



27

Andreas Greck

Straßenbrücken mit einteiligem Verbundquerschnitt

Optimierung des Betonierablaufs der Fahrbahnplatte und Entwicklung eines Vorschlags zur vereinfachten globalen Systemberechnung beim Einsatz mehrerer Schalwagen

Straßenbrücken mit einteiligem Verbundquerschnitt

Optimierung des Betonierablaufs der Fahrbahnplatte und Entwicklung
eines Vorschlags zur vereinfachten globalen Systemberechnung beim
Einsatz mehrerer Schalwagen

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

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Andreas Greck

aus
Dillingen a. d. Donau

D 17

Darmstadt 2013

Referent: Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Oliver Fischer
Tag der Einreichung: 31. Januar 2013
Tag der mündlichen Prüfung: 17. Mai 2013

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Institut für Massivbau – Fachgebiet Massivbau
Petersenstrasse 12
64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.to>

Greck, Andreas:

Straßenbrücken mit einteiligem Verbundquerschnitt

Optimierung des Betonierablaufs der Fahrbahnplatte und Entwicklung eines Vorschlags zur vereinfachten globalen Systemberechnung beim Einsatz mehrerer Schalwagen

1. Auflage Darmstadt

Dissertation // Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt; Heft 27

ISBN 978-3-942886-03-1

Dr.-Ing. Andreas Greck

Geboren 1973 in Dillingen/Donau. Von 1995 bis 2000 Studium des Bauingenieurwesens an der Fachhochschule Augsburg. Von 2000 bis 2003 Tragwerksplaner in der Technischen Abteilung der Dyckerhoff & Widmann AG in München. Von 2003 bis 2006 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt. Von 2006 bis 2008 wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. In dieser Zeit auch als freier Mitarbeiter im Ingenieurbüro König und Heunisch Planungsgesellschaft in Frankfurt/Main tätig. Von 2008 bis Ende 2011 Entwicklungsingenieur bei der Voith Siemens Hydro Power Generation & Co. KG in Heidenheim. Seit Anfang 2012 Leiter der Abteilung Structural Mechanics der Voith Hydro Holding GmbH & Co. KG in Heidenheim.

VORWORT

Erste Ideen und Voruntersuchungen zu dieser Dissertation entstanden während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Wesentliche Teile der vorliegenden Arbeit wurden jedoch zu meiner Zeit als Entwicklungsingenieur bei der Voith Hydro Holding GmbH & Co. KG realisiert. An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Dr.-Ing. Roland Egli und Herrn Dipl.-Ing. Gilbert Grosse für die Genehmigung dieser berufsbegleitenden Promotion bedanken.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich sehr herzlich für die mir zuteilgewordene Motivation zu dieser Arbeit, für seine Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Oliver Fischer möchte ich sehr herzlich für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferates danken.

Bei Herrn Dr.-Ing. Andreas Garg, Herrn Dr.-Ing. Markus Spengler und meiner lieben Schwester Sabrina Greck bedanke ich mich ganz herzlich für die kritische Durchsicht meiner Dissertation und die wertvollen Hinweise.

Besonderer Dank gebührt Herrn Dr.-Ing. Andreas Garg für seine großartige Forschungstätigkeit auf dem Gebiet des Stahlverbundbrückenbaus als Grundlage für die vorliegende Arbeit und für die interessanten, fruchtbaren Diskussionen.

Bedanken möchte ich mich bei den Studenten, die im Rahmen von Studienarbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein Dank gilt insbesondere Herrn Daniel Wingensfeld M.Sc. und Herrn Jaroslav Kohoutek M.Sc.

Meinen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Massivbau bin ich für das vertrauensvolle und freundschaftliche Verhältnis sehr dankbar. Unsere gemeinsame Zeit wird mir in freudiger Erinnerung bleiben.

Meinen Eltern Irmgard und Rupert Greck danke ich von ganzem Herzen für ihre fortwährende Unterstützung und die damit verbundenen Möglichkeiten.

Der größte Dank gilt meiner lieben Frau Sandra. Trotz zahlreicher Entbehrungen in den vergangenen Jahren hat sie durch ihren großen Rückhalt und ihre Unterstützung wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Darüber hinaus ist sie eine wundervolle Mutter für unseren Sonnenschein Julian, wofür ich ihr von ganzem Herzen danke.

Lauingen, Mai 2013

Andreas Greck

ZUSAMMENFASSUNG

Straßenbrücken mit einteiligem Verbundquerschnitt haben sich in den letzten Jahren als wirtschaftliche Bauweise für hohe Talbrücken erwiesen. In Deutschland wird die Fahrbahnplatte dieser Brückenüberbauten in Ortbeton mit in der Regel mehreren Schalwagen hergestellt. Bei langen Brückenüberbauten ruft diese Bauweise zahlreiche Systemmodifikationen bis zur Fertigstellung der Fahrbahnplatte hervor, was mit großem Aufwand bei der globalen Systemberechnung verbunden ist.

