

**Trag- und Verformungsverhalten spezieller Verbundelemente
für Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken unter Kurzzeit-,
Ermüdungs- und Langzeitbeanspruchung**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen
der BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Jens Müller

geboren am 28/04/1982

in Friedrichroda

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karl Rautenstrauch
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann
3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
- Tag der Disputation: 15/05/2014

Danksagung

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand im Rahmen meiner fast siebenjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Holz- und Mauerwerksbau der Bauhaus-Universität Weimar.

Ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei meinem Mentor Professor Dr.-Ing. Karl Rautenstrauch, der diese Arbeit betreute, zahlreiche Ideen anregte und stets ein offenes Ohr für die Diskussion von Problemen, Lösungsansätzen und Ergebnissen hatte. Auch für die Übernahme des Hauptreferates möchte ich mich an dieser Stelle bedanken.

Für das Interesse an meiner Arbeit sowie für die Übernahme der Koreferate bedanke ich mich ebenfalls bei Professorin Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann von der Universität Stuttgart sowie bei Professor Dr.-Ing. Peer Haller von der Technischen Universität Dresden.

Bedanken möchte ich mich bei allen Kollegen der Professur Holz- und Mauerwerksbau für den stets freundlichen Umgang und die positive Arbeitsatmosphäre. An dieser Stelle herausheben möchte ich Frau Antje Simon, die mir in meiner Zeit als Studierender das Forschungsfeld des Holz-Beton-Verbundes eröffnete und damit die Grundlagen für meine wissenschaftliche Tätigkeit legte. Herzlich danken möchte ich Herrn Markus Jahreis, der mich v.a. bei der Versuchsplanung und -durchführung, der fachgerechten Herstellung der Probekörper und den wöchentlichen Langzeitmessungen unterstützte. Gleiches gilt für Herrn Mike Opel, dessen hohes Fachwissen auf dem Themengebiet der numerischen Simulation zur Lösung mancher Problemstellung innerhalb dieser Arbeit beitrug. Ebenso sei den Studierenden Tino Dannenberg, Frank Schmidt, Thomas Kirsten und Torsten Stöpel gedankt, die im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten und/ oder Tätigkeit als wissenschaftliche Hilfskraft zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt den Mitarbeitern der Versuchstechnischen Einrichtung (VTE) der Bauhaus-Universität Weimar unter der Leitung von Herrn Wolf-Dieter Vogler für die Unterstützung bei der Planung sowie hauptsächlich für die Durchführung der experimentellen Bauteilversuche unter statischer sowie zyklischer Belastung, die auch manchen Wochenenddienst miteinschloss.

Wesentliche experimentelle Ergebnisse der in vorliegender Arbeit vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens 16266 BR „Trag-, Verformungs- und Ermüdungsverhalten spezieller Verbundelemente für Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken“ erarbeitet, welches durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) via der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) und dem internationalen Verein für Technische Holzfragen (iVTH e. V.) als Nachfolgeorganisation der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung (DGfH e. V.) gefördert wurde. Für die gewährte finanzielle Unterstützung sei den vorgenannten Institutionen recht herzlich gedankt.

Ein besonderer Dank gilt meinem früheren Kommilitonen und guten Freund Sebastian Böning, der als Kollege von der Professur Verkehrsbau immer den Blick des Brückenbauers in unsere zahlreichen Fachdiskussionen einfließen ließ und auf diese Weise zu mancher Problemlösung beitrug.

Für die aufwendige Korrekturlesung der gesamten Arbeit, die so manchen Rechtschreib-, grammatikalische und orthographische Fehler aufdeckte, möchte ich mich ganz herzlich bei meinem Bruder René Müller bedanken.

Ganz besonders danke ich meiner gesamten Familie, vor allem meiner Partnerin Grit Häfner, für die Unterstützung, den Rückhalt sowie das entgegengebrachte Verständnis in dieser freizeitarmer Lebensphase.

*Jens Müller
Weimar, 2014*

Kurzfassung

Infolge der zyklischen Belastung aus dem Verkehr spielt gerade im Straßenbrückenbau die Ermüdung der eingesetzten Baustoffe eine entscheidende Rolle. Daher widmet sich diese Arbeit insbesondere dem holzseitigen Ermüdungstragverhalten des im Holz-Beton-Verbundstraßenbrückenbau einsetzbaren Verbundelementes Dübelleiste. Neben einem konventionellen und bereits praxiserprobten Verbundfugenaufbau wurde ein neuartiges, durch Polymerbeton modifiziertes, Fugendesign untersucht. Anhand von Scherversuchen unter oft wiederholter Beanspruchung wurden Ermüdungskennlinien erarbeitet, welche die Anwendbarkeit des Ermüdungsnachweiskonzeptes der Holzbrückennorm für beide Fugenaufbauten ermöglicht. In Kombination mit den Resultaten einer separaten Untersuchung unter konstanter Langzeitbelastung, einer statistischen Analyse sowie numerischen Simulationen an einem praxisnahen Brückenquerschnitt werden konkrete Bemessungs- und Konstruktionshinweise für den Holz-Beton-Verbundstraßenbrückenbau vorgestellt.

