]. Prognosedaten wurden dem Teilprojekt E3 zur Verfügung gestellt. In [3] werden Anwendungsmöglichkeiten rekurrenter neuronaler Netze für Fuzzy-Größen zur Sicherheitsbeurteilung und sicherheitszielorientierten Bemessung im Rahmen fuzzy-stochastischer Tragwerksanalysen gezeigt.

Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Vergleichbare Arbeiten zu modellfreien Beschreibungen des unscharfen Langzeitverhaltens von Tragwerken oder Materialien mit rekurrenten neuronalen Netzen für Fuzzy-Größen sind nicht bekannt. Bisher wurden dazu meist Modelle eingesetzt und lediglich deren Parameter mit *feed-forward* Netzen identifiziert. Modellfreie Materialbeschreibungen mit *feed-forward* Netzen wurden außerhalb des Sonderforschungsbereichs bisher nur deterministisch betrachtet.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Rezensierte Veröffentlichungen und Buchveröffentlichungen

- [1] GRAF, W.; SICKERT, J.-U.; FREITAG, S.; PANNIER, S.; KALISKE, M.: Neural Network Approaches in Structural Analysis under Consideration of Imprecision and Variability. In: TSOMPANAKIS, Y.; TOPPING, B.H.V. (eds.): *Soft Computing Methods for Civil and Structural Engineering*. Chania, Stirlingshire : Saxe-Coburg Publications, 2011, chapter 4, pp. 59-85 – doi: 10.4203/csets.29.4
- [2] FREITAG, S.; GRAF, W.; KALISKE, M.; SICKERT, J.-U.: Prediction of time-dependent structural behaviour with recurrent neural networks for fuzzy data. *Computers & Structures* 89 (2011), S. 1071-1981 – doi:10.1016/j.compstruc.2011.05.013
- [3] SICKERT, J.-U.; FREITAG, S.; GRAF, W.: Prediction of uncertain structural behaviour and robust design. *International Journal for Reliability and Safety* 5 (2011), pp. 358–377
- [4] FREITAG, S.; GRAF, W.; KALISKE, M.: Recurrent Neural Networks for Fuzzy Data. *Integrated Computer-Aided Engineering* 18 (2011), pp. 265–280
- [5] GRAF, W.; FREITAG, S.; SICKERT, J.-U.; KALISKE, M.: Prediction of Time-Dependent Structural Behavior with Recurrent Neural Networks. In: CHEUNG, S.O.; YAZDANI, F.; GHAFoori, N.; SINGH, A. (eds.): *Modern Methods and Advances in Structural Engineering and Construction*. Singapore : Research Publishing Services, 2011, pp. 789–794
- [6] FREITAG, S.; STEINIGEN, F.; GRAF, W.; KALISKE, M.: Numerical Long-Term Simulation of TRC Strengthened RC Structures. In: BRAMESHUBER, W. (ed.): *Proceedings of the International RILEM Conference on Material Science (MatSci) – Volume I, 2nd International Conference of Textile Reinforced Concrete (ICTRC)*. RWTH Aachen, Bagnaux : RILEM Publications S.A.R.L., 2010, pp. 319–329
- [7] FREITAG, S.: *Modellfreie numerische Prognosemethoden zur Tragwerksanalyse*. Dissertationsschrift, Veröffentlichungen – Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke, Heft 19, TU Dresden, 2010
- [8] GRAF, W.; FREITAG, S.; KALISKE, M.; SICKERT, J.-U.: Recurrent Neural Networks for Uncertain Time-Dependent Structural Behavior. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 25 (2010), pp. 322–333
- [9] FREITAG, S.; GRAF, W.; KALISKE, M.: Identification and prediction of time-dependent structural behavior with recurrent neural networks for uncertain data. 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. 577–596
- [10] FREITAG, S.; BEER, M.; GRAF, W.; KALISKE, M.: Lifetime prediction using accelerated test data and neural networks. *Computers & Structures* 87 (2009), pp. 1187–1194
- [11] FREITAG, S.; GRAF, W.; KALISKE, M.: Prognose des Langzeitverhaltens von Textilbeton-Tragwerken mit rekurrenten neuronalen Netzen. In: CURBACH, M.; JESSE, F. (Hrsg.): *Textilbeton – Theorie und Praxis, 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4)*. TU Dresden, 2009, S. 365–376

[12] OESER, M.; FREITAG, S.: Modeling of materials with fading memory using neural networks.
International Journal for Numerical Methods in Engineering 78 (2009), pp. 843–862

b) Andere Veröffentlichungen

keine

c) Patente, gegliedert nach angemeldet und erteilt

keine

E4

Kaliske/Graf

5.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM TRANSFERPROJEKT T6

5.1.1 Bemessungsmodell und Applikationstechnologie für Biegeverstärkungen von Stahlbetonplatten

5.1.2 Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach

Geburtsdatum: 28.09.1956

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Massivbau
Helmholtzstraße 10
01069 Dresden

Telefon 0351 – 463 37660

Telefax 0351 – 463 37289

Email: manfred.curbach@tu-dresden.de

Prof.-Dr.-Ing. Rainer Schach

Geburtsdatum: 13.06.1951

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baubetriebswesen
Nürnberger Straße 31A
01187 Dresden

Telefon / Telefax: 0351 – 463 36301 / 0351 – 463 34680

Email: rainer.schach@tu-dresden.de

5.1.3 Kooperationspartner

Mit Antragstellung waren folgende zwei Kooperationspartner an dem Projekt T6 beteiligt:

Bilfinger Berger SE

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Jürgen Reinhardt

Geburtsdatum: 19.12.1958

Dienstanschrift: Bilfinger Berger SE
Tragwerksplanung
Martin-Luther-Ring 13
04109 Leipzig

Telefon: 0341 – 2685370 / 0341 – 2685380

Email: juergen.reinhardt@bilfingerberger.de

Homepage: www.bilfingerberger.de

T6

Curbach / Schach

Bilfinger Berger SE entstand durch die Fusion traditionsreicher Baugesellschaften, deren Anfänge bis ins Jahr 1880 zurückreichen. Die Bilfinger Berger SE verwirklicht anspruchsvolle Bauaufgaben für private und öffentliche Auftraggeber. Sie entwickelt darüber hinaus zunehmend Komplettlösungen für Immobilien und Infrastrukturprojekte, von der Planung über die Finanzierung bis hin zum Betrieb. Bilfinger Berger ist mit zahlreichen Niederlassungen und Beteiligungsgesellschaften in Deutschland und auf allen Kontinenten vertreten. Die Bauaktivitäten sind in den Geschäftsfeldern Ingenieur-, Hoch- und Industriebau angesiedelt. Weitere Geschäftsfelder umfassen Dienstleistungen wie Industrial Services und Facility Services sowie privatwirtschaftliche Betreiberprojekte.

Vorsitzender des Aufsichtsrates: Dr.-Ing. E.h. Bernhard Walter
Vorstandsvorsitzender: Roland Koch
Mitarbeiter: 58.312 (Jahresende 2010)
Branche: Bauwesen, Dienstleistungen
Schwerpunkte: Ingenieurbau, Hoch- und Industriebau, Dienstleistungen
Konzernleistung: 8,123 Mrd. € (2010)

Putzmeister Holding GmbH

Ansprechpartner: Dr.-Ing. Knut Kasten
Geburtsdatum: 16.03.1968
Dienstanschrift: Putzmeister AG
Max-Eyth-Straße 10
72631 Aichtal
Telefon: 07127 - 59 9 67 3
Telefax: 07127 - 59 9 57 0
E-Mail: KastenK@pmw.de
Homepage: www.putzmeister.de

Die Putzmeister Holding GmbH ist mit ihren 14 Tochtergesellschaften ein Innovationsführer auf dem Gebiet der Entwicklung und Herstellung von Maschinen zur Rohrförderung und Verteilung von Dickstoffen (Beton, Mörtel, Dickschlamm) sowie deren Aufbereitung und Zwischenlagerung. Putzmeister zählt in der Branche zu den innovativsten Spezialmaschinenbauunternehmen und verfügt über eine hohe Kernkompetenz auf den Gebieten der Dimensionierung und des Einsatzes von Mörtelpumpen und Mörtelspritzmaschinen. Im Bereich der Mörtelmaschinen lagen vor dem Teilprojekt T6 Erfahrungen bezüglich der Verarbeitung von Glasfasern sowie der Befestigung von Geweben und Gelegen durch Mörtel vor.

Geschäftsführung: Dr. Gerald Karch, Norbert Scheuch (Vorsitzender/CEO)
Vorsitzender des Aufsichtsrates: Dietmar Feder
Mitarbeiter: 2.811 MA (2010)
Branche: Spezialmaschinenbau
Schwerpunkte: Beton-, Mörtel und Dickstoffpumpen
Jahresumsatz: 545 Mio. € (2010)

Auslandsbeteiligungen: 14 Tochtergesellschaften

Im Laufe der frühen Bearbeitungsphase kam im September 2008 die PAGEL SPEZIAL-BETON GmbH & Co. KG hinzu, welche wichtige Impulse bei der Entwicklung eines neuen Feinbetons gab.

PAGEL SPEZIAL-BETON GmbH & Co. KG

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Bernd Gehrke
Geburtsdatum: 10.08.1953
Dienstanschrift: Wolfsbankring 9
D-45355 Essen
Telefon: 0201 – 68504-28
Telefax: 0201 – 68504 31
E-Mail: gehrke@pagel.de
Homepage: www.pagel.de

Seit mehr als 35 Jahren bestimmt PAGEL SPEZIAL-BETON GmbH & Co. KG, Essen, die Entwicklung der Verguss- und anderer Spezialmörtel. Die PAGEL VERGUSS-SYSTEME mit der bekannten Marke V1 und PAGEL-BETON-INSTANDSETZUNGS-SYSTEME sind zu einem weltweit anerkannten Qualitätsbegriff geworden. Die umfassende Produktpalette und die stets gleich bleibende Produktqualität und problemspezifische Kundenberatung haben dem Unternehmen seinen herausragenden Namen verschafft. Bereits 1995 wurde das Unternehmen gem. EN ISO 9001 zertifiziert. PAGEL-Produkte werden in mehr als 10 Ländern produziert sowie durch Niederlassungen und Vertragspartner in 24 Ländern weltweit vertrieben.

Geschäftsführer: Hans-Ferdinand Flottmeier, Wilhelm G. Heil
Mitarbeiter: 50 (Jahresende 2010)
Branche: Bauchemie
Schwerpunkte: Herstellung und Vertrieb von Spezialmörteln

Zur Durchführung der Großversuche wurden weitere Partner im Transferprojekt T6 beteiligt. Diese sind:

- Fertigteilwerk Otto Quast GmbH & Co. KG (Niederlassung Coswig/Sachsen),
- Baumaschinenverleih Theissen (Niederlassung Dresden),
- Baumaschinenverleih Beutelhauser (Niederlassung Dresden),
- Gerüstbau Kaiser (Bischofswerda),
- Bbs Schalungsbau GmbH (Niederlassung Bobenheim-Boxheim),
- BG Bau – Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (Direktion Dresden).

5.2 ENTWICKLUNG DES TRANSFERPROJEKTES

5.2.1 *Bericht*

Für die Biegeverstärkung von plattenförmigen Stahlbetonbauteilen sollen Bemessungsverfahren und Applikationstechnologien bis zur Praxisreife entwickelt werden. Dazu wurde das Transferprojekt T6 in zwei Arbeitspakete gegliedert.

