

Zuverlässigkeit des Klebeverbundes von nachträglich verstärkten Betonbauteilen

Sicherheitskonzept für den Verbundnachweis von oberflächlich geklebter Bewehrung

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Stefan Daus

aus Gelnhausen

D 17

Darmstadt 2007

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Technische Universität Darmstadt
Institut für Massivbau – Fachgebiet Massivbau
Petersenstraße 12
64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.tu-darmstadt.de>

Daus, Stefan:

Zuverlässigkeit des Klebeverbundes von nachträglich verstärkten Betonbauteilen –
Sicherheitskonzept für den Verbundnachweis von oberflächlich geklebter Bewehrung

1. Auflage Darmstadt, Eigenverlag, Heft 16

ISBN 978-3-9811881-2-7

Dr.-Ing. Stefan Daus

Geboren 1974 in Gelnhausen. Von 1993 bis 1999 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt. Von 1999 bis 2002 Tragwerksplanung bei der Philipp Holzmann Ingenieurgesellschaft für Bautechnik mbH in Neu-Isenburg. Von 2002 bis 2007 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Von 2004 bis 2006 freier Mitarbeiter im Ingenieurbüro König und Heunisch Planungsgesellschaft in Frankfurt/Main. Seit 2007 Tragwerksplanung bei Krebs und Kiefer, Beratende Ingenieure für das Bauwesen GmbH, Darmstadt.

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Die Grundlagen für diese Arbeit wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens gelegt, das vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) dankenswerter Weise gefördert wurde. Für die finanzielle Unterstützung und die sehr gute Zusammenarbeit während des Forschungsvorhabens bin ich sehr dankbar.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich sehr herzlich für die mir eröffneten Möglichkeiten, für das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie für seine Unterstützung und seine stete Diskussionsbereitschaft.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Seim danke ich sehr herzlich für sein Interesse an dieser Arbeit, seine fachlichen Anregungen und die Übernahme des Korreferates.

Meinen Kolleginnen und Kollegen bin ich für das vertrauensvolle und freundschaftliche Verhältnis sehr dankbar. Unsere gemeinsame Zeit am Institut für Massivbau wird mir in freudiger Erinnerung bleiben. Meinen Kollegen Herrn Dr.-Ing. Simon Glowienka, Herrn Dr.-Ing. Guido Hausmann und Herrn Dr.-Ing. Holger Schmidt danke ich darüber hinaus für die vielen fachlichen Diskussionen.

Herrn Dr.-Ing. Holger Schmidt, Frau Dipl.-Germ. Katja Simon und meiner Frau Monika danke ich sehr herzlich für die Durchsicht meiner Arbeit.

Von ganzem Herzen danke ich meinen Eltern Ingrid und Norbert Daus für ihre fortwährende, liebevolle Unterstützung sowie meiner lieben Frau Monika und meinen Kindern Simon und Anne für ihren Rückhalt, ihr Verständnis und ihre Geduld, ohne die diese Arbeit kaum möglich gewesen wäre.

Weiterstadt, Dezember 2007

Stefan Daus

Referent: Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Werner Seim

Tag der Einreichung: 29. Oktober 2007

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Dezember 2007

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	I
Formelzeichen und Abkürzungen	VIII
Abkürzungen	VIII
Große lateinische Buchstaben	VIII
Kleine lateinische Buchstaben	X
Griechische Buchstaben	XII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung	2
1.3 Vorgehensweise	3
2 Tragverhalten und Nachweis des Klebeverbundes	6
2.1 Allgemeines	6
2.2 Verbundtragverhalten	6
2.2.1 Verbund zwischen Beton und Betonstahl	6
2.2.2 Verbund oberflächiger Klebebewehrung	8
2.2.3 Zusammenwirken von Klebebewehrung und einbetonierter Bewehrung	16
2.3 Modellierung	17
2.3.1 Allgemeines	17
2.3.2 Modelle für den Endverankerungsnachweis	18
2.3.3 Modelle für den Verbundnachweis auf der gesamten Klebelänge	21
2.3.4 Modelle für das Zusammenwirken von Betonstahl und Klebebewehrung	23
2.4 Nachweiskonzepte	24
2.4.1 Allgemeines	24
2.4.2 Nachweiskonzept der aktuellen bauaufsichtlichen Zulassungen in Deutschland	24
2.4.3 Nachweiskonzept nach Niedermeier (2001)	25
2.4.3.1 Allgemeines	25

