

DORTMUNDER MODELL BAUWESEN

# ARCHITEKT UND INGENIEUR

Matthias Bettin

Zum Zugstoß der Bewehrung bei Bauwerken der Verkehrsinfrastruktur mit großer Betondeckung

# **Zum Zugstoß der Bewehrung bei Bauwerken der Verkehrsinfrastruktur mit großer Betondeckung**

Von der Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen der  
Technischen Universität Dortmund  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Matthias Bettin

Prüfungskommission:

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jeanette Orlowsky

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günter Rombach

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Oktober 2023

Dortmund, 2023

Die *Schriftenreihe Betonbau* der Technischen Universität Dortmund – Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen umfasst Veröffentlichungen des Lehrstuhl Betonbau in den Bereichen, Lehre, Forschung und Praxis.

### **Herausgeber**

Univ. Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer

Lehrstuhl Betonbau

Technische Universität Dortmund

August-Schmidt-Str. 8

44227 Dortmund

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2024 Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen an der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

Heft 15 der Schriftenreihe Betonbau

ISSN 1876-7886

ISBN 978-3-8440-9384-1

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99011 - 0 • Telefax: 02421 / 99011 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Kurzfassung

Die nach dem derzeit für Ingenieurbauwerke der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland gültigen Regelwerk *DIN EN 1992-2* und *DIN EN 1992-2/NA* bemessenen erforderlichen Übergreifungslängen für Betonstahl sind im internationalen Vergleich, vor allem bei kleinen lichten Abständen zwischen den gestoßenen Stäben und großen Stabdurchmessern ( $\emptyset \geq 16\text{mm}$ ), mit Abstand am größten. Dies gilt für die unmittelbar benachbarten Länder wie Dänemark, die Niederlande, die Schweiz aber auch beispielsweise die USA. Schäden, die auf die teilweise deutlich geringeren Übergreifungslängen in diesen Ländern zurückzuführen sind, sind nicht bekannt. Die deutschen Regelungen in *DIN EN 1992-2/NA* sollen nicht nur die Tragfähigkeit, sondern auch die Gebrauchstauglichkeit abdecken. Dabei gehen die deutschen Festlegungen bezüglich der Betondeckung auf der sicheren Seite liegend konservativ von  $c = 1,0 \emptyset$  aus. Der günstige Einfluss einer größeren Betondeckung darf nach Eurocode 2 mit dem Faktor  $\alpha_2$  berücksichtigt werden. Dieser Faktor ist nach dem deutschen Nationalen Anhang allerdings generell mit  $\alpha_2 = 1,0$  anzusetzen, während er nach Eurocode 2 Werte bis 0,7 annehmen kann. Ein weiterer wesentlicher Unterschied ergibt sich in Abhängigkeit von Stoßanteil und Stabdurchmesser aus dem Stoßfaktor  $\alpha_6$  bei kleinen lichten Abständen ( $a < 8 \emptyset$ ) zwischen den gestoßenen Stäben. Daher stellt sich die Frage nach einer Überprüfung der im internationalen Vergleich sehr konservativen deutschen Regelungen bei Ingenieurbauwerken mit üblicherweise deutlich größeren Betondeckungen als  $c = 1,0 \emptyset$ , da sich alleine bei Anwendung des Faktors  $\alpha_2$  um bis zu 30% kürzere Übergreifungslängen ergeben können. Daraus können unter Umständen ausführungstechnisch und konstruktiv günstigere Bewehrungsanordnungen und teilweise deutliche Kostenreduzierungen infolge des geringeren Materialbedarfs resultieren was sich nicht zuletzt auch hinsichtlich der Ressourceneffizienz vorteilhaft auswirkt. Anhand umfangreicher großformatiger Versuche werden in der vorliegenden Arbeit die derzeit gültigen deutschen konservativen Regelungen sowie die Regelungen im Eurocode 2 analysiert.

