

SCSC-PLATTE ALS FAHRBAHNDECK FÜR EISENBAHNBRÜCKEN

Ermittlung der Tragfähigkeit von SCSC-Platten auf Grundlage von experimentellen statischen Traglastuntersuchungen und Bereitstellung eines Finite-Elemente-Grundlagemodells für weiterführende Simulationen an Sandwichplatten

Zusammenfassung der Projektergebnisse

Eine Vielzahl von Eisenbahnbrücken mit offener Fahrbahn nähert sich dem Ende ihrer Lebensdauer. Die betroffenen Brückentragwerke besitzen angesichts der „offenen“ Bauweise der Fahrbahnkonstruktion eine ausgesprochen niedrige Bauhöhe. Für moderne Eisenbahnbrücken besteht hingegen nach den aktuell gültigen Normen und Regelwerken das Erfordernis eines Schotteroberbaus oder einer festen Fahrbahn mit Konstruktionshöhen von rund einem halben Meter und darüber. Demzufolge ergibt sich für die entsprechenden Ersatzneubauten die Notwendigkeit von extrem schlanken Fahrbahnplatten.

Die neuartige Steel-Concrete-Steel-Composite-Platte (SCSC-Platte) erfüllt mit ihrer geringen Dicke von 200 mm die genannte Anforderung an Fahrbahnplatten von eingleisigen Eisenbahnbrücken und weist sowohl eine hohe Tragfähigkeit als auch eine hohe Steifigkeit auf. Das Forschungsprojekt umfasste als Kernaufgabe die Planung, Durchführung und Auswertung von experimentellen Traglastuntersuchungen an Sandwichplattenelementen mit einer Stützweite von 4,1 m unter statischer Belastung (siehe Abbildung 1). Über zusätzliche Ausziehversuche an adaptierten Push-Out-Versuchskörpern erfolgte die Ermittlung der Schubtragfähigkeit der Verbundmittel der SCSC-Platte. Begleitende Vergleichsrechnungen unter Anwendung der Finite-Elemente-Methode wurden ergänzend zur ganzheitlichen Analyse der Plattenkonstruktion herangezogen. Als Ergebnis der Forschungsarbeit wurden charakteristische Kennwerte der Sandwichplatte abgeleitet als auch ein Finite-Elemente-Grundlagemodell für weiterführende numerische Berechnungen bereitgestellt.



ABB 1. Versuchsanlage für Biegeversuche mit Druckkissen unter der SCSC-Platte; SCSC-Versuchskörper H_1 (mit einer Breite von 3 m bei 4,1 m Stützweite) während des laufenden Versuchs bei maximaler Durchbiegung von rund 170 mm in Plattenmitte und 5.590 kN Belastung

Facts:

- Laufzeit: 07/2013-06/2016
- Forschungseinrichtung: Technische Universität Wien - Institut für Tragkonstruktionen, Forschungsbereich Stahlbau
- Labortests an neun adaptierten Push-Out-Probekörpern zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Betonscheiben als schubkraftübertragendes Element der SCSC-Platte
- Experimentelle Tragfähigkeitsuntersuchungen an sechs SCSC-Plattenelementen mit realitätsnaher Stützweite unter statischer Flächenlast
- Bewertung des Tragverhaltens der geprüften Tragkonstruktionen mit unterschiedlichen Querschnittsformen und Identifizierung der systemspezifischen Versagensmechanismen
- Entwicklung eines an den Versuchsergebnissen kalibrierten Finite-Elemente-Grundlagemodells zur ganzheitlichen Beschreibung der Tragwirkung von SCSC-Platten für weiterführende Untersuchungen an Sandwichplatten
- Bewertung vorhandener Rechenmodelle für SCSC-Platten

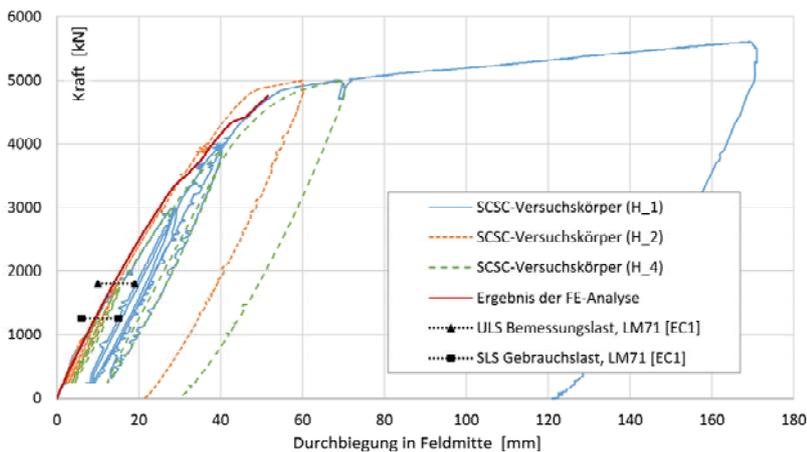


ABB 2. Kraft-Verschiebungs-Diagramm von ausgewählten Versuchskörpern der experimentellen statischen Traglastuntersuchungen im direkten Vergleich zu dem Ergebnis der numerischen Simulation und den normativen Lastvorgaben nach Eurocode 1

Kurzzusammenfassung

Problem

Die derzeit übliche Bauweise schlanker Fahrbahnplatten für Ersatzneubauten von eingleisigen Eisenbahnbrücken mit offener Fahrbahn weist einige Nachteile auf, wodurch das Erfordernis einer alternativen Plattenkonstruktion vorliegt.

Gewählte Methodik

Experimentelle Traglastuntersuchungen an großmaßstäblichen Plattelementen und Labortests zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit der Verbundmittel der neuartigen SCSC-Platte sowie begleitende numerische Simulationen unter Anwendung der Finite-Elemente-Methode (siehe Abbildung 2).

Ergebnisse

Die Ermittlung der Trag- und Versagensmechanismen der SCSC-Platte bilden die wesentlichen Aussagen der Forschungsarbeit. Ein Finite-Elemente-Grundlagemodell wurde im Sinne einer Schritt-für-Schritt Anleitung für weiterführende numerische Analysen zur Verfügung gestellt.

Schlussfolgerungen

Die Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass die Sandwichkonstruktion eine ausgesprochen hohe Tragfähigkeit unter statischen Lasten bei gleichzeitig hoher Duktilität aufweist. Die SCSC-Platte besitzt demgemäß ein hohes Potenzial in Hinsicht auf einen zukünftigen Einsatz in der Praxis. Weiterführende Forschungsaufgaben stellen die Entwicklung eines ingenieurmäßigen Nachweismodells sowie die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit der SCSC-Platte dar.

English Abstract

The current construction method of slender deck slabs for single-track railway bridges shows some relevant disadvantages. Therefore, the static load-carrying capacity of the innovative SCSC-plate was tested by extensive experimental investigations. Based on accompanying finite element analyses a template model for further numerical simulations on the sandwich plate was developed.

Impressum:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

DI Dr. Johann Horvatits
Abt. IV/ST 2 Technik und Verkehrssicherheit
johann.horvatits@bmvit.gv.at

DI (FH) Andreas Blust
Abt. III/14 Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
andreas.blust@bmvit.gv.at
www.bmvit.gv.at

ÖBB-Infrastruktur AG

Ing. Wolfgang Zottl, ISM
Streckenmanagement und Anlageentwicklung
Stab LCM und Innovationen
wolfgang.zottl@oebb.at
www.oebb.at

ASFINAG

DI Eva Hackl
Manager International Relations und Innovation
eva.hackl@asfinag.at

DI (FH) René Moser
Leiter Strategie, Internationales und Innovation
rene.moser@asfinag.at
www.asfinag.at

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH

DI Dr. Christian Pecharda
Programmleitung Mobilität
Sensengasse 1, 1090 Wien
christian.pecharda@ffg.at
www.ffg.at

Dezember, 2016

Weiterführende Forschung zur neuartigen Sandwich Verbundplatte als Fahrbahnplatte für Eisenbahnbrücken

SCSC-Platte

Ein Projekt finanziert im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung 2012 (VIF2012)

Mai 2017



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
A – 1030 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG
Nordbahnstraße 50
A – 1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
A – 1010 Wien



Für den Inhalt verantwortlich:

Technische Universität Wien
Institut für Tragkonstruktionen - Stahlbau
Karlsplatz 13
A – 1040 Wien



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien



Weiterführende Forschung zur neuartigen Sandwich Verbundplatte als Fahrbahnplatte für Eisenbahnbrücken

SCSC-Platte

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2012)

AutorInnen:

Dipl.-Ing. Marlene STEURER
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef FINK

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
ÖBB-Infrastruktur AG
Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

Technische Universität Wien,
Institut für Tragkonstruktionen – Forschungsbereich Stahlbau

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Grundlagen.....	8
1.1.	Allgemeines	8
1.2.	Forschungsschwerpunkt.....	8
1.2.1.	Die Grundlage der Forschungsarbeit.....	8
1.2.2.	Anforderungen an die alternative Bauweise der Fahrbahnplattenkonstruktion.....	9
1.2.3.	Die SCSC-Sandwichplatte: Konstruktionsweise und Tragmechanismen.....	10
1.3.	Ziele des Forschungsprojektes.....	13
1.4.	Der Umfang des Forschungsprojektes	14
2.	Ermittlung von Materialkennwerten für FE-Analysen der Sandwich-Verbundplatte – Vorversuche	15
2.1.	Grundlagen	15
2.2.	Planung und Durchführung der Vorversuche	17
2.2.1.	Die Planung der Vorversuche	17
2.2.1.1.	Die Vorversuchskörper	17
2.2.1.2.	Versuchsanlage und Messkonzept der Vorversuche.....	22
2.2.2.	Der Ablauf der Vorversuche.....	26
2.3.	Ergebnisse der Vorversuche	28
2.3.1.	Ausgewählte Ergebnisse der Vorversuche.....	28
2.3.2.	Eingabewerte für FE-Analysen von Sandwichplatten.....	31
3.	Ermittlung der Tragfähigkeit der SCSC-Platte unter statischer Flächenlast – Hauptversuche 35	
3.1.	Grundlagen	35
3.2.	Planung und Durchführung der Hauptversuche	35
3.2.1.	Die Planung der Hauptversuche	36
3.2.1.1.	Die Hauptversuchskörper.....	36
3.2.1.2.	Versuchsanlage und Messkonzept der Hauptversuche.....	42
3.2.2.	Der Ablauf der Hauptversuche.....	45
3.3.	Ergebnisse der Hauptversuche	47
3.3.1.	Ergebnisse der experimentellen Laboruntersuchung der SCSC-Platte	47
3.3.1.1.	Arbeitslinien – Das Tragverhalten von SCSC-Hauptversuchskörpern.....	47
3.3.1.2.	Messergebnisse der optischen Dehnungsmessung mit Aramis	49
3.3.1.3.	Erläuterungen zum Vergleich der Querschnitts-Typen 1 und 2	55
3.3.2.	Ergebnisse der Finite Elemente-Analyse der Sandwichplatte.....	55
3.3.2.1.	Allgemeines zu der numerischen Simulation der Hauptversuchskörper.....	55
3.3.2.2.	Ergebnisse der numerischen Simulation an SCSC-Plattenelementen	56
3.3.3.	Erkenntnisse nach dem Öffnen der beprobten Hauptversuchskörper.....	59
3.3.3.1.	Allgemeines	59

3.3.3.2.	Darstellung der geöffneten Hauptversuchskörper H_3 und H_4	59
3.3.4.	Zusammenfassung der Ergebnisse nach den SCSC-Hauptversuchen.....	62
3.3.4.1.	Überblick über die Ergebnisse der Hauptversuche	62
3.3.4.2.	Vergleich des Tragverhaltens von Versuchskörpern mit QS-Typ 1 und 2	64
3.3.4.3.	Beurteilung der Anwendbarkeit des numerisch Modells	64
4.	FE-Grundlagemodell für weiterführende numerische Analysen der SCSC-Platte unter statischer Belastung	65
4.1.	Einleitung	65
4.2.	Die Methode der Finiten Elemente	66
4.2.1.	Grundlagen	66
4.2.2.	Vorgehensweise bei FE-Analysen	67
4.2.2.1.	Preprocessor	67
4.2.2.2.	Solver.....	68
4.2.2.3.	Postprocessor.....	68
4.3.	Das kommerzielle FE-Programm ABAQUS	69
4.3.1.	Allgemeines.....	69
4.3.2.	Finite Elemente und deren Vernetzung	70
4.3.2.1.	Finite Elemente.....	70
4.3.2.2.	Das FE-Netz	72
4.3.3.	Stoffgesetze	73
4.3.4.	Die mathematische Formulierung der FEM	73
4.4.	Vorausgegangene numerische Berechnungen von Sandwichplatten.....	74
4.4.1.	Übersicht zu vorausgegangenen numerischen Analysen.....	74
4.4.2.	Wesentliche Festlegungen für numerische Simulationen von SCSC-Platten aus Erkenntnissen vorausgegangener Forschungsarbeiten	75
4.4.2.1.	Festlegungen zur Wahl des Integrationsalgorithmus	75
4.4.2.2.	Festlegungen zu der Modellierung der Grundbausteine einer SCSC-Platte ...	76
4.4.2.3.	Festlegungen zu der Vernetzung der Grundbausteine mit finiten Elementen .	76
4.4.2.4.	Festlegungen zu der Wahl des Elementtyps.....	77
4.4.2.5.	Festlegungen zu den Materialmodellen für Stahl und Beton	77
4.4.2.6.	Festlegungen zu Kontaktformulierungen.....	78
4.5.	Die Simulationen von SCSC-Platten mit ABAQUS - Das SCSC-Grundlagemodell.....	79
4.5.1.	Einleitung	79
4.5.2.	Abaqus CAE.....	79
4.5.3.	Einheiten	81
4.5.4.	Das Modul Part	82
4.5.4.1.	Allgemeines zu Parts.....	82
4.5.4.2.	Überblick zu den Parts der SCSC-Hauptversuchskörper mit QS-Typ 1	84

4.5.4.3.	Die Erstellung eines verformbaren Grundbausteins am Beispiel von Part 1 ...	89
4.5.4.4.	Die Erstellung eines starren Grundbausteins am Beispiel von Part 9	93
4.5.5.	Das Modul Mesh	94
4.5.5.1.	Allgemeines zu der Vernetzung mit finiten Elementen in ABAQUS.....	94
4.5.5.2.	Die Diskretisierung der Parts des SCSC-Grundlagemodells	95
4.5.6.	Das Modul Property - Materials und Sections	98
4.5.6.1.	Allgemeines zu Stoffmodellen und der Vergabe von Materialeigenschaften...	98
4.5.6.2.	Der Posten MATERIALS	99
4.5.6.3.	Der Posten SECTIONS	105
4.5.7.	Das Modul Assembly	105
4.5.7.1.	Allgemeines zu dem Gesamtmodell mit globalem Koordinatensystem	105
4.5.7.2.	Die Option Instances	105
4.5.7.3.	Die Option Sets	106
4.5.7.4.	Die Option Surfaces	106
4.5.8.	Das Modul Step.....	106
4.5.8.1.	Allgemeines zu Berechnungsschritten	106
4.5.8.2.	Der Initial Step	106
4.5.8.3.	Der Analyse-Step	107
4.5.9.	Das Modul Interaction – Interactions und Constraints	107
4.5.9.1.	Die Anwendung des Moduls Interaction.....	107
4.5.9.2.	Der Posten INTERACTION PROPERTIES.....	108
4.5.9.3.	Der Posten INTERACTIONS.....	109
4.5.9.4.	Der Posten CONSTRAINTS.....	110
4.5.10.	Das Modul Load – Loads und Boundary Conditions	111
4.5.10.1.	Allgemeines zu Randbedingungen.....	111
4.5.10.2.	Die Posten AMPLITUDES und LOADS.....	111
4.5.10.3.	Der Posten BCs – Boundary Conditions	112
4.5.11.	Die Posten für Output Requests – Definition der Ausgabewerte.....	115
4.5.11.1.	Allgemeines zu Anforderungen an den Ergebnisumfang.....	115
4.5.11.2.	Der Posten FIELD OUTPUT REQUESTS.....	116
4.5.11.3.	Der Posten HISTORY OUTPUT REQUESTS.....	117
4.5.12.	Das Modul Job	118
5.	Evaluierung vorhandener Rechenmodelle der SCSC-Sandwichplatte nach <i>Herrmann</i>	119
5.1.	Grundlagen	119
5.2.	Beschreibung des Berechnungsverfahrens nach <i>Herrmann</i>	119
5.3.	Gegenüberstellung Ingenieurmodell – Messergebnisse der experimentellen Tragfähigkeitsuntersuchung	121

5.4. Schlussfolgerungen	126
6. Empfehlungen für weiterführende Forschungs-Aktivitäten zur Sandwich-Verbundplatte.....	127
6.1. Rechenmodell für die Bemessung von SCSC-Platten	127
6.2. Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit der SCSC-Platte	127
6.3. Langzeitverhalten der SCSC-Platte.....	128
7. Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse.....	129
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	131
Literaturverzeichnis	134
Anhang A – Planunterlagen	136
A1 – Planunterlagen der Vorversuche	136
A2 – Planunterlagen der Hauptversuche	154
Anhang B – Prüfzeugnisse und Zuschnittdokumentation	175
B1 – Unterlagen zu Stahlerzeugnissen der Vorversuche	175
B2 – Unterlagen zur Festigkeit des Kernbetons der Vorversuchskörper	179
B3 – Unterlagen zu Stahlerzeugnissen der Hauptversuche	180
B4 – Unterlagen zur Festigkeit des Kernbetons der Hauptversuchskörper	197

1. GRUNDLAGEN

1.1. Allgemeines

Die gegenständliche Darstellung versteht sich als Ergebnisbericht zu dem VIF 2012 – Forschungsprojekt 2.2.8 „Entwicklung einer neuartigen Sandwich-Verbundfahrbahnplatte für Eisenbahnbrücken“.

