

Zur Durchstanztragfähigkeit loch- randgestützter Platten mit kleiner Lasteinleitungsfläche

Torsten Welsch

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2013, ISBN 978-3-8167-9002-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Zur Durchstanztragfähigkeit lochrandgestützter Platten mit kleiner Lasteinleitungsfläche

**Vom Fachbereich D (Abteilung Bauingenieurwesen) der
Bergischen Universität Wuppertal angenommene**

Dissertation

zur

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

von

Torsten Welsch

aus Hennef

Wuppertal, April 2013

Kurzfassung

Punktgestützte Stahlbetonflachdecken haben sich aufgrund zahlreicher wirtschaftlicher, konstruktiver und architektonischer Vorzüge als fester Bestandteil des Hochbaus etabliert. In jüngerer Zeit werden neben konventionellen Stahlbetonstützen auch besonders tragfähige Verbund- und Schleuderbetonstützen sowie Stützen aus hochfestem Beton als Auflagerelemente eingesetzt. Für diese Konstruktionsarten wurden Knotendetails entwickelt, bei denen die Lastdurchleitung durch den Stützen-Decken-Knoten über im Querschnitt reduzierte, hochfeste Kerne erfolgt, die die Decke durchdringen. Für die Einleitung der Deckenlast in die Stütze steht hier nicht der gesamte Stützenquerschnitt zur Verfügung, sondern nur eine reduzierte Lasteinleitungsfläche in der Stützenrandzone. Die Auflagerung ist dann nicht mehr kontinuierlich punktgestützt, sondern es stellt sich eine Lochrandstützung mit kleiner Lasteinleitungsfläche ein.

Während der Versagensmechanismus und die wesentlichen Einflussfaktoren beim Durchstanzen normal punktgelagerter Platten bekannt sind und hierfür zahlreiche theoretische Modelle hergeleitet wurden, ist die Anzahl der Untersuchungen an lochrandgestützten Platten überschaubar. Die vorliegenden Arbeiten wurden hauptsächlich im Zusammenhang mit dem Hubdeckenverfahren verfasst und sind aufgrund verschiedener Aspekte ungeeignet, um das Durchstanzen bei lochrandgestützten Platten mit kleiner Lasteinleitungsfläche zu beschreiben.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Tragverhalten lochrandgestützter Platten mit kleiner Lasteinleitungsfläche mittels FEM-Simulationen untersucht. Auf Grundlage der Simulationsergebnisse werden Bemessungsvorschläge für verschiedene Konstruktionsarten angegeben. Abschließend werden Vorschläge für ein Versuchsprogramm und einen Versuchsaufbau gemacht, mit denen die Simulationsergebnisse in einem zweiten Schritt überprüft werden können.

Abstract

Flat slabs have been established due to a number of economic, structural and architectural advantages as an integral part of building construction. More recently, in addition to conventional reinforced concrete columns also composite and spun concrete columns and columns of high-strength concrete are used as supports. Characteristic of these kinds of constructions is that the load transmission through the node between column and slab is made by high-strength cores with a reduced cross-section, which penetrate the slab. The reaction force of the slab then is passed to the column by a small load application area in the fringe of the column. These slabs are characterized as hole edge supported slabs with a small load application area.

While the failure mechanism and the essential factors in normal flat slabs are well known and numerous theoretical models for this purpose have been developed, there is only a small number of investigations on hole edge supported slabs. These papers were mainly written relating to lift slabs. Due to several aspects, they are unsuitable to describe the punching in hole edge supported slabs with a small load application area.

In this paper the structural behavior of hole edge supported slabs with a small load application area is investigated by means of FEM simulations. Based on the simulation results, design approaches are proposed for different kinds of construction. Finally, suggestions for a test series and a test set-up are made in order to check the simulation results in a second step.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand in den Jahren 2010 bis 2012 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehr- und Forschungsgebiet „Massivbau & Tragkonstruktionen“ der Bergischen Universität Wuppertal.

Mein besonderer Dank gilt dem Inhaber des Lehrstuhls, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Held, für die Idee zu dieser Arbeit, die zahlreichen interessanten Gespräche und seine stete Unterstützung während meiner Forschungstätigkeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Goris danke ich für das große Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferats, ebenso den weiteren Mitgliedern der Prüfungskommission, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Anders (Vorsitz) und Herrn Univ.-Prof. Dr. rer. nat. A. Seyfried.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehr- und Forschungsgebiet „Massivbau & Tragkonstruktionen“ für das angenehme Arbeitsklima und die freundschaftliche Zusammenarbeit.

Ich bedanke mich bei meinen Eltern dafür, dass sie mir meinen beruflichen Werdegang ermöglicht und mich dabei immer bedingungslos unterstützt haben. Meiner Frau Britta und meiner Tochter Maja bin ich für ihre immerwährende moralische Unterstützung von Herzen dankbar.