Arbeitspaket 1 (Prof. Curbach):

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 528 „Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“ wurden durch den Antragsteller umfangreiche Vorarbeiten zur Biegeverstärkung mit textilbewehrtem Beton erbracht, die maßgeblich zum Stand des Wissens zu Beginn der Förderperiode (Juli 2008) beigetragen haben [25], [26], [27]. Es wurde folgendes nachgewiesen:

- Die Biegetragfähigkeit von Balken und Plattenbalken kann durch textilbewehrte Verstärkungsschichten erheblich gesteigert werden [28], [29].
- Für die Verankerung der Zugkräfte der textilen Lage ist es ausreichend, die Verstärkungsschicht bis an das Auflager heranzuführen. Durch geeignete Textilwahl und Rauigkeit zwischen Alt- und Textilbeton können Delaminationsversagen in Kontaktebenen unterschiedlicher Materialien ausgeschlossen werden [28], [30].
- Es steht ein additives Berechnungs- und Bemessungsverfahren für textilverstärkte Biegebauteile zur Verfügung. Es orientiert sich an der etablierten Bemessung für Stahlbetonbauteile. Schwierig gestaltete sich bisher besonders die Bestimmung einer geeigneten Materialkennlinie für das Textil [28], [31].

Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, das bekannte Bemessungsverfahren unter Berücksichtigung des Zusammenwirkens und unterschiedlichen Verbundverhaltens der Textil- und Stahlbewehrung zu vereinfachen bzw. eine in der Praxis handhabbare Bemessungshilfe zu entwickeln. Die Eignung ist durch Experimente an klein- und großformatigen Platten zu bestätigen.

Umfangreiche Untersuchungen zum Verbundverhalten der Bewehrungen im Beton und der daraus resultierenden Zugkraftaufteilung wurden von WEILAND [1], [2] durchgeführt. Dabei sind die Erkenntnisse aus den Teilprojekten B1 (Spannungs-Dehnungs-Beziehungen, JESSE) und D1 (Verbund, CURBACH) eingeflossen. Bestandteil der Arbeit [1] sind auch experimentelle Untersuchungen zur Biegetragfähigkeit an kleinformatigen Platten. Als Ergebnis der Untersuchungen steht eine vereinfachte Vorgehensweise zur Biegebemessung von verstärkten Stahlbetonplatten zur Verfügung [1], [4], [24].

Die Anwendbarkeit des vereinfachten Berechnungsverfahrens auf großformatige, praxisübliche Plattenabmessungen wird in [3] und [19] nachgewiesen. Zusätzlich erfolgte eine numerische Berechnung der Traglast und der vertikalen Verschiebungen [16], [18], [20]. Damit wird die Eignung des vereinfachten Berechnungsverfahrens und der Finite-Elemente-Methode mit Berücksichtigung von τ -s-Beziehungen für Stahl/Normalbeton und Textil/Feinbeton zur Bestimmung der Biegetragfähigkeit von verstärkten Stahlbetonplatten bestätigt. Das vereinfachte Berechnungsverfahren

wurde z.B. auch für Verstärkungsmaßnahmen bei einer Tonnenschale in Zwickau eingesetzt [6]-[8], [13]-[14].

Weiterführend wurden kleinformatische Plattenversuche (Vier-Punkt-Biegeversuche) mit einer größeren Variation von Parametern, wie statische Höhe, Stahl- und Textilbewehrungsgrad, Bauteildicke, Betondeckung und Stahldurchmesser durchgeführt. Auf Grundlage des ausführlichen Berechnungsmodells von Bösche [28] wird außerdem die rechnerische Basis für das Erstellen von praxistauglichen, einfach zu handhabenden Bemessungstabellen geschaffen. Die Anwendbarkeit und Eignung dieser Bemessungshilfen werden in [5] dargelegt.

Neben den genannten Tätigkeiten und zusätzlich zum vorgesehenen Arbeitsprogramm, war das Institut für Massivbau in der ersten Hälfte der Förderperiode maßgeblich an der Entwicklung einer Textilbetonsackware in Zusammenarbeit mit dem Institut für Baubetriebswesen und dem Kooperationspartner PAGEL SPEZIAL-BETON GmbH beteiligt. Die Notwendigkeit der Entwicklung einer Sackware zeigte sich bei den durchgeführten Verstärkungsarbeiten der Praxisprojekte (z. B.: [39]), bei denen sich die Herstellung des Feinbetons auf der Baustelle als schwierig und zeitintensiv erwies. Zur Entwicklung der Sackware erfolgte am Institut die Untersuchung von verschiedenen Textilien in drei verschiedenen Feinbetonmischungen. Es wurden Regelprüfungen zu den Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie Dehnkörper- und Auszugsversuche [31], [32] mit Unterstützung des Institutes für Baustoffe der TU Dresden durchgeführt. Die Firma PAGEL SPEZIAL-BETON GmbH führte Versuche zur Verarbeitbarkeit des Betons, dem Spritz- und Haftvermögen und zur Düsenteknik durch. Weiterhin erarbeiteten Sie die Arbeitsschritte für das Anmischen des Textilbetons. Als Ergebnis dieser Arbeit steht der Bauindustrie das von der Firma PAGEL SPEZIAL-BETON GmbH & Co. KG vertriebene Produkt PAGEL®/TUDALIT® Feinbeton TF10 zur Verfügung. Der Feinbeton kam beispielsweise bereits bei der Verstärkung von großformatigen Platten und Stützen [3], [16], von einer Erdgeschossdecke eines Produktionsgebäudes in Koblenz [22] und bei Verstärkungsmaßnahmen eines Büro- und Geschäftshauses in Prag zum Einsatz [33].

Die im Arbeitspaket 1 erreichten Ergebnisse dieses Transferprojektes sind aus Grundlagen- und Anwendersicht sehr zufriedenstellend. Es konnten sowohl praxistaugliche Bemessungsverfahren und -hilfen als auch die erfolgreiche Biegeverstärkung an einer Vielzahl von Praxisprojekten nachgewiesen werden. Mit der Einführung einer einfach handhabbaren Sackware ist der Fein- und Textilbeton leicht erhältlich und kann eine breite Anwendung finden. Der PAGEL®/TUDALIT® Feinbeton TF10 vergrößert damit das Produktportfolio der PAGEL SPEZIAL-BETON GmbH und erhöht den Bekanntheitsgrad des TUDALIT Markenverbandes e.V., dem Deutschen Zentrum für Textilbeton und der TU Dresden.

Aufgrund nicht vollständig geförderter Leistungen konnte das beantragte Arbeitsprogramm nicht komplett abgearbeitet werden. So wurden gemischt bewehrten Zugkörper nicht experimentell untersucht. Daraus folgt, dass die theoretische Herleitungen zu den Verbundbeiwerten nach [1] praktisch nicht überprüft werden konnten. Eine mögliche Einbindung von Verbundbeiwerten in ein Bemessungsmodell erfolgte deshalb nicht.

Arbeitspaket 2 (Prof. Schach):

Schwerpunkte der vorausgegangenen Grundlagenforschung war hauptsächlich die Entwicklung geeigneter Materialien, wie zum Beispiel Beton und Gelege, sowie die Bestimmung von konstruktiven Randbedingungen und Bemessungsmethoden zur Verstärkung von Betonbauteilen mit textiler Bewehrung. Bei dieser Grundlagenforschung erfolgte die Verstärkung von Betonbauteilen mit

textiler Bewehrung fast ausschließlich unter Laborbedingungen. Dabei wurden die Untersuchungen an relativ kleinen Probekörpern durchgeführt. Die Applikation erfolgte ausschließlich mit „händischen“ Verfahren, auf horizontalen Flächen sowie von oben. Eine Anwendung dieser im Labor durchgeführten Verfahrenstechniken ist jedoch für die Baupraxis im Bereich der Verstärkung weitgehend ungeeignet oder nicht realisierbar. Neben sehr wechselhaften Rahmenbedingungen in der Baupraxis, im Vergleich zu relativ konstanten Versuchsbedingungen im Labor, fehlten wichtige Kenntnisse zum Bauverfahren und zur Technologie. Dieses waren zum Beispiel Kenntnisse zu Vorbehandlungsmethoden, Nachbehandlungsmethoden, Applikationstechnologien mit einzelnen Teilprozessen des Bauverfahrens und baubetrieblichen Rahmenbedingungen sowie umfassende Kenntnisse zu Ressourcenbedarf (Produktionsmittel Stoffe, Geräte, Personal).

Um diese Wissenslücken zu füllen, wurden im Rahmen des Teilprojektes T6 Großversuche durchgeführt. Außerdem wurden mehrere Pilotprojekte hinsichtlich der baubetrieblichen Merkmale analysiert. Durch geeignete Methoden der Datenerhebung, Datenstrukturierung und Datenauswertung kann eine Bewertung vorgenommen werden. Nachfolgend wird auf die einzelnen Punkte des Arbeitsprogramms Prof. Schach zusammenfassend eingegangen.

Adaption der Betonrezeptur (Punkt 1 im Arbeitsprogramm):

In den vorausgegangenen Förderperioden wurde eine SFB-Referenz-Rezeptur aus CEM III als Standardrezeptur eingesetzt. Um die Wirtschaftlichkeit und die Qualitätsansprüche zu erfüllen, wurde im Rahmen der Großversuche und als Kooperationsleistung zwischen den Praxispartnern, dem Institut für Baustoffe, dem Institut für Massivbau und dem Institut für Baubetriebswesen eine Betontrockenmischung PAGEL®/TUDALIT® Feinbeton TF10 als 25-kg Sackware entwickelt [9].

Maschinen und Spritztauglichkeit (Punkt 2 im Arbeitsprogramm):

Aus der Vielzahl von verfügbaren Geräten zum Mischen und Fördern des Feinbetons wurden für die Großversuche drei Geräte für spezielle Maschinentests ausgewählt. Dieses waren die Schneckenpumpe S5 mit aufgesetztem Tellermischer, die Schneckenpumpe SP 11 Beliso mit Hubmischer und die Strobot 406 S. Als Spritzgeräte kamen eine konventionelle Putzerdüse des Unternehmens Putzmeister, die PAGEL-MAWO-Düse und die Putzmeister-Strobl-Luftstromdüse zum Einsatz. Die Trockenmischung wurde direkt als 25 kg Sackwaren geliefert und konnte damit bequem in den Zwangsmischer gefüllt werden. Vom Zwangsmischer gelangt das Frischbetongemisch bei der Schneckenpumpe S5 direkt in die Pumpe. Für die Tests an der Strobot 406 S musste der Frischbeton händisch in die Pumpe umgefüllt werden. Die Schneckenpumpe SP 11 Beliso wurde nicht getestet, da diese analoge Kennwerte aufzeigt, wie die SP 5. Der Unterschied zur SP 5 liegt bei der SP 11 im Antriebssystem, welches hier mit Diesel erfolgt. [9] Die Geräte zum Mischen und Fördern stellen nur eine Auswahl der benötigten Produktionsmittel (Geräte und Maschinen) dar. Die getesteten und als tauglich empfundenen Geräte und deren Zuordnung zu den einzelnen Teilprozessen wurden ausführlich dokumentiert.