1.2. Forschungsschwerpunkt

1.2.1. Die Grundlage der Forschungsarbeit

Im Zuge des Forschungsprojektes wurde die *Steel-Concrete-Steel-Composite Plate* (kurz: *SCSC-Platte*), auch Sandwichplatte genannt, als Alternative zu der derzeit gängigen Grobblechplatte (siehe Abbildung 1 rechts) für die Anwendung als schlanke Fahrbahnplatte von kurzgespannten, eingleisigen Eisenbahnbrücken untersucht.

Die gegenwärtig übliche Bauweise als 120 mm dicke Grobblechplatte erweist sich trotz der sehr geringen Bauhöhe nicht als optimale Fahrbahnplattenkonstruktion für Ersatzneubauten des genannten Typs. Dies ergibt sich aufgrund diverser ungünstiger Eigenschaften wie der in Relation zur Stützweite großen Stahltonnage, den technologisch anspruchsvollen Schweißverbindungen als auch der mangelnden Verfügbarkeit der benötigten Grobbleche aufgrund geringer Bestellmenge an Baustahl.

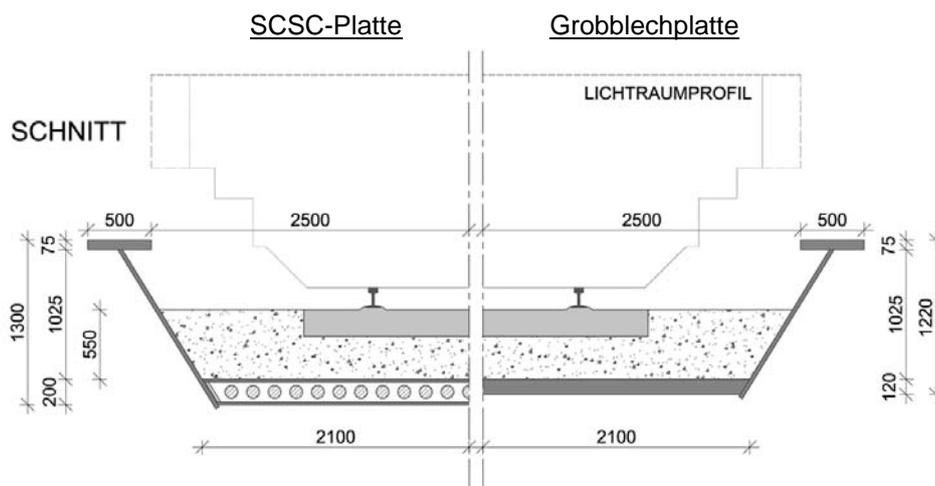


Abbildung 1: Querschnitt einer exemplarischen Trogbrückenkonstruktion mit Schotteroberbau; Konstruktionstypen der Fahrbahnplatte - links: SCSC-Platte; rechts: Grobblechplatte

1.2.2. Anforderungen an die alternative Bauweise der Fahrbahnplattenkonstruktion

Entsprechend der Vorgabe der Projektausschreibung wurde die Bauhöhe der Sandwichplatte auf 200 mm beschränkt. Als statisches System ergibt sich für die Versuchsanordnung eine zweiseitig gelagerte Platte mit einer Stützweite von 4.080 mm. Die genannten Systemdaten entsprechen den geometrischen Rahmenbedingungen für die beispielhafte Fahrbahnplatte einer eingleisigen Eisenbahnbrücke in Trogbauweise (entsprechend Abbildung 1 links).

Die an die Bauweise der neue Fahrbahnplattenkonstruktion gestellten Anforderungen lauten entsprechend dem Anbot des Forschungsprojektes SCSC-Platte [LB13] wie folgt:

Zur Vermeidung der oben beschriebenen Nachteile der unausgesteiften Grobblechfahrbahn (gemäß Kapitel 1.2.1, Anm.), wurde im Zuge von [Her13] (Anm.) eine Alternative gesucht, die vergleichbare Tragfähigkeiten bietet, ohne dabei wesentlich an Schlankheit zu verlieren. Es liegt nahe, das Material, das um die Schwerachse herum angeordnet ist und daher bei Biegemomentenbeanspruchung in Brückenquertragrichtung kaum Spannungen erfährt, durch einen kostengünstigeren Werkstoff, wie zum Beispiel Beton, auszutauschen. An den hoch ausgenutzten Randfasern kann die ursprüngliche Tragfähigkeit dabei durch die Anordnung von relativ dünnen Schichten aus Stahl nahezu ohne Einbußen erhalten bleiben. Dabei muss jedoch sichergestellt werden, dass die außen liegenden Stahlteile schubfest miteinander verbunden sind, um deren „Steineranteile“ möglichst voll ausnutzen zu können. Der stahlbaumäßige Anschluss an das Haupttragwerk soll erhalten bleiben, um eine vertikale Fuge zwischen Betonplatte und Brückenhauptträger zu vermeiden. Eine derartige Fuge ist in der Regel ein problematischer Detailpunkt, da deren dauerhafte Abdichtung gegen eindringendes Wasser nahezu unmöglich ist. Des Weiteren übernimmt das beiderseits der Betonplatte angeordnete Stahlblech zusätzlich die Funktion der Betonabdichtung auf der gesamten Plattenoberfläche und erhöht somit signifikant die Dauerhaftigkeit der Konstruktion.

Aus der Summe dieser Überlegungen heraus entsteht ein neuartiger Plattentyp, die „Steel-Concrete- Steel- Composite“ oder auch SCSC-Platte.

1.2.3. Die SCSC-Sandwichplatte: Konstruktionsweise und Tragmechanismen

Die SCSC-Platte stellt eine geschlossene Stahlkonstruktion aus dünnen Stahlblechen mit innenliegendem Betonkern dar. Der Schubverbund zwischen den Querschnittsteilen der beiden Verbundwerkstoffe Stahl und Beton wird mittels längslaufenden Dübelleisten, den sogenannten Lochdübelleisten, in Verbindung mit Betonscheiben (jene Bereiche des Kernbetons, welche die Löcher der Lochdübelleisten ausfüllen) als Verbunddübel gewährleistet. Die Konstruktionsweise lässt sich anhand der Fertigungsschritte der Sandwichplatte anschaulich darstellen (siehe Abbildung 2).

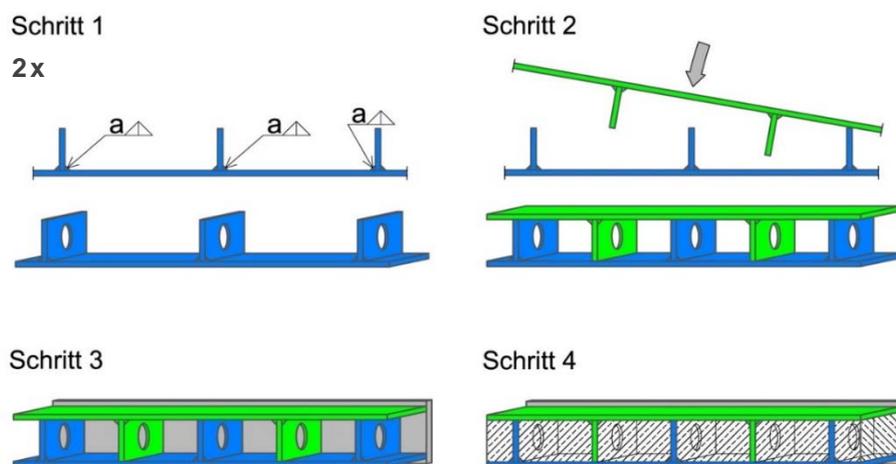


Abbildung 2: Fertigungsschritte bei der Herstellung einer SCSC-Platte [Her13]

Die Sandwichplatte besteht grundsätzlich aus zwei baugleichen Stahl-Teilquerschnitten, welche aus je einem 15 mm dicken Deckblech mit aufgeschweißten Lochdübelleisten zusammengefügt sind (Schritt 1). Der Abstand der Dübelleisten zueinander beträgt hierbei jeweils 1.000 mm. Die Lochdübelleisten mit 20 mm Dicke weisen kreisrunde Löcher mit einem Durchmesser von 100 mm alle 165 mm auf. Die beiden Teilquerschnitte aus Stahl werden in der Art zueinander ausgerichtet, dass die Lochdübelleisten kammförmig ineinandergreifen (Schritt 2). Anschließend werden in einem 3. Arbeitsschritt Endbleche an den beiden Auflagerlinien angeschweißt. Diese Bleche können einerseits die Stegbleche des exemplarischen Trogrückentragwerkes darstellen oder dienen neben der Funktion des Raumabschlusses als Teil der Auflagerkonstruktion der SCSC-Hauptversuchskörper (siehe Kapitel 3 und 4). Anschließend wird der Stahlkasten über Betonieröffnungen mit Beton ausgegossen (Schritt 4). Je nach Erfordernis wird der unbewehrte Betonkern zusätzlich verdichtet. Zur Herstellung der vollständigen Dichtigkeit der SCSC-Platte kann abschließend das Verschließen der Betonieröffnungen erfolgen.

Aus der speziellen Konstruktionsart der Sandwichplatte entstehen zwei Extremfälle der geometrischen Anordnung der Lochdübelleisten im Inneren der Verbundplatte. Diese sind zum einen die äquidistante Austeilung der Dübelleisten, im Folgenden Querschnitts-Typ 1 genannt, und zum anderen Querschnitts-Typ 2 mit benachbart liegenden Dübelleistenpaaren (siehe Abbildung 3).

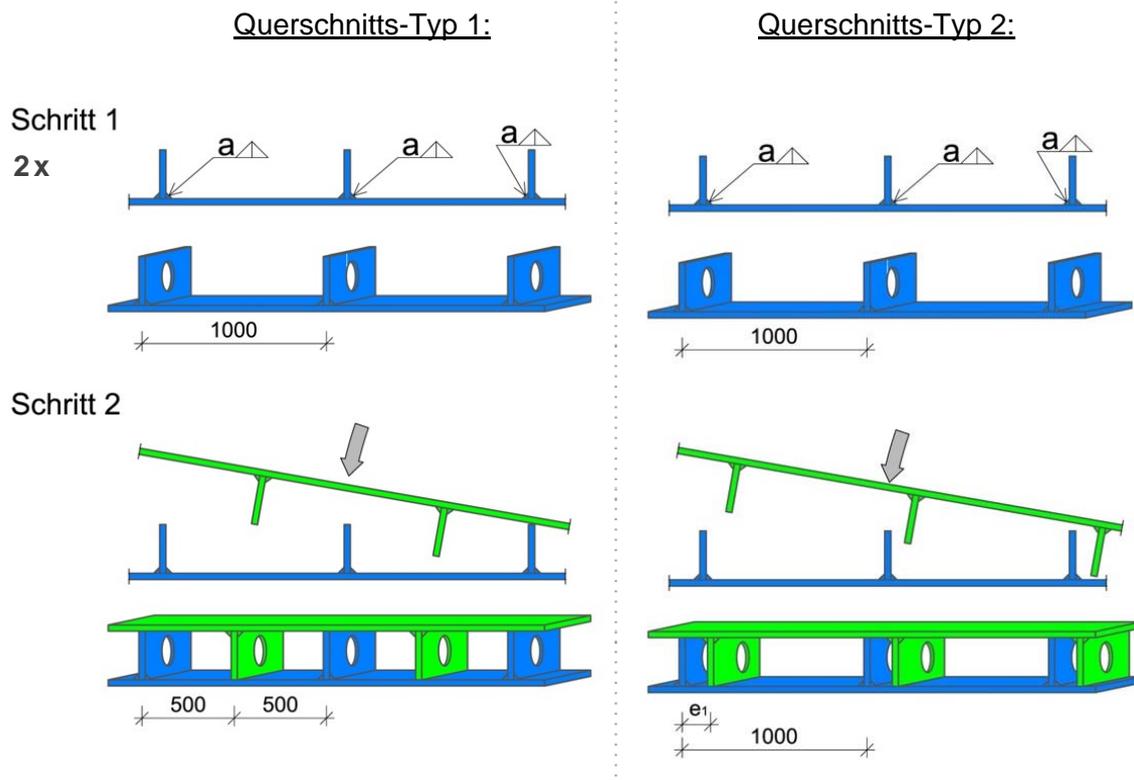


Abbildung 3: Vergleich der Querschnitts-Typen 1 und 2 der Sandwichplatte anhand der Fertigungsschritte 1 und 2 der Stahl-Teilquerschnitte

SCSC-Platten des Querschnitts-Typs 1, kurz: QS-Typ 1, zeichnen sich durch die Anordnung der Lochdübelleisten der beiden ineinandergreifenden Stahlquerschnitte im Abstand von jeweils 500 mm aus (siehe Abbildung 3 links). Dadurch weisen alle Abschnitte des Betonkerns jeweils die gleiche Breite auf. Der Aufbau von Querschnitts-Typ 2 zeigt hingegen auf einen Meter Platte zwei ungleich breite Betonkernabschnitte (siehe Abbildung 3 rechts). Grund dafür ist die Ausbildung von je einem Dübelleistenpaar je Laufmeter mit einem lichten Abstand e_1 von < 100 mm. In diesem Zusammenhang ist bei der Betonage von SCSC-Bauteilen mit schmalen Betonkernen besonders auf eine ausreichende Verdichtung dieser Bereiche zu achten.

Grundlegende Untersuchungen an Plattenkonstruktionen mit längslaufenden Dübelleisten (Kronendübeln bzw. Lochdübelleisten) wurden am Institut für Tragkonstruktionen – Stahlbau der Technischen Universität Wien von *DI Dr.techn. Paul Herrmann* unter der Leitung von *Univ.Prof. DI Dr.techn. Josef Fink* durchgeführt. Die Ergebnisse der umfangreichen Traglastanalyse sowie Tragmodelle der Sandwichplatte sind in der Dissertation von *Herrmann* mit dem Titel „*Tragfunktionsanalyse und rechnerische Modellbildung einer neuartigen Sandwich-Verbundplatte (SCSC-Platte) als Fahrbahndeck für Eisenbahnbrücken*“ [Her13] erörtert.