## Abstract

The required lap lengths for reinforcing steel, which are currently governed by *DIN EN 1992-2* and *DIN EN 1992-2 / NA* regulations for civil engineering structures in Germany, are by far the largest in international comparison, especially in the case of small clearances between the lapped bars. This applies to the directly neighboring countries such as Denmark, the Netherlands, Switzerland but also, for example, the USA. Damages due to the sometimes significantly shorter overlap lengths in these countries are not known. The German regulations in *DIN EN 1992-2 / NA* should cover not only the load-bearing capacity but also the serviceability. The German specifications regarding concrete cover on the safe side are conservative of  $c = 1.0 \varnothing$ . The favorable influence of a larger concrete cover may be considered according to Eurocode 2 with the factor  $\alpha_2$ . However, according to the German National Annex, this factor is generally assumed to be  $\alpha_2 = 1.0$ , while according to Eurocode 2 it can be up to 0.7. Another significant difference results from the factor  $\alpha_6$  at small clearances ( $a < 8 \varnothing$ ) between the lapped bars, depending on percentage of lapped bars and bar diameter. This raises the question of the need for a review of the German regulations for engineering structures with concretes that are usually much larger than  $c = 1.0 \varnothing$ , since the overlap lengths can be reduced up to 30% only if the factor  $\alpha_2$  is used. Under certain circumstances, this may result in design-related and structurally favorable reinforcement arrangements and in some cases significant cost reductions as a result of the lower material requirement. This is also beneficial concerning sustainability. The present paper analyzes the currently valid German conservative regulations on the basis of extensive large-scale experiments.

## Vorwort

Die konstruktive Durchbildung, das Bewehren des Betons, ist von zentraler Bedeutung für die Qualität des Tragwerks. Die Regelungen zum Bewehren in den Normen des Betonbaus können in zwei Schwerpunkte unterteilt werden, *allgemeine Bewehrungsregeln* und *spezielle Konstruktionsregeln* für die verschiedenen Bauteilarten. Speziell die allgemeinen Bewehrungsregeln zur *Verankerung* und den *Übergreifungsstößen* stellen wesentliche Grundlagen zum Bewehren im Stahlbetonbau dar, die bereits in der alten nationalen Normenreihe DIN 1045 enthalten waren und in deren jeweiligen Neuausgaben bis in die heute aktuellen nationalen Anhänge der Normenreihe DIN EN 1992, basierend auf *Eurocode 2*, im Wesentlichen immer wieder fortgeschrieben wurden. Aus dem derzeit gültigen nationalen Anhang für Deutschland resultiert eine erhebliche Verschärfung der Regelungen für Übergreifungsstöße gegenüber *Eurocode 2*, so dass sich im internationalen Vergleich derzeit für Deutschland die größten Übergreifungslängen ergeben.

Deutlich zu Tage trat dieses Problem bei einem aktuellen großen grenzüberschreitenden Projekt, der 18 km langen Fehmarnbeltquerung, ein Absenktunnel, der künftig die dänische Insel Lolland mit der deutschen Insel Fehmarn verbinden soll. Der Tunnel, der jeweils etwa zur Hälfte auf deutschem und dänischen Staatsgebiet liegt, wird neben einer vierspurigen Autobahn auch eine zweigleisige Bahnstrecke aufnehmen. Der Tunnel wird gemäß Staatsvertrag nach dänischem Regelwerk gebaut. Zur Erlangung des Baurechts auf deutschem Hoheitsgebiet war nachzuweisen, dass nach dänischem Regelwerk ein vergleichbares Sicherheitsniveau entsprechend den Anforderungen nach deutschen Regelwerken erreicht wird. Da sich der zugrunde liegende *Eurocode 2* aufgrund der unterschiedlichen nationalen Anhänge zwischen Dänemark und Deutschland unterscheidet, ergaben sich nach deutschem Regelwerk in weiten Bereichen deutlich größere Übergreifungslängen, mit erheblichen wirtschaftlichen Auswirkungen.

Zum Nachweis eines dem deutschen vergleichbaren Sicherheitsniveaus wurden dadurch projektbezogen systematische Versuchsreihen zu den Übergreifungsstößen in Verbindung mit theoretischen Untersuchungen ausgelöst, die in Kooperation mit Femern A/S und der TU Dortmund durchgeführt wurden. Zuständiger Bearbeiter an der TU Dortmund war Herr Bettin.

Da das Thema „kürzere Übergreifungslängen“ von allgemeinem Interesse auch für alle anderen Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland ist, wurde im Rahmen eines FE-Auftrags der BAST eine weitere Versuchsreihe mit theoretischen Untersuchungen beauftragt, die ebenfalls von Herrn Bettin bearbeitet wurden.

Kürzere Übergreifungslängen sind sowohl konstruktiv als auch ausführungstechnisch von Vorteil. Zusätzlich sind die möglichen Einsparpotentiale bei der Bewehrung nicht nur ökonomisch, sondern auch im Hinblick auf nachhaltiges Bauen und Ressourceneffizienz von Interesse.