Nachbehandlung (Punkt 3 im Arbeitsprogramm):

Bei dem hier eingesetzten Feinbeton musste zunächst festgestellt werden, wie sich das Austrocknungsverhalten der Feinbetonschichten unter realen Umwelteinflüssen verhält. Das Forscherteam identifizierte verschiedene Quellen und baubetriebliche Einflüsse, die zur Austrocknung

und damit zum Ansteifen des Feinbetons beitragen. Dies sind zum Beispiel: Das eingesetzte Textilgelege, die vorbehandelte Altbetonoberfläche, die Klimafaktoren (Sonneneinstrahlung Umgebungstemperatur Luftfeuchtigkeit Niederschlagsentwicklung) vor, während und nach den Verstärkungsarbeiten. Eine genaue Feststellung des Nachbehandlungsbedarfes wurde über das Verfahren der so genannten Kapillarunterdruckmessungen erwirkt [47]. Außerdem wurden in den Großversuchen die Praktikabilität verschiedener Methoden getestet. So hat sich gezeigt, dass die Nachbehandlung mit Folie oder Vlies für die Einbauszenarien am Boden ohne größere konstruktive Maßnahmen möglich ist. Es muss dafür gesorgt werden, dass die Folien- oder Vliesbahnen nicht vom Wind oder sonstigen Umwelteinflüssen beschädigt oder verschoben werden. Bei der Einbausituation an der Wand sind kleine Konstruktionshilfen notwendig, um Folie- oder Vliesbahnen ausreichend zu fixieren. Bei dem Einbau über Kopf wären die konstruktiven Maßnahmen (zum Beispiel Unterbau) für den Einbau von Folie- oder Vliesbahnen sehr umfänglich und würden einer wirtschaftlichen Anwendung des gesamten Bauverfahrens entgegenwirken. Es hat sich weiterhin gezeigt, dass Nachbehandlungsmitteln (zum Beispiel Benetzen der Oberfläche durch Curing) bei Verstärkungsarbeiten im Freien ungeeignet sind, da hier die Filmbildung zu spät eintritt. Beim Einsatz dieser Mittel im Gebäude wird davon ausgegangen, dass mindestens 60 Prozent Luftfeuchtigkeit herrschen und keine Sonneneinstrahlung auftritt. Diese Bedingungen begünstigen den Einsatz von Nachbehandlungsmitteln im Allgemeinen.

Ermittlung der Aufwandswerte (Punkt 5 im Arbeitsprogramm):

Für eine differenzierte Ermittlung der Aufwandskennwerte wurden umfangreiche Datenerhebungen durchgeführt. [10] Durch Zeitaufnahmen werden Prozesszeiten ermittelt, die der jeweiligen Einbausituation der Verstärkungen an Altbetonflächen (an der Wand, am Boden, an der Decke) entsprechen. Bei den Großversuchen wurden verschiedener Produktionsmittel (Stoffe, Geräte, Maschinen, Werkzeuge, Personal) und deren Einfluss auf die Termsituation des neuen Bauverfahrens getestet. Es hat sich gezeigt, dass alle Haupttätigkeiten des neuen Bauverfahrens in neun Teilprozesse eingeteilt werden können. Dieses sind: Vorbehandlung der Altbetonoberfläche, Konfektionierung des Textilgeleges, Aufbauarbeiten, Wässern, Betonmischen, Spritzenführung, Gelegeföhrung, Nachbehandlung und Reinigung mit Abbauarbeiten. Alle diesbezüglichen Haupttätigkeiten und zugehörige Prozesszeiten werden derzeit analysiert und dokumentiert.

Wirtschaftlichkeitsanalyse, Praxistauglichkeit und Entwicklungspotentiale (Punkt 4 und 6 im Arbeitsprogramm):

Großversuche für eine wirtschaftliche Betrachtung des neuen Bauverfahrens erfolgten. Eine abschließende Auswertung im vorgesehenen Projektzeitraum war infolge der im Rahmen des Teilprojektes T6 bewilligten Ressourcen nicht möglich. Die Auswertung hinsichtlich der Einflüsse aus den Komponenten Termine, Kosten, Umwelteinfluss, Arbeitssicherheit und Qualität erfolgt derzeit und wird in den kommenden Monaten abgeschlossen.

Nutzwertanalyse (Punkt 7 im Arbeitsprogramm):

Die Herausarbeitung und Darstellung der Vor- und Nachteile bei der Verstärkung von Altbetonflächen mit textilbewehrten Beton wird derzeit vollzogen. Es ist bekannt, dass die Nutzwertanalyse in der Regel sehr gute relative Aussagen zwischen zwei oder mehr Alternativen zu einem Kriterienkatalog gewährleistet. Der Nutzwert bei dem neuen Bauverfahren kann beispielsweise hinsicht-

lich der Einbausituation (an der Wand, am Boden, an der Decke) unterschieden werden. Eine konkrete Benennung und damit das richtige Deuten des Nutzwertes (als Zahl ausgedrückt) erfordern ausführliche Kommentierungen des gewählten Kriterienkataloges und der im Einzelnen eingeflossenen Bewertungen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Nutzwert des neuen Bauverfahrens nach einer ausführlichen Betrachtung der Einflusskomponenten Termine, Kosten, Umwelteinfluss, Arbeitssicherheit und Qualität eine gute Beurteilung für die beteiligten Praxispartner und sonstige Anwender des neuen Bauverfahrens zulässt. Eine ausführliche Darstellung der verschiedenen Nutzwerte wird derzeit erarbeitet.

Qualität des Haftzugversuches zur Kalibrierung des Bemessungsmodells:

Für die Einflusskomponente Qualität war unter anderen die Beurteilung des Haftverbundes zwischen der Altbetonfläche und der Verstärkungsschicht bei der praxisnahen Anwendung gefordert. Dieser Haftverbund wird zum Beispiel durch die Produktionsmittel im Teilprozess Vorbehandlung beeinflusst. Versuche im Rahmen des Teilprojektes T6 zeigten, dass unter den angesetzten Rahmenbedingungen alle Haftverbünde ausreichend waren. Die Bruchstelle beim Haftzugfestigkeitsversuch lag im Altbeton. Der Mittelwert für die Bruchlast lag bei 4,03 kN und der für die Haftzugfestigkeit bei 2,06 N/mm².

Weiterführende Informationen zu Prozessen des neuen Bauverfahrens sind der geplanten Dissertationsschrift von Herrn Dipl.-Ing. Manuel Hentschel zu entnehmen. Unter anderen werden ausführliche Analysen der untersuchten Vorbehandlungsmethoden, Mischverfahren, eingesetzte Produktionsmittel (Stoffe, Geräte und Maschinen, Personal), zu beachtende Umwelteinflüsse, Nachbehandlungsmethoden sowie umfängliche Belange zu Arbeitsschutz im Umgang mit dem neuen Bauverfahren dargestellt.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Rezensierte Veröffentlichungen und Buchveröffentlichungen

- [1] WEILAND S.: *Interaktion von Betonstahl und textiler Bewehrung bei der Biegeverstärkung mit textilbewehrtem Beton*. Technische Universität Dresden : Eigenverlag, 2009 – Dissertation
- [2] WEILAND, S.; CURBACH, M.: Interaktion gemischter Bewehrung bei der Verstärkung von Stahlbeton mit textilbewehrtem Beton. In: CURBACH, M. (Hrsg.); JESSE, F. (Hrsg.): Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung „Textilbeton – Theorie und Praxis“, Dresden, Juni 2009, S. 553-564
- [3] SCHLADITZ F.; LORENZ, E.; CURBACH, M.: Biegetragfähigkeit von textilbetonverstärkten Stahlbetonplatten. *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), S. 377-384
- [4] JESSE, F.; CURBACH, M.: Verstärken mit Textilbeton. In: BERGMEISTER, K. ; FINGERLOOS, F. ; WÖRNER, J.-D. (HRSG.): *Betonkalender 2010*. Berlin : Ernst & Sohn, 2010
- [5] FRENZEL, M.; CURBACH, M.: Bemessungsmodell für biegebeanspruchte textilbetonverstärkte Stahlbetonplatten. In: CURBACH, M. (Hrsg.); ORTLEPP, R. (Hrsg.): Tagungsband zum 6. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS6) und zur 3. Anwendertagung „Textilbeton in Theorie und Praxis“, Dresden, September 2011, S. 381-400

- [6] LORENZ, E.; SCHLADITZ, F.; JESSE, F.; CURBACH, M.: Textile Reinforced Concrete (TRC) for Strengthening of RC Structures – Report from Practical Application. Proceedings of the 3rd International fib Congress, „An investment in your future“, Washington, 29.05.-02.06.2010, 2010
- [7] SCHLADITZ, F.; LORENZ, E.; JESSE, F.; CURBACH, M.: Verstärkung einer denkmalgeschützten Tonnenschale mit Textilbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 104 (2009), S. 432-437
- [8] SCHLADITZ, F.; LORENZ, E.; JESSE, F.; CURBACH, M.: Strengthening of a Barrel-Shaped Roof using Textile Reinforced Concrete. Proceedings of the 33rd Symposium of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) „Sustainable Infrastructure Environment Friendly, Safe and Resource Efficient“, Bangkok, September 2009, S. 416-417
- [9] SCHACH, R.; HENTSCHEL, M.: Grundlagen für die Nutzwertanalyse für Verstärkungen aus textilbewehrtem Beton. In: CURBACH, M. (HRSG.); JESSE, F. (Hrsg.): Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung „Textilbeton – Theorie und Praxis“, Dresden, Juni 2009, S. 459-470
- [10] SCHACH, R.; HENTSCHEL, M.: Process Optimization for the Rehabilitation and Strengthening with Textile Reinforced Concrete. In: BRAMESHUBER W. (Hrsg.): Proceedings of the International RILEM Conference on Material Science (MatSci), Aachen, September 2010, S. 245-254

b) Andere Veröffentlichungen

- [11] SCHACH, R.; HENTSCHEL, M.: Verfahrenstechnische Grundlagen für die Verstärkung mit textilbewehrtem Beton im Hochbau. In: MOTZKO, C. (Hrsg.): *Baubetriebliche Aufgaben. Festschrift anlässlich des 30-jährigen Bestehens des Institutes für Baubetrieb der TU Darmstadt*. Düsseldorf: VID-Verlag (Fortschrittberichte VDI/4, 211), 2009, S. 263-273
- [12] SCHACH, R.; HENTSCHEL, M.; WACH, M.: Die Verantwortung von Architekten und Bauingenieuren für sicheres Bauen. *Bauforschung und Baupraxis*. Heft/Vol. 10, *Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Jäger*. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Tragwerksplanung, TU Dresden : Eigenverlag, 2011

5.2.3 Dokumentation weiterer Aktivitäten

Vorträge

WEILAND, S.: Textilbewehrter Beton – Wege in die Baupraxis. Firmenweiterbildung gth Beton, Weinböhla, 09.03.2009

CURBACH, M.: Textile Bewehrung im Betonbau. Bautechnik-Forum Chemnitz (Ingenieurkammer Sachsen), Chemnitz, 20.03.2009

WEILAND, S.: Praktischer Einsatz von textilbewehrtem Beton beim Bauen im Bestand. Fortbildung der Strassenbauverwaltung Sachsen, Carsdorf bei Dresden, 01.04.2009