Eine Beschreibung der Tragmechanismen der Verbundplattenkonstruktion mit Querschnitts-Typ 1 wurde im Anbot des Forschungsprojektes *SCSC-Platte* [LB13] wie folgt dargelegt:

Die prinzipielle Konstruktion der SCSC-Platte besteht aus je einem außen liegendem Deck- und Bodenblech, die durch ihre Querschnittsfläche und ihren definierten Abstand den Hauptteil der Plattenbiegesteifigkeit erzeugen. Die direkte Verbindung des oberen mit dem unteren Blech, beispielsweise mit schubsteifen Stahlstegen, wäre statisch am günstigsten, ist aber aus Gründen der niedrigen Bauhöhe und somit der Unzugänglichkeit der Schweißnähte nicht ausführbar. Daher muss der Schubverbund durch den Füllbetonkern und Dübelleisten hergestellt werden, die mit dem Deck-, beziehungsweise dem Bodenblech verschweißt werden. Dabei werden diese Dübelleisten in einem definierten, wiederkehrenden Achsabstand wechselweise am oberen und unteren Blech angeordnet. Ihre Höhe entspricht dem Abstand der äußeren Stahlbleche, sodass keine zusätzlichen Abstandhalter erforderlich sind. []

Die Grundidee der Tragfunktion der so hergestellten Platte ist die Schubübertragung im Sandwichquerschnitt durch die Ausbildung von horizontal liegenden Druckdiagonalen zwischen benachbarten Dübelleisten im Betonkörper. [Abbildung 4] (Anm.) zeigt das Prinzip dieser Tragwirkung. Die Druckdiagonalen im Betonkern stützen sich gegenseitig an den Dübelleisten ab und leiten somit die aus dem globalen Plattenbiegemoment entstehenden Gurtscheibenkräfte in die außen liegenden Stahlteile ein. Diese Einleitung der Gurtnormalkräfte ist in den Längsschnitten in [Abbildung 4] (Anm.) durch die rot dargestellten Pfeile erkennbar. In der Modellvorstellung der unendlich ausgedehnten Platte mit definierter Stützweite stehen die quer zur Plattenspannrichtung stehenden Kraftanteile der Druckdiagonalen im Gleichgewicht mit den Diagonalen der angrenzenden Betonkammern. Lediglich an den Plattenrändern sind diese Horizontalanteile durch genügend steife Konstruktionen, wie zum Beispiel dicke Schottbleche, abzufangen. Die Aufgabe des

Füllbetons beschränkt sich also im Wesentlichen auf die schubfeste Verdübelung der außen liegenden Stahlteile. Er ersetzt sozusagen die, aus Gründen mangelnder Zugänglichkeit nicht ausführbare, zweite Halskehlnaht der „Stahlstege“, also der Dübelleisten. Im Rahmen dieser vereinfachten Definition der Tragfunktion wird der Betonkern dabei nur durch Druckspannungen beansprucht. Dies ermöglicht einen materialgerechten Einsatz von unbewehrtem Beton als Füllmaterial.

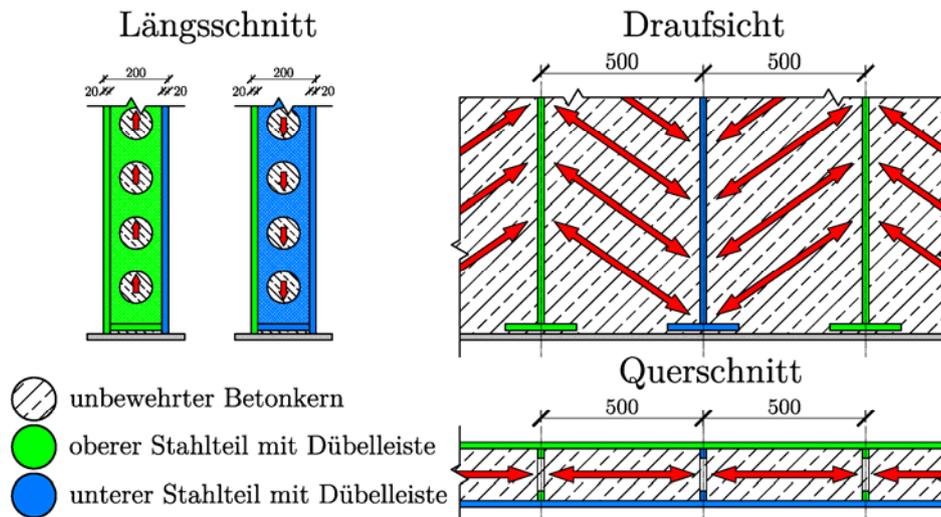


Abbildung 4: Tragfunktion der SCSC-Platte; Schubkraftübertragung im Sandwichquerschnitt durch horizontal liegende Druckdiagonalen (rote Pfeile) im Beton [Her13]

Die prinzipielle Funktionsweise der Schubkraftübertragung bei SCSC-Platten mit QS-Typ 2 entspricht ebenfalls dem oben genannten Tragmodell von horizontal liegenden Betondruckstreben, wobei der Schubverbund hier mittels kurzer Diagonaldruckstreben zwischen den benachbarten Betonscheiben der Dübelleistenpaare gewährleistet wird.

1.3. Ziele des Forschungsprojektes

Die dem Werkvertrag zugrunde liegenden Forschungsziele sind:

1. Experimentelle Ermittlung von charakteristischen Kennwerten zur Beurteilung des Zustands der Tragfähigkeit (ULS) von SCSC-Platten unter Anwendung probabilistischer Methoden. Statistisch aussagekräftige Ergebnisse sind dabei durch entsprechende Serien von Bauteilversuchen mit realitätsnahen Stützweiten und Belastungsszenarien erzielbar. → Kapitel 3

2. Entwicklung eines an Versuchsergebnissen kalibrierten FE-Modells zur vertiefenden, ganzheitlichen Beschreibung der Tragwirkung im Rahmen der Auswertung der Laborexperimente. → *Kapitel 2, 3 und 4*
3. Aussagen über die Anwendbarkeit von vorhandenen Rechenmodellen nach [Her13] für reale Stützweiten und Lastbilder nach Eurocode. Sind zur Erreichung einer ausreichenden Ergebnistrefferbarkeit eventuelle Anpassungen der Modelle notwendig, werden diese identifiziert und dokumentiert. → *Kapitel 5*
4. Bereitstellung von nichtlinearen Finite Elemente-Modellen, die anhand der Tragfähigkeitsuntersuchungen erarbeitet und kalibriert werden. Diese Modelle sind für zukünftige Untersuchungen von Einflüssen des Langzeitverhaltens (insbesondere Schwinden und Kriechen) des Kernbetons auf die Verformungen, Dehnungen und Spannungen der Konstruktion sowie für numerische Analysen des Bauteilermüdungswiderstandes verwendbar. → *Kapitel 4*

1.4. Der Umfang des Forschungsprojektes

Für die Untersuchung des Tragverhaltens der Sandwichplatte unter statischen Lasten wurden experimentelle Laboruntersuchungen an Versuchskörpern beider Querschnittstypen als auch umfassende numerische Simulationen durchgeführt und vergleichend ausgewertet. Im Zuge der Bearbeitung des Forschungsprojektes entstanden zusätzliche – im Werkvertrag des gegenständlichen Projektes *SCSC-Platte* nicht enthaltene jedoch für die Ergebnisfindung unerlässliche – Forschungsfragen. Diese beziehen sich auf die Analyse des zweiten Querschnittstyps sowie auf die experimentelle Ermittlung der Schubtragfähigkeit einer Betonscheibe durch die sogenannten „Vorversuche“. Die jeweiligen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen sind den nachfolgenden Kapiteln zu entnehmen.

2. ERMITTLUNG VON MATERIALKENNWERTEN FÜR FE-ANALYSEN DER SANDWICH-VERBUNDPLATTE – VORVERSUCHE

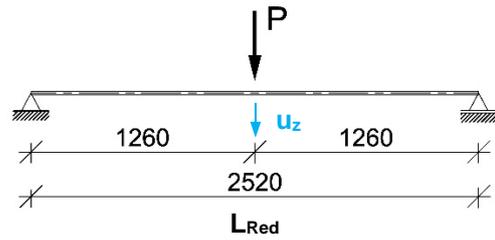
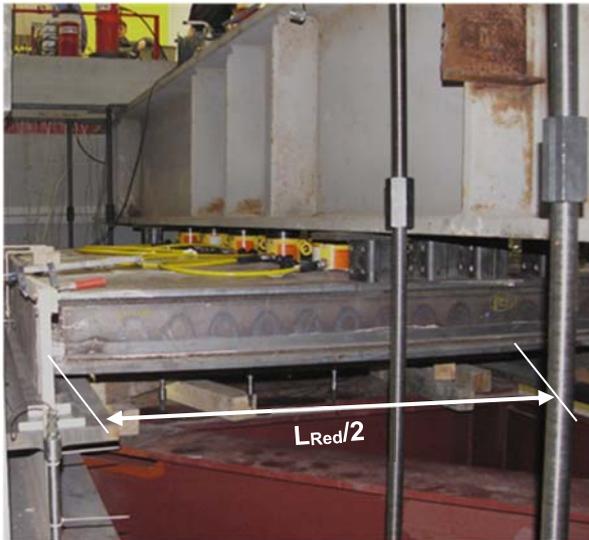
2.1. Grundlagen

Ziel der Vorversuche war einerseits die experimentelle Ermittlung der Schubtragfähigkeit einer Betonscheibe mittels Labortests an adaptierten Push-Out-Versuchskörpern. Die Ergebnisse dienen darüber hinaus insbesondere als fundierte Grundlage zur Festlegung anwendungsbezogener Eingabeparameter für numerische Analysen der Sandwichplatte.

Das gegenständliche Forschungsprojekt setzt auf einer vorangegangenen Untersuchung zu Sandwichplatten von *DI Dr.techn. Paul Herrmann* auf. Die wesentlichen Erkenntnisse sind in der Dissertation „*Tragfunktionsanalyse und rechnerische Modellbildung einer neuartigen Sandwich-Verbundplatte (SCSC-Platte) als Fahrbahndeck für Eisenbahnbrücken*“ [Her13] ausführlich dargelegt. *Herrmann* führte Sondierungsuntersuchungen an vier Versuchskörpern mit reduzierter Stützweite von 2.520 mm und unterschiedlichen Dübelleistengeometrien (Kronendübel sowie Lochdübelleisten) durch. Bezogen auf die SCSC-Platte mit Querschnitts-Typ 1 (entspricht Typ C nach [Her13]) zeigten begleitende Finite Elemente-Analysen trotz umfangreicher Parameterstudien eine Abweichung im Tragvermögen zwischen dem realen Versuchskörper und den Ergebnissen der Finiten Elemente-Analyse (siehe Abbildung 5 unten).

Dahingehend ergab sich die Notwendigkeit der Anpassung der Arbeitslinien von Stahl und Beton im numerischen Modell der Vorversuchskörper als auch die Überarbeitung der Parameterkombination der Eingabewerte für den Werkstoff Beton. Wie im Zwischenbericht [ZB14] beschrieben, wurde für diesen Arbeitsschritt nach Abwägung der Vor- und Nachteile dreier möglicher Lösungswege die experimentelle Analyse von Betonscheiben an Kleinversuchskörpern favorisiert und nachfolgend durchgeführt. In Kapitel 4.5.6.2 sind die aus der beschriebenen Untersuchung erhaltenen Erkenntnisse zusammengefasst.

Die im Folgenden erläuterten Vorversuche wurden im Verlauf des Forschungsprojektes *SCSC-Platte* als ergänzender Forschungsschwerpunkt zusätzlich zu den Inhalten des Werkvertrages bearbeitet.



L_{Red} Systemlänge in [mm]
 P Kraft in [kN]
 u_z Mittendurchbiegung in [mm]

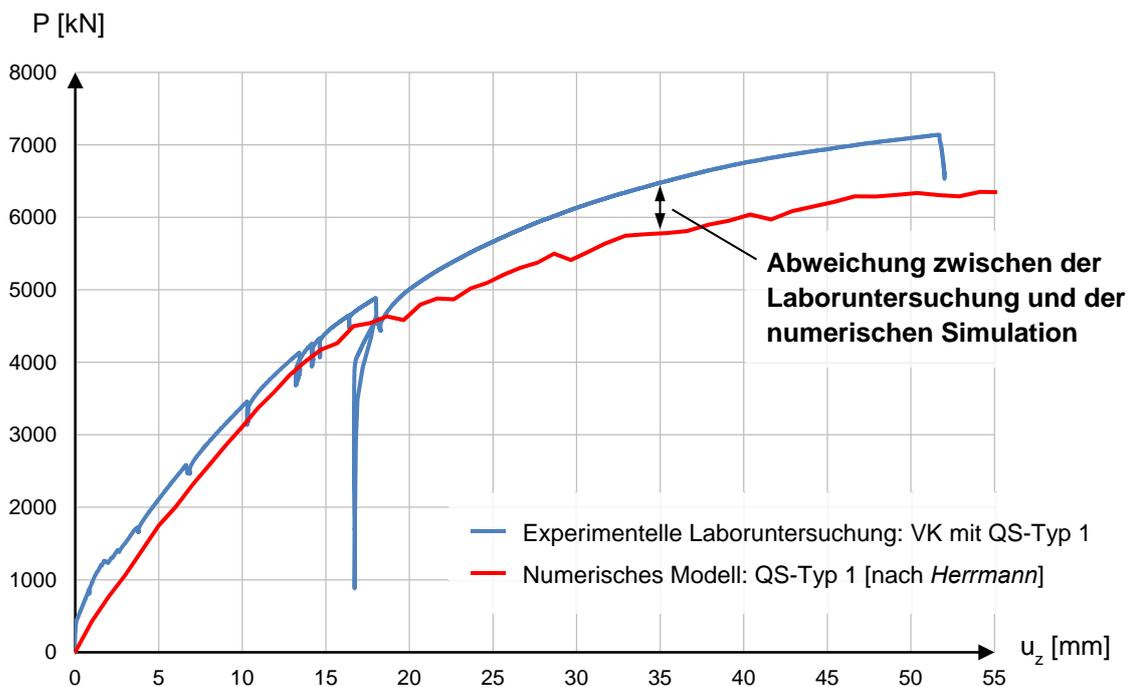


Abbildung 5: Sondierungsversuch an dem SCSC-Versuchskörper Typ C mit reduzierter Stützweite nach [Her13]; oben: Versuchsanlage und statisches System; unten: Kraft-Verschiebungs-Diagramm, Vergleich zwischen der experimentell ermittelten Arbeitslinie und dem Ergebnis der begleitenden FE-Analyse

2.2. Planung und Durchführung der Vorversuche

2.2.1. Die Planung der Vorversuche

Die Planungstätigkeit zu der experimentellen Untersuchung der Dübeltragfähigkeit von SCSC-Platten, auch Ausziehversuche genannt, umfasste im Wesentlichen

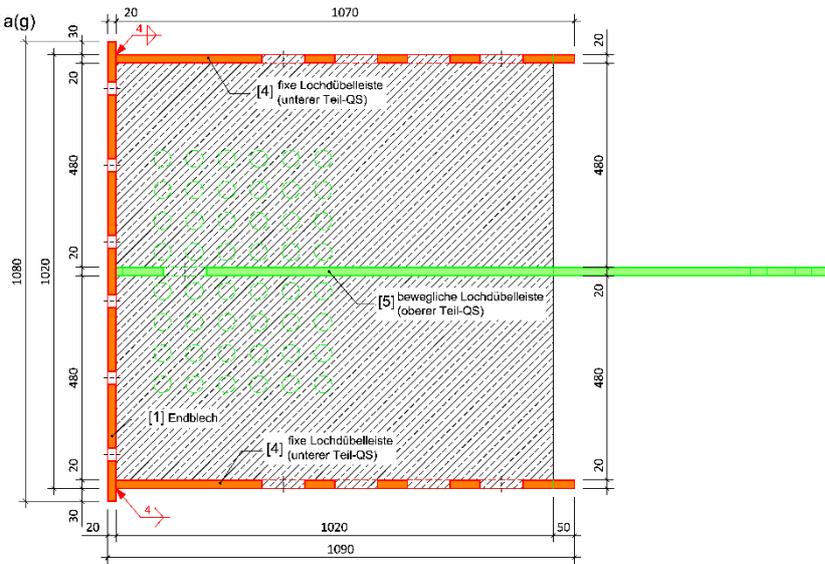
- die Festlegung der Versuchskörpergeometrie,
- die Erarbeitung einer geeigneten Versuchsanlage,
- die Anpassung des Messkonzeptes sowie
- die Erstellung aller erforderlichen Plan- und Vergabeunterlagen.