Die größeren Übergreifungslängen nach deutschem nationalen Anhang resultieren aus den Anforderungen, dass nicht nur im GZT eine ausreichende Tragfähigkeit sichergestellt ist, sondern auch im GZG die zulässige Rissbreite an den Stoßenden unter Dauerlast nicht überschritten wird. Nach seinerzeitiger deutscher Auffassung decken die kürzeren Übergreifungslängen in

*Eurocode 2* lediglich den GZT ab, erfüllen aber nicht die Anforderungen im GZG hinsichtlich der zulässigen Rissbreite an den Stoßenden unter Dauerlast.

Maßgebend für die erforderlichen Übergreifungslängen  $l_0$  nach derzeit gültigem Nachweisformat sind in erster Linie die Faktoren  $\alpha_2$  für Betondeckung  $c$  und  $\alpha_6$  für lichten Stababstand  $a$  sowie Stabdurchmesser  $\emptyset$ . Die unterschiedlichen Festlegungen für diese Faktoren stellen die entscheidenden Unterschiede zwischen dem *Eurocode 2* und dem zugehörigen deutschen nationalen Anhang dar.

Vor diesem Hintergrund geht Herr Bettin in seiner Arbeit einer Überprüfung der sehr konservativen deutschen Regelungen speziell bei Ingenieurbauwerken der Verkehrsinfrastruktur mit großen Betondeckungen nach. Ziel ist die Bewertung der derzeit konservativen deutschen Regelungen im Vergleich zu denen im Original *Eurocode 2*, wie sie in den anderen europäischen Ländern angewendet werden.

Wesentliches Ziel der von Herrn Bettin durchgeführten experimentellen und theoretischen Untersuchungen ist die Klärung der Frage, ob die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit auch mit den kürzeren Übergreifungslängen nach dem original *Eurocode 2* erfüllt werden können.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer

Oktober 2023

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>III</b>
<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation, Anlass und Ziele.....	1
1.2 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit.....	2
<b>2 Stand des Wissens</b> .....	<b>3</b>
2.1 Verbund zwischen Stahl und Beton .....	3
2.1.1 Der Verbund als Grundlage des Verbundwerkstoffs Stahlbeton .....	3
2.1.2 Die Wirkungsweise des Verbunds .....	4
2.1.3 Die Ursachen von Verbundbeanspruchungen .....	5
2.1.4 Die Verbundmechanismen .....	5
2.1.5 Die Versagensmechanismen.....	7
2.1.6 Die Einflussgrößen auf den Verbund .....	13
2.2 Übergreifungsstöße mit gerippten Betonstahl und geraden Stabende.....	17
2.2.1 Versagensmechanismen .....	18
2.2.2 Lastübertragungsmodell.....	21
2.2.3 Tragfähigkeit von Übergreifungsstößen.....	25
2.2.3.1 Einfluss der Übergreifungslänge .....	26
2.2.3.2 Einfluss der Betondruck und -zugfestigkeit.....	26
2.2.3.3 Einfluss des Stabdurchmesser .....	26
2.2.3.4 Einfluss der Lage der Stöße beim Betonieren .....	26
2.2.3.5 Einfluss des Stoßabstands und der seitlichen Betondeckung .....	27
2.2.3.6 Einfluss des Abstands zwischen den gestoßenen Stäben.....	27
2.2.3.7 Einfluss der Art der Belastung .....	27
2.2.3.8 Einfluss des Stoßanteils .....	28
2.2.3.9 Einfluss einer Querbewehrung im Stoßbereich .....	28
2.2.3.10 Einfluss der Betondeckung an Balken-bzw. Plattenober- oder -	
unterseite .....	29
2.2.4 Die Gebrauchstauglichkeit von Übergreifungsstößen.....	30
2.2.5 Ansatz zur genaueren Ermittlung der Übergreifungslängen nach	
Eligehausen .....	32
2.2.6 Neuere Untersuchungen zum Einfluss des Stoßanteils nach Cairns .....	34
<b>3 Stand der Normung</b> .....	<b>37</b>
3.1 Normative Ermittlung der Verbundfestigkeit im GZT .....	37
3.1.1 DIN EN 1992-1-1 .....	37
3.1.2 Model Code 2010: 2013 .....	37