Abstract

The fatigue behaviour of the construction materials is very important, especially in bridge building due to the cyclic stress as a consequence of traffic loads. For this reason this thesis deals with the fatigue behaviour of the timber part of the stud connector, which can be used as connector for timber-concrete composite (TCC) road bridges. Beside the conventional construction of the joint a new modified design characterized by the arrangement of a layer consisting of polymer concrete (PC) was investigated. S-N-lines for both types of the connection were elaborated with the help of push-out-tests under pulsating stress. This method allows the application of the fatigue verification according to the standard for timber bridges. With the results of separate investigations under constant long-term loading, statistical analysis and numeric simulations at a practical example detailed advices regarding design and construction of a timber-concrete composite road bridge are presented.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis.....	XVI
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Lösungsweg.....	2
2 Stand der Forschung	3
2.1 Holz-Beton-Verbundkonstruktionen	3
2.1.1 Holz-Beton-Verbund im Hochbau.....	3
2.1.2 Holz-Beton-Verbund im Brückenbau	8
2.1.3 Wirkungsweise und prinzipielles Tragverhalten	11
2.1.4 Berechnungsmöglichkeiten und -modelle.....	13
2.1.4.1 Theorie des elastischen Verbundes.....	13
2.1.4.2 γ - Verfahren	13
2.1.4.3 Stabwerksmodell.....	14
2.1.4.4 Finite-Elemente-Modelle und weitere Berechnungsverfahren	16
2.1.5 Normativ anzusetzende Steifigkeiten und weitere Randbedingungen ..	17
2.2 Ermüdungsfestigkeit von Holz.....	19
2.3 Ermüdungsfestigkeit von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen	23
2.4 Langzeittragverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen	26
2.5 Zusammenfassung.....	27
3 Experimentelle Untersuchungen zum Kurzzeit- und Ermüdungstragverhalten	29
3.1 Kurzzeitscherversuche	29
3.1.1 Vorüberlegungen und Randbedingungen.....	29
3.1.2 Versuchsplanung und -aufbau.....	31
3.1.3 Geometrie und Wahl der Probekörper.....	33
3.1.3.1 Serien E-K-A und E-K-B	34
3.1.3.2 Serie E-K-PC	35
3.1.4 Messverfahren und Belastung.....	36
3.1.4.1 Messverfahren und -equipment	36
3.1.4.2 Festlegung der Höchstlast und des Lastregimes	37
3.1.5 Versuchsergebnisse und Auswertung	40
3.1.5.1 Verschiebungsmodul und Anfangsschlupf.....	40
3.1.5.2 Bruchlasten	44
3.1.5.2.1 <i>Gegenüberstellung theoretischer und experimentell gewonnener</i> <i>Bruchlasten</i>	48

3.1.5.2.2	Zugkräfte.....	49
3.1.5.3	Photogrammetrische Auswertung.....	50
3.1.5.4	Zusammenfassung	52
3.2	Scherversuche unter zyklischer Beanspruchung	54
3.2.1	Intention, Versuchsumfang und Lastregime	54
3.2.2	Versuchsergebnisse und Auswertung	56
3.2.2.1	Überblick und Dokumentation ausgewählter Versuche	56
3.2.2.2	Relativverschiebungen, Anfangsschlupf und Verschiebungsmoduln	62
3.2.2.3	Schädigungsmodell.....	65
3.2.2.4	Ermittlung einer reduzierten Verbundelementsteifigkeit auf Basis der dissipierten Energie	69
3.2.2.5	Bruchversuch und Resttragfähigkeit nach der oft wiederholten Belastung	72
3.2.2.6	Ermüdungskennlinien für beide Verbundfugenausbildungen	75
3.2.2.7	Gegenüberstellung von Ermüdungskennlinien diverser Verbundelemente.....	78
4	Experimentelle Untersuchungen zum Langzeittragverhalten	80
4.1	Einführung.....	80
4.2	Langzeitscherversuche	80
4.2.1	Randbedingungen	80
4.2.2	Klima- und Holzfeuchteverlauf während der Langzeitbeanspruchung ..	82
4.2.3	Relativverschiebung unter Langzeitbeanspruchung.....	83
4.2.3.1	Verschiebungszunahme unter konstanter Langzeitbeanspruchung ..	83
4.2.3.2	Approximation der Verformung und Extrapolation von Kriechfaktoren	86
4.2.3.3	Entlastung nach Langzeitbeanspruchung.....	89
4.3	Untersuchungen nach Beendigung der Langzeitbeanspruchung	90
4.3.1	Verbundelementsteifigkeiten nach der Langzeitbeanspruchung.....	90
4.3.2	Bruchversuch und Resttragfähigkeit.....	92
4.4	Zusammenfassung.....	95
5	Statistische Analyse ausgewählter Versuchsergebnisse	97
5.1	Einleitung	97
5.2	Ausreißerproblematik.....	97
5.3	Statistische Analyse mit Verteilungsfunktionen.....	99
5.3.1	Kumulierte Häufigkeit	99
5.3.2	Stetige Verteilungen	100
5.3.3	Zuordnung der Zufallsvariablen zur Verteilungsfunktion	102