Die Planunterlagen zu den Vorversuchen (Versuchskörper, Versuchsanlage, Messkonzept) sind gesammelt in Anhang A1 ersichtlich.

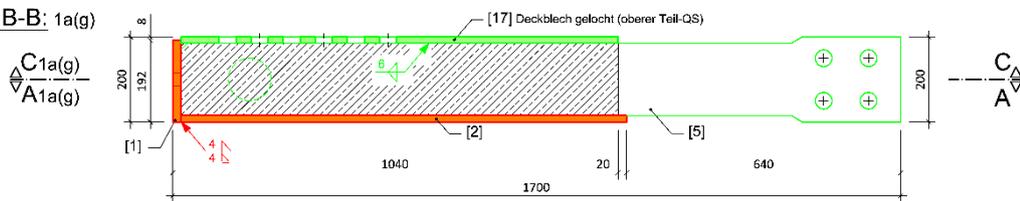
2.2.1.1. Die Vorversuchskörper

In Anlehnung an die Konstruktionsweise von Push-Out-Versuchskörpern wurden die SCSC-Ausziehversuche an Versuchskörpern mit einer entlang der Längsachse verschieblichen Lochdübelleiste geplant. Die genannte mittlere Dübelleiste wies aufgrund der Geometrie der Lasteinleitungsstruktur lediglich ein kreisförmiges Loch mit 100 mm Durchmesser auf, wodurch je Versuchskörper Aussagen zum Tragverhalten einer einzelnen Betonscheibe gemacht werden konnten. Die Breite der Probekörper entsprach mit rund 1 m der Systemabmessung eines vollen Plattenfeldes mit jeweils zwei Betonkammern. Den seitlichen Abschluss der Versuchskörper bildeten fixe Randdübelleisten mit einer definierten Anzahl an kreisförmigen Ausnehmungen (Anzahl der seitlichen Löcher abhängig vom Versuchskörper-Typ). Die Plattendicke betrug 200 mm, die Dicken der Lochdübelleisten wurden mit 20 mm, jene der Deck- und Bodenbleche mit 15 mm festgelegt. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass durch die Übereinstimmung der verwendeten Geometriedaten mit jenen der SCSC-Hauptversuchskörper (siehe Kapitel 3) die Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse untereinander nahezu uneingeschränkt gewährleistet ist. Zur Gegenüberstellung des Tragvermögens von Betonscheiben in Abhängigkeit des Querschnitts-Typs wurden drei Arten von Versuchskörpern getestet (siehe Abbildung 6 bis Abbildung 8). Je Serie wurden hierfür drei Versuchskörper gefertigt, wobei jeweils zwei baugleiche Versuchskörper und ein Versuchskörper mit gelochtem Deckblech zur Anwendung kamen. Die Öffnungen ermöglichten einen punktuellen Blick auf den Betonkern des Versuchskörpers mittels optischer Dehnungsmessung (System Aramis/GOM) während des laufenden Versuches.

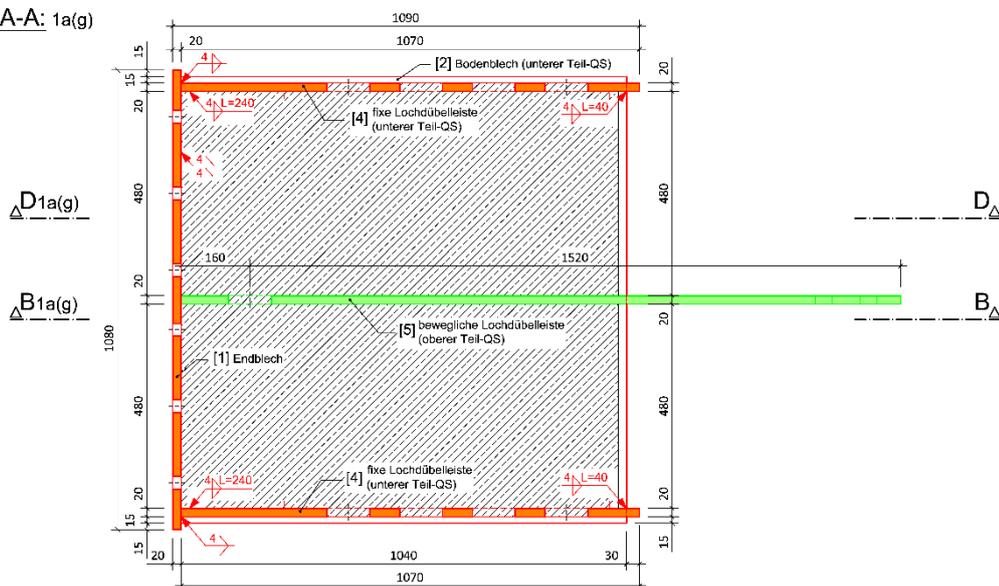
SCHNITT C-C: 1a(g)



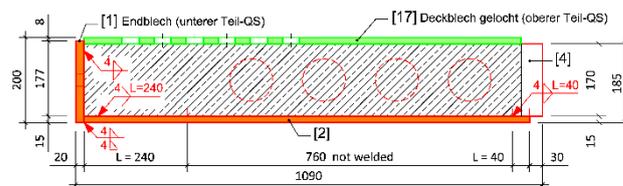
SCHNITT B-B: 1a(g)



SCHNITT A-A: 1a(g)



SCHNITT D-D: 1a(g)

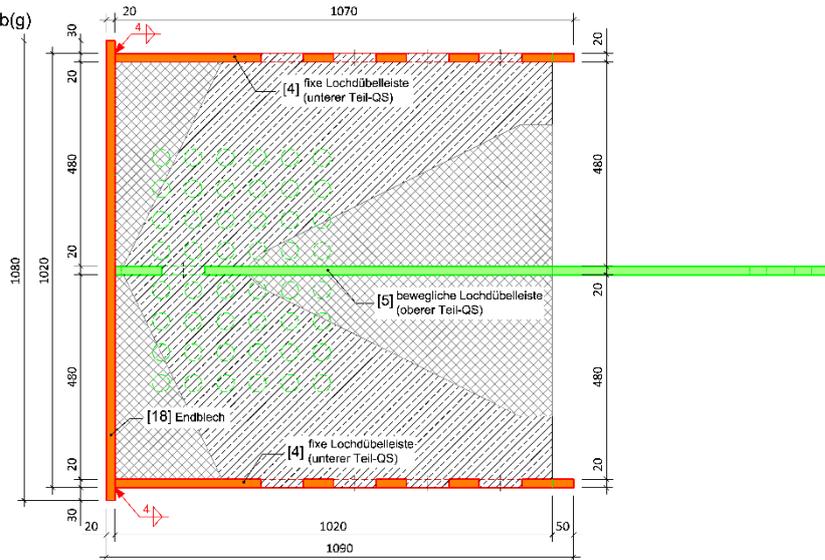


LEGENDE

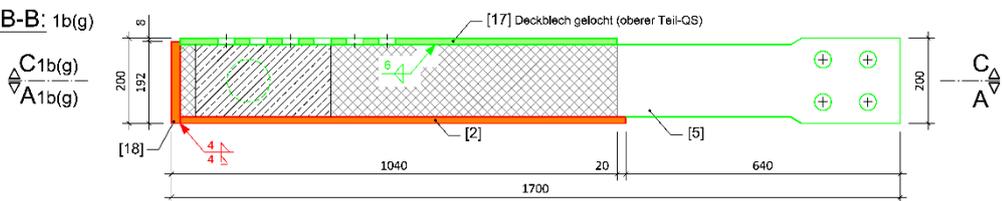
- Stahl, oberer Teil-QS
- Stahl, unterer Teil-QS
- Beton

Abbildung 6: Vorversuchskörper des Querschnitts-Typs 1a mit gelochtem Deckblech (vgl. Planunterlagen in Anhang A1)

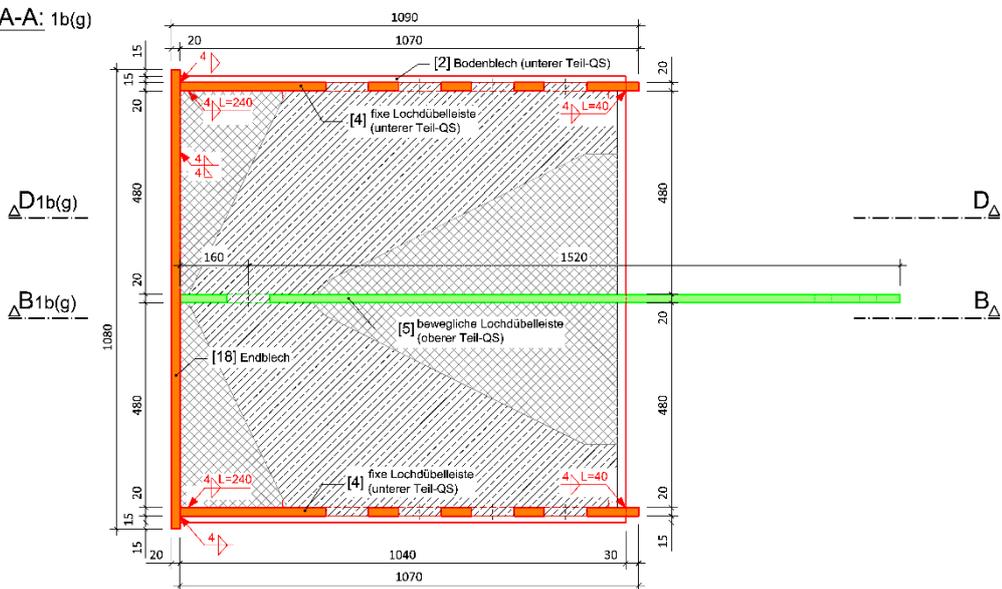
SCHNITT C-C: 1b(g)



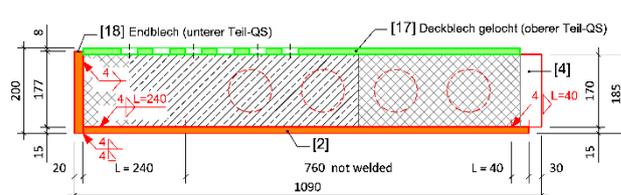
SCHNITT B-B: 1b(g)



SCHNITT A-A: 1b(g)



SCHNITT D-D: 1b(g)

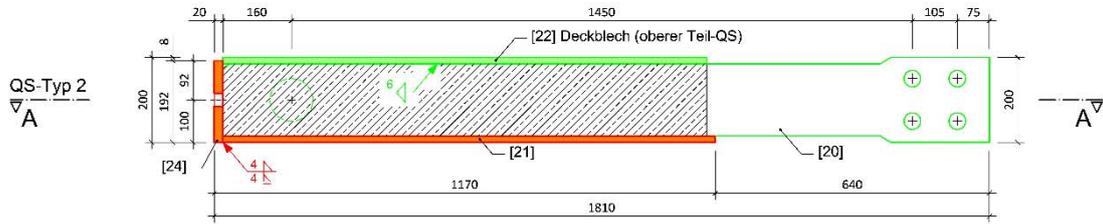


LEGENDE

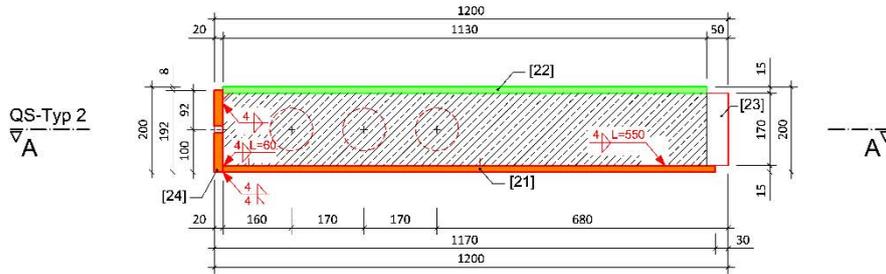
- Stahl, oberer Teil-QS
- Stahl, unterer Teil-QS
- Beton
- Styropor

Abbildung 7: Vorversuchskörper des Querschnitts-Typs 1b mit Styroporeinlage und gelochtem Deckblech (vgl. Planunterlagen in Anhang A1)

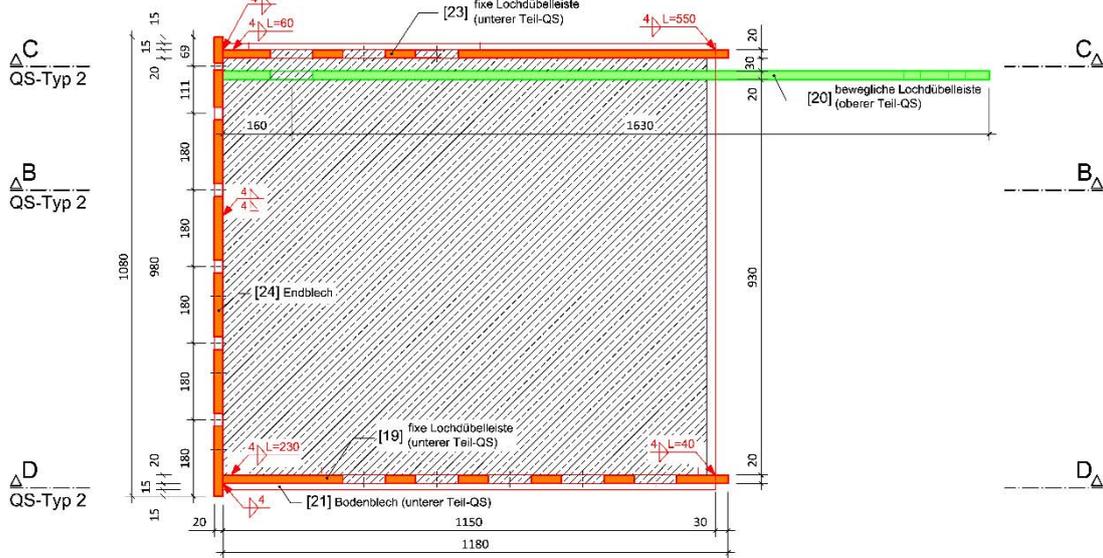
SCHNITT B-B: QS-Typ 2



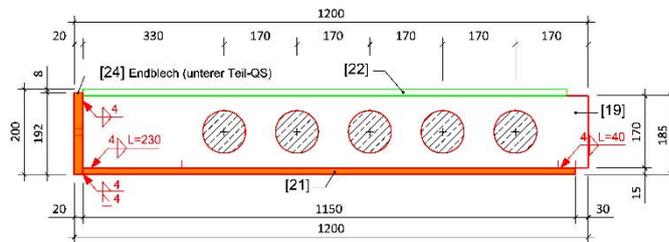
SCHNITT C-C: QS-Typ 2



SCHNITT A-A: QS-Typ 2



SCHNITT D-D: QS-Typ 2



LEGENDE

- Stahl, oberer Teil-QS
- Stahl, unterer Teil-QS
- Beton

**Abbildung 8: Vorversuchskörper des Querschnitts-Typs 2
(vgl. Planunterlagen in Anhang A1)**



Abbildung 9: Vorversuchskörper; links: Teil-Querschnitte aus Stahl des QS-Typs 1 vor der Betonage des Betonkerns (Bildausschnitt links: Teil-QS mit gelochtem Deckblech); rechts: oberer Teil-Querschnitt eines QS-Typ 1b-Versuchskörpers



Abbildung 10: Betonierarbeiten der Vorversuchskörper; links: Vorversuchskörper nach der Betonage; rechts: Probewürfel und temporäre Versiegelung von Öffnungen mit Wachs

Die Zusatzbezeichnungen Querschnitts-Typ 1a und 1b ergaben sich aus der Differenzierung der Vorversuchskörper ohne und mit Styroporeinlage (siehe Abbildung 6, Abbildung 7 und Abbildung 9). Die eingebrachten Styroporkeile in drei der sechs Vorversuchskörper mit QS-Typ 1 waren der Untersuchung etwaiger Abstützkräfte von Betondruckstreben in den Randbereichen der Betonkerne geschuldet.