3.2	Normative Ermittlung der Übergreifungslänge von Rippenstahlstößen mit geraden Stabenden .....	38
3.2.1	Allgemeines.....	38
3.2.2	EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA .....	39
3.2.3	Model Code 2010: 2013.....	41
3.2.4	SIA 262:2013 .....	42
3.2.5	ACI 318M: 2011 .....	43
3.2.6	Historische Entwicklung im deutschen Regelwerk .....	44
3.2.6.1	Verbundspannungen und Grundmaß der Verankerungslänge .....	44
3.2.6.2	Ansatz der Verbundspannungen .....	45
3.2.6.3	Einfluss der Betondeckung .....	48
3.2.6.4	Einfluss des seitlichen Stababstandes und des Stoßanteils.....	48
3.2.6.5	Erkenntnisse aus Untersuchungen von Rehm/Eligehausen aus <i>DAfStb 291</i> und <i>Rehm 1977</i> .....	50
3.2.6.6	Erkenntnisse aus Untersuchungen aus <i>Stöckl 1972</i> .....	53
3.2.7	Vergleich der unterschiedlichen Berechnungsansätze an Beispielen .....	55
<b>4</b>	<b>Eigene experimentelle Untersuchungen zum Verbundverhalten.....</b>	<b>58</b>
4.1	Versuchsprogramm .....	58
4.2	Versuchskörperbeschreibung .....	58
4.2.1	Geometrie.....	58
4.3	Materialkennwerte .....	61
4.3.1	Beton.....	61
4.3.2	Betonstahl .....	61
4.4	Herstellung der Versuchskörper .....	63
4.5	Beschreibung des Versuchsstands .....	63
4.6	Messtechnik .....	64
4.6.1	Allgemeines.....	64
4.6.2	Schlupfmessung .....	64
4.6.3	Aufzeichnung der Rissentwicklung.....	65
4.7	Versuchsdurchführung .....	65
4.8	Versuchsergebnisse .....	66
4.8.1	Verbundspannungs-Schlupf Beziehungen.....	66
4.8.2	Einfluss der Betondruckfestigkeit auf die Verbundfestigkeit .....	68
4.8.3	Einfluss der Betondeckung auf die Verbundfestigkeit .....	71
4.8.4	Rissverhalten.....	73
4.8.5	Einfluss einer nicht angeschweißten Querbewehrung.....	75
4.8.6	Verbundspannung nach EN 1992-1-1 .....	75
4.8.7	Zusammenfassung, Wertung.....	76
<b>5</b>	<b>Spezifische Versuche für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – eigene Versuche an der TU Dortmund .....</b>	<b>77</b>
5.1	Entwicklung der systematischen Versuchsreihen.....	77
5.1.1	Definition der Randbedingungen .....	77

5.1.2	Wahl der Prüfkörperabmessungen .....	77
5.1.3	Vordimensionierung der kombinierten Übergreifungsstöße .....	80
5.2	Herstellung der Versuchsträger .....	82
5.2.1	Wahl von Bewehrung und Beton .....	84
5.2.1.1	Bewehrung .....	84
5.2.1.2	Beton.....	84
5.3	Versuchsaufbau und Messtechnik .....	85
5.3.1	Lagerung der Versuchsträger.....	85
5.3.2	Anordnung der Pressen .....	86
5.3.3	Messtechnik .....	86
5.3.3.1	Allgemeines.....	86
5.3.3.2	Kraftmessdosen .....	87
5.3.3.3	Dehnungsmessstreifen (DMS) .....	87
5.3.3.4	Induktive Wegaufnehmer .....	89
5.3.3.5	Optische Messung .....	90
5.3.3.6	Messung der Rissbreiten.....	91
5.3.4	Festlegung der Einwirkung für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ..	92
5.4	Versuchsergebnisse .....	92
5.4.1	Tragverhalten.....	92
5.4.2	Traglasten im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT).....	96
5.4.3	Rissbreiten für ausgewählte Laststufen .....	99
<b>6</b>	<b>Eigene spezifische Versuche zu Übergreifungsstößen unter Dauerlast.....</b>	<b>102</b>
6.1	Motivation.....	102
6.2	Entwicklung der systematischen Versuchsreihen.....	102
6.2.1	Definition der Randbedingungen .....	102
6.2.2	Wahl der Prüfkörperabmessungen.....	103
6.3	Materialkennwerte .....	103
6.3.1	Betonstahl .....	103
6.3.2	Beton.....	104
6.4	Versuchsstand .....	104
6.5	Versuchsdurchführung.....	105
6.6	Versuchsergebnisse .....	106
6.6.1	Tragverhalten.....	106
6.6.1.1	Tragfähigkeit .....	106
6.6.1.2	Last- Durchbiegungsverhalten .....	107
6.6.1.3	Spannungen im Stoßbereich .....	107
6.6.1.4	Dauerstandversuch.....	109
6.6.2	Rissbreiten .....	111
6.6.2.1	Träger B14 .....	112
6.6.2.2	Träger B15 .....	112
6.7	Vergleich mit baugleichen statischen Versuchen .....	116