Wuppertal, im April 2013

Torsten Welsch

Tag der Einreichung: 12. Oktober 2012
Tag der mündlichen Prüfung: 12. März 2013

Prüfungskommission:

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Held, Bergische Universität Wuppertal
2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Alfons Goris, Universität Siegen
Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Anders, Bergische Universität Wuppertal
Weiteres Mitglied: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Armin Seyfried, Bergische Universität Wuppertal

Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG	1
1.1	EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	1
1.2	KONSTRUKTIONSARTEN MIT LOCHRANDSTÜTZUNG UND KLEINER LASTEINLEITUNGSFLÄCHE	3
1.2.1	<i>Verbundstützen mit eingestelltem Stahlprofil</i>	<i>4</i>
1.2.2	<i>Kompaktstütze (CC) System DYWIDAG®.....</i>	<i>7</i>
1.2.3	<i>Schleuderbetonstütze System MABA®.....</i>	<i>9</i>
1.2.4	<i>Schleuderbetonstützen System EUROPOLES®.....</i>	<i>10</i>
1.3	BERÜCKSICHTIGUNG DER LOCHRANDSTÜTZUNG IN REGELWERKEN	12
1.4	FAZIT KAPITEL 1	12
2	STAND DER FORSCHUNG	13
2.1	DURCHSTANZEN: DEFINITION, VERSAGENSMECHANISMUS UND EINFLUSSFAKTOREN	13
2.1.1	<i>Betonart.....</i>	<i>16</i>
2.1.2	<i>Statische Nutzhöhe</i>	<i>17</i>
2.1.3	<i>Biegebewehrung.....</i>	<i>18</i>
2.1.4	<i>Betonnormalspannung</i>	<i>19</i>
2.1.5	<i>Stützenlage</i>	<i>19</i>
2.1.6	<i>Stützengeometrie</i>	<i>21</i>
2.1.7	<i>Durchstanzbewehrung</i>	<i>21</i>
2.2	DURCHSTANZMODELL VON MUTTONI (SCHWEIZ, 2008)	26
2.2.1	<i>Versagenskriterium nach der Theorie der kritischen Schubrissbreite.....</i>	<i>27</i>
2.2.2	<i>Ermittlung der Last-Rotations-Beziehung</i>	<i>29</i>
2.2.3	<i>Erweiterung der CSCT auf Platten mit Durchstanzbewehrung.....</i>	<i>34</i>
2.3	BISHERIGE UNTERSUCHUNGEN ZUM DURCHSTANZTRAGVERHALTEN LOCHRANDGESTÜTZTER PLATTEN	39
2.4	FAZIT KAPITEL 2	44
3	EIGENE UNTERSUCHUNGEN MITTELS FEM-BERECHNUNGEN.....	45
3.1	KONZEPT FÜR DIE FEM-UNTERSUCHUNGEN.....	45
3.1.1	<i>Geometrie.....</i>	<i>45</i>
3.1.2	<i>Elementauswahl und Diskretisierung</i>	<i>46</i>
3.1.3	<i>Werkstoffgesetze für die physikalisch nichtlineare Berechnung.....</i>	<i>48</i>
3.1.4	<i>Belastung.....</i>	<i>49</i>
3.1.5	<i>Berechnung</i>	<i>49</i>
3.1.6	<i>Kriterien für die Auswahl von Fremdversuchen zu normal punktgestützten Platten ...</i>	<i>54</i>
3.2	DURCHSTANZVERSUCH P1 VON SCHAEIDT, LADNER UND RÖSLI (SCHWEIZ, 1967)	55
3.2.1	<i>Geometrie und Materialeigenschaften im Versuch.....</i>	<i>55</i>
3.2.2	<i>Versuchsaufbau und -ablauf</i>	<i>56</i>
3.2.3	<i>Versuchsergebnisse.....</i>	<i>56</i>
3.2.4	<i>Diskretisierung.....</i>	<i>59</i>
3.2.5	<i>Werkstoffparameter für die FEM-Berechnung</i>	<i>61</i>
3.2.6	<i>Berechnung</i>	<i>63</i>
3.2.7	<i>Ergebnisse der FEM-Berechnungen.....</i>	<i>63</i>
3.3	DURCHSTANZVERSUCH S2.2 VON TOLF (SCHWEDEN, 1988).....	72
3.3.1	<i>Geometrie und Materialeigenschaften im Versuch.....</i>	<i>72</i>
3.3.2	<i>Versuchsaufbau und -ablauf</i>	<i>73</i>
3.3.3	<i>Versuchsergebnisse.....</i>	<i>74</i>
3.3.4	<i>Diskretisierung.....</i>	<i>77</i>

3.3.5	Werkstoffparameter für die FEM-Berechnung	78
3.3.6	Berechnung	79
3.3.7	Ergebnisse der FEM-Berechnungen	79
3.4	DURCHGEFÜHRTE PARAMETERSTUDIEN IN HINBLICK AUF LOCHRANDSTÜTZUNG	87
3.4.1	Lochrandstützung bei Platten mit einem Sackloch in Plattenmitte	88
3.4.2	Lochrandstützung bei Platten mit einem Stahlkern in Plattenmitte	106
3.4.3	Lochrandstützung mit Stahlkern und daran fixierter Längsbewehrung	122
3.5	FAZIT KAPITEL 3	133
4	BEMESSUNGSVORSCHLAG	137
4.1	LOCHRANDGESTÜTZTE PLATTEN MIT EINEM SACKLOCH IN PLATTENMITTE	137
4.2	LOCHRANDGESTÜTZTE PLATTEN MIT EINEM STAHLKERN IN PLATTENMITTE	145
4.3	LOCHRANDGESTÜTZTE PLATTEN MIT EINEM STAHLKERN UND DARAN FIXIERTER BEWEHRUNG	148
4.4	FAZIT KAPITEL 4	150
5	KONZEPTION EINER VERSUCHSREIHE UND EINES VERSUCHSAUFBAUS	152
5.1	ENTWURF EINER VERSUCHSREIHE	152
5.2	KONZEPTION EINES VERSUCHSTANDS	158
5.3	DURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG DER VERSUCHE	161
5.4	FAZIT KAPITEL 5	163
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	164
7	LITERATURVERZEICHNIS	169

Einheiten und Bezeichnungen

Nachstehend werden die wichtigsten in dieser Arbeit verwendeten Einheiten und Formelzeichen angegeben. Nicht aufgeführte Bezeichnungen werden im Text erläutert.