5.4 Verschiebungsmoduln diverser Verbundelementtypen.....	105
6 Bemessungskonzept für Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken.....	107
6.1 Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit	107
6.1.1 Betonteilquerschnitt.....	107
6.1.2 Holzteilquerschnitt	108
6.1.3 Verbundelement	110
6.1.3.1 Fall 1 – Vorholzabscheren	110
6.1.3.2 Fall 2 – Holzdruckversagen	111
6.1.3.3 Fall 3 – Betondruckversagen	113
6.1.3.4 Fall 4 – Abscherversagen der Kopfbolzendübel	114
6.1.3.5 Fall 5 – Abheben der Betonplatte	114
6.2 Ermüdungsnachweis.....	115
6.2.1 Generelles Vorgehen bei der Nachweisführung gegen Ermüdung	115
6.2.2 Vereinfachter Ermüdungsnachweis auf Basis der Holzbrückennorm..	116
6.2.3 Verknüpfung der Forschungsergebnisse mit dem bestehenden Nachweiskonzept nach Norm.....	118
6.2.4 Genauerer Ermüdungsnachweis	119
7 Parameteruntersuchungen an einer praxisnahen Holz-Beton-Verbundstraßenbrücke	122
7.1 Einführung, Randbedingungen und Vorstellung der untersuchten Konstruktion	122
7.2 Berechnungen mit dem Stabwerksmodell.....	124
7.2.1 Berechnungsmodell und zugehörige Randbedingungen.....	124
7.2.2 Lastfälle und Lastfallkombinationen	125
7.2.2.1 Charakteristische Einzellastfälle	125
7.2.2.2 Lastquerverteilungslinie	129
7.2.2.3 Lastfallkombinationen	130
7.2.3 Schnittgrößen- und Verformungsverläufe.....	131
7.2.3.1 Charakteristische Schnittgrößen aus Einzellastfällen	131
7.2.3.2 Bemessungsschnittgrößen aus Lastfallkombinationen.....	133
7.2.4 Variation diverser Parameter	134
7.2.4.1 Einfluss der ermittelten Verbundelementsteifigkeiten	134
7.2.4.2 Einfluss des Verbundelementkriechens.....	138
7.2.4.3 Einfluss der Schädigung infolge zyklischer Beanspruchung.....	139
7.2.4.3.1 Berechnungen ohne Berücksichtigung des „dynamischen“ Faktors	140
7.2.4.3.2 Berechnungen mit Berücksichtigung des „dynamischen“ Faktors..	143
7.2.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung	144
7.3 Berechnungen mit einem Volumenmodell	145

7.3.1	Grundlagen, Randbedingungen und Eigenschaften des Volumenmodells	145
7.3.2	Vorstellung der einzelnen Modellvarianten.....	148
7.3.2.1	Isotrope und orthotrope Materialeigenschaften	148
7.3.2.2	Randbedingungen für die Lagerung der einzelnen Modellvarianten	151
7.3.3	Gegenüberstellung von Stabwerksmodell und Solid	152
7.3.3.1	Gegenüberstellung von Stabwerk und einzelnen Varianten des Volumenmodells	153
7.3.3.1.1	<i>Verformungen (GZG, Anfangszustand)</i>	153
7.3.3.1.2	<i>Schnittgrößen (GZT, Anfangszustand)</i>	154
7.3.3.1.3	<i>Schubkräfte (GZT, Anfangszustand)</i>	157
7.3.3.2	Gegenüberstellung von Stabwerk und Vorzugsvariante des Volumenmodells	159
7.3.3.2.1	<i>Verformungen (GZG, Anfangs- und Endzustand)</i>	159
7.3.3.2.2	<i>Bemessungsschnittgrößen (GZT, Anfangs- und Endzustand)</i>	159
7.3.3.2.3	<i>Bemessungsschubkräfte (GZT, Anfangs- und Endzustand)</i>	161
7.3.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	163
8	Zusammenfassung	165
8.1	Resultate und Schlussfolgerungen	165
8.2	Ausblick.....	170
	Literaturverzeichnis	i

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Holz-Beton-Verbundkonstruktionen, systematisiert nach Art der Verbindung von Beton und Holz.....	4
Abb. 2-2: HBV-Schubverbinder nach [Z-9.1-557, 2012] aus [TiComTec® 2013].....	5
Abb. 2-3: Verbundelement Kerne in Anlehnung an [Michelfelder 2006].....	5
Abb. 2-4: Blockverleimter Brettschichtholzträger mit dem Verbundelement Dübelleiste aus [Simon, Barthl, Rautenstrauch 2009]	10
Abb. 2-5: Pilotprojekt Birkbergbrücke Wippra im Mai 2010, 17 Monate nach Fertigstellung	10
Abb. 2-6: Tragverhalten und maßgebende Schnittkräfte am hybriden Verbundtragwerk in Anlehnung an [Rautenstrauch et al. 2004] und [Holschemacher et al. 2013]	12
Abb. 2-7: Stabwerksmodell in Anlehnung an [Rautenstrauch et al. 2004]	15
Abb. 2-8: Statisches Ersatzsystem für das Verbundelement ohne Berücksichtigung der Gurtsteifigkeit.....	15
Abb. 2-9: Statisches Ersatzsystem für das Verbundelement mit Berücksichtigung der Gurtsteifigkeit	15
Abb. 2-10: Schematisches Spannungs-Zeit-Schaubild eines Dauerschwingversuches und mögliche Bereiche der Schwingbeanspruchung nach [DIN 50100:1978]	20
Abb. 2-11: Abminderungswert k_{fat} in Abhängigkeit von Ermüdungsklasse und Schwingspielzahl nach [Mohr 2001]	21
Abb. 2-12: Abminderungswert k_{fat} in Abhängigkeit von Ermüdungsklasse und Spannungsverhältnis nach [Mohr 2001]	21
Abb. 2-13: Abminderungswerte k_{fat} für verschiedene Beanspruchungen nach [Kreuzinger, Mohr 1994], [Mohr 2001] und der aktuellen Holzbrückennorm...22	22
Abb. 2-14: Slip-Block-Test, Querschnitt und Ansicht einer Probe aus [Tommola, Salokangas, Jutila 1999].....	23
Abb. 3-1: Abstände der Kopfbolzendübel	29
Abb. 3-2: Dübelleiste verbaut in Birkbergbrücke Wippra (Kopfbolzendübeldurchmesser 19 mm)	30
Abb. 3-3: Push-Out-Versuch und Annahme für den internen Kraftfluss	31
Abb. 3-4: Versuchsaufbau für Schertests unter statischer und zyklischer Belastung.....	31
Abb. 3-5: Aufbau der Versuchskörper bestehend aus Brettschichtholz	33
Abb. 3-6: Probe mit passgenau eingefräster Kerne und eingelegter Dübelleiste (Serien E-K-A und E-K-B)	34
Abb. 3-7: Probe mit Polymerbetonschicht in der last-übertragenden Zone zwischen Dübelleiste und Holz (Serie E-K-PC)	34
Abb. 3-8: Herstellung des Polymerbetons	36