CURBACH, M.: Sanierung von Stahlbetonschalen mit textiler Bewehrung. Mitteldeutsches Bau-Reko-Kolloquium Freiberg, Freiberg, 29.04.2009

WEILAND, S.: Einsatzmöglichkeiten von Textilbeton beim INNOVATORIUM Dresden. 2. Forum INNOVATORIUM, Dresden, 09.07.2009

JESSE, F.: Textilbewehrter Beton zur Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen-Grundlagen. Tagung der Landesgütegemeinschaft Instandsetzung von Betonbauwerken Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., Leipzig, 12.11.2009

HENTSCHEL, M.: Grundlagen für die Nutzwertanalyse für Verstärkungen aus textilbewehrtem Beton. 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS 4), Dresden, 04.06.2009

HENTSCHEL, M.: Baubetriebliche und technologische Kennwerte bei Textilbetonverstärkungen. 2. Anwendertagung Deutsches Zentrum Textilbeton, 01.10.2010 in Dresden

SCHLADITZ, F.: Tragfähigkeitssteigerung mit Textilbeton. 2. Anwendertagung Deutsches Zentrum Textilbeton, 01.10.2010 in Dresden

FRENZEL, M.: Bemessungsmodell zur Berechnung der Tragfähigkeit von biegeverstärkten Stahlbetonplatten. 20.09.2011, CTRS6 – 6. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken

Schulungen

Deutsches Zentrum Textilbeton, Dresden International University: Textilbewehrter Beton – Wege zur praktischen Anwendung eines innovativen Verbundwerkstoffes. Dresden, 26.09.2009

Kolloquien

4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS 4), Dresden, 3.6.-5.6.2009

2. Internationales Kolloquium, ICTRC Textile Reinforced Concrete (CTRS 5), Aachen, 6.-8.09.2010

6. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS 6), Berlin 19.-20.09.2011

Deutsches Zentrum Textilbeton, Die TUD – Austauschplattform für SFBs und Exzellenzcluster, Meitingen, 4.12.2009

5.4 LITERATUR

5.4.1 Weitere projektrelevante eigene Publikationen

a) begutachtete Publikationen

- [13] SCHLADITZ, F.; HOFFMANN, A.; GRAF, W.; LORENZ, E.; JESSE, F.: Strengthening of a Barrel Shell with Textile Reinforced Concrete - Part I: Dimensioning and Design. In: ALDEA, C.-M. (Hrsg.): Proceedings of the ACI 2010 Spring Convention, Chicago, März 2010
- [14] LORENZ, E.; SCHLADITZ, F.; JESSE, F.; CURBACH, M.: Strengthening of a Barrel Shell with Textile Reinforced Concrete - Part II: Practical Experience. In: ALDEA, C.-M. (Hrsg.): Proceedings of the ACI 2010 Spring Convention, Chicago, März 2010
- [15] SCHLADITZ, F.; STROBELT, J.: Verstärkung eines Tonnendaches - Ein Erfahrungsbericht. In: CURBACH, M.; JESSE, F. (Hrsg.): Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung „Textilbeton – Theorie und Praxis“, Dresden, Juni 2009, S. 586-587
- [16] SCHLADITZ F.; FRENZEL, M.; EHLIG D.: Bending load capacity of reinforced concrete slabs with textile reinforced concrete. *Engineering Structures* (eingereicht Juni 2011)
- [17] ORTLEPP, R.; SCHLADITZ F.: Textilbetonverstärkte Stahlbetonstützen. *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), S. 640-648
- [18] Steinigen, F.; Sickert J.; Hoffmann A.; Graf W.; Kaliske, M.: Tragwerke aus Textilbeton – numerische Strukturanalyse. In: Curbach, M. (Hrsg.); Ortlepp, R. (Hrsg.): Tagungsband zum 6. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS6) und zur 3. Anwendertagung „Textilbeton in Theorie und Praxis“, Dresden, September 2011, S. 401-412

b) nichtbegutachtete Publikationen

- [19] SCHLADITZ F.; LORENZ, E.: Tragfähigkeitssteigerung mit Textilbeton. In: TUDALIT, Magazin zur 2. Anwendertagung Textilbeton, Dresden, Oktober 2010, S. 13
- [20] Sickert J.; Steinigen F.; Graf W.: Numerische Simulation textilbetonverstärkter Plattenstrukturen. In: TUDALIT, Magazin zur 2. Anwendertagung Textilbeton, Dresden, Oktober 2010, S.14
- [21] STROBELT, J.; SCHLADITZ, F.; LORENZ, E.: Textilbeton in der Praxis: Verstärkung eines Tonnendaches. *Beratende Ingenieure* 39 (2009), S. 41-45
- [22] STIPRIAAN U.; WEILAND S.; SCHÖN K.: Instandsetzung Koblenz, Verstärkung der Erdgeschossdecke eines Produktionsgebäudes mit Textilbeton. In: TUDALIT, Magazin – Vorschau zur 3. Anwendertagung Textilbeton, Berlin, September 2011, S. 6
- [23] SCHLADITZ, F.; LORENZ, E.; JESSE, F.; CURBACH, M.: Usilenie Tekstilnyom Betonom Schelesobetonnoi Konstrukzii Kryschi Istoritschkogo Sdaniya. *Beton i Zhelezobeton* (2011) 1, S. 27-30
- [24] JESSE, F.; CURBACH M.: Verstärken mit Textilbeton. Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden, Heft 20, Ernst & Sohn, 2010

5.4.2 Sonstige Veröffentlichungen

- [25] REINHARDT, H.-W.; KRÜGER, M.; BENTUR, A.; BRAMESHUBER, W.; BANHOLZER, B.; CURBACH, M.; JESSE, F.; MOBASHER, B.; PELED, A.; U. A.: Composite materials - 6.1. Bond. In: BRAMESHUBER, W. (Hrsg.): *Textile Reinforced Concrete – State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC*. RILEM Publications SARL, 2006, S. 83-131
- [26] CURBACH, M.; ORTLEPP, R.; TRIANTAFILLOU, T. C.: TRC for Rehabilitation. In: BRAMESHUBER, W. (Hrsg.): *Textile Reinforced Concrete – State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC*. RILEM Publications SARL, 2006, S. 221-236
- [27] CURBACH, M.; JESSE, F.; ORTLEPP, R.; BRÜCKNER A.; WEILAND S.: Textile Bewehrung im Betonbau. In: BARADIY, S. ET AL. (Hrsg.): Tagungsband zum 8. Bautechnikforum, TU Chemnitz, 20.03.2009. TU Chemnitz : Eigenverlag, 2009
- [28] BÖSCHE, A.: MÖGLICHKEITEN zur Steigerung der Biegetragfähigkeit von Beton- und Stahlbetonbauteilen durch den Einsatz textiler Bewehrungen - Ansatz für ein Bemessungsmodell. Technische Universität Dresden : Eigenverlag, 2007 – Dissertation
- [29] BÖSCHE, A.; ORTLEPP, R.; JESSE, F.: Innovationen für Verstärkungen. In: Beiträge zum 48. DAfStb-Forschungskolloquium am 19. Oktober 2007 an der Technischen Universität Dresden. Technische Universität Dresden, 2007, S. 21-34
- [30] ORTLEPP, R.: Untersuchungen zur Verbundverankerung textilbewehrter Feinbetonverstärkungsschichten für Betonbauteile. Technische Universität Dresden: Eigenverlag, 2007 – Dissertation
- [31] JESSE, F.: Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix. Technische Universität Dresden: Eigenverlag, 2004 – Dissertation
- [32] LORENZ E.; ORTLEPP R.: Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung der Verankerungslänge der textilen Bewehrung in der Feinbetonmatrix. In: CURBACH, M.; JESSE, F. (Hrsg.): Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, „*Textilbeton – Theorie und Praxis*“, Dresden, Juni 2009, S. 491-502
- [33] HANKERS C.; MATZDORFF D.: Textilbewehrter Spritzbeton zur Bauwerksverstärkung. IN: Fachaufsatz zur Spritzbetontagung 2009, 15.1.-16.1.2009, Alpbach, Tirol
- [34] CURBACH, M.; WEILAND, S.: Fertigteilbrücke für die Landesgartenschau 2006 in Oschatz aus textilbewehrtem Beton. *Betonwerk + Fertigteil-Technik* 70 (2004), S. 102–103
- [35] BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M.: Textile Reinforced Concrete – Applications and Bond Specifics. Proceedings of the fib-Symposium „*Concrete Structures – the Challenge of Creativity*“, Avignon, April 2004, S. 161–162
- [36] CURBACH, M.; BRÜCKNER, A.: Textile Strukturen zur Querkraftverstärkung von Stahlbetonbauteilen. In: CURBACH, M.; JESSE, F. (Hrsg.): Tagungsband zum 2. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS2), Dresden, Sept./Okt. 2003, S. 347–360

- [37] CURBACH, M.; JESSE, F.; ORTLEPP, R.; WAGNER, A.: Verstärkung von Stahlbetontragwerken mit textilen Bewehrungen. 6. Dresdner Baustatik-Seminar, Dresden, 18.10.2002, S. 153–178
- [38] CURBACH, M.: Sachstandsbericht zum Einsatz von Textilien im Massivbau. Heft 488 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin : Beuth-Verlag, 1998
- [39] CURBACH, M.; HAUPTENBUCHNER, B.; ORTLEPP, R.; WEILAND, S.: Textilbewehrter Beton zur Verstärkung eines Hyparschalentragwerks in Schweinfurt. *Beton- und Stahlbetonbau* 102 (2007), S. 353-361
- [40] CURBACH, M.; BAUMANN, L.; JESSE, F.; MARTIUS, A.: Textilbewehrter Beton für die Verstärkung von Bauwerken. *Beton* 51 (2001), S. 430-434
- [41] FRANZKE, G.; HEMPEL, R.; ENGLER, T.; SCHIERZ, M.; BRÜCKNER, A.; PROSKE, D.; ORTLEPP, S.: Betonmastsanierung mit mehraxialen Gelegen aus alkaliresistenten Glas. *Bautechnik*, 2002, Jg.79, Nr.6, S.368-374
- [42] HÖCKER, H.; ARNOLD, A.; KASTANJA, A.: Dauerhaftigkeitsuntersuchungen an nasschemischen und plasmagestützten Modifizierungen von Rovings für den Einsatz in textilbewehrtem Beton. In: CURBACH, M.; JESSE, F. (Hrsg.): Tagungsband zum 2. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS2), Dresden, Sept./Okt. 2003
- [43] CURBACH, M.; ORTLEPP, R.: Besonderheiten des Verbundverhaltens von Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton. In: CURBACH, M.; JESSE, F. (Hrsg.): Tagungsband zum 2. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS2), Dresden, Sept./Okt. 2003, S. 361–374
- [44] CURBACH, M.; BRÜCKNER, A.; BÖSCHE, A.: Textile Strukturen zur Querkraftverstärkung von Stahlbetonbauteilen. In: CURBACH, M.; JESSE, F. (Hrsg.): Tagungsband zum 2. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS2), Dresden, Sept./Okt. 2003, S. 347–360
- [45] SCHORN, H.; BUTLER, M.; HEMPEL, M.; SCHIEKEL, M.: Untersuchungen zum Verbundverhalten von alkaliresistenten Glasfilamentgarnen in zementgebundenen Matrices. In: CURBACH, M.; JESSE, F. (Hrsg.): Tagungsband zum 2. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS2), Dresden, Sept./Okt. 2003, S. 77–89
- [46] MÖLLER, B.; BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; STEINIGEN, F.: Verstärken mit textilbewehrtem Beton. *Beton- und Stahlbetonbau* (1999), S. 466–471
- [47] SCHMIDT, D.; Slowik, V.; Schmidt, M.; Fritsch, R.: Auf Kapillardruckmessung basierende Nachbehandlung von Betonflächen im plastischen Materialzustand; In: *Beton- und Stahlbetonbau* 102 (2007), Ernst & Sohn Verlag für Architekten und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin 2007.