Einheiten:

Kräfte:	kN, MN
Momente:	kNm
Spannungen:	KPa, MPa
Längen:	mm, cm, m
Flächen:	mm ² , cm ² , m ²
Winkel:	rad, Grad

Bezeichnungen:

Kleine lateinische Buchstaben

<i>c</i>	Stützenbreite, Stützendurchmesser
<i>d</i>	statische Nutzhöhe
<i>h</i>	Bauteilhöhe
<i>e</i>	Lastausmitte
<i>l</i>	Stützweite
<i>r</i>	Radius
<i>u</i>	kritischer Rundschnitt im Abstand $d/2$ vom Anschnitt
<i>w</i>	Durchbiegung
<i>x</i>	Druckzonenhöhe

Große lateinische Buchstaben

<i>E</i>	Elastizitätsmodul
<i>G</i>	Schubmodul
<i>V</i>	Stützenlast

Kleine lateinische Buchstaben mit Indizes

c_x, c_y	Abmessungen einer Rechteckstütze
d_{col}	Durchmesser einer kreisrunden Stütze
d_{core}	Durchmesser eines Stahlkerns
d_{fixed}	Durchmesser eines Stahlkerns mit daran fixierter Betonstahlbewehrung
d_g	Größtkorndurchmesser
d_{hole}	Durchmesser eines Sacklochs
d_s	Stabdurchmesser der Betonstahlbewehrung
f_c	Einaxiale Zylinderdruckfestigkeit des Betons
f_{ck}	Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen
$f_{cm, cube150}$	Mittelwert der Betondruckfestigkeit eines Würfels mit 150 mm Kantenlänge nach 28 Tagen

$f_{cm,cube200}$	Mittelwert der Betondruckfestigkeit eines Würfels mit 200 mm Kantenlänge nach 28 Tagen
$f_{cm,cyl}$	Mittelwert der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit des Betons
f_{ct}	zentrische Zugfestigkeit des Betons
$f_{ct,fl}$	Biegezugfestigkeit des Betons
f_{ctm}	Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit des Betons
f_{tk}	Charakteristische Zugfestigkeit der Betonstahlbewehrung
f_y	Streckgrenze der Betonstahlbewehrung
f_{yw}	Streckgrenze der Durchstanzbewehrung
$f_{ywd,ef}$	wirksamer Bemessungswert der Streckgrenze der Durchstanzbewehrung
k_{core}	Abminderungsbeiwert zur Ermittlung der rechnerischen Versagenslast lochrandgestützter Platten mit einem Kern in Plattenmitte
$k_{hole,2}$	Abminderungsbeiwert zur Ermittlung der rechnerischen Versagenslast lochrandgestützter Platten mit einem Sackloch in Plattenmitte, bilinearer Ansatz
$k_{hole,3}$	Abminderungsbeiwert zur Ermittlung der rechnerischen Versagenslast lochrandgestützter Platten mit einem Sackloch in Plattenmitte, kubischer Ansatz
l_{col}	Stützenlänge
l_w	Länge des schubbewehrten Bereichs
m_{cr}	Rissmoment
m_r	radiales Plattenmoment (erzeugt Dehnungen in radialer Richtung / tangentielle Risse)
m_t	tangentiales Plattenmoment (erzeugt Dehnungen in tangentialer Richtung / radiale Risse)
r_c	Radius einer kreisrunden Stütze
r_q	Radius der Lasteinleitungspunkte
r_s	Außenradius eines kreisrunden Deckenausschnitts
s_r	radialer Abstand einer Durchstanzbewehrungsreihe
u_0	Stützenumfang
u_1	Umfang des kritischen Rundschnitts
$u_{out,ef}$	Umfang des äußeren Rundschnitts
v_{min}	Mindestwert des Querkraftwiderstands
v_q	über den Umfang verteilte Belastung eines kreisrunden Deckenausschnitts
$v_{Rd,c}$	Bemessungswert des Durchstanzwiderstands längs des kritischen Rundschnitts einer Platte ohne Durchstanzbewehrung
$v_{Rd,c,core}$	Bemessungswert des Durchstanzwiderstands längs des kritischen Rundschnitts einer lochrandgestützten Platte mit einem Kern in Plattenmitte ohne Durchstanzbewehrung
$v_{Rd,c,hole}$	Bemessungswert des Durchstanzwiderstands längs des kritischen Rundschnitts einer lochrandgestützten Platte mit einem Sackloch in Plattenmitte ohne Durchstanzbewehrung
$v_{Rd,cs}$	Bemessungswert des Durchstanzwiderstands für Platten mit Durchstanzbewehrung
$v_{Rd,c,out}$	Bemessungswert des Durchstanzwiderstands längs des äußeren Rundschnitts einer Platte mit Durchstanzbewehrung
$v_{Rd,max}$	Bemessungswert des maximalen Durchstanzwiderstands je Flächeneinheit längs des Stützenumfangs
$v_{Rd,s}$	Bemessungswert des Durchstanzwiderstands der Durchstanzbewehrung