Abb. 3-9: Verbundmatrix des Polymerbetons (12,5-fache Vergrößerung)	36
Abb. 3-10: Relativverschiebungsmessung mit IWT und Kraftmesseinrichtung an den Bolzen	37
Abb. 3-11: Photogrammetrie-Messfeld mit applizierten Messpunkten	37
Abb. 3-12: Prinzip der 2D-Photogrammetrie aus [Franke, B 2008]	37
Abb. 3-13: Photogrammetrisches Messsystem mit telezentrischem Objektiv	37
Abb. 3-14: Gesamtüberblick über die rechnerischen Versagenslasten	39
Abb. 3-15: Verwendetes Lastregime für die Kurzzeitscherversuche	39
Abb. 3-16: Statische Lastrampen der Probe E-K-B-1	40
Abb. 3-17: Entwicklung Verschiebungsmodul K_{ser} des Probekörpers E-K-B-1	40
Abb. 3-18: Statische Lastrampen der Probe E-K-PC-1	41
Abb. 3-19: Entwicklung Verschiebungsmodul K_{ser} der Probe E-K-PC-1	41
Abb. 3-20: Gemittelte Werte der Verschiebungsmoduln der einzelnen Serie bezogen auf laufenden Meter Dübelleistenlänge	42
Abb. 3-21: Übersicht über den Anfangsschlupf	42
Abb. 3-22: Gemittelte Last-Verschiebungs-Kurven aller Serien (Erstbelastung)	43
Abb. 3-23: Gemittelte Last-Verschiebungs-Kurven aller Serien (Bruchversuch)	43
Abb. 3-24: Bruchversuch der Probe E-K-B-1	44
Abb. 3-25: Bruchversuch der Probe E-K-PC-1	44
Abb. 3-26: Bruchfläche E-K-B-1	45
Abb. 3-27: Vorholzriss E-K-B-1 (Ansicht Hirnholz)	45
Abb. 3-28: Übergangsstreifen zwischen Holz- und Polymerbeton, Eindringtiefe des Epoxidharzes (25-fache Vergrößerung)	45
Abb. 3-29: Variierende Eindringtiefen des Epoxidharzes und leere Luftporen (25-fache Vergrößerung)	45
Abb. 3-30: Erreichte Bruchlasten F_1 und (F_2) aller Proben pro Verbundelement	46
Abb. 3-31: Maximale Verschiebungen w_1 und (w_2) zugehörig zu den Bruchlasten F_1 und F_2	46
Abb. 3-32: Verlauf der Schubfestigkeit in Abhängigkeit der Querdruck- (-) resp. Querzugspannungen (+) auf Basis der Versuchsergebnisse von [Spengler 1982]	48
Abb. 3-33: Gegenüberstellung theoretischer und experimentell ermittelter Bruchlasten infolge Abscheren des Vorholzes	49
Abb. 3-34: Maximale Zugkräfte in den Bolzen [kN] in Relation zur Bruchlast F_1 pro Verbundelement [kN/20cm]	49
Abb. 3-35: Dehnungsverlauf quer zur Faser der Probe E-K-A-3 (Bruchversuch, Timestep 300), maximale Querzugdehnung im Kervengrund	51
Abb. 3-36: Dehnungsverlauf quer zur Faser der Probe E-K-PC-4 (Bruchversuch, Timestep 341), maximale Querzugdehnung im Inneren	51

Abb. 3-37:Rissbildung, E-K-PC-1 (Timestep 225).....	51
Abb. 3-38:Rissbildung, E-K-PC-1 (Timestep 300).....	51
Abb. 3-39:Bruchlasten der Kurzzeitscherversuche pro Probekörper in [kN]	55
Abb. 3-40:Kraft-Zeit-Diagramm der Belastung für die drei ausgewählten Laststufen.....	55
Abb. 3-41:Lastregime für die Versuche unter oft wiederholter Beanspruchung in Anlehnung an [DIN 50100:1978].....	56
Abb. 3-42:Kraft-Verformungskurven der Probe E-D-1_40% (statische Zwischenmessungen innerhalb der zyklischen Belastung).....	57
Abb. 3-43:Entwicklung der Verbundelementsteifigkeit der Probe E-D-1_40%	57
Abb. 3-44:Kraft-Verformungskurve der Probe E-D-1_40% (Bruchversuch)	58
Abb. 3-45:Abgeschertes Vorholz der Probe E-D-1_40% nach statischem Bruchversuch	58
Abb. 3-46:Gemittelte Last-Verschiebungs-Kurven der Proben E-D-5 und E-D-PC-5.....	58
Abb. 3-47:Makroriss entlang des Vorholzes ausgehend vom Kervengrund, Probe E- D-5 nach 2.282.500 Schwingspielen	58
Abb. 3-48:Verformungsverlauf aus „dynamischer“ Messung von E-D-PC-5_50%	59
Abb. 3-49:Verformungsverlauf aus „dynamischer“ Messung von E-D-PC-12_50%	59
Abb. 3-50:Kraft-Verformungskurven der statischen Messungen der Probe E-D-PC- 12_50%	59
Abb. 3-51:Entwicklung der Verbundelementsteifigkeit der Probe E-D-PC-12_50%.....	59
Abb. 3-52:Rissbildung am IWT 2 der Probe E-D-PC-12_50% nach 5.073.000 Schwingspielen	60
Abb. 3-53:Gegenseitige Relativverschiebung im Bruchzustand bei 5.161.512 Lastwechseln	60
Abb. 3-54:Überblick über die durchgeführten zyklischen Versuche und ertragene Schwingspielzahlen	60
Abb. 3-55:Ermüdungsbruch Probe E-D-PC-12_50%	61
Abb. 3-56:Bruchflächen in der LR- und LT-Ebene des Probekörpers E-D-PC-15_60%	61
Abb. 3-57:Struktur und Ausrichtung des Holzes aus [Grosse 2005]	62
Abb. 3-58:Gemittelte Maximalwerte der Verschiebung in Abhängigkeit der Lastspielanzahl	62
Abb. 3-59:Initialverschiebungen (Anfangsschlupf)	62
Abb. 3-60:Mittelwerte der Verschiebungsmoduln bezogen auf lfd. Meter Kervenbreite aller Serien, sortiert nach Belastungszyklus	64
Abb. 3-61:Entwicklung der Verbundelementsteifigkeit über die Schwingspielzahl (Prinzipskizze).....	64
Abb. 3-62:Definition der Schädigung aus [Gross, Seelig 2011]	66