Jeder Vorversuchskörper bestand aus einem oberen Teil-Querschnitt aus Stahl (mittlere Lochdübelbleiste und Deckblech), einem unteren Teil-Querschnitt aus Stahl (zwei Randdübelbleisten, Bodenblech und Endblech) und dem Betonkern. Für alle Stahlbleche der Vorversuchskörper wurde Baustahl der Güte S355 J2 +N¹ verwendet, der mit einem Trichter von oben eingebrachte Beton wies die Güte C30/37/B3/GK8² auf und wurde mit einer Rüttelflasche verdichtet.

Die für das Ausbetonieren der Stahlteile mit Wachs verschlossenen Öffnungen in den Deck- und Endblechen (siehe Abbildung 10, unten rechts) wurden vor Versuchsbeginn geöffnet. Ebenso wurden die Schweißpunkte zwischen dem Deckblech und den Randdübelbleisten, welche zusätzlich zur temporären Verspannung der Versuchskörper zur Lagesicherung der beiden Stahl-Teilquerschnitte während der Betonage dienten, vor dem Einbau der Versuchskörper in die Versuchsanlage aufgeschnitten.

Die Gestalt der Vorversuchskörper stellte einen Ausschnitt bzw. Teilbereich einer SCSC-Platte dar. Bedingt durch die spezielle Form der Probekörper konnte der Schubtragmechanismus der Sandwichplatte – die Übertragung der im oberen Stahl-Teilquerschnitt eingeleiteten Normalkraft durch die mittlere Lochdübelbleiste, die einzeln betrachtete Betonscheibe der mittleren Lochdübelbleiste über Betondruckstreben in die Betonscheiben der Randdübelbleisten bis zur Einleitung in den unteren Stahl-Teilquerschnitt – isoliert betrachtet und untersucht werden.

2.2.1.2. Versuchsanlage und Messkonzept der Vorversuche

Im Nachfolgenden ist ein kurzer Überblick über die Versuchsanlage und das Messkonzept der Vorversuche gegeben.

Abbildung 12 zeigt schematisch die Einbauten der Versuchsanlage der experimentellen Vorversuche für die Untersuchung von SCSC-Plattenelementen des Querschnitts-Typs 1 im Grund- und Aufriss. Die einzelnen Einbauten sind hierbei zum Zweck der besseren Übersichtlichkeit ihrer Funktion nach farblich gekennzeichnet. Der adaptierte Aufbau der Versuchsanlage für Tests an QS-Typ 2-Versuchskörpern ist in Abbildung 11 ersichtlich. Abbildung 13 stellt eine schematische Übersicht über die unterschiedlichen Messwertaufnehmer am Beispiel eines QS-Typ 1a-Vorversuchskörpers dar.

Die Vorversuche wurden im hauseigenen Labor des Instituts für Tragkonstruktionen – Forschungsbereich Stahlbau durchgeführt. Das Prüflabor verfügt über einen zwei-

¹ Nennwert der Stahlgüte

² Nennwert der Betongüte

geschossigen Prüfraumen (dargestellt in Abbildung 12 in brauner Farbe), welcher eine geeignete Lagerkonstruktion für die Einbauten der Versuchsanlage darstellte. Der Versuchskörper (grün) wurde mittels Schwerlastrollen auf der Unterkonstruktion (blau) über die Montagebahn (dunkelblau) im Prüfraumen in Position gebracht und mittels der seitlichen Messeinrichtung (violett - Grundriss) in seiner Lage fixiert. Anschließend wurde die Abstützkonstruktion (rot) an die Randdübelleisten angelegt und die beiden lasteinbringenden, horizontal orientierten Pressen (rot) über Laschen und Ankerplatten mit der mittleren Lochdübelleiste verschraubt. Abschließend erfolgten das Anlegen der vertikalen Messeinrichtung (violett - Aufriss) auf dem Deckblech des Vorversuchskörpers sowie das Einrichten der optischen Dehnungsmessung.

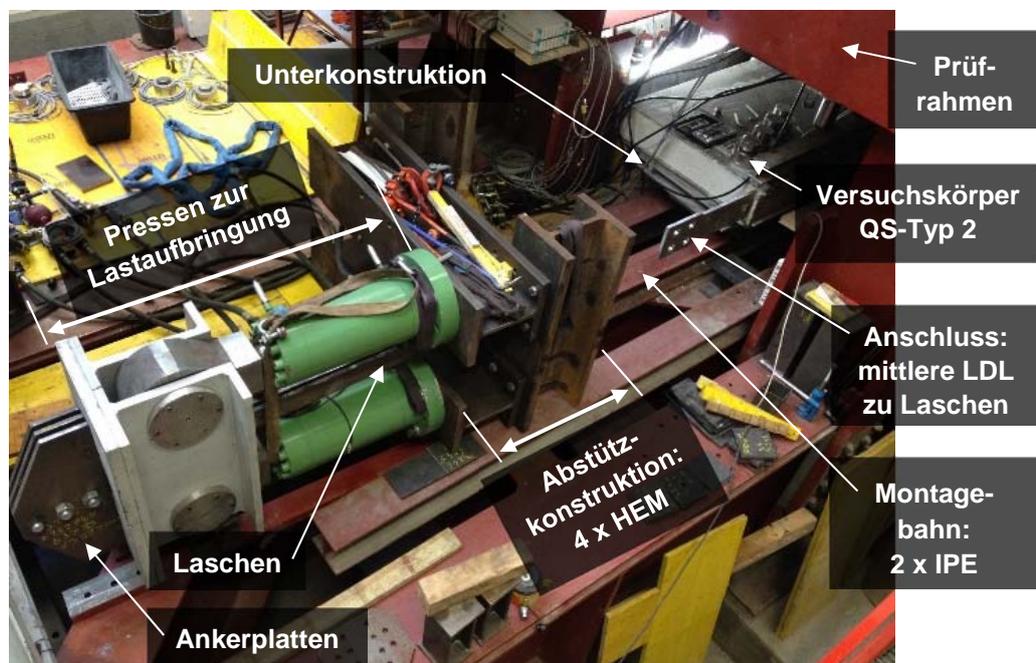
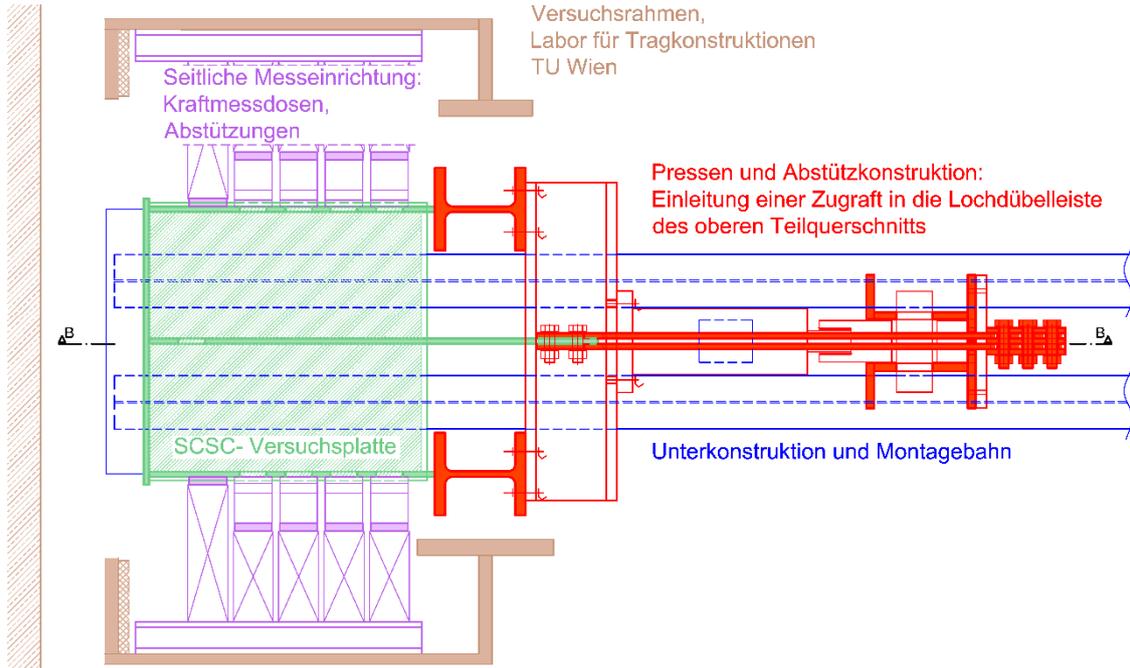


Abbildung 11: Übersicht über die Versuchsanlage der Vorversuche während dem Einbau eines QS-Typ 2-Vorversuchskörpers

Als Auflager der Vorversuchskörper fungierten

- die Unterkonstruktion (flächig, unverschieblich),
- die an die Betonscheiben der Randdübelleisten angelegten Kraftmessdosen bzw. Wägezellen als auch Abstützungen (punktuell, unverschieblich, gelenkig),
- vier Hohlzylinder-Pressen kombiniert mit Wägezellen als Teil der vertikalen Messeinrichtung im Bereich der freien Ränder des Deckbleches (punktuell, in Kraft-richtung verschieblich) als auch
- die Abstützkonstruktion in Längsrichtung der Randdübelleisten (unverschieblich).

SCHNITT A-A - horizontal



SCHNITT B-B - vertikal

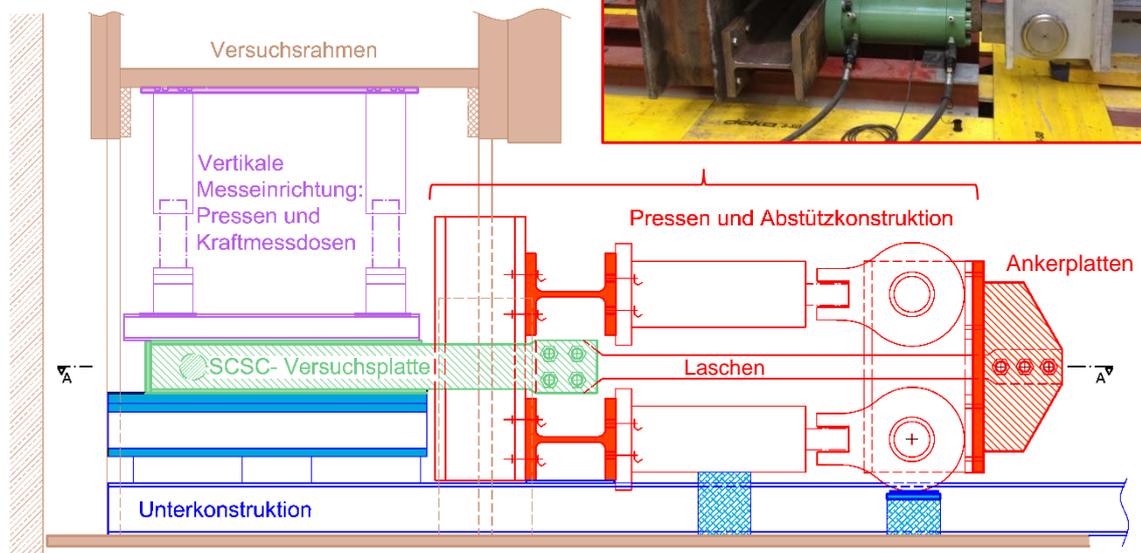


Abbildung 12: Grundriss und Schnitt der Versuchsanlage der Vorversuche samt eingebauten Probekörper des Querschnitts-Typs 1

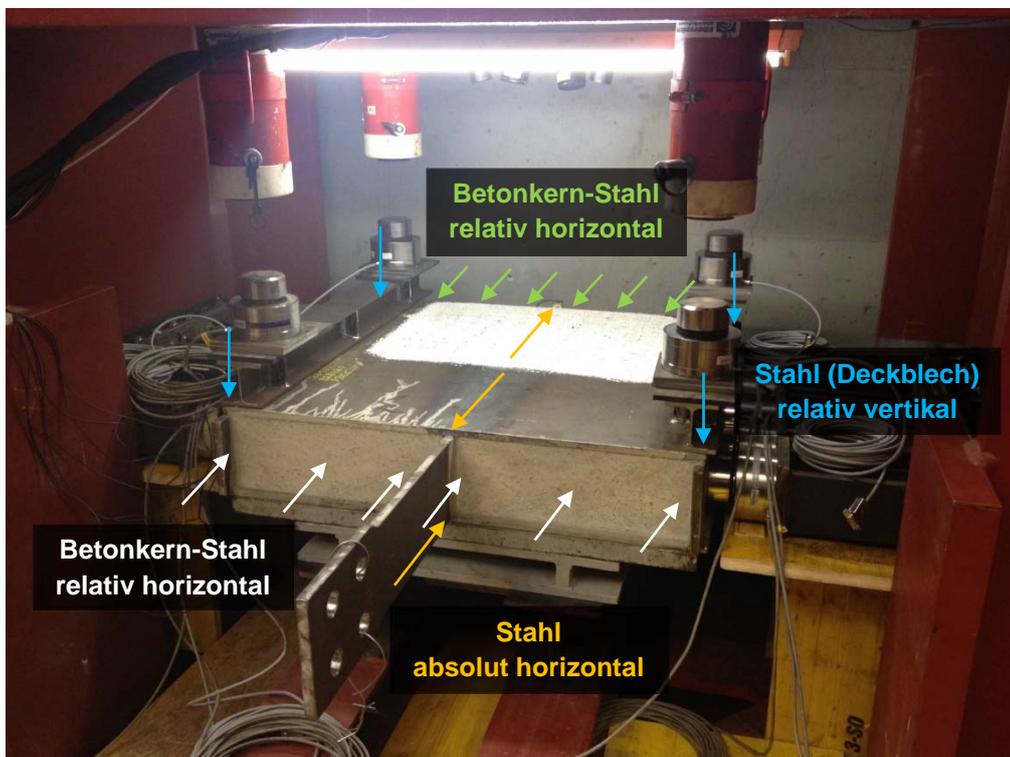
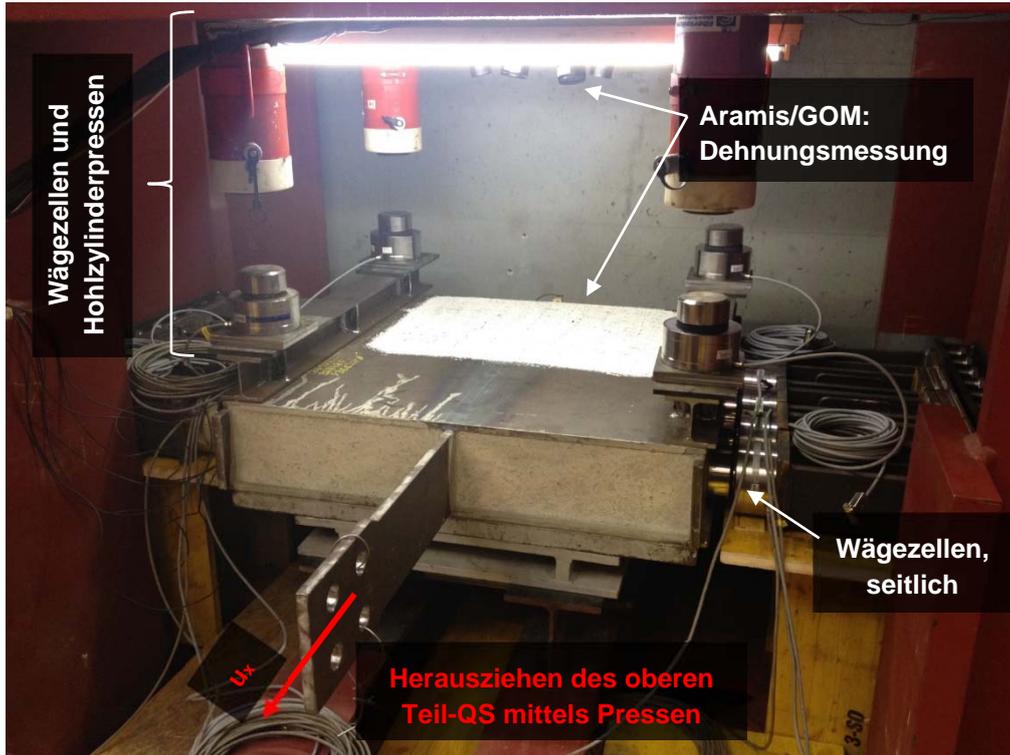


Abbildung 13: Übersicht zum Messkonzept der Vorversuche an einem QS-Typ 1-Versuchskörper; oben: Wägezellen, optische Dehnungsmessung sowie Lasteinleitung; unten: schematische Darstellung der Wegmessung mittels Wegaufnehmern

Die Belastung der Versuchskörper erfolgte weggesteuert über zwei gekoppelt angesteuerte Pressen, welche durch Ausfahren der Kolben das Herausziehen der mittleren Lochdübel- leiste bzw. des oberen Stahl-Teilquerschnittes ermöglichten. Der Wert der Versuchslast wurde hierbei über den Pressendruck ermittelt. Die Lasteinleitungs-konstruktion wurde so konstruiert, dass die über die Pressen eingeleitete Versuchslast im Sinne eines geschlossenen Systems als Auflagerkraft der beiden Randdübel- leisten von der Abstütz- konstruktion aufgenommen wurde.