w_k	Rissbreite
$x_{5\%}$	5%-Quantil
x_m	Mittelwert

Große lateinische Buchstaben mit Indizes

A_c	Betonquerschnittsfläche
A_{col}	Stützenquerschnittsfläche
A_{Load}	Lasteinleitungsfläche
$A_{Load,red}$	Infolge Lochrandstützung reduzierte Lasteinleitungsfläche
A_{sw}	Querschnittsfläche der Durchstanzbewehrung in einer Bewehrungsreihe
E_c	Elastizitätsmodul des Betons
E_{cm}	Mittelwert des Elastizitätsmoduls des Betons
E_{c0m}	Mittelwert des Elastizitätsmoduls des Betons als Tangente im Ursprung der Spannungs-Dehnungslinie nach 28 Tagen
EI_0	Biegesteifigkeiten vor Erstrissbildung
EI_1	Biegesteifigkeiten nach Erstrissbildung
E_s	Elastizitätsmodul der Betonstahlbewehrung
G_f	Bruchenergie
$V_{E,k}$	charakteristischer Wert der Stützenlast
V_{flex}	bei Erreichen der Biegetragfähigkeit wirkende Querkraft
$V_{R,cs}$	Durchstanztragfähigkeit im durchstanzbewehrten Bereich
$V_{R,out}$	Durchstanztragfähigkeit außerhalb des durchstanzbewehrten Bereichs
$V_{R,max}$	Durchstanztragfähigkeit der Druckstrebe
V_u	Versagenslast
$V_{u,core}$	Versagenslast einer lochrandgestützten Platte mit Kern in Plattenmitte
$V_{u,core,cal}$	rechnerische Versagenslast einer lochrandgestützten Platte mit Kern in Plattenmitte
$V_{u,core,EC}$	rechnerische Versagenslast einer lochrandgestützten Platte mit Kern in Plattenmitte unter Verwendung eines Ansatzes nach Eurocode 2
$V_{u,disp}$	Versagenslast einer Vollplatte mit ausgelagerter Bewehrung
$V_{u,fixed}$	Versagenslast einer lochrandgestützten Platte mit Kern und daran fixierter Längsbewehrung in Plattenmitte
$V_{u,fixed,cal}$	rechnerische Versagenslast einer lochrandgestützten Platte mit Kern und daran fixierter Längsbewehrung in Plattenmitte
$V_{u,fixed,EC}$	rechnerische Versagenslast einer lochrandgestützten Platte mit Kern und daran fixierter Längsbewehrung in Plattenmitte unter Verwendung eines Ansatzes nach Eurocode 2
$V_{u,hole}$	Versagenslast einer lochrandgestützten Platte mit Sackloch in Plattenmitte
$V_{u,hole,cal2}$	rechnerische Versagenslast einer lochrandgestützten Platte mit Sackloch in Plattenmitte unter Verwendung eines bilinearen Ansatzes
$V_{u,hole,cal3}$	rechnerische Versagenslast einer lochrandgestützten Platte mit Sackloch in Plattenmitte unter Verwendung eines kubischen Ansatzes
$V_{u,hole,EC}$	rechnerische Versagenslast einer lochrandgestützten Platte mit Sackloch in Plattenmitte unter Verwendung eines Ansatzes nach Eurocode 2

Griechische Buchstaben

α	Winkel zwischen Durchstanzbewehrung und Plattenebene
β	Lasterhöhungsfaktor zur Berechnung des Bemessungswerts der Stützenlast
β	Faktor zur Abminderung des Schubmoduls infolge Rissbildung
γ	Schubverzerrung
ε	Dehnung
κ	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Maßstabeffekts
μ	<i>COULOMB</i> 'scher Reibungskoeffizient
μ	Querdehnzahl
σ	Spannung
φ	Reibungswinkel
ψ	Plattenrotation
χ	Krümmung

Griechische Buchstaben mit Indizes

$\Delta\varphi$	Winkel eines Sektorelements
Δu	Relativverschiebung
ε_c	Betondehnung
ε_{cr}	Dehnung bei Erreichen der Betonzugfestigkeit
ε_s	Betonstahldehnung
ε_u	prozentuale Betonstahldehnung bei Höchstkraft
η_l	Beiwert für Leichtbeton
ρ_l	Geometrischer Längsbewehrungsgrad
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptspannungen
σ_{cp}	Spannung im Beton aus Normalkraft oder Vorspannung
σ_s	Spannung in der Betonstahlbewehrung
σ_x	Standardabweichung
χ_r	radiale Krümmung
χ_t	tangentiale Krümmung