Abb. 3-63: Abnahme des Elastizitätsmoduls infolge der Schädigung durch Überschreiten des linearen Materialverhaltens durch steigende einwirkende Spannung	67
Abb. 3-64: Abnahme des Verschiebungsmoduls infolge der Schädigung durch die oft wiederholte Belastung.....	67
Abb. 3-65: Schädigungsgrad je Probe in Abhängigkeit vom Belastungsniveau	68
Abb. 3-66: Prinzip der Energiedissipation aus Erstbelastung und Lastwechsel bis zur letzten statischen Belastung	69
Abb. 3-67: Übersicht über die bei den Durchläufern während der zyklischen Belastung dissipierten Energie	69
Abb. 3-68: Bestimmung der reduzierten Verbundelementsteifigkeit nach [Simon 2008]..	70
Abb. 3-69: Reduzierte Verbundelementsteifigkeiten im Vergleich zur jeweiligen Initialsteifigkeit.....	70
Abb. 3-70: Übersicht über die Bruchlasten F_1 (Lastabfall, Zahlenwert im Diagramm angegeben) und F_2 (Bruch, qualitativ) pro Verbundelement aller zyklisch belasteten Proben.....	72
Abb. 3-71: Übersicht über gemittelte Bruchlasten (Serienmittel) unter Einbeziehung der Durchläufer (16 Versuche), zusätzlich Darstellung der Kurzzeitscherversuche.....	72
Abb. 3-72: Bruchversuch der Probe E-D-PC-5_50%	74
Abb. 3-73: Bruchversuch der Probe E-D-PC-14_50%	74
Abb. 3-74: Probe E-D-PC-14_50% vor dem Test, Keilzinkung oberhalb der Lasteinleitung.....	74
Abb. 3-75: Probe E-D-PC-14_50% nach Bruchversuch und zyklischer Belastung	74
Abb. 3-76: Kennwerte der „Wöhlerlinie“ aus [Radaj 2003]	75
Abb. 3-77: Bruchlasten pro Verbundelement (VE) aus den Kurzzeitscherversuchen	75
Abb. 3-78: Vorschläge für die „Wöhlerlinien“ für den Mittelwert und für das 5 %-Quantil der Ergebnisse für Serie E	76
Abb. 3-79: Vorschläge für die „Wöhlerlinien“ für den Mittelwert und für das 5 %-Quantil der Ergebnisse für Serie E-PC.....	76
Abb. 3-80: Gegenüberstellung von Ermüdungskennlinien verschiedener Verbundelementtypen.....	78
Abb. 4-1: Probekörpergeometrie der Langzeitscherversuche als Push-Out-Test aus [Simon 2008].....	80
Abb. 4-2: Langzeitscherversuche unter den Randbedingungen der Nutzungsklasse 2 im Außenklima unter einer Bedachung, Lastaufbringung mit Federkonstruktion	81
Abb. 4-3: Stahlfeder, Messstellen für Relativverschiebung und Permanentelektroden..	81
Abb. 4-4: Messwerte der Temperatur T, relativen Luftfeuchte (RH) und Holzfeuchte u der Langzeitversuche.....	82