In der vorliegenden Arbeit werden relevante Einflüsse auf die Bemessungsschnittgrößen des Brückenüberbaus, insbesondere bis zur Fertigstellung der Fahrbahnplatte, ermittelt. Das Eigengewicht der Fahrbahnplatte ruft den wesentlichen Schnittgrößenanteil für die Bemessung des Brückenüberbaus hervor, weshalb die diesen Schnittgrößenanteil beeinflussenden Effekte gezielt analysiert werden. Hierzu kommen unter anderem Einflusslinien zum Einsatz, die an räumlichen FEM-Modellen bestimmt werden.

Letztlich münden die Untersuchungen dieser Arbeit in Empfehlungen für die abschnittsweise Herstellung der Fahrbahnplatte beim Einsatz mehrerer Schalwagen. Zielsetzung ist dabei, die Rissbildung in der Fahrbahnplatte bei zugleich niedrigen Bewehrungsgraden zu minimieren. Die Anwendung dieser Betonierreihenfolgen ermöglicht zudem eine deutliche Vereinfachung der globalen Systemberechnung.

ABSTRACT

Composite bridges with one-piece steel-concrete cross sections have become economical solutions for high road bridges during the last years. The reinforced concrete slab of the bridge superstructure is concreted in situ with multiple mobile composite forming carriages. In case of long superstructures this construction method causes several modifications of the mechanical system until the whole concrete slab is completed. Hence, much effort is necessary for the determination of internal forces.

This doctoral thesis deals with the detection of relevant influences on the distribution of internal design forces on the superstructure. Attention is focused on impacts which occur until completion of the concrete slab. The internal forces induced by the dead load of the concrete slab are the decisive parameters for dimensioning the superstructure. Hence, effects which could influence this portion of internal design forces are analysed in detail. For this purpose influence lines which are determined by 3D-FEM-models are used besides other methods.

The investigations within this paper result in recommendations for concreting of the concrete slab using multiple composite forming carriages. Goal of these recommendations is to minimize cracking in the concrete slab along with low degrees of reinforcement. Furthermore, the application of the suggested construction methods for the concrete slab leads to a remarkably reduced effort for the determination of internal forces.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Variablen.....	VI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Vorgehensweise	3
2 Grundlagen zur Berechnung von Überbauten in Verbundbauweise	5
2.1 Einführung	5
2.2 Materialverhalten	5
2.2.1 Beton	5
2.2.1.1 Allgemeines	5
2.2.1.2 Beton unter einachsiger Druckspannung	6
2.2.1.3 Beton unter einachsiger Zugspannung.....	10
2.2.1.4 Beton unter zweiachsialer Beanspruchung	12
2.2.1.5 Junger Beton	13
2.2.1.6 Kriechen.....	16
2.2.1.7 Schwinden.....	24
2.2.1.8 Abfließen der Hydratationswärme	28
2.2.2 Bau- und Betonstahl	30
2.3 Herstellung von Verbundträgern.....	30
2.3.1 Allgemeines.....	30
2.3.2 Herstellung mit oder ohne Eigengewichtsverbund	31
2.3.3 Abschnittsweise Herstellung der Fahrbahnplatte	31
2.3.3.1 Allgemeines	31
2.3.3.2 Prinzipieller Bauablauf	33
2.3.3.3 Praxisübliche Betonierreihenfolgen.....	35
2.4 Berechnungen auf Querschnittsebene.....	37
2.4.1 Allgemeines.....	37
2.4.2 Teilschnittgrößen bei kurzzeitiger Last.....	37

2.4.3	Teilschnittgrößen bei Dauerlast.....	40
2.4.3.1	Allgemeines	40
2.4.3.2	Kategorisierung des Querschnitts	43
2.4.3.3	Ermittlung der Teilschnittgrößen durch numerische Integration.....	43
2.4.4	Abfließen der Hydratationswärme	48
2.4.4.1	Einführung	48
2.4.4.2	Verfahren nach Pamp (1991)	49
2.4.4.3	Abfließen der Hydratationswärme nach DIN–FB 104 (2009).....	52
2.4.5	Begrenzung der Rissbreiten.....	53
2.4.5.1	Allgemeines	53
2.4.5.2	Mindestbewehrung zur Rissbreitenbegrenzung	54
2.4.5.3	Begrenzung der Rissbreite unter Last	56
2.5	Berechnungen auf Systemebene	59
2.5.1	Strukturmodellierung.....	59
2.5.1.1	Allgemeines	59
2.5.1.2	Einstabmodell.....	59
2.5.1.3	Modelle mit Schalen- und Volumenelementen.....	67
2.5.2	Sekundäre Schnittgrößen bei statisch unbestimmt gelagerten Systemen...	68
3	Beschreibung und Modellierung eines repräsentativen	
	Brückenbauwerks.....	71
3.1	Einführung	71
3.2	Vorstellung der repräsentativen Brücke.....	71
3.3	Verwendete Strukturmodelle	73
3.3.1	Einstabmodell.....	73
3.3.2	Modell mit Schalenelementen	74
3.3.3	Modell mit Volumenelementen.....	75
3.4	Einwirkungen während der Herstellung der Fahrbahnplatte	76
3.4.1	Zusammenstellung der Einwirkungen.....	76
3.4.2	Abfließen der Hydrationswärme	77