2.4.3.2	Bestimmung des Rissbildes	25
2.4.3.3	Bestimmung der Verbundbeanspruchung.....	28
2.4.3.4	Bestimmung des Verbundwiderstandes	28
2.4.3.5	Nachweis.....	31
2.4.4	Nachweiskonzept nach Neubauer (2000).....	31
2.4.4.1	Suche der Nachweisstellen.....	32
2.4.4.2	Bestimmung des Rissbildes	32
2.4.4.3	Bestimmung der Verbundbeanspruchung an den Nachweisstellen	33
2.4.4.4	Bestimmung des Verbundwiderstandes an den Nachweisstellen	33
2.4.4.5	Nachweis an den ausgewählten Stellen	34
2.4.5	Vergleich und Bewertung der Nachweiskonzepte nach Neubauer (2000) und Niedermeier (2001).....	34
2.4.6	Untersuchtes Nachweiskonzept.....	38
2.5	Zusammenfassung.....	40
3	Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie für tragende Bauteile	42
3.1	Allgemeines	42
3.2	Die Grenzzustandsfunktion.....	44
3.3	Statistische Verteilungsfunktionen	45
3.3.1	Normalverteilung	45
3.3.2	Logarithmische Normalverteilung (Lognormalverteilung).....	46
3.3.3	Gumbelverteilung.....	47
3.4	Die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit.....	49
3.4.1	Integration über den Versagensbereich	49
3.4.2	Bemessungspunkt und Sensitivitätsbeiwerte	50
3.4.3	Näherungsverfahren der Zuverlässigkeitstheorie.....	52
3.4.4	Simulationsmethoden	54
3.4.4.1	Direkte Monte-Carlo-Methode	54
3.4.4.2	Monte-Carlo-Methoden mit Importanzstichprobenwahl (Importance Sampling)	55
3.4.4.3	Adaptive Importance Sampling	58

3.4.4.4	Weitere Simulationsverfahren.....	59
3.5	Erforderliche Tragwerkszuverlässigkeit.....	59
4	Stochastische Modellierung der Basisvariablen.....	66
4.1	Allgemeines.....	66
4.2	Materialeigenschaften.....	66
4.2.1	Beton.....	66
4.2.2	Betonstahl S 500.....	71
4.2.3	Betonstahl S 220.....	72
4.2.4	Faserverbundwerkstoffe.....	73
4.2.4.1	CFK-Lamellen.....	73
4.2.4.2	Kohlefasergelege.....	73
4.2.5	Laschenstahl.....	74
4.2.6	Zusammenfassung der stochastischem Modelle der Materialeigenschaften.....	76
4.3	Einwirkungen.....	77
4.3.1	Allgemeines.....	77
4.3.2	Ständige Einwirkungen.....	77
4.3.3	Nutzlasten.....	78
4.3.3.1	Allgemeines.....	78
4.3.3.2	Modelle für den Maximalwert der Nutzlast.....	81
4.3.3.3	Modelle für den quasi-stationären Nutzlastanteil.....	88
4.3.4	Schnee.....	88
4.3.5	Zusammenfassung der stochastischem Modelle der Einwirkungen.....	89
4.4	Geometrische Größen.....	91
4.4.1	Betonquerschnitt.....	91
4.4.2	Betondeckung.....	91
4.4.3	Betonstahlbewehrung.....	92
4.4.4	Nutzhöhe des Betonstahls.....	92
4.4.5	Nutzhöhe der Klebebewehrung.....	92
4.4.6	Systemabmessungen.....	93