6.7.1	Versagen im GZT .....	116
6.7.2	Last- Durchbiegungsverhalten .....	117
6.7.3	Spannungen im Stoßbereich .....	117
6.7.4	Rissbreiten.....	117
6.7.5	Zusammenfassung und Wertung .....	117
<b>7</b>	<b>Ergänzende eigene Versuche zu Übergreifungsstößen bei 2-lagiger Bewehrung und großer Betondeckung.....</b>	<b>119</b>
7.1	Problemstellung .....	119
7.2	Unterschiede zwischen den Regelungen der EN 1992-2 und DIN EN 1992-2/NA für die Ausbildung von Übergreifungsstößen bei mehrlagiger Bewehrung .....	120
7.3	Stand des Wissens bei Stößen in mehrlagiger Bewehrung.....	121
7.4	Entwicklung der systematischen Versuchsreihen.....	121
7.4.1	Definition der Randbedingungen .....	121
7.4.2	Wahl der Prüfkörperabmessungen .....	122
7.4.3	Wahl von Bewehrung und Beton .....	124
7.4.3.1	Betonstahl .....	124
7.4.3.2	Beton.....	124
7.5	Versuchsaufbau und Messtechnik .....	126
7.6	Versuchsergebnisse .....	126
7.6.1	Tragverhalten.....	126
7.6.2	Traglasten im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT).....	128
7.6.3	Rissbreiten im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG).....	132
7.6.4	Bewertung der Ergebnisse .....	134
<b>8</b>	<b>Projektbezogene Versuchsreihe für einen Tunnel mit besonders großer Betondeckung.....</b>	<b>136</b>
8.1	Vorbemerkung.....	136
8.2	Entwicklung der systematischen Versuchsreihen.....	137
8.2.1	Definition der Randbedingungen .....	137
8.2.2	Bemessung der kombinierten Übergreifungsstöße.....	137
8.2.3	Wahl der Prüfkörperabmessungen.....	139
8.2.4	Wahl von Bewehrung und Beton.....	143
8.2.4.1	Beton.....	144
8.2.4.2	Betonstahl .....	144
8.3	Versuchsaufbau und Messtechnik .....	145
8.3.1	Messung der Rissbreiten.....	145
8.3.2	Messung der Betonstahldehnung .....	145
8.4	Versuchsergebnisse .....	146
8.4.1	Traglasten im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT).....	146
8.4.2	Rissbreiten im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG).....	149
8.5	Zusammenfassung und Wertung .....	152

<b>9</b>	<b>Auswertung der Stahlspannung im Bruchzustand nach Model Code 2010..</b>	<b>154</b>
<b>10</b>	<b>Ergänzende eigene Versuche zu Übergreifungsstößen unter dem Gesichtspunkt des Einflusses einer Querbewehrung im Stoßbereich .....</b>	<b>157</b>
10.1	Motivation.....	157
10.2	Entwicklung der systematischen Versuchsreihen.....	158
10.2.1	Definition der Randbedingungen .....	158
10.2.2	Wahl von Bewehrung und Beton .....	160
10.3	Versuchsaufbau und Messtechnik .....	160
10.4	Versuchsergebnisse .....	160
10.4.1	Versuchsträger B16.....	160
10.4.1.1	Tragverhalten.....	160
10.4.1.2	Rissbildung.....	163
10.4.2	Versuchsträger B17.....	164
10.4.2.1	Tragverhalten.....	164
10.4.2.2	Rissbildung.....	167
10.4.3	Zusammenfassung und Vergleich.....	169
10.4.3.1	Rissbreiten .....	169
10.4.3.2	Traglasten im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT).....	170
10.5	Zusammenfassung und Wertung .....	173
<b>11</b>	<b>Nummerische Simulation von Zugstößen .....</b>	<b>174</b>
11.1	Zweck der Untersuchungen .....	174
11.2	Modelierung der Versuchsträger .....	174
11.2.1	Materialmodelle .....	174
11.2.1.1	Beton.....	174
11.2.1.2	Betonstahl.....	175
11.2.1.3	Verbund .....	175
11.2.2	Lösungsverfahren.....	176
11.2.3	Strukturmodell .....	178
11.3	Validierung des FE Modells durch Versuchsnachrechnungen.....	178
11.3.1	Modellierung des Betons .....	178
11.3.2	Modellierung des Betonstahls .....	179
11.3.3	Verbundeigenschaften.....	180
11.3.4	Aufbringung der Belastung.....	182
11.3.5	Ergebnisse der Nachrechnung von Versuch B2.....	182
11.3.6	Ergebnisse der Nachrechnung von Versuch B1 .....	184
11.3.7	Ergebnisse der Nachrechnung von Versuch B10.....	186
11.3.8	Zusammenfassung der Ergebnisse des Validierungsberechnungen .....	188
11.4	Parametervariation.....	188
11.4.1	Variation der Betonzugfestigkeit.....	188
11.4.2	Variation der Betondeckung.....	191
11.4.3	Kombination von Zugfestigkeit und Betondeckung.....	194

