



26

Kay-Uwe Thorn

**Neuentwicklung eines
Ladungsrückhaltesystems aus
textilbewehrten Betonfertigteilen**

DISSERTATION

Heft 26

Darmstadt 2013

Neuentwicklung eines Ladungsrückhaltesystems aus textilbewehrten Betonfertigteilen

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

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Kay-Uwe Thorn

aus
Limburg a. d. Lahn / Hessen

D 17

Darmstadt 2013

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

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider

Tag der Einreichung: 28. Januar 2013

Tag der mündlichen Prüfung: 03. Mai 2013

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Institut für Massivbau – Fachgebiet Massivbau
Petersenstrasse 12
64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.to>

Thorn, Kay-Uwe:

Neuentwicklung eines Ladungsrückhaltesystems aus textilbewehrten Betonfertigteilen

1. Auflage Darmstadt

Dissertation // Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt; Heft 26

ISBN 978-3-942886-04-8

Dr.-Ing. Kay-Uwe Thorn

Geboren 1967 in Diez a. d. Lahn. Von 1987 bis 1993 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt. Von 1993 bis 1998 Mitarbeiter im Ingenieurbüro Dr. Weihermüller & Dr. Vogel GmbH in Wiesbaden und seit April 1998 Mitarbeiter in der R&P RUFFERT Ingenieurgesellschaft mbH in Limburg an der Lahn. Seit 2006 Mitarbeiter im Arbeitsausschuss „Schutzeinrichtungen“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. Von 2009 bis 2013 externer Doktorand von Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand berufsbegleitend während meiner Tätigkeit als Tragwerksplaner in der R&P RUFFERT Ingenieurgesellschaft mit Sitz in Limburg a. d. Lahn.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich aufrichtig für meine Aufnahme als externer Doktorand, seine Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider möchte ich sehr herzlich für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferates danken.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Arbeitgebern Herrn Dipl.-Ing. Jörg Holl und Herrn Dipl.-Ing. Heinz-Georg Ruffert bedanken, die die berufsbegleitende Bearbeitung dieser Arbeit durch die Schaffung der notwendigen Rahmenbedingungen erst ermöglicht haben.

Meinen Kollegen und Kolleginnen der R&P RUFFERT Ingenieurgesellschaft danke ich für die Übernahme meiner Projekte während meiner Freistellungszeit. Ganz besonders möchte ich meinem Kollegen Herrn Dr.-Ing. René Conchon für das stets vorhandene Interesse und die Diskussionsbereitschaft bezüglich meiner Forschungsarbeit danken. Darüber hinaus möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Heiko Denk, Herrn Prof. Dr.-Ing. Andrej Albert, Herrn M.Eng. Dominik Mölder und Herrn Michael Thorn bedanken, die im Besonderen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Von ganzem Herzen danke ich meinen Eltern für ihre fortwährende Unterstützung, die mir insbesondere während meines Studiums eine große Hilfe war.

Der größte Dank gilt jedoch meiner Frau Dagmar und meinen Töchtern Anna-Lisa und Kathrin, die mir die Freiheit gegeben haben, diese Arbeit über Jahre an den Wochenenden und während meines Urlaubs zu bearbeiten. Mit eurem Verzicht, eurem Verständnis und der immer willkommenen Ablenkung habt ihr großen Anteil am Gelingen dieser Arbeit. Ihr seid das Wichtigste in meinem Leben.

Darmstadt, Mai 2013

Kay-Uwe Thorn

Zusammenfassung

Die beiden weltweit bisher bekannten Ladungsrückhaltesysteme werden in Stahlbauweise ausgeführt. Bei diesen stählernen Systemen soll die Anprallenergie des Ladungsgegenstandes ausschließlich durch Deformationsenergie der Rückhaltekonstruktion verzehrt werden. Dies führt bereits bei einem vergleichsweise geringen Ladungsanprall zu nennenswerten Reparatur- bzw. Erneuerungsarbeiten der deformierten Schutzeinrichtung mit den damit verbundenen Beeinträchtigungen des Straßenverkehrs und den daraus resultierenden Unterhaltungskosten.

Da bisher noch keine Schutzeinrichtung in Massivbauweise bekannt ist, deren Funktion ausschließlich darin besteht, im Bedarfsfall die transportierte Ladung eines abkommenden Fahrzeuges zurückzuhalten, wird im Rahmen dieser Arbeit ein Ladungsrückhaltesystem aus textilbewehrten Betonfertigteilen entwickelt, bei dem die kinetische Energie des definierten Ladungsgegenstandes durch reversible Konstruktionsverformungen unter Nutzung der Massenträgheit des Betons und, bei einem möglichen höheren Energieniveau der anprallenden Ladung, durch irreversible Verformungen im Bereich einer definierten Deformationsschicht dissipiert wird.