Abbildungen

Bild 1-1: Knotenpunkt normalfeste Decke – hochfeste Stütze	3
Bild 1-2: Unterscheidung der unterschiedlichen Lagerungsarten	4
Bild 1-3: Mantelrohr und Einstellprofil durchlaufend (aus [12])	5
Bild 1-4: Mantelrohr unterbrochen, Einstellprofil durchlaufend (aus [12])	5
Bild 1-5: Mantelrohr und Einstellprofil unterbrochen (aus [12])	6
Bild 1-6: Stoß der eingestellten Stahlprofile oberhalb der Decke [13]	6
Bild 1-7: Beispiel für die Ausführung einer Verbundstütze mit großem Kern (aus [15])	7
Bild 1-8: DYWIDAG Kompaktknoten [®] (aus [4])	8
Bild 1-9: Detailschnitt DYWIDAG Kompaktknoten [®] (aus [17])	9
Bild 1-10: Schleuderbetonstütze mit Deckenknoten System MABA [®] (aus [19])	10
Bild 1-11: Ausführung des Knotens Schleuderbetonstütze – Decke mit Baustahlkonstruktion (nach [22])	10
Bild 1-12: Knoten mit durchgehender Stützenbewehrung mit großem Betonstahlquerschnitt (nach [23])	11
Bild 2-1: Bruchkegelquerschnitt bei Bauteilen unterschiedlicher Schlankheit (nach [36])	13
Bild 2-2: Bruchbild einer zentrisch belasteten Innenstützen-Verbindung (nach [39])	14
Bild 2-3: Verformungen im Durchstanzbereich (nach [40])	14
Bild 2-4: Qualitativer Verlauf der Last-Dehnungs-Kurven (nach [42])	15
Bild 2-5: Bogen-Zugband-System (C = compression / Druck, T = tension / Zug)	16
Bild 2-6: Kraftfluss in Normal- und Leichtbeton auf der Meso-Ebene (nach [36])	17
Bild 2-7: Last-Rotations-Beziehungen für Versuche von KINNUNEN und NYLANDER (nach [40])	18
Bild 2-8: Bruchbilder von Randstützen mit unterschiedlicher Lastausmitte (nach [38])	20
Bild 2-9: Überlagertes Fachwerk-System (C = Druck, T = Zug)	22
Bild 2-10: Versagensstellen bei Bauteilen mit Durchstanzbewehrung (nach [36])	22
Bild 2-11: Last-Verformungs-Kurven verschiedener Bewehrungselemente (aus [52])	24
Bild 2-12: Durchstanzmodell von MUTTONI, a) Störung der geraden Druckstrebe durch den kritischen Schubriss, b) Fachwerkmodell mit geknickter Druckstrebe (nach [40])	27
Bild 2-13: Durchstanzversuche von BOLLINGER (nach [40])	28
Bild 2-14: Vergleich des Versagenskriteriums von MUTTONI mit 99 Versuchen aus der Literatur (nach [40])	29
Bild 2-15: Versuchsergebnisse von KINNUNEN und NYLANDER im Vergleich zur Versagenslast aus Gl. 2.6 und Gl. 2.22 (nach [40])	30
Bild 2-16: Quadrilineare Momenten-Krümmungs-Beziehung nach MUTTONI (nach [40])	30
Bild 2-17: Annahmen zur Ableitung der Last-Rotations-Beziehung (nach [40]);	31
Bild 2-18: Druckstreben Tragfähigkeit als Schnittpunkt zwischen Versagenskriterium und Last-Rotations-Beziehung (nach [59])	34
Bild 2-19: Zerlegung der Durchstanztragfähigkeit im durchstanzbewehrten Bereich in einen Beton- und einen Bewehrungstraganteil (nach [59])	35
Bild 2-20: geometrische Beziehungen im Schubriss und am Durchstanzkegel (nach [59])	36
Bild 2-21: Ermittlung der Durchstanztragfähigkeit außerhalb des durchstanzbewehrten Bereichs (nach [59])	38
Bild 2-22: Verlauf der Tangential- und Radialmomente in Abhängigkeit von der Auflagerung (nach [72])	40
Bild 2-23: Verhältnis $V_{E,k}/A_{Load}$ der vorgestellten Arbeiten im Vergleich zu Platten	41
Bild 2-24: Praxisbeispiel für eine Verbundstütze mit großem Kern	42
Bild 2-25: Praxisbeispiel für eine Verbundstütze mit Stahlpilz [73]	42

Bild 3-1: Isoparametrisches 20-Knoten-Quaderelement vom Typ „CHX60“ (aus [79])	46
Bild 3-2: Volumenelement CHX 60 mit eingebetteter Bewehrung (nach [79])	48
Bild 3-3: Topologie und Spannung für eingebettete Bewehrung (nach [79]).....	48
Bild 3-4: Newton-Raphson-Verfahren (nach [88]).....	51
Bild 3-5: Modifiziertes Newton-Raphson-Verfahren (nach [88])	52
Bild 3-6: Quasi-Newton-Verfahren (nach [88]).....	53
Bild 3-7: In <i>DIANA</i> implementierte Konvergenzkriterien (nach [88])	54
Bild 3-8: Geometrie und Bewehrung der Versuchsplatte <i>P1</i> (nach [101]).....	55
Bild 3-9: Last-Verformungs-Diagramm (nach [101])	57
Bild 3-10: Last-Dehnungs-Diagramm der Bewehrung (links) und Last-Stauchungs-Diagramm des Betrags (rechts) (nach [101])	57
Bild 3-11: Rissbild bei $V = 669$ kN (Gebrauchslast; Zahlenwerte = Rissbreite in 1/100 mm) (nach [101]).....	58
Bild 3-12: Rissbild bei $V_u = 1662$ kN (Bruchzustand) (nach [101]).....	58
Bild 3-13: Durchstanzkegel, Neigung ca. 30° (nach [101]).....	59
Bild 3-14: Geometrie des FEM-Modells zu Platte <i>P1</i>	59
Bild 3-15: Verwendetes Netz einschl. Lagerungsbedingungen und Belastung	60
Bild 3-16: Element-Seitenverhältnisse in Modell <i>P1</i>	60
Bild 3-17: Für die FEM-Berechnung verwendete Arbeitslinie des Betonstahls „Tor 50 IIIb“	63
Bild 3-18: Last-Verformungs-Kurve des Versuchs <i>P1</i> und der FEM-Simulation <i>P1</i> im Vergleich ..	64
Bild 3-19: Betonstauchungen im Versuch <i>P1</i> und in der FEM-Simulation <i>P1</i>	65
Bild 3-20: Bewehrungsdehnungen im Versuch <i>P1</i> und in der FEM-Simulation <i>P1</i> im Vergleich ...	66
Bild 3-21: Rissbildung in Lastinkrement 12 ($V = 693,5$ kN) im Vergleich zum Rissbild bei $V = 669$ kN (Gebrauchslast) im Versuch.....	67
Bild 3-22: Rissbildung beim Bruch in der FEM-Simulation (Lastinkrement 31) im Vergleich zum Versuchsergebnis (Durchstanzrisse jeweils nachgezeichnet)	67
Bild 3-23: Durchstanzriss in der Symmetrieebene auf der X-Achse (nachgezeichnet).....	68
Bild 3-24: Rissbildung (links) und Radiale Spannungen σ_{xx} (rechts) [MPa, mm]	69
Bild 3-25: Vertikale Dehnungen ε_{zz} in den letzten Lastinkrementen	70
Bild 3-26: Ausbildung einer geknickten Druckstrebe beim Versagen (Spannungen σ_{zx} [MPa]).....	71
Bild 3-27: Versuchsplatte <i>S2.2</i> von <i>TOLF</i> (nach [111])	72
Bild 3-28: Arbeitslinie des verwendeten Betonstahls „Ks 60S“ (nach [111]).....	73
Bild 3-29: Versuchsaufbau von <i>TOLF</i> (nach [111])	74
Bild 3-30: Messstellen an Platte <i>S2.2</i> (nach [111]).....	74
Bild 3-31: Plattenrotation (links) und vertikale Verschiebungen (rechts) (nach [111])	75
Bild 3-32: Bewehrungsdehnungen in Plattenmitte (links) und Betonstauchungen bei $a = 65$ mm (rechts) (nach [111]).....	75
Bild 3-33: Rissbild und Rissbreiten bei verschiedenen Laststufen (nach [111]).....	76
Bild 3-34: Durchstanzriss in Platte <i>S2.2</i> (nach [111])	76
Bild 3-35: Geometrie des FEM-Modells zu Platte <i>S2.2</i>	77
Bild 3-36: Verwendetes Netz einschl. Lagerungsbedingungen und Belastung	77
Bild 3-37: Für die Berechnung verwendete Arbeitslinie des Betonstahls „Ks 60S“	78
Bild 3-38: Last-Verformungs-Kurve des Versuchs <i>S2.2</i> und der FEM-Simulation <i>S2.2</i> im Vergleich	79
Bild 3-39: Betonstauchungen im Versuch <i>S2.2</i> und in der FEM-Simulation <i>S2.2</i>	80
Bild 3-40: Bewehrungsdehnungen im Versuch <i>S2.2</i> und in der FEM-Simulation <i>S2.2</i>	81
Bild 3-41: Rissbildung in Lastinkrement 12 ($V = 242,3$ kN) im Vergleich zum Rissbild bei $V = 240$ kN (Gebrauchslast) im Versuch.....	82
Bild 3-42: Rissbildung beim Bruch in der FEM-Simulation (Lastinkrement 31, $V = 606,1$ kN, Durchstanzriss nachgezeichnet) im Vergleich zum Versuchsergebnis ($V = 603$ kN)	82
Bild 3-43: Durchstanzriss in der Symmetrieebene auf der X-Achse (nachgezeichnet).....	83