T6

Curbach / Schach

T6

Curbach / Schach

T6

Curbach / Schach

5.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM TRANSFERPROJEKT T7

5.1.1 *Adaption und Anwendung nicht-deterministischer Simulations- und Bemessungsstrategien in der industriellen Entwurfspraxis*

5.1.2 *Projektleitung*

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf

Geburtsdatum: 12.03.1953

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke
Helmholtzstraße 10
01069 Dresden

Telefon: (0351) 463-341 72

Email: wolfgang.graf@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske

Geburtsdatum: 22.07.1960

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke
Helmholtzstraße 10
01069 Dresden

Telefon: (0351) 463-343 86

Email: michael.kaliske@tu-dresden.de

5.1.3 *Kooperationspartner 1*

BMW AG

Grossenbacher, Kathrin, Dr. sc. ETH Zürich

Produkt- und Prozessgestaltung, Simulation

Knorrstr. 147

80788 München

Tel: 089-382-33108

Fax: 089-382-43177

Beim Automobilhersteller BMW AG ist die Gruppe „Produkt- und Prozessgestaltung, Simulation“ innerhalb des Werkzeugbaus für die Entwicklung von Methodenkonzepten sowie deren Absicherung durch Simulation verantwortlich. Das Aufgabengebiet beinhaltet dabei die fertigungstechnische Mitgestaltung von Design und Konstruktion der Bauteile in der frühen Phase der Konzeptentwicklung sowie die Erstellung von Methodenkonzepten als Voraussetzung für eine qualitäts- und kostenorientierte Auslegung der Fertigungsmittelkonstruktionen. Diese stellen die Grundlagen

für die Entwicklung hochproduktiver Umformwerkzeuge dar. Im Weiteren ist die Gruppe verantwortlich für die gesamthafte Weiterentwicklung von Simulationsverfahren basierend auf der FE-Methode.

Vorsitzender des Aufsichtsrates: Prof. Dr.-Ing. Joachim Milberg
Vorstandsvorsitzender: Dr.-Ing. Norbert Reithofer
Mitarbeiter: 95'453 (2010)
Branche: Automobilindustrie
Jahresumsatz: 60'477 Mio. EUR

5.1.4 Kooperationspartner 2

DYNAmore GmbH
Müllerschön, Heiner, Dr.-Ing.
Leiter Optimierung und Prozessintegration
70565 Stuttgart
Tel: 0711-459-60020
Fax: 0711-459-60029

Die Firma DYNAmore ist ein Ingenieurdienstleister auf dem Gebiet der nichtlinearen Simulation. Die Haupttätigkeit ist der Vertrieb von Produkten des Softwareentwicklers Livermore Software Technology Corporation (LSTC) aus Livermore, Kalifornien, USA. Die überwiegende Mehrzahl der Mitarbeiter beschäftigt sich mit dem kommerziellen Finite Element Programm LS-DYNA und Programmen aus dessen Umfeld. Im Portfolio ist auch das Optimierungstool LS-OPT. Außerdem ist DYNAmore in enger Absprache mit LSTC an der Erweiterung der Programme LS-DYNA und LS-OPT in den Bereichen Algorithmenentwicklung, Materialmodellierung und Benutzeroberflächen beteiligt. Ein umfassendes Schulungsangebot zu vielen Themengebieten der nichtlinearen numerischen Simulation und Optimierung rundet das Tätigkeitsfeld ab.

Derzeit hat DYNAmore 50 Mitarbeiter verteilt auf 4 Standorte (u.a. Dresden). Inhaber der Firma ist eine Gruppe erfahrener Ingenieure. Geschäftsführer sind Prof. Karl Schweizerhof und Uli Franz.

5.2 ENTWICKLUNG DES TRANSFERPROJEKTS

5.2.1 Bericht

▪ Ausgangssituation

Im Sonderforschungsbereich wurden neuartige Vorgehensweisen zum Entwurf von Textilbetonverstärkungen entwickelt (Teilprojekt E3). Durch Anwendung dieser Vorgehensweisen kann eine Textilbetonverstärkung nicht nur optimiert, sondern schon in einer frühen Entwurfsphase in Richtung Robustheit und Zuverlässigkeit beeinflusst werden.

Die Erfassung nicht-deterministischer Eingangsgrößen im Entwurf erfordert die Anwendung der alternativen Unschärfemodelle Fuzziness und Fuzzy-Zufälligkeit. Die Idee und Vorgehensweisen dieser wurden im Transferprojekt T4 (2005-2008) in Zusammenarbeit mit der Firma DYNAmore

GmbH bereits in die Anwendung transferiert. Die Ausstrahlung dieses Transferprojektes weckte beim Kooperationspartner BMW AG Interesse an den neuen Entwurfsmethoden. Insbesondere die Beeinflussung eines Entwurfs in Richtung Robustheit und Zuverlässigkeit in einer frühen Entwurfsphase war von besonderem Interesse für die BMW AG.

- **Zielsetzung**

Im Rahmen des Transferprojekts T7 sollten die durch die TU Dresden bereitgestellten Lösungen adaptiert werden, um für die Prozesskette Tiefziehen-Crash bei unscharfer Datenbasis zuverlässige Entwürfe zu ermöglichen. Die Lösungsidee und die entwickelten Vorgehensweisen sollten an praxisrelevanten Anwendungen verdeutlicht werden. Das Ziel des Kooperationspartners BMW AG ist der Einsatz dieser Methoden in der Fahrzeug- und Werkzeugentwicklung. Hierzu soll der Kooperationspartner DYNAmore GmbH als Softwareentwickler und Ingenieurdienstleister diese Methoden perspektivisch in eigene Softwareprodukte implementieren.

- **Transferierte SFB-Ergebnisse und Methoden**

Der Entwurf von Textilbetonverstärkungen erfordert die realitätsnahe Beschreibung der Eingangsgrößen, die nur unscharf erfolgen kann. Die Methoden zur Analyse unscharfer Daten und Simulation von Fuzzy- bzw. Fuzzy-Zufallsgrößen wurden im Transferprojekt T4 bereits in die Anwendung überführt.

Weitergehend wurden im Teilprojekt E3 sowohl Methoden des zuverlässigkeitsbasierten Entwurfs als auch Vorgehensweisen zur Lösung eines inversen Problems für Textilbetonverstärkungen entwickelt. Auf Grundlage einer unscharfen Analyse mit Fuzzy- bzw. Fuzzy-Zufallsgrößen können bereits in einer frühen Entwurfsphase zuverlässige alternative Entwurfslösungen detektiert werden.

Im Teilprojekt E4 wurden neuronale Netze für die modellfreie Strukturanalyse mit unscharfen Daten adaptiert und fortentwickelt. Diese Methoden können eingesetzt werden, um die Effizienz der numerischen Simulation zu erhöhen.

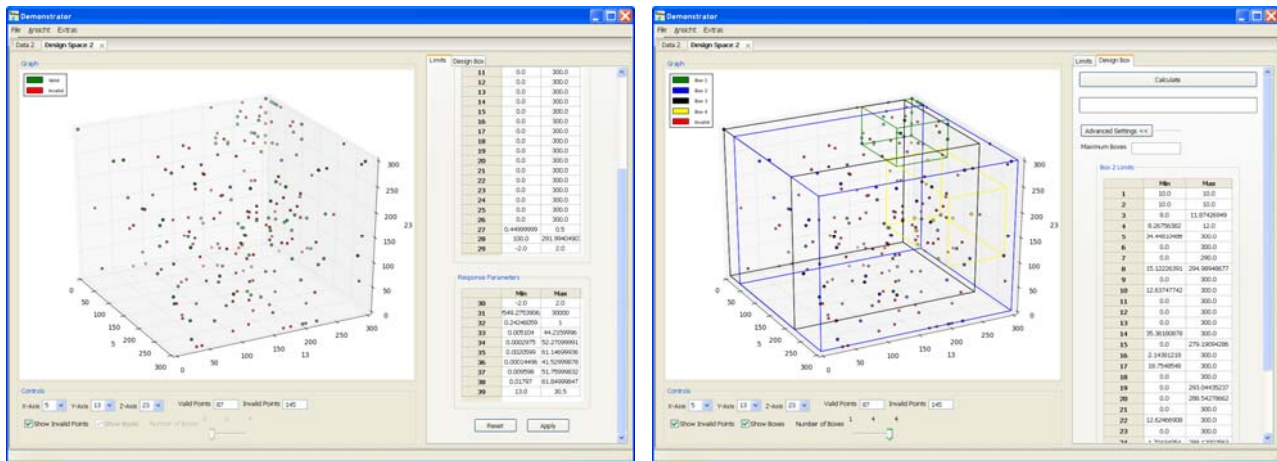
- **Arbeitsschritte der beteiligten Partner**

In einem ersten Arbeitsschritt wurde eine programmtechnische Schnittstelle zwischen den Programmen der Projektpartner erstellt. Die Analysealgorithmen der TU Dresden wurden so aufbereitet, dass LS-DYNA als deterministische Grundlösung verwendet werden konnte. Zur Auswertung der Beispiele wurden von BMW die entsprechenden Pre- und Postprocessing Programme entwickelt.

Zunächst wurde für einen „Querträger Stirnwand“ der BMW AG eine zuverlässigkeitsbasierte Optimierung durchgeführt. Hierbei wurden die im Transferprojekt T4 erarbeiteten Ergebnisse nochmals an einem Beispiel der BMW AG gezeigt und die Einbindung in einen Optimierungsprozess prototypisch demonstriert.

In einem nächsten Arbeitsschritt wurden mit den Programmen der TU Dresden für ein „real“ aufgetretenes Problem im Türeinstieg eines Fahrzeugträgers zulässige alternative Entwurfslösungen ermittelt [8]. Hierbei konnten die Ergebnisse mit den von BMW ermittelten Ergebnissen – auf Basis der bisher bekannten Vorgehensweisen – verglichen werden.

Da die neu entwickelten Methoden einen beträchtlichen Erkenntniszuwachs ermöglichen, wurde auf Wunsch der Kooperationspartner eine prototypische Umsetzung der im SFB entwickelten Methoden vorgenommen, siehe Bild 1. Hierbei wirkte vor allem DYNAMore mit der langjährigen Erfahrung als Softwarehersteller mit. Mit der Demonstrationssoftware wurde ermöglicht, dass die neuen Methoden „on the job“ bei BMW getestet werden konnten. Hierzu wurden nach einer Schulung des kooperierenden Fachbereiches bei BMW weitere Untersuchungen an einem eigens für das Projekt erstellten Anwendungsbeispiel durchgeführt.