Die Kraftmessdosen der seitlichen Messeinrichtung wurden vor Versuchsbeginn kraft- schlüssig an die Betonscheiben der Randdübel- leisten angelegt. Diese lieferten laufend während der Versuchsdurchführung Daten über die Auflagerwirkung der einzelnen seitlichen Betonscheiben.

Die vier Hohlzylinderpressen als Teil der vertikalen Messeinrichtung dienten der Simulation der realen vertikalen Auflast aus Eigengewicht des Schotteroberbaues und der Verkehrslast eines überfahrenden Zuges (entsprechend Lastmodell 71, EN 1991-2) im Versuch. Kraftmessdosen zwischen den Hohlzylinderpressen und dem Deckblech wurden zur laufenden Kontrolle der durch die Hohlzylinderpressen aufgebraachten Last eingebaut.

Neben der optischen Dehnungsmessung mit dem System Aramis/GOM kamen eine Vielzahl von Linearpotentiometern und Miniatur-Tastern zur Anwendung. Diese zeichneten die relativen und absoluten Verschiebungswege der einzelnen Bauteile der Vorversuchs- körper sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung auf (siehe Abbildung 13). Zusätzlich wurden Referenzmessungen mit linearen Dehnungsmessstreifen durchgeführt.

2.2.2. Der Ablauf der Vorversuche

Nach dem Einbau des jeweiligen SCSC-Vorversuchskörpers in die Versuchsanlage sowie der Feststellung der ordnungsgemäßen Funktion aller Messwertaufnehmer wurden die lasteintragenden Pressen an den Versuchskörper angelegt als auch ein Nullabgleich aller Messkanäle durchgeführt. Die Belastung der Versuchskörper wurde durch das Ausfahren der Pressenkolben mit einer Geschwindigkeit von 0,2 mm/min ausgeführt. Be- und Entlastungszyklen erfolgten erstmalig bei 30 kN Versuchslast. Wie exemplarisch für Versuchskörper V_3 in Abbildung 14 dargestellt, wurden hier zwei zusätzliche Lastzyklen nach Überschreitung der maximalen Versuchslast im Bereich des Reibungsplateaus bei rund 500 kN durchfahren. Halteintervalle von je 10 Minuten wurden bei Erreichen von 110 kN, 250 kN, 375 kN und 500 kN Versuchslast an allen Vorversuchskörpern sowie bei 750 kN an Querschnitts-Typ 2-Versuchskörpern (vgl. Abbildung 16) eingehalten.

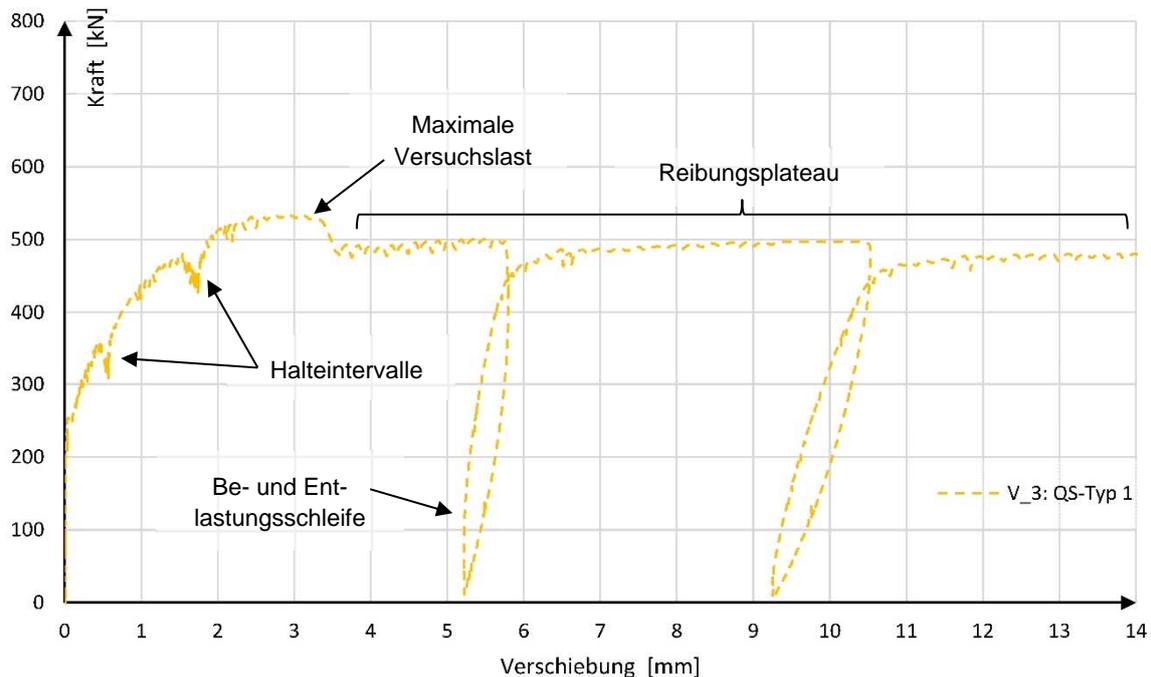


Abbildung 14: Kraft-Verschiebungs-Diagramm des SCSC-Vorversuchskörpers V_3

Aufgrund der Tatsache, dass durch das ausgeprägt duktile Bauteilverhalten der Vorversuchskörper mit QS-Typ 1 kein vollständiges Kollabieren der Versuchskörper herbeigeführt werden konnte, wurde das Versuchsende nach einem angemessenen Verschiebungsweg von rund 43 mm (V_2), rund 26 mm (V_4, V_6) bzw. rund 22 mm (V_3) definiert. Innerhalb dieser Verschiebungswege konnten die wesentlichen Zustände im Tragverhalten der untersuchten Betonscheiben durchfahren werden.

Bei Querschnitts-Typ 2-Versuchskörpern hingegen erwies sich die aufgebrachte Last als einschränkender Faktor (siehe Abbildung 16). Hier wurden die Versuche bei der rechnerisch maximal ertragbaren Last der Versuchsanlage von 800 kN abgebrochen. Nach Auswertung der Messergebnisse kann auch für diese Art der Vorversuchskörper das Versagensmuster der Betonscheiben eindeutig ausgewiesen werden.

Über die gesamte Dauer der Versuchsdurchführung wurden die Messwerte von Wägezellen, Wegaufnehmern, Dehnungsmessstreifen sowie der Pressenweg samt zugehöriger Kraft laufend aufgezeichnet. Zusätzlich erfolgte die Analyse des Deckbleches bzw. des Kernbetons mittels der dreidimensionalen optischen Dehnungsmessung (Aramis/GOM).

2.3. Ergebnisse der Vorversuche

Als wesentliche Erkenntnisse aus den Vorversuchen ergaben sich einerseits benutzer-spezifische Eingabewerte für Finite Elemente-Analysen der experimentellen SCSC-Hauptversuche (siehe Kapitel 2.3.2).

Andererseits erfolgte die Untersuchung der Schubtragfähigkeit von Betonscheiben an Versuchskörpern beider Querschnitts-Typen in Ergänzung zu den Forschungsinhalten des gegenständlichen Forschungsprojektes.

2.3.1. Ausgewählte Ergebnisse der Vorversuche

In diesem Abschnitt sind wichtige Ergebnisse der Vorversuche auszugsweise dargelegt. Abbildung 15 und Abbildung 16 stellen die Arbeitslinien der Vorversuchskörper unter statischer Belastung getrennt nach den Querschnitts-Typen 1 und 2 gesondert dar.

Abbildung 17 zeigt im Detail das Versagensmuster „vollständiges Abscheren eines Betondübels“ an einem nach Versuchsende geöffneten QS-Typ 1b-Versuchskörper. Im Weiteren sind die Untersichten aller Betonkerne der beprobten und geöffneten Vorversuchskörper in Abbildung 18 bis Abbildung 20 ersichtlich.

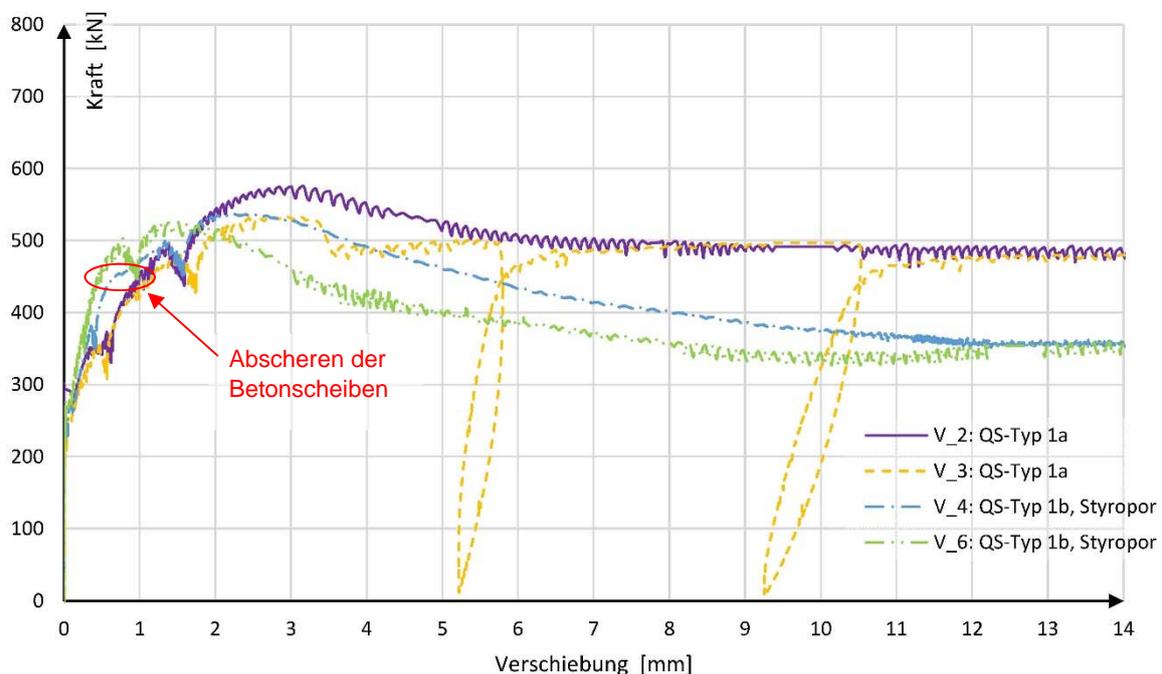


Abbildung 15: Kraft-Verschiebungs-Diagramm ausgewählter SCSC-Vorversuchskörper mit Querschnitts-Typ 1a und 1b

In Abbildung 15 sind vier Arbeitslinien von Vorversuchskörpern mit zentrisch liegender mittlerer Lochdübelreihe mit und ohne Styroporeinlagen abgebildet. Alle Vorversuchskörper weisen eine sehr hohe Anfangssteifigkeit auf. Im Lastbereich zwischen 450 kN und 480 kN erfolgte das vollständige Abscheren der Betonscheiben mit anschließender Umlagerung der Strebenwirkung im Kernbeton von anfänglich alleine wirkenden Betondruckstreben im ungestörten Betonkörper hin zu der Tragwirkung Gleitreibung zwischen der abgescherten Betonscheibe entlang der Betonkammern. Die Arbeitslinien weisen dahingehend im Nachbruchbereich ein ausgesprochen duktileres Tragverhalten auf. Dies ist anhand des langen Verschiebungsweges von über 14 mm ohne nennenswerte Änderung der eingebrachten Kraft ersichtlich, was sich durch das „Herausziehen“ der vollständig abgescherten Betonscheibe aus dem umgebenden Kernbeton (siehe Abbildung 17) erklärt.

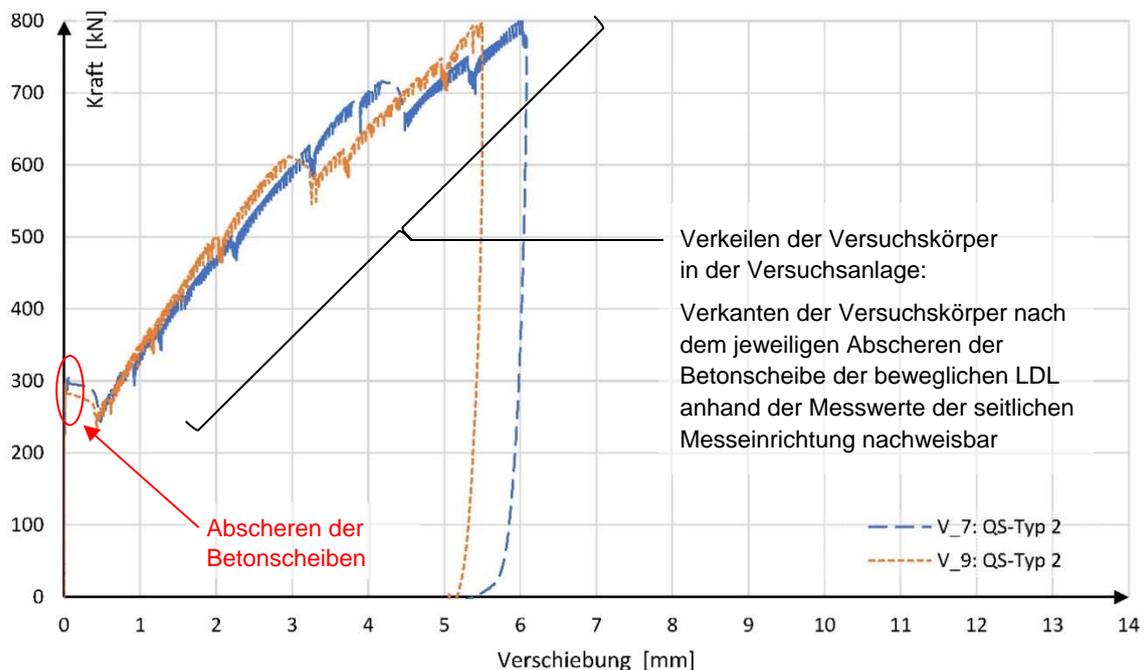


Abbildung 16: Kraft-Verschiebungs-Diagramm ausgewählter SCSC-Vorversuchskörper mit Querschnitts-Typ 2

Das Abscheren der jeweiligen Betonscheibe des oberen Teil-Querschnittes bei SCSC-Vorversuchskörpern des Querschnitts-Typs 2 erfolgte bei rund 300 kN. Wie in Abbildung 16 dargestellt, trat ein anschließendes Verkeilen des Versuchskörpers in der Versuchsanlage auf, wodurch für die Vorversuchskörper mit Dübelreihenpaaren keine Aussagen über das Bauteil-Tragverhalten im Nachbruchbereich getroffen werden konnten.