Bild 3-44: Rissbildung (links) und radiale Spannungen σ_{xx} auf der X-Achse (rechts) [MPa, mm] .	84
Bild 3-45: Vertikale Dehnungen ε_{zz} in der Symmetrieebene auf der X-Achse.....	85
Bild 3-46: Zugdehnungen ε_{zz} in der Simulation und Durchstanzriss beim Versuch im Vergleich...	86
Bild 3-47: Schräge Druckstrebe beim Versagen (Spannungen σ_{zx} [MPa]).....	86
Bild 3-48: Anschluss der Bewehrung an den Kern mit Gewindemuffen (links, aus [15]) und Durchsteckmontage bei Schleuderbetonstützen (Mitte, aus [21]) und Verbundstützen (rechts, aus [15])	87
Bild 3-49: Modelle für Parameterstudien mit Lochrandstützung, hier exemplarisch für Platte <i>P1-H-450</i> (links) und <i>S2.2-H-200</i> (rechts)	89
Bild 3-50: Vernetzung der Modelle <i>P1-H-450</i> (links) und <i>S2.2-H-200</i> (rechts)	89
Bild 3-51: Elementseitenverhältnisse bei Modell <i>P1-H-450</i>	90
Bild 3-52: Elementseitenverhältnisse bei Modell <i>S2.2-H-200</i>	90
Bild 3-53: Stützenversagen bei Verwendung normalfesten Betons für die Stütze (Versuch <i>P1-H-400</i>)	91
Bild 3-54: Last-Verformungs-Beziehungen für die lochrandgestützten Platten der Reihe <i>P1-H</i>	92
Bild 3-55: Last-Verformungs-Beziehungen für die lochrandgestützten Platten der Reihe <i>S2.2-H</i> ...	92
Bild 3-56: Last-Verformungs-Beziehungen für die Platten der Reihe <i>P1-D</i>	93
Bild 3-57: Last-Verformungs-Beziehungen für die Platten der Reihe <i>S2.2-D</i>	94
Bild 3-58: Betondehnungen in Platte <i>P1-H-450</i>	95
Bild 3-59: Betondehnungen in Platte <i>S2.2-H-200</i>	95
Bild 3-60: Stahldehnungen in Platte <i>P1-H-450</i> , Stab S1	96
Bild 3-61: Stahldehnungen in Platte <i>S2.2-H-200</i> , Stab S1	97
Bild 3-62: Rissbildung (Plattenoberseite) in Platte <i>P1-H-450</i> beim Versagen (Lastinkrement 20) ..	98
Bild 3-63: Rissbildung (Plattenoberseite) in Platte <i>S2.2-H-200</i> beim Versagen (Lastinkrement 27)	98
Bild 3-64: Platte <i>P1-H-450</i> , Rissbildung in der Symmetrieebene auf der X-Achse im Bruchzustand	99
Bild 3-65: Platte <i>S2.2-H-200</i> , Rissbildung in der Symmetrieebene auf der X-Achse im Bruchzustand.....	99
Bild 3-66: Radiale Spannungen in der X-Achse [MPa], links Platte <i>P1-H-450</i> , rechts Platte <i>P1</i> ...	100
Bild 3-67: Radiale Spannungen in der X-Achse [MPa], links Platte <i>S2.2-H-200</i> , rechts Platte <i>S2.2</i>	101
Bild 3-68: Vertikale Dehnungen ε_{zz} (links) und Spannungen σ_{zz} (rechts, MPa), Modell <i>P1-H-450</i>	102
Bild 3-69: Vertikale Dehnungen ε_{zz} (links) und Spannungen σ_{zz} (rechts, MPa), Modell <i>S2.2-H-200</i>	103
Bild 3-70: Druckstrebenneigungen in Platte <i>P1-H-450</i> (links) und <i>S2.2-H-200</i> (rechts).....	104
Bild 3-71: Lokales Versagen in Platte <i>S2.2-H-180</i> und Durchstanzen in Platte <i>S2.2-H-160</i>	105
Bild 3-72: Lokales Versagen in Platte <i>P1-H-425</i> bis <i>P1-H-375</i> , Durchstanzen in Platte <i>P1-H-350</i>	105
Bild 3-73: Modelle für Parameterstudien mit Kern, Platte <i>P1-C-450</i> (links) und <i>S2.2-C-200</i> (rechts)	106
Bild 3-74: Vernetzung der Modelle <i>P1-C-450</i> (links) und <i>S2.2-C-200</i> (rechts)	107
Bild 3-75: Interface-Elemente CQ48I mit lokalen Koordinatensystemen (nach [79])	107
Bild 3-76: Ausbildung einer Fuge zwischen Kern und Beton in Bereichen mit positiven Radialspannungen (hier dargestellt σ_{xx} in Lastinkrement 15, <i>P1-C-450</i>).....	108
Bild 3-77: Last-Verformungs-Beziehungen für die Platten der Reihe <i>P1-C</i>	109
Bild 3-78: Last-Verformungs-Beziehungen für die Platten der Reihe <i>S2.2-C</i>	109
Bild 3-79: Betonstauchungen in Platte <i>P1-C-450</i>	110
Bild 3-80: Betonstauchungen in Platte <i>S2.2-C-200</i>	111
Bild 3-81: Stahldehnungen in Platte <i>P1-C-450</i> , Stab S1	112
Bild 3-82: Stahldehnungen in Platte <i>S2.2-C-200</i> , Stab S1	112