(a) Zulässige und nicht-zulässige Entwürfe

(c) Zulässige alternative Entwurfsräume

Bild 1: Screenshots vom Demonstrator

Aus den ersten Erfahrungsberichten der Ingenieure konnten zu lösende Teilaufgaben für einen erfolgreichen Einsatz abgeleitet werden. Im Wesentlichen wurden die Algorithmen mit Blick auf die numerische Effizienz optimiert. Zusätzlich wurden Studien an bekannten Benchmarkbeispielen durchgeführt, um den Lösungsansatz der neuen Methoden verdeutlichen zu können.

▪ Ergebnisse des Transferprojekts und ihre Bedeutung

Mit dem Transferprojekt konnten neu entwickelte Vorgehensweisen der Grundlagenforschung in die Anwendung transferiert werden. Die TU Dresden konnte durch das Transferprojekt einen Einblick in die Arbeitsweisen der industriellen Anwendung erhalten, wodurch Frage- und Aufgabenstellungen der Kooperationspartner verdeutlicht wurden. Diese gaben Impulse für die eigene Grundlagenforschung. Weiterhin konnten die im SFB entwickelten Methoden verbessert werden. Insbesondere für die in der Anwendung wichtigen Aspekte Stabilität, Reproduzierbarkeit und Effizienz konnten die Vorgehensweisen erweitert werden.

Der Kooperationspartner BMW AG lernte durch das Transferprojekt neue Methoden zur Lösung von Entwurfsaufgaben kennen. Dadurch können Produkte des Kooperationspartners robuster entworfen werden. Weiterhin haben sich für den Kooperationspartner neue Anwendungsfelder erschlossen, insbesondere für den Entwurf in einer frühen Phase. Der Kooperationspartner gründete intern eine eigene Forschungsgruppe, um die transferierten Methoden weiter verbessern und fortentwickeln zu können. Hierbei stehen vor allem Ziele im Fokus, die die Marktstellung der BMW AG weiter stärken können.

Der Kooperationspartner DYNAMore GmbH hat durch das Transferprojekt die Anwendungsrelevanz der im SFB 528 entwickelten Methoden erkannt und als eigenen Entwicklungsschwerpunkt

aufgenommen. Durch die intensive Zusammenarbeit mit der TU Dresden bei der Erstellung des Demonstrators sind die wissenschaftlichen Grundlagen bereits transferiert. Einige kleinere Fragestellungen, die im Transferprojekt auf Grund der begrenzten Zeit nicht beantwortet werden konnten, müssen im Anschluss noch bearbeitet werden. Eine Kommerzialisierung ist von einer entsprechenden Kundennachfrage abhängig.

▪ **Schwierigkeiten und Projekthemmnisse**

Eine wesentliche Schwierigkeit bei der Projektdurchführung war die mit der Bewilligung verbundenen verkürzte Bearbeitungszeit. Hierdurch konnte die notwendige Effizienzsteigerung der numerischen Simulation nicht im erforderlichen Maße in den Transfer einbezogen werden. Die Einsatzfähigkeit einer Methode in der industriellen Anwendung wird aber insbesondere an der Effizienz gemessen.

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Rezensierte Veröffentlichungen und Buchveröffentlichungen

- [1] PANNIER, S.; GRAF, W.: Simulation-driven sequential metamodels for fuzzy reliability based optimisation tasks. *International Journal of Mathematical Modeling and Numerical Optimisation (accepted)*
- [2] KRÖGER, T.; PANNIER, S.; KALISKE, M.; ALTROGGE, I.; GRAF, W.; PREUSSER, T.: Optimal applicator placement in hepatic radiofrequency ablation on the basis of rare data. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 13 (2010), S. 431-440
- [3] SICKERT, J.-U.; PANNIER, S.; GRAF, W.; KALISKE, M.: Efficient numerical reliability based design of TRC strengthening layers for complex structures. In: BRAMESHUBER, W. (ed.): *2nd International Conference Textile Reinforced Concrete (ICTRC) RWTH Aachen, Proceedings RILEM Publications*. Bagnaux, 2010, pp. 307-318.
- [4] GRAF, W.; SICKERT, J.-U.; FREITAG, S.; PANNIER, S.; KALISKE, M.: NEURAL NETWORK APPROACHES IN STRUCTURAL ANALYSIS UNDER CONSIDERATION OF IMPRECISION AND VARIABILITY. IN: TSOMPANAKIS, Y.; TOPPING, B.H.V. (EDS.): *Soft Computing Methods for Civil and Structural Engineering*. CHANIA, STIRLINGSHIRE: SAXE-COBURG PUBLICATIONS, (2011), CHAPTER 4, PP. 59-85 – DOI: 10.4203/CSETS.29.4
- [5] 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.): *4th International Workshop on Reliable Engineering Computing*. Singapore, 2010, S. 554-573.
- [6] SICKERT, J.-U.; GRAF, W.; PANNIER, S.: Entwurf von Textilbetonverstärkungen - computerorientierte Methoden mit verallgemeinerten Unschärfemodellen. In: CURBACH, M.; JESSE, F. (Hrsg.) *Textilbeton - Theorie und Praxis*, 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4), TU Dresden, 2009, S. 313-324

b) Andere Veröffentlichungen

- [7] PANNIER, S.; GROSSENBACHER, K.; LIEBSCHER, M.; GRAF, W.; KALISKE, M.: Solution of inverse problems to detect permissible design spaces. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics* (2011)
- [8] PANNIER, S.; GRAF, W.; KALISKE, M.; GROSSENBACHER, K.; GANSER, M.; LIPP, A.; LIEBSCHER, M.; MÜLLERSCHÖN, H.: Affecting reliability of deep drawing processes in early design stages. In: 8th ASMO UK / ISSMO conference on Engineering Design Optimization. London, 2010. – Book of Abstracts and CDROM, pp. 1–10
- [9] PANNIER, S.; GROSSENBACHER, K.; LIEBSCHER, M.; GANSER, M.; GRAF, W.; MÜLLERSCHÖN, H.; LIPP, A.; KALISKE, M.: Increasing reliability of metal forming processes in early design stages. In: 9. LS-DYNA Anwenderforum. Bamberg, 2010, pp. C-II-17-C-II-27.
- [10] PANNIER, S.; SICKERT, J.-U.; GRAF, W.; KALISKE, M.: Tailored metamodels for fuzzy reliability based optimization tasks. In: *2nd International Conference on Engineering Optimization*. Lisbon, 2010, CD-ROM.
- [11] GRAF, W.; KALISKE, M.; SICKERT, J.-U.; PANNIER, S.; FREITAG, S.: Neural Networks and Imprecise Probability Concepts for the design of Industry-sized Structures. (invited lecture) In: *9th World Congress on Computational Mechanics - WCCM9*. Sydney, 2010, pp. 72-73.
- [12] PANNIER, S.; SICKERT, J.-U.; GRAF, W.: Patchwork approximation scheme for reliability assessment and optimization of structures. In: FURUTA, H.; FRANGOPOL, D. M.; SHINOZUKA, M. (eds.): *Safety, reliability and risk of structures, infrastructures and engineering systems*. Osaka, 2009, pp. 482-489.

c) Patente

5.2.3 Dokumentation weiterer Aktivitäten

Das Transferprojekt wird im Internet vorgestellt (<http://sfb528.tu-dresden.de/t7/index.html>) und mit einer aktuellen Veröffentlichungsliste wird auf erarbeitete Ergebnisse verwiesen.

Die erarbeiteten Ergebnisse wurden ebenfalls auf einer Vielzahl internationaler Konferenzen präsentiert, siehe Abschnitt 5.2.2. Aus dem Interesse anderer Konferenzteilnehmer ergab sich beispielsweise die Möglichkeit, bei Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG die Ergebnisse des Transferprojektes in einem Seminar am 09.12.2010 vorzustellen (Kontakt: Dr. Marcus Meyer). Für den Kooperationspartner BMW AG wurde eine Schulung am 04.11.2010 für das erstellte Demonstrationssoftwaretool durchgeführt. Auf dem Infotag Tiefziehen am 29.10.2010, organisiert durch den Kooperationspartner DYNAmore GmbH, wurden ebenfalls die Ergebnisse des Transferprojekts vorgestellt.

Der Kooperationspartner BMW AG hat nach Abschluss des Transferprojekts die TU Dresden beauftragt (vier Personenmonate), spezielle Weiterentwicklungen der Methoden vorzunehmen.

Die TU Dresden und der Kooperationspartner DYNAmore GmbH befinden sich derzeit in der Fertigstellungsphase eines Antrages für ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt. Ein Positivbe-

scheid in einer Vorabbegutachtung wurde bereits erteilt. Ziel ist es, Vorgehensweisen für offene Fragestellungen aus dem Transferprojekt zu entwickeln, um damit im Anschluss ein kommerzielles Softwaretool erstellen zu können.

T7

Graf / Kaliske

5.1 ALLGEMEINE ANGABEN ZUM SERVICEPROJEKT Y1

5.1.1 Photogrammetrische Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei mechanischen Untersuchungen textilverstärkter Bauteile

5.1.2 Projektleitung

Univ.-Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas

Geburtsdatum: 07.08.1959

Nationalität: Deutsch

Dienstanschrift: Technische Universität Dresden
Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
Helmholzstr. 10
01069 Dresden

Telefon: (03 51) 463-33680

Telefax: (03 51) 463-37266

E-Mail: hans-gerd.maas@tu-dresden.de

5.2 ENTWICKLUNG DES SERVICEPROJEKTS

5.2.1 Bericht

Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung bei der letzten Antragstellung

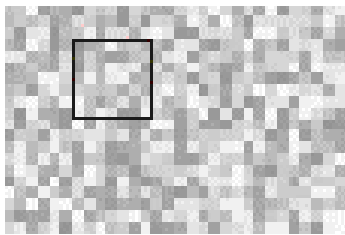
Rückblickend auf den Beginn der Arbeiten im SFB 528 kann festgestellt werden, dass in den vergangenen Jahren die Verfahren der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie zunehmend in vielen Industrie- und Forschungsbereichen des Bauwesens für Materialuntersuchungen eingesetzt werden [1-12]. Im Antrag wurde ausführlich der Kenntnisstand dargelegt [15]. Das früh erkannte und genutzte Potential zur flächenhaften Erfassung von Verformungs- und Risszuständen führte seit Beginn der Forschungsaktivitäten [13] im Serviceprojekt Y1 (TP D3) zu einem Entwicklungsstand, der heute vielschichtige, anspruchsvolle Messaufgaben unter Einbeziehung der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie ermöglicht. Die teilweise sehr hohen Anforderungen bei den im SFB 528 durchgeführten Untersuchungen führten zu einer kontinuierlichen Entwicklung von Methoden und Auswertemodulen der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie (2D/2.5D/3D), deren Anwendung und Weiterentwicklung ein zentraler Schwerpunkt des Serviceprojektes in der 4. Förderperiode war [15]. Konkrete Ziele waren die Entwicklung und Anwendung leistungsoptimierter Verfahren und fehlertoleranter Auswertemodule für photogrammetrische Verformungs- und Rissmessungen. In diesem Zusammenhang wurde ein neuer Algorithmus zur subpixelgenauen Bildzuordnung homologer Bildbereiche entwickelt, der eine Erfassung besonders kleiner Verformungszustände im Subpixelbereich geschwindigkeitsoptimiert ermöglicht. Neben den speziellen Auswertemodulen wurde ein zentrales, fehlertolerantes Modul (GUI) vollständig neu entwickelt, das die Einzelmodule

zusammenführt und durch die Unterstützung von leistungsfähigen Mehrprozessorsystemen den hohen Anforderungen bei der Auswertung umfangreicher Massenexperimenten gerecht wird.