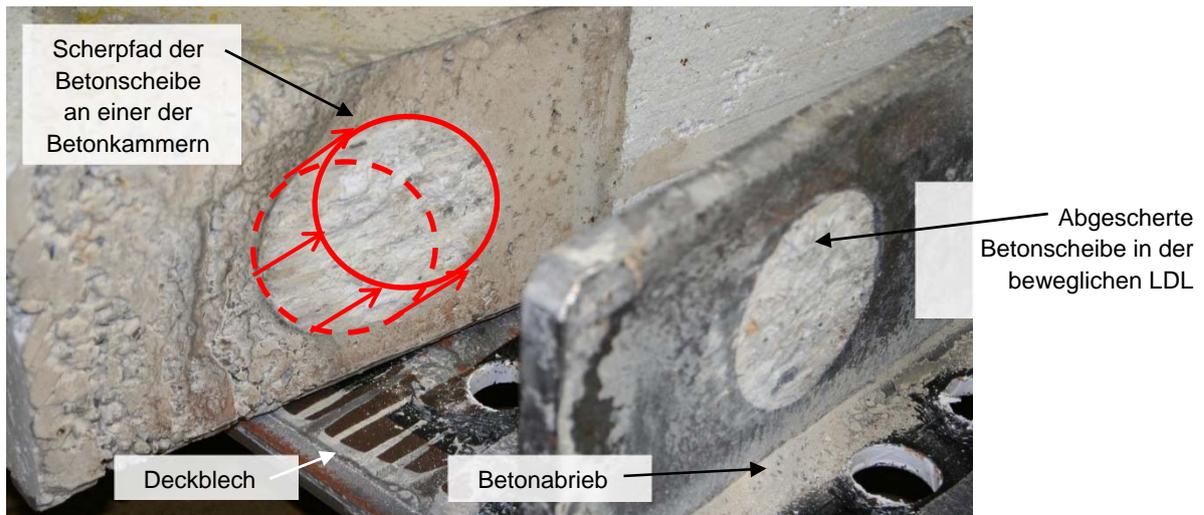


Abbildung 17: Darstellung eines geöffneten und umgedrehten QS-Typ 1b-Vorversuchskörpers mit vollständig abgeschserter Betonscheibe der mittleren Lochdübelreihe

Als wesentlicher Schritt bei der Analyse des Tragmechanismus von SCSC-Vorversuchskörpern beider Querschnitts-Typen erwies sich das Öffnen der Versuchskörper nach erfolgter Versuchsdurchführung. Hierfür wurden die vorhandenen Rissmuster im Betonkörper mit den Messwerten von Wägezellen, Wegaufnehmern und der optischen Dehnungsmessung vergleichend ausgewertet. Die erhaltenen Ergebnisse wurden als Grundlage für die nachfolgende numerische Parameteruntersuchung zur Ermittlung anwendungsbezogener Eingabewerte herangezogen.

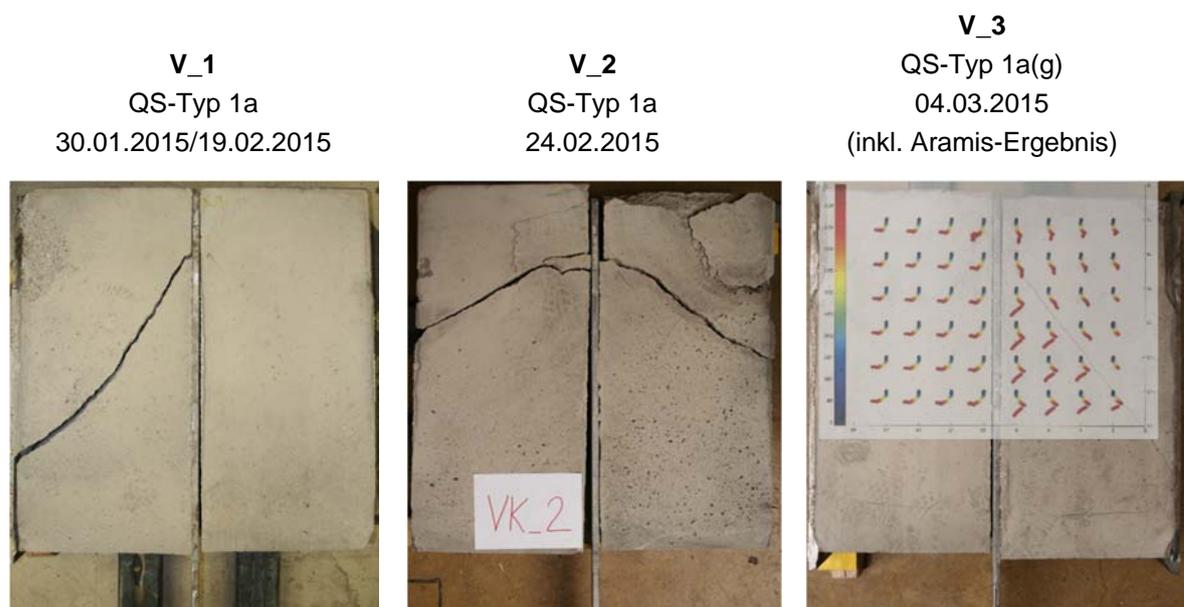


Abbildung 18: Untersichten der Betonkerne der geöffneten QS-Typ 1a-Vorversuchskörper



Abbildung 19: Untersichten der Betonkerne der geöffneten QS-Typ 1b-Vorversuchskörper



Abbildung 20: Untersichten der Betonkerne der geöffneten QS-Typ 2-Vorversuchskörper

2.3.2. Eingabewerte für FE-Analysen von Sandwichplatten

Die numerischen Vergleichsberechnungen zu den SCSC-Vorversuchen wurden mit einer Reihe von unterschiedlichen Parameterkombinationen durchgeführt. Bei der Modellierung der FE-Modelle wurde insbesondere auf die Vergleichbarkeit der physikalisch messbaren Eingabewerte, wie etwa die Druckfestigkeit des Betons oder die Festigkeitseigenschaften des Stahls (siehe Anhang B1 und B2), Wert gelegt. Es sind sowohl Vorversuchskörper mit Querschnitts-Typ 1 als auch jene mit Querschnitts-Typ 2 mittels numerischer Simulation analysiert worden (FE-Modelle siehe Abbildung 21).

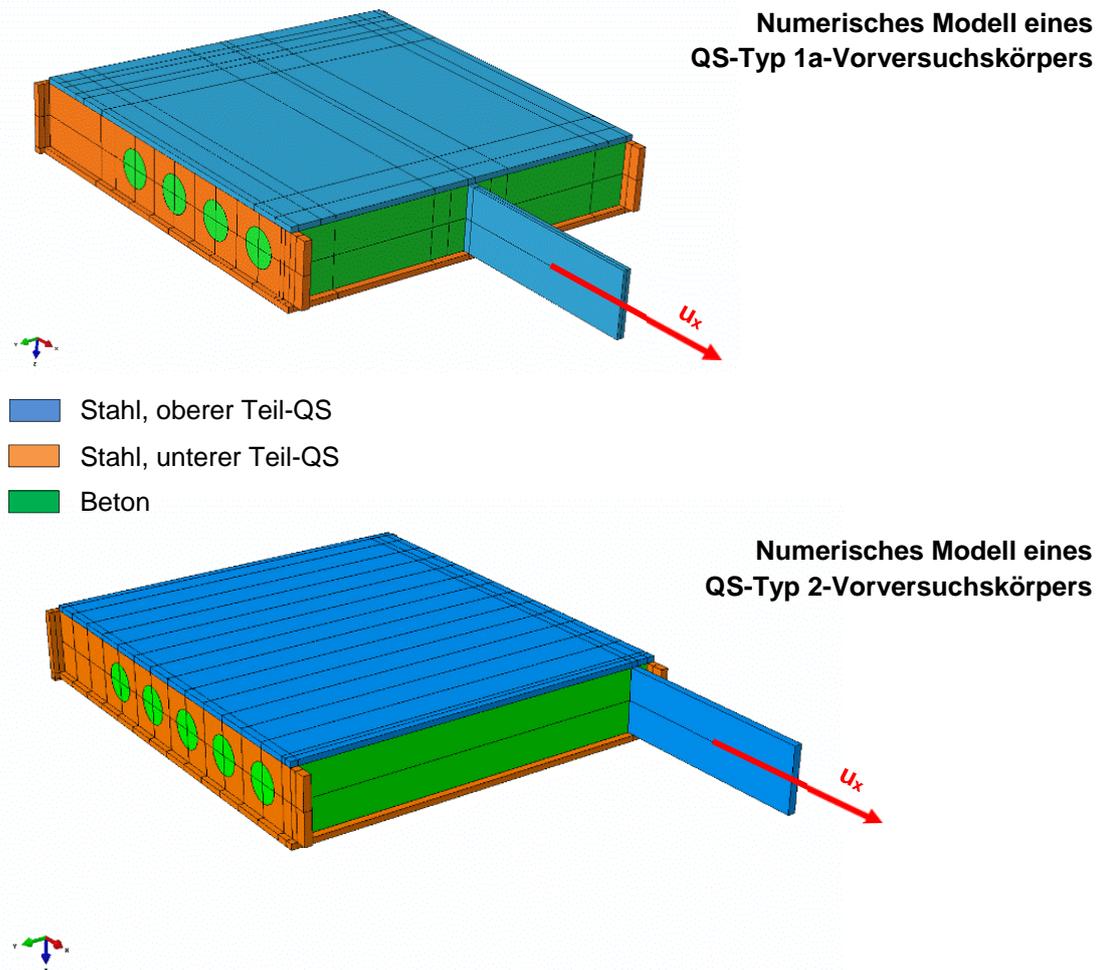
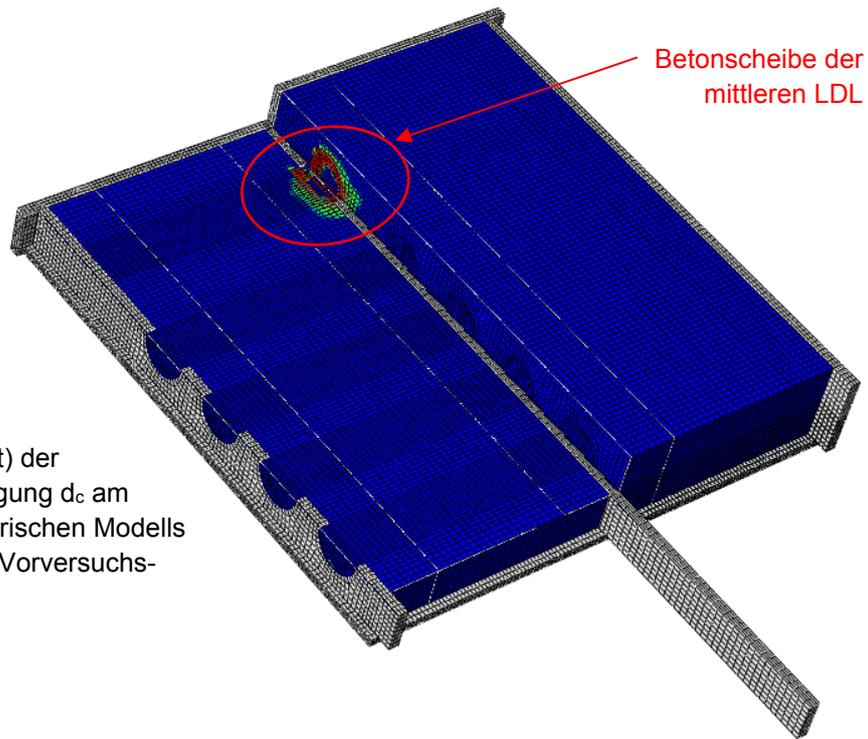
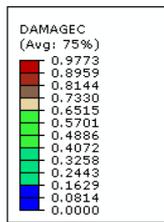


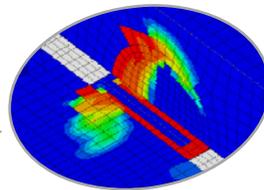
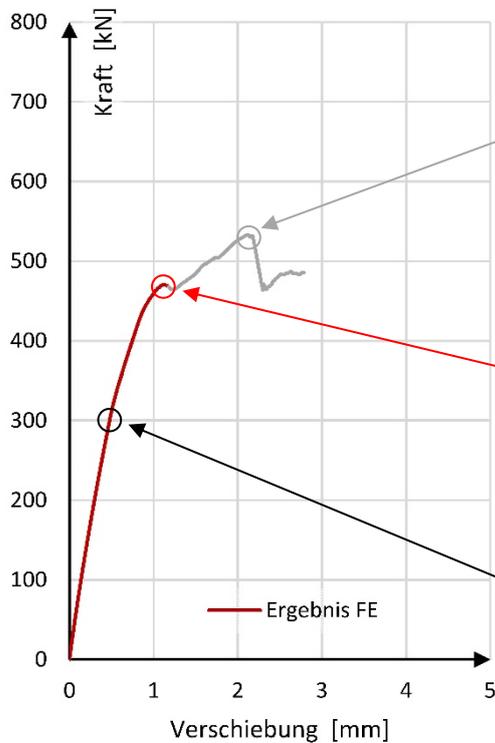
Abbildung 21: Numerische Modelle von Vorversuchskörpern unterschiedlicher Bauart

Die in Kapitel 4 empfohlenen Modellierungsregeln und -schritte für SCSC-Platten wurden in vollem Umfang bei den numerischen Simulationen der Vorversuchskörper angewendet. Auf die Modellierung einer Haftreibung zwischen dem Kernbeton und den Stahlteilen beider Querschnittsteile wurde verzichtet. Die dadurch entstandene Abweichung der Arbeitslinien der Laboruntersuchungen zu dem FE-Ergebnis trat ausschließlich in niedrigen Lastbereichen auf und besitzt keinen nennenswerten Einfluss auf die Erkenntnisse in Hinsicht auf den Versagensmechanismus der Simulationen (siehe Abbildung 23).

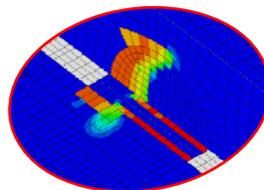
Der Gleitreibungsverbund der Betonscheiben im Bereich der Kehlen der Lochdübelleisten (Stirnflächen der runden Ausschnitte der LDL) mit den betreffenden Stahlteilen erfolgte mit einem Reibbeiwert $\mu = 0,3$. Allen weiteren Berührflächen zwischen den Stahlteilen und dem Betonkern wurden keine tangential wirkenden Reibungseigenschaften zugewiesen (dies entspricht $\mu = 0$).



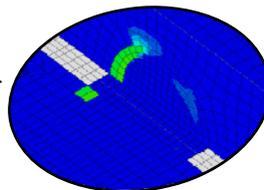
Konturdiagramm
(engl. Contour Plot) der
Betondruckschädigung d_c am
Beispiel des numerischen Modells
eines QS-Typ 1a- Vorversuchs-
körpers
($d_{c,max} = 0,9773$)



533 kN:
Fortschreitende Schädigung
von Nachelementen der
maximal geschädigten finiten
Elemente (Tragmechanismus
Abscheren und Gleitreibung mit
Betonmodell CDP nicht
darstellbar)



470 kN:
Schädigung des Betons im
Bereich zwischen der Beton-
platte und dem umgebenden
Kernbeton vollständig
ausgebildet
→ Versagensmechanismus
„Abscheren der Betonplatte“



300 kN:
Betondruckschädigung im
Bereich des Betondübels der
mittleren LDL schwach
ausgeprägt (max. $d_c = 0,573$)

**Abbildung 22: Ergebnis der numerischen Parameteruntersuchung
der Vorversuche am Beispiel eines QS-Typ 1a-Modells**

Als maßgeblicher Versagensmechanismus der modellierten Vorversuchskörper wurde das beidseitige Abscheren des Betondübels von dem umgebenden Kernbeton bei einer eingprägten Verschiebung von 1,1 mm respektive einer aufgebracht Last von 470 kN identifiziert (siehe Abbildung 22).