Bild 3-83: Rissbildung (Plattenoberseite) in Platte <i>PI-C-450</i> beim Versagen (Lastinkrement 24)	113
Bild 3-84: Rissbildung (Plattenoberseite) in Platte <i>S2.2-C-200</i> beim Versagen (Lastinkrement 33)	113
Bild 3-85: Platte <i>PI-C-450</i> , Rissbildung in der Symmetrieebene auf der X-Achse im Bruchzustand	114
Bild 3-86: Platte <i>S2.2-C-200</i> , Rissbildung in der Symmetrieebene auf der X-Achse im Bruchzustand	114
Bild 3-87: Radiale Spannungen in der X-Achse [MPa], links Platte <i>PI-C-450</i> , rechts Platte <i>PI...</i>	115
Bild 3-88: Radiale Spannungen in der X-Achse [MPa], links Platte <i>S2.2-C-200</i> , rechts Platte <i>S2.2</i>	116
Bild 3-89: Vertikale Dehnungen ε_{ZZ} (links) und Spannungen σ_{ZZ} (rechts, MPa), Modell <i>PI-C-450</i>	117
Bild 3-90: Vertikale Dehnungen ε_{ZZ} (links) und Spannungen σ_{ZZ} (rechts, MPa), Modell <i>S2.2-C-200</i>	117
Bild 3-91: Ausbildung einer geknickten Druckstrebe beim Bruch; Spannungen σ_{zx} [MPa],	118
Bild 3-92: Relativverschiebungen Δu_z [mm] in den Interfaceelementen,	119
Bild 3-93: Lokales Versagen in Platte <i>PI-C-400</i> , Durchstanzversagen in Platte <i>PI-C-375</i> ;	120
Bild 3-94: Lokales Versagen in Platte <i>S2.2-C-180</i> , Durchstanzversagen in Platte <i>S2.2-C-160</i> ;	120
Bild 3-95: Modelle für Parameterstudien mit Kern und daran fixierter Bewehrung,	122
Bild 3-96: Last-Verformungs-Beziehungen für die Platten der Reihe <i>PI-F</i>	123
Bild 3-97: Last-Verformungs-Beziehungen für die Platten der Reihe <i>S2.2-F</i>	123
Bild 3-98: Betonstauchungen in Platte <i>PI-F-450</i>	124
Bild 3-99: Betonstauchungen in Platte <i>S2.2-F-200</i>	125
Bild 3-100: Stahldehnungen im Bereich der Stütze; links <i>PI</i> , rechts <i>PI-F-450</i>	125
Bild 3-101: Bewehrungsdehnungen in Platte <i>PI-F-450</i>	126
Bild 3-102: Bewehrungsdehnungen in Platte <i>S2.2-F-200</i>	126
Bild 3-103: Rissbildung (Plattenoberseite) in Platte <i>PI-F-450</i> beim Versagen (Lastinkrement 28)	127
Bild 3-104: Rissbildung (Plattenoberseite) in Platte <i>S2.2-F-200</i> beim Versagen (Lastinkrement 36)	128
Bild 3-105: Platte <i>PI-F-450</i> , Durchstanzriss in der Symmetrieebene auf der X-Achse	128
Bild 3-106: Platte <i>S2.2-F-200</i> , Durchstanzriss in der Symmetrieebene auf der X-Achse	128
Bild 3-107: Radiale Spannungen in der X-Achse [MPa], links Platte <i>PI-F-450</i> , rechts Platte <i>PI</i>	129
Bild 3-108: Radiale Spannungen in der X-Achse [MPa], links Platte <i>S2.2-F-200</i> , rechts Platte <i>S2.2</i>	130
Bild 3-109: Vertikale Dehnungen ε_{ZZ} in Modell <i>PI-F-450</i>	131
Bild 3-110: Vertikale Dehnungen ε_{ZZ} in Modell <i>S2.2-F-200</i>	131
Bild 3-111: Druckstrebenneigungen bei Platte <i>PI-F-450</i> (links) und <i>S2.2-F-200</i> (rechts)	132
Bild 4-1: Vereinfachte Berechnung der Plattenrotation ψ aus der Verformung w	137
Bild 4-2: Kubischer Zusammenhang zwischen reduzierter Lasteinleitungsfläche und Versagenslast bei den Platten der <i>H</i> -Serie	138
Bild 4-3: Bilinearer Zusammenhang zwischen reduzierter Lasteinleitungsfläche und Versagenslast bei den Platten der <i>H</i> -Serie	139
Bild 4-4: Versagenskriterium nach <i>MUTTONI</i> und Versagenskriterium für lochrandgestützte Platten mit einem Sackloch in Plattenmitte nach Gl. 4.3 (<i>H</i> -Serie)	140
Bild 4-5: Linearer Zusammenhang zwischen reduzierter Lasteinleitungsfläche und Versagenslast bei den Platten der <i>C</i> -Serie	145
Bild 4-6: Zusammenhang zwischen reduzierter Lasteinleitungsfläche und Versagenslast (<i>F</i> -Serie)	148