Die statische und dynamische Untersuchung des Ladungsrückhaltesystems aus Betonfertigteilen erfolgt mit geometrisch und physikalisch nichtlinearen Berechnungen, bei denen die nichtlinearen Effekte des Berechnungsmodells mittels eines iterativen Berechnungsverfahrens bestimmt und die dynamischen Effekte mit einem Zeitschritt-Integrationsverfahren simuliert werden.

Als Ergebnis dieser Arbeit wird ein Ladungsrückhaltesystem aus textilbewehrten Betonfertigteilen vorgeschlagen, das als relativ leichtes System ohne Gründung auf einer Brücke oder mit großer Betonfertigteillänge und damit möglichst wenigen Einzelfundamenten auf freier Strecke entlang einer Straße angeordnet werden kann und dem vorgegebenen Ladungsanprall Stand hält.

Abstract

The two load restraint systems that are globally known so far are produced in steel construction. For those steel systems the impact energy of the load object shall be consumed exclusively by deformation energy of the restraint system. This already leads at a comparatively low load impact to considerable repair or replace works of the deformed safety barrier with the connected reductions of the road traffic and the maintenance costs resulting from it.

Up to now there is no safety barrier known in solid construction whose function consists exclusively in holding back the transported load of a vehicle running off the road, if necessary. Within this thesis a load restraint system of textile reinforced precast concrete units is developed, where the kinetic energy of the defined load object is converted in reversible construction deformations under the use of concrete mass inertia and, at a possible higher energy level of the defined load object, in irreversible deformations in the area of a defined deformation layer.

The static and dynamic analysis of the load restraint system of precast concrete units is carried out with geometrically and physically nonlinear calculations which determine the nonlinear effects of the calculation model by an iterative calculation method and simulate the dynamic effects with a time step integration method.

As a result of this thesis a load restraint system of textile reinforced precast concrete units is suggested, which can be placed on a bridge as a relatively light system without foundation or on main track along the road with a large precast concrete unit length and therefore as few as possible footings and which withstands the specified load impact.

INHALTSVERZEICHNIS

Formelzeichen, Variablen und Abkürzungen	V
1. Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Vorgehensweise	2
2. Stand der Erkenntnisse.....	4
2.1 Grundlagen der mit LKW transportierten Ladung.....	4
2.1.1 Ladung und Ladungssicherung in Deutschland	4
2.1.2 Unfallgeschehen mit schweren LKW über 12 Tonnen	8
2.2 Fahrzeug-Rückhaltesysteme an Straßen	11
2.3 Ladungsrückhaltesysteme an Straßen	16
2.3.1 Einführung.....	16
2.3.2 Überblick der bekannten Ladungsrückhaltesysteme.....	16
2.3.2.1 Französisches Ladungsrückhaltesystem (F-LRS).....	16
2.3.2.2 Schweizer Ladungsrückhaltesystem (S-LRS).....	19
2.3.3 Einsatzvorgaben für Ladungsrückhaltesysteme	21
2.4 Dynamisch beanspruchte Baukonstruktionen.....	25
2.4.1 Grundlagen der Stoßmechanik und Stoßarten.....	25
2.4.2 Dynamische Anprallberechnung nach DIN EN 1991-1-7	27
2.4.3 Berechnungsverfahren und Dämpfung.....	29
2.4.4 Werkstoffeigenschaften unter hochdynamischen Beanspruchungen.....	32
2.4.4.1 Einführung	32
2.4.4.2 Baustahl.....	33
2.4.4.3 Beton	36
2.4.5 Pfahlwiderstände unter stoßartiger Beanspruchung.....	37
2.5 Textilbeton	39
2.5.1 Allgemeines.....	39
2.5.2 Textile Bewehrung	40
2.5.3 Feinbeton.....	43
2.5.4 Herstellungsverfahren	44

2.5.5	Mechanische Eigenschaften	45
2.5.6	Dauerhaftigkeit.....	48
2.5.7	Dauerstandfestigkeit.....	49
2.5.8	Brandwiderstand.....	49
2.5.9	Zug-, Biege- und Querkrafttragfähigkeit	50
2.5.10	Verankerungslängen.....	54
2.5.11	Teilsicherheitsbeiwerte des Widerstands der verwendeten Baustoffe	55
3.	Entwicklung und Modellbildung eines LRS in Massivbauweise	56
3.1	Vergleich eines LRS in Stahlbauweise und in Stb.-Massivbauweise.....	56
3.2	Aufbau und Funktionsweise des entwickelten LRS aus Betonfertigteilen.....	58
3.3	Tragelemente des entwickelten LRS aus Betonfertigteilen	62
3.3.1	Betonwandeinzelement mit Deformationsschicht.....	62
3.3.2	Verbindungselemente der zusammengesetzten BWE.....	64
3.3.3	Rückverankerung der Betonwandeinzelemente	65
3.3.4	Einzelfundament des Ladungsrückhaltesystems aus Betonfertigteilen	68
3.4	Tragwerksmodell	70
3.5	Vorschlag eines Lastmodells für einen Ladungsanprall	79
4.	Experimentelle Untersuchungen.....	85
4.1	Allgemeines	85
4.2	Textilbewehrtes Betonrohr.....	85
4.2.1	Herstellung	85
4.2.2	Statischer Versuch.....	89
4.2.2.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	89
4.2.2.2	Versuchsauswertung	91
4.2.3	Dynamischer Versuch	95
4.2.3.1	Versuchsaufbau und -durchführung	95
4.2.3.2	Versuchsauswertung	97
4.3	Textilbewehrter Betondübel.....	100
4.3.1	Herstellung	100
4.3.2	Statischer Versuch.....	101
4.3.2.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	101