11.4.4	Numerische Simulationen zur Tragfähigkeit bei veränderlicher Zugkraft längs des Stoßes .....	197
<b>12</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>199</b>
12.1	Zusammenfassung.....	199
12.2	Ausblick.....	200
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>201</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>207</b>
<b>A</b>	<b>Anhang BEAM END TESTS.....</b>	<b>209</b>
A.1	Auswertung der Verbundspannungen aus den Beam-End Tests .....	209
A.2	Verbundspannungs – Schlupfkurven der Beam End-Tests .....	210
A.2.1	Versuchskörper BEc20a .....	210
A.2.2	Versuchskörper BEc20b .....	210
A.2.3	Versuchskörper BEc40a .....	211
A.2.4	Versuchskörper BEc40b .....	211
A.2.5	Versuchskörper BEc60a .....	212
A.2.6	Versuchskörper BEc60b .....	212
A.2.7	Versuchskörper BEc80a .....	213
A.2.8	Versuchskörper BEc80b .....	213
A.2.9	Versuchskörper BEc40a2530.....	214
A.3	Bruchbilder der Beam-End Tests .....	215
A.4	Rissbildung Beam-End Tests .....	217
A.4.1	Versuchskörper BEc20a .....	217
A.4.2	Versuchskörper BEc20b .....	220
A.4.3	Versuchskörper BEc40a .....	223
A.4.4	Versuchskörper BEc40b .....	226
A.4.5	Versuchskörper BEc60a .....	229
A.4.6	Versuchskörper BEc60b .....	232
A.4.7	Versuchskörper BEc80a .....	235
A.4.8	Versuchskörper BEc80b .....	238
A.5	Eigenschaften des Frischbetons.....	241
A.6	Übersicht der verwendeten Betonchargen .....	241
A.7	Spannungs-Dehnungs-Linie desverwendeten Betonstahls Ø20 .....	242
A.8	Umrechnung der mittleren Würfeldruckfestigkeit in die mittlere Zugfestigkeit / Abgleich mit der an Prüfkörpern ermittelten Spaltzugfestigkeit .....	242
<b>B</b>	<b>Anhang Vierpunktbiegeversuche .....</b>	<b>243</b>
B.1	Ergebnisse Versuchsträger B1.....	243
B.2	Ergebnisse Versuchsträger B2.....	253
B.3	Ergebnisse Versuchsträger B3.....	263
B.4	Ergebnisse Versuchsträger B4.....	277

B.5	Ergebnisse Versuchsträger B5 .....	290
B.6	Ergebnisse Versuchsträger B6 .....	304
B.7	Ergebnisse Versuchsträger B7 .....	318
B.8	Ergebnisse Versuchsträger B8 .....	332
B.9	Ergebnisse Versuchsträger B9 .....	339
B.10	Ergebnisse Versuchsträger B10.....	353
B.11	Entwicklung der Betonfestigkeiten.....	366
B.12	Eigenschaften des Frischbetons.....	371
B.13	Betonzusammensetzung .....	371
B.14	Schal- und Bewehrungspläne der Versuchsträger.....	372
B.15	Ergebnisse der Versuchsträger B14 und B15.....	374
B.16	Entwicklung der Betonfestigkeiten der Chargen C1-C3, Balken B11-B13....	383
B.17	Ergebnisse Versuchsträger B11.....	385
B.18	Ergebnisse Versuchsträger B12.....	388
B.19	Ergebnisse Versuchsträger B13.....	391