Bild 5-1: Versuchsplatte <i>LI</i> (Referenz-Vollplatte)	154
Bild 5-2: Versuchsplatte <i>LI-H-250</i>	155
Bild 5-3: Versuchsplatte <i>LI-C-250</i>	156
Bild 5-4: Versuchsplatte <i>LI-F-250</i>	157
Bild 5-5: Entwurf für einen Versuchsstand zur Durchführung der Durchstanzversuche	159
Bild 5-6: Vorschlag für die Anordnung der Messinstrumente	160

Tabellen

Tabelle 3-1: Materialeigenschaften des Versuchskörpers <i>PI</i>	56
Tabelle 3-2: Grundwert der Bruchenergie G_{f0} (nach [105])	61
Tabelle 3-3: Werkstoffparameter des Betons für die Berechnung	62
Tabelle 3-4: Mechanische Eigenschaften des Betonstahls „Tor 50 IIIb“	62
Tabelle 3-5: Materialeigenschaften des Versuchskörpers <i>S2.2</i>	73
Tabelle 3-6: Werkstoffparameter des Betons für die Berechnung	78
Tabelle 3-7: Untersuchungsprogramm für Parameterstudien mit Sackloch	88
Tabelle 3-8: Versagenslasten für Vollplatten V_u , Platten mit Sackloch $V_{u,hole}$ und Vollplatten mit ausgelagerter Bewehrung $V_{u,disp}$ im Vergleich	94
Tabelle 3-9: Untersuchungsprogramm für Parameterstudien mit Stahlkern	106
Tabelle 3-10: Versagenslasten der Vollplatten V_u , der Modelle mit Kern $V_{u,core}$ und der Vollplatten mit ausgelagerter Bewehrung $V_{u,disp}$ im Vergleich	110
Tabelle 3-11: Untersuchungsprogramm für Modelle mit Stahlkern und angeschlossener Bewehrung	122
Tabelle 3-12: Versagenslasten der Vollplatte V_u und der Platten aus der F-Serie $V_{u,fix}$ im Vergleich	124
 Tabelle 4-1: Vergleich der rechnerischen Versagenslasten nach Gl. 4.3 mit den Ergebnissen	141
Tabelle 4-2: Vergleich der rechnerischen Versagenslasten nach Gl. 4.4 mit den Ergebnissen	141
Tabelle 4-3: Vergleich der rechnerischen Versagenslasten nach Gl. 4.3 mit den Ergebnissen	142
Tabelle 4-4: Vergleich der rechnerischen Versagenslasten nach Gl. 4.4 mit den Ergebnissen	143
Tabelle 4-5: Vergleich der rechnerischen Versagenslasten nach Gl. 4.6 mit den Ergebnissen	144
Tabelle 4-6: Vergleich der rechnerischen Versagenslasten nach Gl. 4.8 mit den Ergebnissen	146
Tabelle 4-7: Vergleich der rechnerischen Versagenslasten nach Gl. 4.8 mit den Ergebnissen	147
Tabelle 4-8: Vergleich der rechnerischen Versagenslasten nach Gl. 4.10 mit den Ergebnissen der FEM-Simulationen unter Verwendung der charakteristischen Betondruckfestigkeit f_{ck} (C-Serie)	147
Tabelle 4-9: Vergleich der rechnerischen Versagenslasten nach Gl. 2.6 mit den Ergebnissen der FEM-Simulationen unter Verwendung der mittleren Betondruckfestigkeit f_c (F-Serie)	149
Tabelle 4-10: Vergleich der rechnerischen Versagenslasten nach Gl. 2.6 mit den Ergebnissen der FEM-Simulationen unter Verwendung der charakteristischen Betondruckfestigkeit f_{ck} (F-Serie)	149
Tabelle 4-11: Vergleich der rechnerischen Versagenslasten nach Gl. 2.1a mit den Ergebnissen der FEM-Simulationen unter Verwendung der charakteristischen Betondruckfestigkeit f_{ck} (F-Serie)	150
 Tabelle 5-1: Übersicht über das konzipierte Versuchsprogramm	158