Abb. 4-5: Relativverschiebung zwischen Beton und Holz (Serie S – Schubleiste).....	84
Abb. 4-6: Belastung der Langzeitscherproben über Federkonstruktion (Serie S – Schubleiste)	84
Abb. 4-7: Mittlere Zunahme der Relativverschiebung zwischen den Verbundpartnern unter Langzeitbelastung.....	84
Abb. 4-8: Genaue und approximierte Verläufe der Kriechbeiwerte der drei untersuchten Verbundelementtypen	87
Abb. 4-9: Extrapolation des Kriechbeiwertes der Serie S (Schubleiste) für eine Dauer von 20.000 Tagen (54,8 Jahre).....	87
Abb. 4-10:Entlastung der Probe S-L1 nach 2.079 Tagen unter konstanter Belastung....	89
Abb. 4-11:Entlastung der Proben nach Langzeitbeanspruchung (Serie S – Schubleiste)	89
Abb. 4-12:Entlastete Probe S-L1 vor Ermittlung des Verschiebungsmoduls mit anschließendem Bruchversuch.....	90
Abb. 4-13:Lastregime zur Ermittlung von Verschiebungsmodul und Bruchlast nach [DIN EN 26891:1991].....	90
Abb. 4-14:Initialbelastung und statische Lastrampen der Proben der Serien K, S und X	91
Abb. 4-15:Gemittelte Verschiebungsmoduln der Langzeitversuche.....	91
Abb. 4-16:Initialsteifigkeiten vor und nach der Langzeitbeanspruchung (Serie S)	92
Abb. 4-17:Gemittelter Verschiebungsmodul der Initialbelastung (Serienvergleich mit 2006).....	92
Abb. 4-18:Bruchversuch der Proben der Serien K (Kerve) und S (Schubleiste).....	93
Abb. 4-19:Versagen der Probe S-L1 infolge Abscheren des rechten Vorholzes auf Schub	93
Abb. 4-20:Kurz- und Langzeitbruchlasten sowie konstante Belastung (Serienmittelwerte).....	94
Abb. 4-21:Verschiebungen im Bruchzustand	94
Abb. 4-22:Bruchversuch der Proben der Serie X (X-Verbinder).....	95
Abb. 4-23:Am Druckstab ausgelöstes Betondruckversagen (Probe X-L3).....	95
Abb. 5-1: Kumulierte Häufigkeit der Verbundelementsteifigkeit der Initialbelastung für beide Verbundfugenkonfigurationen (Serien E und E-PC)	99
Abb. 5-2: Verteilungsdichte $f(x)$ von Normal-, Extremwert- (Kleinst- und Größtwerte) und Lognormalverteilung	101
Abb. 5-3: Verteilungsfunktion $F(x)$ von Normal-, Extremwert- (Kleinst- und Größtwerte) und Lognormalverteilung	101
Abb. 5-4: Kumulierte Häufigkeit und für Normal- sowie Extremwertverteilung umgerechnete kumulierte Häufigkeit des Verschiebungsmoduls K_{ser} der Initialbelastung (Serie E).....	102

Abb. 5-5: Kumulierte Häufigkeit und für Lognormalverteilung umgerechnete kumulierte Häufigkeit des Verschiebungsmoduls K_{ser} der Initialbelastung (Serie E).....	102
Abb. 5-6: Bestimmtheitsmaße für Zufallsvariable Verschiebungsmodul K_{ser} (Serie E).103	
Abb. 5-7: Bestimmtheitsmaße für Zufallsvariable Verschiebungsmodul K_{ser} (Serie E-PC).....	103
Abb. 5-8: Statistische Werte der Zufallsvariable Verschiebungsmodul unter Zugrundelegung der Lognormalverteilung für Serie E	104
Abb. 5-9: Statistische Werte der Zufallsvariable Verschiebungsmodul unter Zugrundelegung der Lognormalverteilung für Serie E-PC	104
Abb. 5-10: Statistische Werte der Zufallsvariable Bruchlast unter Zugrundelegung der Lognormalverteilung für Serie E-K.....	104
Abb. 5-11: Statistische Werte der Zufallsvariable Bruchlast unter Zugrundelegung der Lognormalverteilung für Serie E-K-PC.....	104
Abb. 5-12: Charakteristische Verschiebungsmoduln K_{ser} ausgewählter Verbundelementtypen.....	105
Abb. 6-1: Mögliche Versagensmechanismen bei dem Verbundelement Dübelleiste (Grafik in Anlehnung an [Simon 2008]).....	110
Abb. 6-2: Berechnungsmöglichkeiten der Holzdruckfestigkeit unter einem Winkel zur Faser.....	112
Abb. 6-3: Ablaufschema zum Ermüdungsnachweis von Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken	115
Abb. 7-1: Querschnitt und Geometrie der untersuchten Holz-Beton-Verbundstraßenbrücke	124
Abb. 7-2: Statische Modellierung der Holz-Beton-Verbundstraßenbrücke mit dem Stabwerksmodell.....	124
Abb. 7-3: Berechnung der mitwirkenden Plattenbreite b_{eff} nach [DIN EN 1992-1-1:2011].....	125
Abb. 7-4: LINKS: Lastmodell 1 nach [DIN EN 1991-2:2010] bezogen auf einen zweispurigen Überbau ([LF [3] bis LF [8]).....	127
Abb. 7-5: OBEN: Ermüdungslastmodell 3 nach [DIN EN 1991-2:2010], [LF 14].....	127
Abb. 7-6: Konstante und linear veränderliche Temperaturanteile nach [DIN EN 1991-1-5:2010] bezogen auf die untersuchte Überbaugeometrie.....	129
Abb. 7-7: Normalkraftverlauf im Holzquerschnitt für ausgewählte Lastfälle (Anfangszustand).....	131
Abb. 7-8: Momentenverlauf im Holzquerschnitt für ausgewählte Lastfälle (Anfangszustand).....	131
Abb. 7-9: Verformungsverlauf im Beton- und Holzquerschnitt für ausgewählte Lastfälle (Anfangs- und Endzustand).....	132