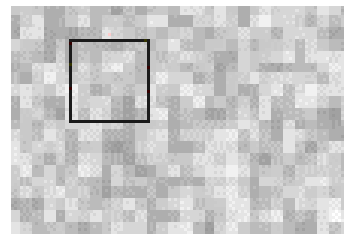
Ergebnisse sowie angewandte und ggf. neu entwickelte Methoden

1.) Entwicklung einer neuen Methode zur subpixelgenauen Bildmessung

Die Motivation zur Entwicklung des Subpixel-Algorithmus ergab sich einerseits durch die z. T. sehr hohen Anforderungen bei den durchgeführten Versuchen bzgl. der Messgenauigkeit, die bei entsprechenden Abbildungsverhältnissen eine hohe Messgenauigkeit im Subpixelbereich erfordern. Andererseits sind für rechenintensive Auswerteprozesse, besonders bei Massenexperimenten, leistungsoptimierte Algorithmen für die subpixelgenaue Bildzuordnung homologer Bildbereiche entscheidend für die praktische Anwendbarkeit. Die Idee für diesen Algorithmus begründet sich auf dem quasi-kontinuierlichen Verlauf der Ähnlichkeitsmaße für die Menge aller Subpixelpositionen, die z. B. mittels Kreuzkorrelation berechnet werden können. Der Ausgangspunkt für den entwickelten Algorithmus ist die bekannte pixelgenaue Position des Patches im Lastbild, die mit den bekannten Verfahren der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie bestimmt werden kann [1], [5]. Das prinzipielle Ziel der Bildzuordnung homologer Bildbereiche ist die subpixelgenaue Lagebestimmung der jeweiligen Patches des Referenzbildes im Lastbild (Bild 1).



(a) Patch im Referenzbild



(b) Patch im Lastbild

Bild 1: Bildzuordnung homologer Bildbereiche

Zur Bestimmung der subpixelgenauen Lage berechnet der neu entwickelte Algorithmus, ausgehend im Zentrum des Patches/Pixels (P_r^0 , s. Bild 2), in einem symmetrischen 3×3 Raster der Größe G_0 (Pixelgröße) für die 9 Rasterpunkte Ähnlichkeitsmaße unter Einbeziehung der jeweiligen Patches, z. B. mittels Kreuzkorrelation [3]. Der Rasterpunkt mit der besten Übereinstimmung liefert die neue Subpixelposition P_r^1 des Rasters G_1 (Bild 2). Im ersten Berechnungsschritt beträgt die Auflösung $P_a^0 = 1/2$ eines Pixels. Der nächste Berechnungsschritt erfolgt mit der Rastergröße $G_1 = G_0 \times 2^{-1}$ (Gl. 1) und liefert nach Wiederholung der vorgenannten Berechnungsschritte die Subpixelposition P_r^2 mit einer Auflösung von $P_a^1 = 1/4$ eines Pixels. Die Berechnungsschritte können theoretisch bis zu einer unendlichen Auflösung wiederholt werden, sind aber praktisch vom Auflösungsvermögen der verwendeten bildgebenden Sensoren und der Berechnungsqualität der Ähnlichkeitsmaße abhängig.

$$G_i = 2^{-i} \quad (i \geq 0) \tag{1}$$

$$P_a^i = 2^{-(i+1)} \quad (i \geq 0) \tag{2}$$

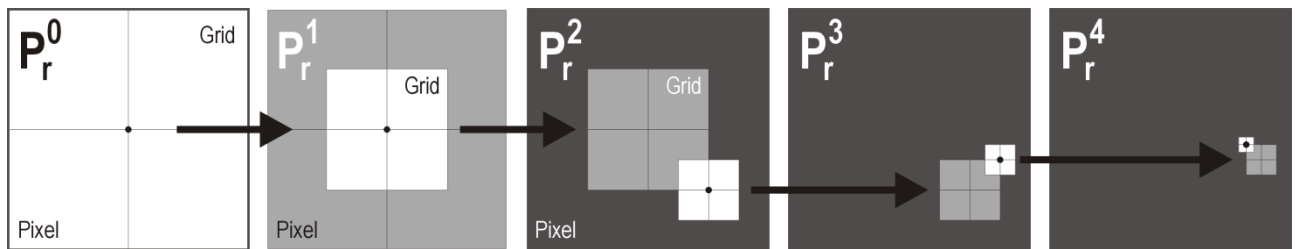


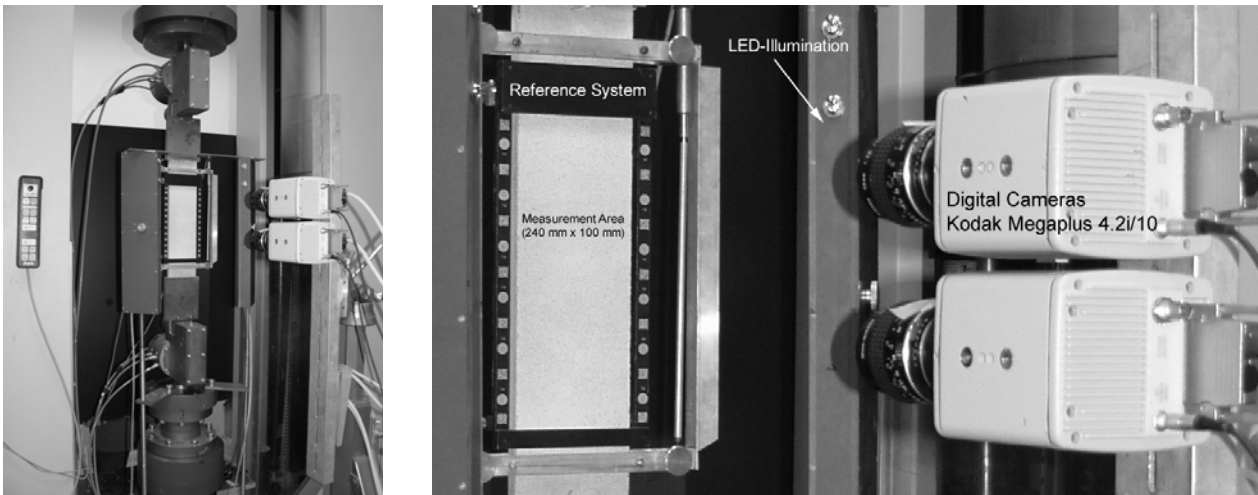
Bild 2: Subpixel-Algorithmus für die Bildzuordnung homologer Bildbereiche (Berechnungsschritte 1 bis 5)

Die Berechnung kann automatisch beendet werden, wenn sich bei der Berechnung der Ähnlichkeitsmaße keine Veränderungen mehr ergeben bzw. diese einen vorgegebenen Schwellwert erreichen. Durch den exponentiellen Ansatz weist der Algorithmus ein optimales zeitliches Verhalten auf und führt nach Gl. (2) bereits nach wenigen Berechnungsschritten zu einer hohen Subpixelauflösung. Die relative Pixelposition P_r berechnet sich aus der Summe der einzelnen relativen Pixelpositionen P_r^i .

2.) Photogrammetrische Verformungs- und Risserfassung bei Zugversuchen im Teilprojekt D5 (Mechtcherine)

In der 4. Phase wurden in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt D5 (Mechtcherine) Zugversuche an textilverstärkten Betonproben durch photogrammetrische Verformungs- und Rissmessungen unterstützt. Im Kontext dieser Untersuchungen wurden die bestehenden Aufnahme- und Auswertemodule für die spezielle Versuchsanordnung weiterentwickelt. Konkret wurde die entwickelte 2.5D-Objekterfassung [5] für den Einsatz von 2 Kameras erweitert. Hinsichtlich der Versuchsauswertung wurden spezielle Auswerteroutinen zur erweiterten Rissanalyse umgesetzt. Die Vorgaben dazu wurden vom TP D5 formuliert. Für die Auswertung der Versuche konnte der vorgenannte neue Algorithmus zur subpixelgenauen Bildmessung erfolgreich eingesetzt werden. Die realisierte Messaufgabe bestand in der Erfassung eines 100 mm x 240 mm großen Messbereiches (Bild 3). Zur Erreichung einer größtmöglichen Genauigkeit für den zu erfassenden Messbereich wurden zwei Kodak Megaplug 4.2i/10 in einer erweiterten 2.5D-Konfiguration eingesetzt [2]. Das ermöglicht eine effiziente Erfassung des Messbereiches unter Berücksichtigung der geforderten Messgenauigkeit [2, 5]. Bild 3 zeigt den Versuchsstand (a), die digitalen Kameras und einen für diese Versuche entworfenen Bezugsrahmens (b), der für die 2.5D-Erfassung erforderlich ist. Dieser dient zur Erfassung und Korrektur von Starrkörperbewegungen bzw. Kamerabewegungen (Erschütterungen). Ziel der photogrammetrischen Auswertung war die lastabhängige, profilbasierte Erfassung der Verformungsentwicklung (Bild 4) und eine weiterführende Rissanalyse. Ausgewählte Ergebnisse der Rissanalyse sind in Bild 5 zu sehen. Die geforderte Messauflösung für die Risserfassung betrug 10 μm und konnte für den überwiegenden Teil der durchgeführten Versuche erreicht bzw. gesteigert werden.

Y1
Maas



(a) Versuchsstand (TP D5) (b) Kamerakonfiguration mit Referenzsystem (2.5D)

Bild 3: Photogrammetrische Verformungs- und Risserfassung bei Zugversuchen (2.5D) an textilverstärkten Betonproben (TP D5)