3.4.3	Temperatureinwirkung	78
3.5	Einfluss verschiedener Einwirkungen auf die Tragwerksdimensionierung.....	79
4	Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zur Bestimmung von Einflusslinien.....	81
4.1	Einführung	81
4.2	Bestimmung von Einflusslinien am Stabmodell.....	82
4.3	Einfluss der abschnittswisen Fahrbahnplattenherstellung auf die Systemsteifigkeiten	85
4.4	Bestimmung von Einflusslinien am räumlichen FEM-Modell.....	87
4.4.1	Einflusslinien für Auflagerkräfte	87
4.4.2	Einflusslinien für Stützmomente.....	91
4.5	Schnittgrößenermittlung mithilfe von Einflusslinien.....	92
4.6	Zusammenfassung.....	92
5	Relevante Einflüsse auf die Ergebnisse der Systemberechnung	95
5.1	Einführung	95
5.2	Repräsentativer Querschnitt.....	95
5.3	Streuung des Elastizitätsmoduls des Gurtbetons	96
5.3.1	Allgemeines.....	96
5.3.2	Querschnittstragverhalten.....	97
5.3.2.1	Querschnitt mit minimaler mitwirkender Gurtbreite	97
5.3.2.2	Querschnitt mit maximaler mitwirkender Gurtbreite	101
5.3.2.3	Ideelle Biegesteifigkeiten bei Variation der Breiten des Betongurts... ..	106
5.3.3	Systemtragverhalten	107
5.3.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	110
5.4	Kriechen der Betonfahrbahnplatte	111
5.4.1	Allgemeines.....	111
5.4.2	Kriechfunktionen für die gegebenen Randbedingungen.....	111
5.4.3	Kriechen auf Querschnittsebene.....	112
5.4.3.1	Einführung	112
5.4.3.2	Querschnitt mit minimaler mitwirkender Gurtbreite	112

5.4.3.3	Querschnitt mit maximaler mitwirkender Gurtbreite.....	116
5.4.3.4	Diskussion und Vorschlag für die Systemberechnung	119
5.4.4	Kriechen auf Systemebene	122
5.4.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	124
5.5	Abfließen der Hydratationswärme	125
5.5.1	Allgemeines.....	125
5.5.2	Abfließen der Hydratationswärme auf Querschnittsebene.....	125
5.5.3	Abfließen der Hydratationswärme auf Systemebene	126
5.5.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	128
5.6	Schwinden.....	130
5.7	Zusammenfassung.....	131
6	Betonierreihenfolgen beim Einsatz mehrerer Schalwagen.....	133
6.1	Einführung	133
6.2	Zulässige Beanspruchung des Verbundquerschnitts.....	134
6.3	Herstellung der Fahrbahnplatte nach Garg (2006).....	140
6.3.1	Betonierabschnittsgrenzen und Betonierreihenfolge.....	140
6.3.2	Variante „Feldweise A“.....	141
6.3.2.1	Einteilung der Betonierabschnitte und Betonierablauf	141
6.3.2.2	Biegemomente auf den Verbundquerschnitt.....	144
6.3.3	Variante „Feldweise B“.....	145
6.3.3.1	Einteilung der Betonierabschnitte und Betonierablauf	145
6.3.3.2	Biegemomente auf den Verbundquerschnitt.....	145
6.4	Vorschlag zur Herstellung der Fahrbahnplatte	147
6.4.1	Einführung.....	147
6.4.2	Betonieren mit zwei Schalwagen	147
6.4.2.1	Einteilung der Betonierabschnitte und Betonierablauf	147
6.4.2.2	Biegemomente auf den Verbundquerschnitt.....	148
6.4.2.3	Physikalisch nichtlineare Systemberechnung	155
6.4.3	Betonierreihenfolge „Drei Schalwagen“	157

6.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	161
7	Mitwirkende Gurtbreiten für die Stabmodellierung	163
7.1	Einleitung	163
7.2	Mitwirkende Breiten des Stahltrogs.....	164
7.3	Mitwirkende Breiten des Betongurts	165
7.3.1	Vorgehensweise zur Ermittlung mitwirkender Breiten.....	165
7.3.2	Mitwirkende Breiten für ausgewählte Lastfälle	168
7.3.3	Mitwirkende Breiten im Bauzustand nach DIN–FB 104 (2009)	171
7.3.4	Vereinfachte Festlegung für die Schnittgrößenermittlung	172
7.3.4.1	Einführung	172
7.3.4.2	Schnittgrößen während der Herstellung der Fahrbahnplatte	175
7.3.4.3	Schnittgrößen zum Zeitpunkt der Fertigstellung der Fahrbahnplatte ..	179
7.4	Zusammenfassung.....	181
8	Vorschlag für eine vereinfachte Systemberechnung.....	183
8.1	Einführung	183
8.2	Konstruktionseigengewicht des Brückenüberbaus	183
8.2.1	Allgemeines.....	183
8.2.2	Systemberechnung mit Stabmodellen	184
8.3	Weitere Lastfälle	185
9	Zusammenfassung und Ausblick	187
10	Literaturverzeichnis	191
Anhang	195