4.3.2.2	Versuchsauswertung	102
4.3.3	Dynamischer Versuch	106
4.3.3.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	106
4.3.3.2	Versuchsauswertung	108
5.	Grundlagen der Bauteilwiderstände und des Lagesicherheitsnachweises.....	111
5.1	Bauteilwiderstände.....	111
5.1.1	Verwendete Materialien	111
5.1.2	Textilbewehrte Zerstörungs- und Rückhalteschicht.....	113
5.1.3	Textilbewehrtes Querschott.....	114
5.1.4	Textilbewehrte Koppelplatte	115
5.1.5	Textilbewehrtes Betonrohr (TRC-Rohr)	118
5.1.5.1	Bemessungsmodell	118
5.1.5.2	Rechnerische Scheiteldruckfestigkeit und -verformung	119
5.1.5.3	Vergleich rechnerische und experimentelle Ergebnisse	122
5.1.5.4	Schlussfolgerungen und Druckfederkennlinie	122
5.1.6	Textilbewehrter Betondübel (TRC-Dübel)	125
5.1.6.1	Bemessungsmodell	125
5.1.6.2	Rechnerische Querkrafttragfähigkeit	126
5.1.6.3	Vergleich rechnerische und experimentelle Ergebnisse	131
5.1.6.4	Schlussfolgerungen und Bemessungsvorschlag	132
5.1.7	Zugstab	134
5.1.8	Gründung.....	134
5.2	Lagesicherheitsnachweis.....	137
6.	Berechnungsmodell des entwickelten Ladungsrückhaltesystems.....	139
6.1	Allgemeines	139
6.2	Betonwandeinzelement mit Deformationsschicht	139
6.3	Verbindungselemente der zusammengesetzten Betonwandeinzelemente ...	141
6.4	Rückverankerung der Betonwandeinzelemente.....	143
6.5	Gründung und Gesamtmodell.....	145
6.6	Grundlagen der statischen Untersuchung des Ladungsrückhaltesystems.....	146
6.7	Grundlagen der dynamischen Untersuchung des Ladungsrückhaltesystems ..	147

7.	Statische und Dynamische Analyse des Ladungsrückhaltesystems.....	149
7.1	Vorgehensweise und Berechnungsgrundlagen	149
7.2	Maßgebende Kenngröße der Berechnungsergebnisse	152
7.3	Systemvariante A – Statische und dynamische Berechnungsergebnisse.....	157
7.4	Systemvariante B – Anzahl der nebeneinander angeordneten BWA	159
7.5	Systemvariante C – Anprallort des Ladungsgegenstandes	161
7.6	Systemvariante D – Zusätzlicher Horizontaldübel am Wandkopf.....	163
7.7	Systemvariante E – Erfordernis der Koppelplatte zur vertikalen Kopplung ...	165
7.8	Gesamtergebnis der untersuchten Systemvarianten A bis E.....	166
8.	Vorschlag für ein LRS aus textilbewehrten Betonfertigteilen	167
8.1	Berechnungs- und Bemessungsgrundlagen	167
8.2	Ladungsrückhaltesystem <i>Brücke</i>	171
8.2.1	Geometrie und Federkennwerte	171
8.2.2	Tragfähigkeits- und Lagesicherheitsnachweise - $h_{LRS} = 3,0$ m	172
8.2.3	Tragfähigkeits- und Lagesicherheitsnachweise - $h_{LRS} = 4,5$ m	173
8.2.4	Erläuterung der Berechnungsergebnisse	174
8.2.5	Konstruktionskennwerte des vorgeschlagenen LRS auf einer Brücke	175
8.3	Ladungsrückhaltesystem <i>Strecke</i>	177
8.3.1	Geometrie und Federkennwerte	177
8.3.2	Tragfähigkeits- und Lagesicherheitsnachweise - $h_{LRS} = 3,0$ m	178
8.3.3	Tragfähigkeits- und Lagesicherheitsnachweise - $h_{LRS} = 4,5$ m	179
8.3.4	Erläuterung der Bemessungsergebnisse	180
8.3.5	Konstruktionskennwerte des vorgeschlagenen LRS auf freier Strecke ...	181
8.3.6	Bemessung der Gründung des Ladungsrückhaltesystems <i>Strecke</i>	183
8.4	Statisches Ersatzlastmodell für die lastaufnehmenden Bauteile	184
9.	Zusammenfassung	185
10.	Literaturverzeichnis	188
Anhang	195