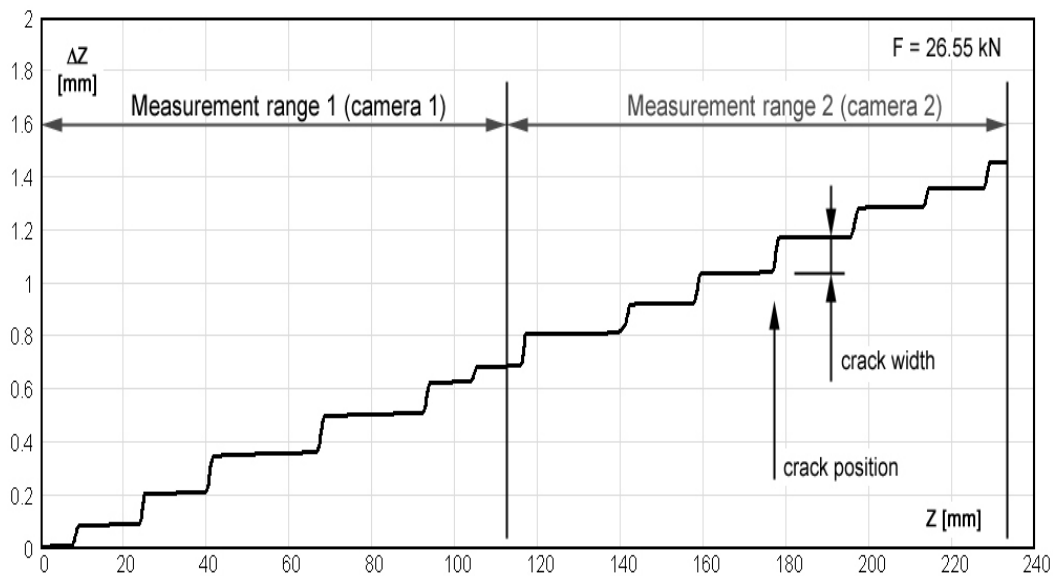
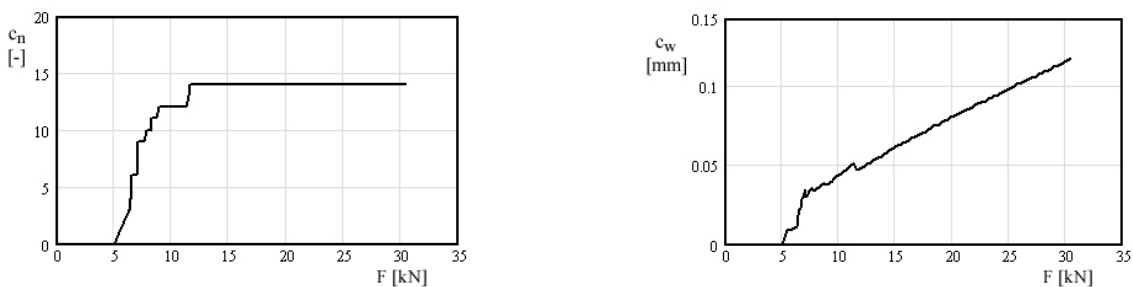


Bild 4: Ergebnis der photogrammetrischen Verformungsmessung (2.5D, 2 Kameras) für eine Laststufe (F = 26.55 kN)



(a) Rissanzahl (b) Mittlere Rissbreitenentwicklung

Bild 5: Photogrammetrische Rissanalyse bei Zugversuchen textilverstärkter Betonproben für alle erfassten Laststufen (TP D5/Y1)

Probleme und Schwierigkeiten bei der Umsetzung des Arbeitsprogramms

- Die laufenden experimentellen Untersuchungen und deren Auswertung erforderten teilweise eine parallele Weiterentwicklung der jeweiligen Auswertemodule. Dies wurde erforderlich, um die jeweiligen Besonderheiten der Versuche im Auswerteprozess optimal zu berücksichtigen bzw. in kritischen Fällen eine Auswertung erst zu ermöglichen. Dies führte teilweise dazu, dass – bedingt durch die Entwicklungsarbeit – es zu zeitlichen Verschiebungen zwischen Versuchsdurchführung und Auswertung gekommen ist.
- Im Zusammenhang mit den photogrammetrischen Messungen im TP B1 (Jesse) wurden für ausgewählte Proben zu den realisierten diskreten Verformungsmessungen (eigentliche Messaufgabe) nachträglich flächenhafte Rissanalysen vorgenommen. Aufgrund der ursprünglichen Messkonzeption (diskrete 3D-Verformungsmessung unter Verwendung von Messmarken) war keine künstliche Oberflächenmarkierung der Proben vorgesehen. Dies führte zu Schwierigkeiten bei der Auswertung und hat den Einsatz künstlicher Oberflächenmarkierungen - besonders bei schwach strukturierten Objektoberflächen - bestätigt.

Bezüge zu und Kooperationen mit anderen Arbeiten im Sonderforschungsbereich

Als Serviceprojekt wurden neben der beschriebenen Entwicklungsarbeit zahlreiche Versuche messtechnisch begleitet. Der Schwerpunkt lag bei den im TP 5 (Mechtcherine) durchgeführten Zugversuchen an textilverstärkten Betonproben, für die Verformungs- und Rissanalysen (profilbasiert) vorgenommen wurden. Im Zusammenhang mit den biaxialen Zugversuchen im Teilprojekt B1 (Jesse) wurden weiterführende Auswertungen zur Rissanalyse vorgenommen.

Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereichs

Aktuelle Veröffentlichungen [6-10] bestätigen das große Potential der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie zur Erfassung der Verformungs- und Rissentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen. In [6] werden z. B. diskrete und flächenhafte photogrammetrische Verformungsmessungen vorgestellt, die im Serviceprojekt Y1 (TP D3) in vergleichbarer Weise vorgenommen wurden [1, 5, 12-15]. Neue Ansätze zur flächenhaften Risserfassung finden sich in [7, 9, 10]. Die in [7] vorgestellte Methode basiert auf einer Interpretation sich abbildender Rissstrukturen in digitalen Bildern. In [8] wurde bereits ein System zur geometrisch basierten Risserfassung vorgestellt. Für kleine Risse – die nur durch wenige Pixel abgebildet werden – ergeben sich Einschränkungen. Aufgrund der z. T. sehr kleinen Rissbreiten ($\ll 1$ Pixel), die bei den Zug- und Schubversuchen von textilbewehrten Betonproben im SFB 528 zu erfassen sind, führten entsprechende Untersuchungen zur dynamischen Risserfassung bei Belastungsversuchen zu keinen brauchbaren Ergebnissen [13-15]. Die in [8] vorgestellten Untersuchungen wurden unter Leitung von Prof. Maas am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden vorgenommen und nutzen bei der flächenhaften Objekterfassung ein Dreiecksnetz als Basis für die Verformungs- und Rissanalyse. Eine neue Herangehensweise zur Risserkennung - unter Verwendung von neuronalen Netzen - wird in [10] vorgestellt, die im SFB 532 (RWTH Aachen) entwickelt wurde. Diese stellt eine Weiterentwicklung der seit der 2. Phase im SFB 532 begonnenen Untersuchungen zum Einsatz photogrammetrischer Verfahren dar [11]. Die im Serviceprojekt Y1 entwickelte Methode zur Risserfassung basiert auf einer kontinuierlichen Oberflächenabtastung mit einer auf die jeweilige Mess-

aufgabe abgestimmten Auflösung. Die i. d. R. erzielte hohe Messdichte ermöglicht die Berechnung von dichten Verschiebungsfeldern, deren Unstetigkeiten den Ausgangspunkt für die Rissdetektion und nachfolgende Rissanalyse darstellen [1, 2, 5, 12-15].

5.2.2 Projektrelevante eigene Publikationen

a) Rezensierte Veröffentlichungen und Buchveröffentlichungen

- [1] HAMPEL, U.; MAAS, H.-G.: Cascaded image analysis for dynamic crack detection in material testing. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (2008) 4, pp. 345-350
- [2] HAMPEL, U.: *Photogrammetrische Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen*. Technische Universität Dresden. Dissertation. (2008)

b) Andere Veröffentlichungen

- [3] HAMPEL, U.: Crack detection during load tests in civil engineering material testing with digital closed range photogrammetry – algorithms and applications. In: *ISPRS Commission V Symposium 2010, Newcastle (UK), 22.6-24.6.2010*, pp. 268 - 271
- [4] HAMPEL, U.: Photogrammetrische Messprozesse im bautechnischen Versuchswesen – Aufgaben, Anforderungen und Optimierung. In: Luhmann, Th. (Hrsg.): *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik; 8. Oldenburger 3D-Tage, 28.1-29.1.2009*. Heidelberg : Verlag Herbert Wichmann, 1. Aufl. (2009), S. 356-366 – ISBN 978-3-87907-478-5
- [5] HAMPEL, U.; MAAS, H.-G.: Dynamische Rissdetektion mittels photogrammetrischer Verfahren – Entwicklung und Anwendung optimierter Algorithmen. In: CURBACH, M. (Hrsg.), JESSE, F. (Hrsg.): *Textile Reinforced Structures: Proceedings of the 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.-5.6.2009*. SFB 528, Technische Universität Dresden, D-01062 Dresden : Eigenverlag (2009), S. 355-364 – ISBN 978-3-86780-122-5

5.2.3 Weitere projektrelevante Publikationen

- [6] BARAZZETTI, L.; SCAIONI, M.: Development and Implementation of Image-based Algorithms for Measurement of Deformations in Material Testing. In: *Sensors* 10/2010. pp. 7469-7495 - ISSN 1424-8220
- [7] NISHIKAWA, T.; YOSHIDA, J.; SUGIYAMA, T.; FUJINO, F.: *Concrete Crack Detection by Multiple Sequential Image Filtering. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. Blackwell Publishing Inc., (2011) - DOI:10.1111/j.1467-8667. 2011.00716.x
- [8] RIEDEL, B.; NIEMEIER W.; FRASER C.; DARE, P., CRONK, S.: 2003: Development of an imaging system for monitoring cracks in concrete structures. In: GRÜN, A.; KAHMEN H. (Eds.): *6th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques. Institute of Geodesy and Photogrammetry, Vol. II, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 22.–25.9.2003*. pp. 96–103
- [9] KOSCHITZKI, R.: Bildsequenzauswertung zur Rissdetektion bei Belastungsversuchen an Stahl- und Spannbetonbauteilen. In: LUHMANN, TH. (Hrsg.): *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik; Beiträge Oldenburger 3D-Tage (2011)*, Verlag Herbert Wichmann

- [10] LANGE, J.; BENNING, W.: Risserkennung mittels eines Neuronalen Netzes. In: LUHMANN, TH. (Hrsg.): *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik; Oldenburger 3D-Tage (2008)*, Wichmann Verlag Heidelberg
- [11] LANGE, J.; BENNING, W.; PETERS, J.: Photogrammetrie zur Deformations- und Rissanalyse bei textilverstärkten Betonbauteilen. In: LUHMANN, TH.; Müller, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage (2006)*, Wichmann Verlag Heidelberg
- [12] MAAS, H.-G.; HAMPEL, U.: Photogrammetric Techniques in Civil Engineering Material Testing and Structure Monitoring. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(1):39–45 (2006)
- [13] OPITZ, H.; MAAS, H.-G.; FUCHS, S.; HAMPEL, U.; SCHREIBER, F.; FLACH, B.; KASK, E.: Erfassung der Verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung von Baukonstruktionen bei baumechanischen Untersuchungen mit Hilfe digitaler photogrammetrischer Verfahren. In: CURBACH, M. (Hrsg.): *Arbeits- und Ergebnisbericht für Periode II/1999-I/2002 des Sonderforschungsbereiches 528. Technische Universität Dresden (2001)*, S. 449–496
- [14] MAAS, H.-G.; HAMPEL, U.: Bildgebende Verfahren zur Bewertung des mechanischen Verhaltens mit textilen Bewehrungen verstärkter Bauwerke (Digitale Photogrammetrie, Computertomographie, Infrarotthermographie). In: CURBACH, M. (Hrsg.): *Arbeits- und Ergebnisbericht für Periode II/2002-I/2005 des Sonderforschungsbereiches 528. Technische Universität Dresden (2004)*, S. 403–425
- [15] MAAS, H.-G.; HAMPEL, U.: Photogrammetrische Erfassung der verformungs-, Riss- und Schädigungsentwicklung bei baumechanischen Untersuchungen textilverstärkter Bauteile. In: CURBACH, M. (Hrsg.): *Arbeits- und Ergebnisbericht für Periode II/2005-I/2008 und Finanzierungsantrag für Periode II/2008-I/2011 des Sonderforschungsbereiches 528. Technische Universität Dresden (2008)*, S. 659-684

Y1

Maas