4.4.7	Klebebewehrung.....	93
4.4.8	Zusammenfassung der stochastischem Modelle der geometrischen Größen.....	95
5	Modellunsicherheiten	96
5.1	Allgemeines	96
5.2	Nachrechnung von Versuchen	97
5.3	Bemessungskonzept.....	98
5.4	Ergebnisse der Versuchsnachrechnungen.....	99
5.5	Bewertung der Ergebnisse	103
6	Sicherheitskonzepte.....	108
6.1	Allgemeines	108
6.2	Vorgehensweise zur Kalibrierung des Sicherheitskonzepts	110
6.3	Untersuchte Sicherheitskonzepte	110
6.3.1	Sicherheitsbeiwerte für den Verbundwiderstand	111
6.3.1.1	Teilsicherheitsbeiwerte für die Baustofffestigkeiten (TSBB).....	112
6.3.1.2	Pauschaler Sicherheitsbeiwert für den Verbundwiderstand (PSBV)...	115
6.3.2	Sicherheitsbeiwerte für die Querschnittstragfähigkeit	115
7	Probabilistische Analyse der untersuchten Sicherheitskonzepte.....	118
7.1	Allgemeines	118
7.2	Gewähltes Verfahren zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeiten ..	118
7.2.1	Adaptive Importance Sampling.....	119
7.2.2	Verbundnachweis	123
7.3	Vorgezogene Sensitivitätsanalyse.....	126
7.4	Untersuchungsumfang	129
7.4.1	Untersuchte Parameter	129
7.4.1.1	Querschnitt.....	130
7.4.1.2	Verstärkungsgrad	130
7.4.1.3	Vordehnungszustand beim Verstärken	131
7.4.1.4	Betondruckfestigkeit	132
7.4.1.5	Betonzugfestigkeit	132

7.4.1.6	Betonstahl	132
7.4.1.7	Mechanischer Bewehrungsgrad	133
7.4.1.8	Staffelung der Betonstahlbewehrung	133
7.4.1.9	Stabdurchmesser d_s der Längsbewehrung	134
7.4.1.10	Steifigkeit der Klebebewehrung	134
7.4.1.11	Biegeschlankheit	135
7.4.1.12	Lastbild und Höhe der Beanspruchung	135
7.4.1.13	Nutzlastanteil und Nutzungsart	135
7.4.2	Konzeption der Beispiele	136
7.5	Vergleich der Sicherheitskonzepte und Nachweisverfahren	139
7.5.1	Allgemeines	139
7.5.2	Sicherheitskonzept und Varianten des untersuchten Nachweisverfahrens	140
7.5.2.1	Einfeldplatten mit CFK-Lamellen	140
7.5.2.2	Einfeldplatten mit Stahllaschen	145
7.5.2.3	Einfeldplatten mit Kohlefasergelegen	148
7.5.2.4	Fazit	151
7.5.3	Vergleich mit alten allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen	152
7.6	Maßgebliche Einflussparameter beim Verbundnachweis	154
7.6.1	Allgemeines	154
7.6.2	Parameterstudie	154
7.6.2.1	Einfeldplatten mit CFK-Lamellen	154
7.6.2.2	Zweifeldplatten mit CFK-Lamellen	158
7.6.2.3	Einfeldplatten mit Stahllaschen	159
7.6.2.4	Einfeldplatten mit Kohlefasergelegen	161
7.6.2.5	Balken und Plattenbalken	163
7.6.2.6	Zusammenfassung	165
7.6.3	Sensitivitätsbeiwerte	165
8	Normative Umsetzung des untersuchten Nachweiskonzepts	170
8.1	Vorbemerkungen	170

Inhaltsverzeichnis

8.2	Anwendungsbereich.....	170
8.3	Grundlagenermittlung und Zustandserfassung	171
8.4	Nachweisführung	172
8.4.1	Allgemein.....	172
8.4.2	Bestimmung des Rissbildes.....	172
8.4.3	Bestimmung der Verbundbeanspruchung	176
8.4.4	Bestimmung des Verbundwiderstands	177
8.4.5	Nachweis	180
8.5	Sicherheitskonzept	181
8.6	Zugkraftdeckung und Anordnung der Klebebewehrung	182
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	184
	Literaturverzeichnis	188
	Anhang.....	196
	Anhang 1: Versuchsdaten	197
	Anhang 2: Ergebnisse – Versuchsnachrechnungen	201
	Anhang 3: Zuverlässigkeitsanalyse – Beispielbauteile.....	203
	Anhang 4: Zuverlässigkeitsanalyse – Ergebnisse für Einfeldplatten.....	217