Abb. 7-10: Schubkraftverlauf in der Verbundfuge für ausgewählte Lastfälle (Anfangszustand).....	132
Abb. 7-11: Bemessungsmomente im Beton und Holz (Anfangs- und Endzustand).....	134
Abb. 7-12: Bemessungsschubkräfte im Verbundelement (Anfangs- und Endzustand)..	134
Abb. 7-13: Momentenbeanspruchung im Beton und Holz in Abhängigkeit vom Verschiebungsmodul K_{ser}	135
Abb. 7-14: Normalkraftbeanspruchung im Beton und Holz in Abhängigkeit vom Verschiebungsmodul K_{ser}	135
Abb. 7-15: Nachweise im Holz in Abhängigkeit vom Verschiebungsmodul K_{ser}	136
Abb. 7-16: Schubkraft in der Verbundfuge in Abhängigkeit vom Verschiebungsmodul K_{ser}	136
Abb. 7-17: Normalkraftverlauf im Holzquerschnitt für verschiedene Verschiebungsmoduln unter Temperaturbelastung (Anfangszustand).....	138
Abb. 7-18: Momentenverlauf im Holzquerschnitt für verschiedene Verschiebungsmoduln unter Temperaturbelastung (Anfangszustand).....	138
Abb. 7-19: Nachweise im Holz in Abhängigkeit von der Kriechzahl	139
Abb. 7-20: Schubkraft in der Verbundfuge in Abhängigkeit von der Kriechzahl	139
Abb. 7-21: Momentenverläufe im Beton- und Holzteilquerschnitt unter Ermüdungsbelastung in Abhängigkeit von K_{ser} und k_{dyn}	140
Abb. 7-22: Auslastung der Ermüdungsnachweise im Beton- und Holzquerschnitt in Abhängigkeit von K_{ser} und k_{dyn}	140
Abb. 7-23: Ermüdungstraglasten und Schubkraftverlauf in der Fuge unter Ermüdungsbelastung in Abhängigkeit von K_{ser} und k_{dyn}	141
Abb. 7-24: Auslastung der holzseitigen Ermüdungsnachweise am Verbundelement in Abhängigkeit von K_{ser}	141
Abb. 7-25: Nachweise im Holz in Abhängigkeit vom Verschiebungsmodul K_{ser} und k_{dyn}	144
Abb. 7-26: Verformung von Beton- und Holzquerschnitt in Abhängigkeit von K_{ser} und k_{dyn}	144
Abb. 7-27: 3D-Volumenmodell einer Holz-Beton-Verbundstraßenbrücke, Variante mit Lagerung in der Schwerachse des Holzes	146
Abb. 7-28: Verwendetes Materialgesetz für die Beschreibung der Kontaktsteifigkeit aus [ANSYS® 2012]	146
Abb. 7-29: Lastfall [7] – Tandemsystem (TS) in Brückenmitte, Anzeige der Knotenkopplung	148
Abb. 7-30: Lastfall [11] – Temperatur linear, Erwärmung der Oberseite um 15 K.....	148
Abb. 7-31: Isotropes, multilinear-elastisches Materialgesetz für den Betonteilquerschnitt	149
Abb. 7-32: Verhältnis der Elastizitätsmoduln des Holzes (parallel und senkrecht zur Faser).....	149

Abb. 7-33:Verformung von Beton und Holz infolge Eigengewicht (LF [1])	153
Abb. 7-34:Verformung von Beton und Holz infolge Doppelachse TS (LF [7])	153
Abb. 7-35:Normalkraft im Holzteilquerschnitt infolge Eigengewicht (LF [1]).....	155
Abb. 7-36:Moment im Holzteilquerschnitt infolge Eigengewicht (LF [1])	155
Abb. 7-37:Normalkraft im Holz infolge Belastung mit dem Tandemsystem TS (LF [7])	156
Abb. 7-38:Moment im Holz infolge Belastung mit dem Tandemsystem TS (LF [7]).....	156
Abb. 7-39:Normalkraft im Holzteilquerschnitt infolge konstanter Temperaturbelastung (LF [9])	157
Abb. 7-40:Moment im Holzteilquerschnitt infolge konstanter Temperaturbelastung (LF [9])	157
Abb. 7-41:Schubkraft in der Fuge infolge der Lastfälle Eigenlast (LF [1]) und TS (LF [7])	158
Abb. 7-42:Schubkraft in der Fuge infolge konstanter Temperaturbelastung (LF [9]).....	158
Abb. 7-43:Bemessungswerte der Normalkräfte im Beton und Holz für Anfangs- und Endzustand ($K_{ser} = 640 \text{ kN/mm/m}$).....	160
Abb. 7-44:Bemessungswerte der Momente im Beton und Holz für Anfangs- und Endzustand ($K_{ser} = 640 \text{ kN/mm/m}$).....	160
Abb. 7-45:Modellierung des Gesamtsystem mit in Längsrichtung wandernder Belastung aus Lastmodell 1 (Laststellung 9)	161
Abb. 7-46:Nicht-lineare Einflussfunktion der charakteristischen Schubkraft je Verbundelement ($K_{ser} = 640 \text{ kN/mm/m}$)	161
Abb. 7-47:Verlauf der Bemessungsschubkraft über die Trägerlänge für den Anfangs- und Endzustand ($K_{ser} = 640 \text{ kN/mm/m}$).....	162
Abb. 7-48:Verlauf der Bemessungsschubkraft über die Trägerlänge für den Anfangs- und Endzustand ($K_{ser} = 8.700 \text{ kN/mm/m}$).....	162

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Anzusetzende Material- und Verbundelementsteifigkeiten gemäß aktueller Normenlage	18
Tab. 3-1: Abstände von Kopfbolzendübeln nach [DIN-Fb 104:2009].....	29
Tab. 3-2: Randbedingungen für die Durchführung der Versuche unter oft wiederholter Belastung	76
Tab. 3-3: Regressionsgleichungen der Ermüdungskennlinien für die Serien E und E-PC	77
Tab. 4-1: Kriechbeiwerte der untersuchten Verbundelementtypen Kerne, Schubleiste und X-Verbinder	87
Tab. 6-1: Grenzwerte für die bezogene Druckzonenhöhe aus [Baar, Ebeling, Lohmeyer 2013]	108
Tab. 6-2: Quotient von Spannungsamplitude und Ermüdungsfestigkeit und Ermüdungsbeiwerte	117
Tab. 6-3: Ermittelte Ermüdungskoeffizienten „a“	118
Tab. 7-1: Parameterraum der Verbundelementsteifigkeiten K_{ser} für Stabwerks- und Volumenmodell	123
Tab. 7-2: Geometrie- und Querschnittswerte sowie ausgewählte Materialeigenschaften der Verbundpartner.....	123
Tab. 7-3: Übersicht über die Einzellastfälle als charakteristische Einwirkungen in Anlehnung an [Simon 2008].....	126
Tab. 7-4: Lastmodell 1 nach [DIN EN 1991-2:2010] mit Anpassungsfaktoren nach [DIN EN 1991-2/NA:2012].....	126
Tab. 7-5: Einwirkungskombinationen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nach [DIN EN 1990:2010]	131
Tab. 7-6: Aufnehmbare Schubkräfte nach Norm sowie auf Basis der experimentellen Versuche	137
Tab. 7-7: Angesetzte Materialparameter für den Baustoff Holz (orthotropes Materialmodell)	151
Tab. 7-8: Übersicht über die einzelnen Modellvarianten	151

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Bedingt durch den Klimawandel und der damit einhergehenden, weltweit spürbaren negativen Folgen besteht die dringende Notwendigkeit, den Ausstoß von Treibhausgasen, insbesondere von Kohlendioxid, zu reduzieren. Dies wird zwangsläufig zu einer weiter steigenden Bedeutung von ökologischen Bauweisen und nachwachsenden Rohstoffen führen. In diesem Zusammenhang spielt der nachhaltig verfügbare Baustoff Holz, der während seiner Wachstumsphase der Atmosphäre Kohlendioxid entzieht, dieses über seine gesamte Nutzungsdauer als Kohlenstoff speichert und dadurch eine sehr gute Umweltbilanz besitzt, eine zentrale Rolle. Während im Hochbau der Anteil der ökologischen Holzbauweise stetig wächst, spielt der Baustoff Holz im Bereich des Verkehrsbaus eine eher untergeordnete Rolle – nahezu ausschließlich werden hier die in ihrer Herstellung sehr energieintensiven Materialien Stahl und Beton verwendet. Daher können Holz-Beton-Verbundbrücken eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Alternative zu den konventionellen Massiv- und Verbundbauweisen darstellen und einen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

Aufbauend auf einer Vielzahl von experimentellen Versuchen, Parameterstudien und Simulationen wurde im Vorfeld dieser Arbeit an der Professur Holz- und Mauerwerksbau der Bauhaus-Universität Weimar bereits ein für den Holz-Beton-Verbundstraßenbrückenbau geeignetes Verbundelement entwickelt. Die aus einer Stahlplatte mit aufgeschweißten Kopfbolzendübeln bestehende Dübelleiste nutzt für die holzseitige Schubkraftübertragung in der Verbundfuge das Versatzprinzip, während auf der Betonseite analog zu dem Stahlverbundbau die Kopfbolzendübel die Kraftübertragung realisieren. Zudem besitzt die Dübelleiste neben hohen Werten für Verbundelementsteifigkeit und Tragfähigkeit ein ausgeprägt duktilen Bruchverhalten. Die Entwicklung dieses vorteilhaften Verbundelementes verhalf der hybriden Bauweise mit der Errichtung der Birkbergbrücke bei Wippra (Sachsen-Anhalt) als erster Holz-Beton-Verbundstraßenbrücke Deutschlands zur erfolgreichen Umsetzung in die Praxis.

Neben dem Kurzzeitverhalten spielt für eine sichere Bemessung einer Verbundkonstruktion auch das Tragverhalten unter Langzeiteinwirkungen eine entscheidende Rolle, da die Verbundpartner Beton und Holz unterschiedliche Langzeiteigenschaften besitzen. In diesem Zusammenhang sind Kriech- und Schwindprozesse des Betonquerschnittes, Kriechen und hygroexpansive Vorgänge (Quellen und Schwinden) im Holz, die zudem von der Holzfeuchtigkeit abhängen, sowie die differentiellen Ausdehnungskoeffizienten von Beton und Holz unter Temperaturbeanspruchung zu nennen. Zur experimentellen Beurteilung dieser hochkomplexen Vorgänge wurden an der Professur Holz- und Mauerwerksbau bereits im Jahre 2006 Langzeitscherversuche initiiert, die im Rahmen dieser Arbeit übernommen, fortgeführt, abgeschlossen und umfassend ausgewertet werden.

Des Weiteren unterliegt gerade eine Straßenbrücke zyklischen Belastungen aus dem Verkehr. Aus diesem Grund muss neben dem Ermüdungstragverhalten der am Verbund beteiligten Materialien Beton und Holz auch das Tragverhalten des Verbundfugenbereiches unter oft wiederholter Belastung bei der Dimensionierung und Nachweisführung einer Verbundkonstruktion berücksichtigt werden. Auch hierzu wurden an der Professur Holz- und Mauerwerksbau experimentelle Untersuchungen angestellt, deren Umfang für eine detaillierte Beurteilung des Ermüdungstragverhaltens des Verbundelementes Dübelleiste jedoch nicht ausreichten und daher den Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit darstellen.