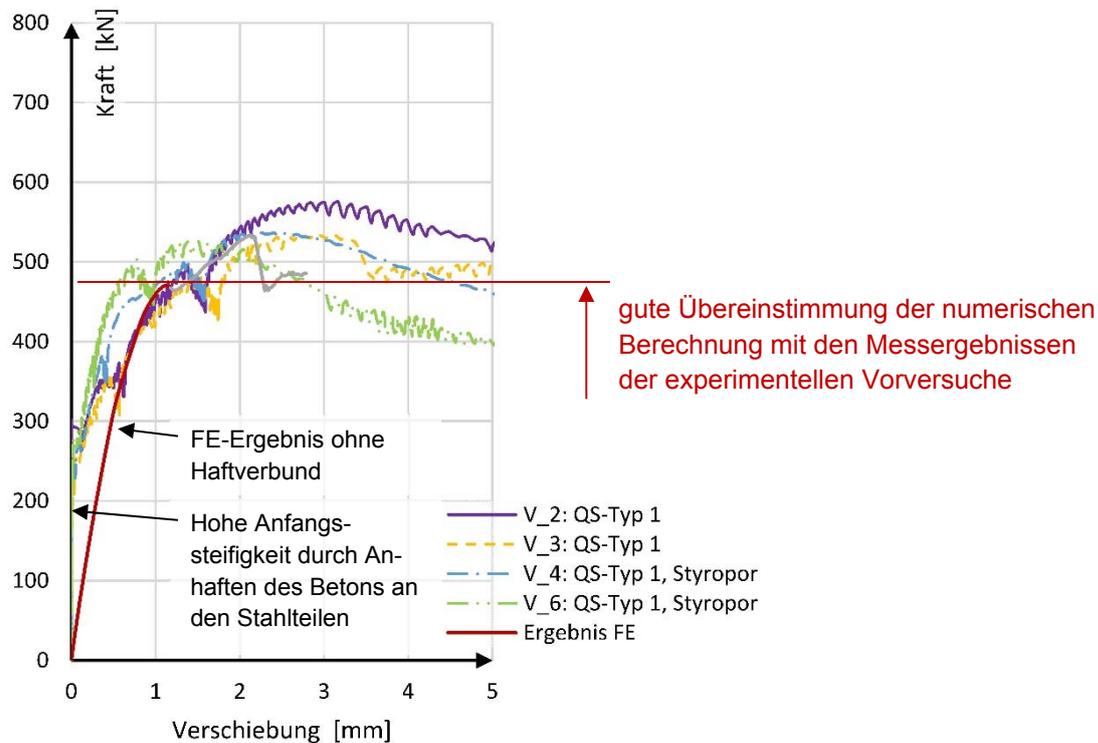


Abbildung 23: Vergleich der Arbeitslinien von QS-Typ 1-Vorversuchskörpern mit dem Ergebnis der numerischen Parameteruntersuchung

Die Ergebniskurve der FE-Berechnung mit den empfohlenen Eingabeparametern für numerische SCSC-Traglastanalysen (entsprechend Tabelle 8) ist im Vergleich zu den experimentell ermittelten Arbeitslinien der Vorversuchskörper mit QS-Typ 1 in Abbildung 23 abgebildet. Diese zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem Ergebnis der numerischen Simulation und dem Tragverhalten realer Vorversuchskörper (vgl. Arbeitslinien der QS-Typ 1a-Versuchskörper V_2 und V_3).

Die erhaltene, anwendungsbezogene Parameterkombination der Eingabewerte im FE-Programm ABAQUS wurde nachfolgend für die Simulation von SCSC-Hauptversuchskörpern angewendet. Detaillierte Informationen zur Versuchsdurchführung sind in Kapitel 3 dargelegt.

3. ERMITTLUNG DER TRAGFÄHIGKEIT DER SCSC-PLATTE UNTER STATISCHER FLÄCHENLAST – HAUPTVERSUCHE

3.1. Grundlagen

Die experimentellen Hauptversuche an Sandwichplatten mit 4.080 mm Stützweite stellen den Schwerpunkt des gegenständlichen Forschungsprojektes *SCSC-Platte* dar. Wie bei den in Kapitel 2 beschriebenen Vorversuchen wurden bei den Hauptversuchen ebenso Versuchskörper beider Querschnitts-Typen experimentell untersucht und anschließend zum Zweck einer ganzheitlichen Analyse des Bauteil-Tragverhaltens mit numerischen Simulationen ergänzt. Die nachfolgenden Ausführungen geben Informationen zu Planung, Durchführung sowie der Auswertung der Traglastuntersuchungen an großmaßstäblichen SCSC-Plattenelementen.

Alle maßgeblichen Arbeitsschritte in der Bearbeitung der Hauptversuche wurden von Projektmitarbeitern des Instituts für Tragkonstruktionen – Forschungsbereich Stahlbau der Technischen Universität Wien unter der Leitung von *Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Fink* durchgeführt.

3.2. Planung und Durchführung der Hauptversuche

Bei der Planung der SCSC-Hauptversuche wurde ein Kriterienkatalog ausgearbeitet, welcher im Sinne einer Zieldefinition die endgültige Geometrie der Hauptversuchskörper als auch den funktionellen Aufbau der Versuchsanlage maßgeblich beeinflusst hat.

Die Basiskriterien lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Gestalt der Hauptversuchskörper entspricht in ihrer Form einem Ausschnitt einer SCSC-Platte als Fahrbahnplatte einer realen Tragkonstruktion. Dieser muss zumindest einen – in Geometrie und Tragverhalten – ungestörten Teilbereich (Plattenstreifen mit 1 m Breite) aufweisen.
- Die Hauptversuche sollen an Versuchskörpern beider Querschnitts-Typen durchgeführt werden – diese müssen untereinander nahezu uneingeschränkt vergleichbar sein.
- Die Form der Belastung, welche auf die Fahrbahnplatte einer in Betrieb befindlichen Brücke einwirkt, muss realitätsnahe abgebildet werden. Dies kann durch eine Näherung mittels dreier Linienlasten oder über eine flächenhafte Lasteinleitung erfolgen.

- Die Auflagerung der Versuchskörper darf keine Zwängungen in den Versuchskörpern hervorrufen.
- Die Versuchsanlage soll in der Weise konstruiert sein, dass ein Deckblech des Versuchskörpers während der gesamten Versuchsdurchführung für die optische Dehnungsmessung frei zugänglich ist. Der Ein- und Ausbau der Hauptversuchskörper ist mit möglichst wenigen Arbeitsschritten rasch durchzuführen.
- Der Standort der Versuchsanlage muss über die erforderliche Infrastruktur (Wasser, Strom 230 V und 400 V etc.) und über eine für Lastkraftwagen passierbare Zufahrt verfügen sowie einen ausreichend tragfähigen Untergrund aufweisen. Das Vorhandensein eines Portalkranes zum Manipulieren der Versuchskörper als auch der Anlagenteile ist als vorteilig zu bewerten, andernfalls ist ein entsprechender Mobilkran erforderlich. Im Weiteren ist in unmittelbarer Nähe der Versuchsanlage für die Lagerung der Messapparaturen als auch für die Zwischenlagerung der Hauptversuchskörper eine hinreichend große Stellfläche über die gesamte Dauer der Hauptversuche frei zu halten.

3.2.1. Die Planung der Hauptversuche

3.2.1.1. Die Hauptversuchskörper

Bei den Hauptversuchen wurden zwei Serien von je drei baugleichen Versuchskörpern hergestellt. Die Hauptversuchskörper der Serien A (Versuchskörper des QS-Typs 1) und B (Versuchskörper des QS-Typs 2) unterschieden sich lediglich durch die Anordnung der Lochdübelleisten im Inneren der Verbundplatte (siehe Abbildung 24).

SCSC-Hauptversuchskörper beider Querschnitts-Typen wiesen bei einer Stützweite von 4.080 mm eine Plattenstärke von 200 mm auf. Die Plattenbreite von rund 3 m ergab sich aus zwei Randfeldern und einem als ungestört angesehenen Plattenfeld von je 1 m Breite. Ein SCSC-Hauptversuchskörper bestand im Wesentlichen aus einem oberen und einem unteren Stahl-Teilquerschnitt, den Auflagerkonstruktionen (Endblechen mit Auflagerflanschen), Abschlussblechen an den Randdübelleisten sowie dem Kernbeton.

Alle Stahlteile entsprachen der Güte S355 J2 +N. Aufgrund der unerlässlich notwendigen Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen vorausgegangener Laborexperimente an Sandwichplatten bestand für die Hauptversuchskörper die Forderung einer Betondruckfestigkeit von $\leq 60 \text{ N/mm}^2$. Dahingehend wurde mittels Einstellversuchen ein Rezeptbeton für den Kernbeton mit der Betongüte C30/37/X0/GK8/SCC entwickelt.

Eine schematische Übersicht über die Konstruktionsweise der SCSC-Hauptversuchskörper ist in Abbildung 24 und in Abbildung 25 ersichtlich.

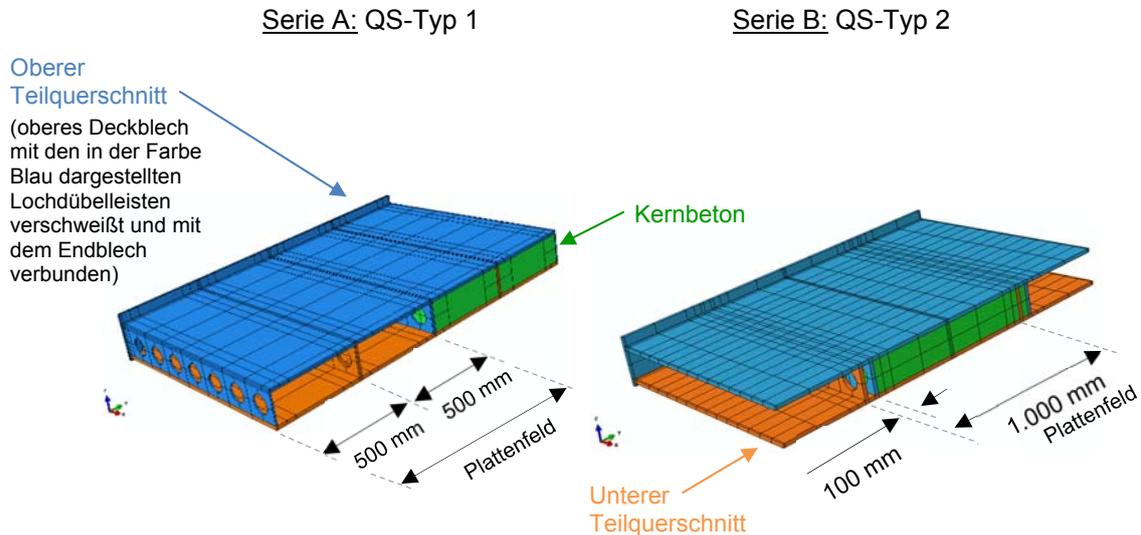


Abbildung 24: Vergleich der Querschnitts-Typen 1 und 2 der SCSC-Platte; schematische Axonometrie eines Ausschnittes der Hauptversuchskörper

In einem ersten Fertigungsschritt erfolgte die Herstellung der Stahl-Teilquerschnitte. Jeder dieser Bauteile wies ein 15 mm dickes Deck- oder Bodenblech auf, an das Lochdübeln von 20 mm Dicke im Abstand von 1.000 mm angeschweißt wurden. Die Verbunddübeln besaßen jeweils 24 Löcher mit 50 mm Radius alle 165 mm und wurden beidseitig mit Endsteifen (Dicke 15 mm) versehen. Die Bodenbleche der unteren Teilquerschnitte erhielten zusätzliche Knaggen aus Flachstahl, welche nachfolgend sowohl während des Betonierens als auch während der Versuchsdurchführung als seitliche Lagerung des freien Endes der Randdübeln (= äußere Lochdübeln der oberen Teilquerschnitte) dienten. Anschließend wurde jeder Teilquerschnitt mit einem 20 mm dicken Endblech verschweißt, wobei je Versuchskörper ein Endblech mit sechs runden Betonieröffnungen von 150 mm im Durchmesser vorgesehen war (vgl. Abbildung 26 oben/mitte). Danach wurden die als seitlicher Raumabschluss dienenden sägeblattförmigen Abschlussleisten mit den Randdübeln der oberen Teilquerschnitte verbunden. Im Weiteren wurden die Auflagerflansche mit den Endblechen verschweißt (siehe Abbildung 26 mitte). Durch das Aufsetzen des oberen Teilquerschnittes auf den entsprechenden unteren Teilquerschnitt wurde die endgültige Form der Stahlbauteile eingestellt. Zuletzt wurden die fehlenden Schweißnähte zwischen den Endblechen und den Deck- bzw. Bodenblechen gesetzt (siehe Abbildung 26 unten).

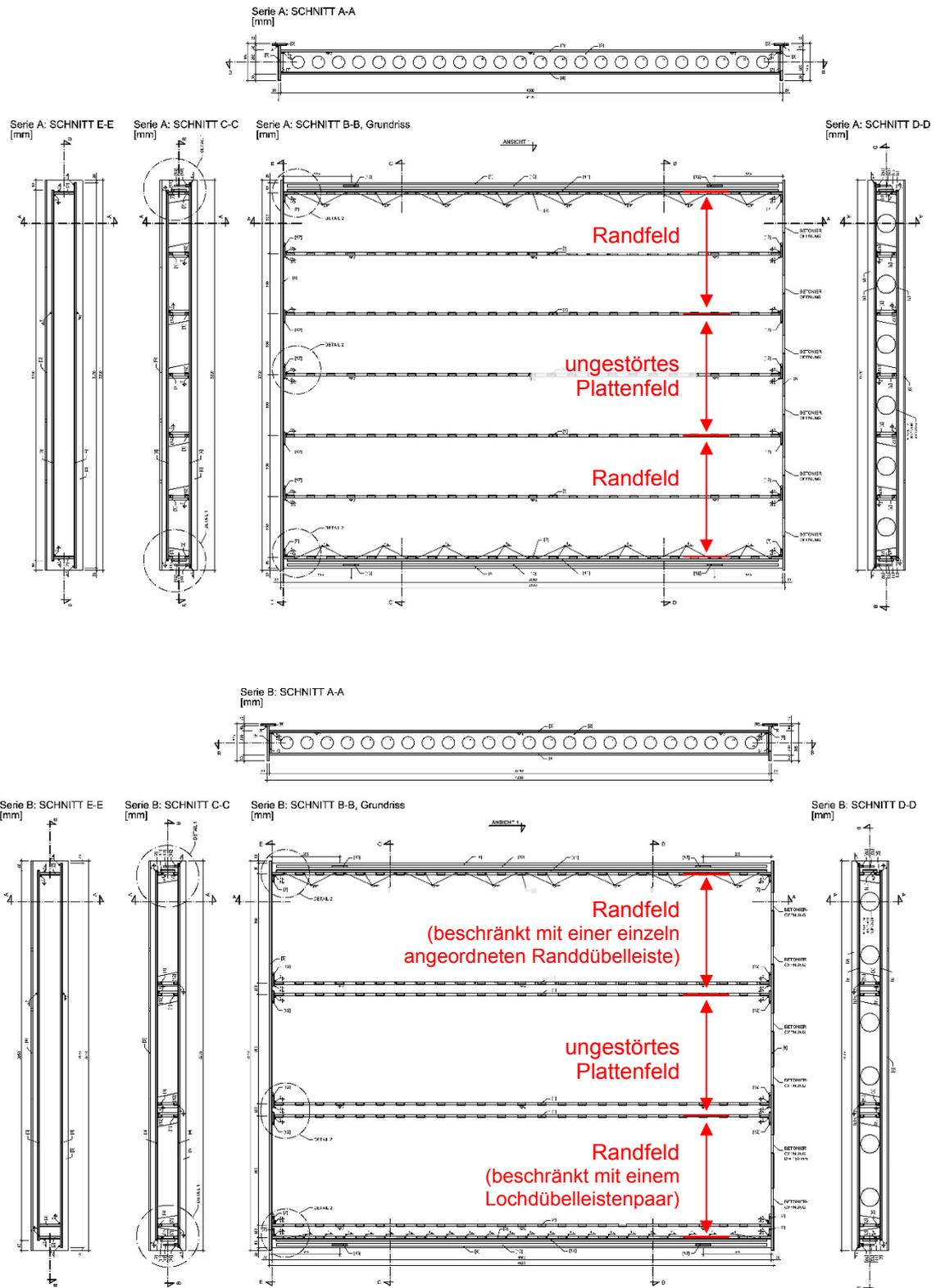


Abbildung 25: Planische Darstellung der SCSC-Hauptversuchskörper (vgl. Planunterlagen in Anhang A2); oben: Versuchskörper der Serie A (QS-Typ 1); unten: Serie B (QS-Typ 2)

Aufgrund der speziellen Bauart der Sandwichplatte sind die Lochdübelleisten jeweils alternierend entweder am Deck- oder dem Bodenblech angeschweißt, siehe Abbildung 25 und Abbildung 27. Details der Stahlbauteile während der Fertigung stellt Abbildung 26 dar.

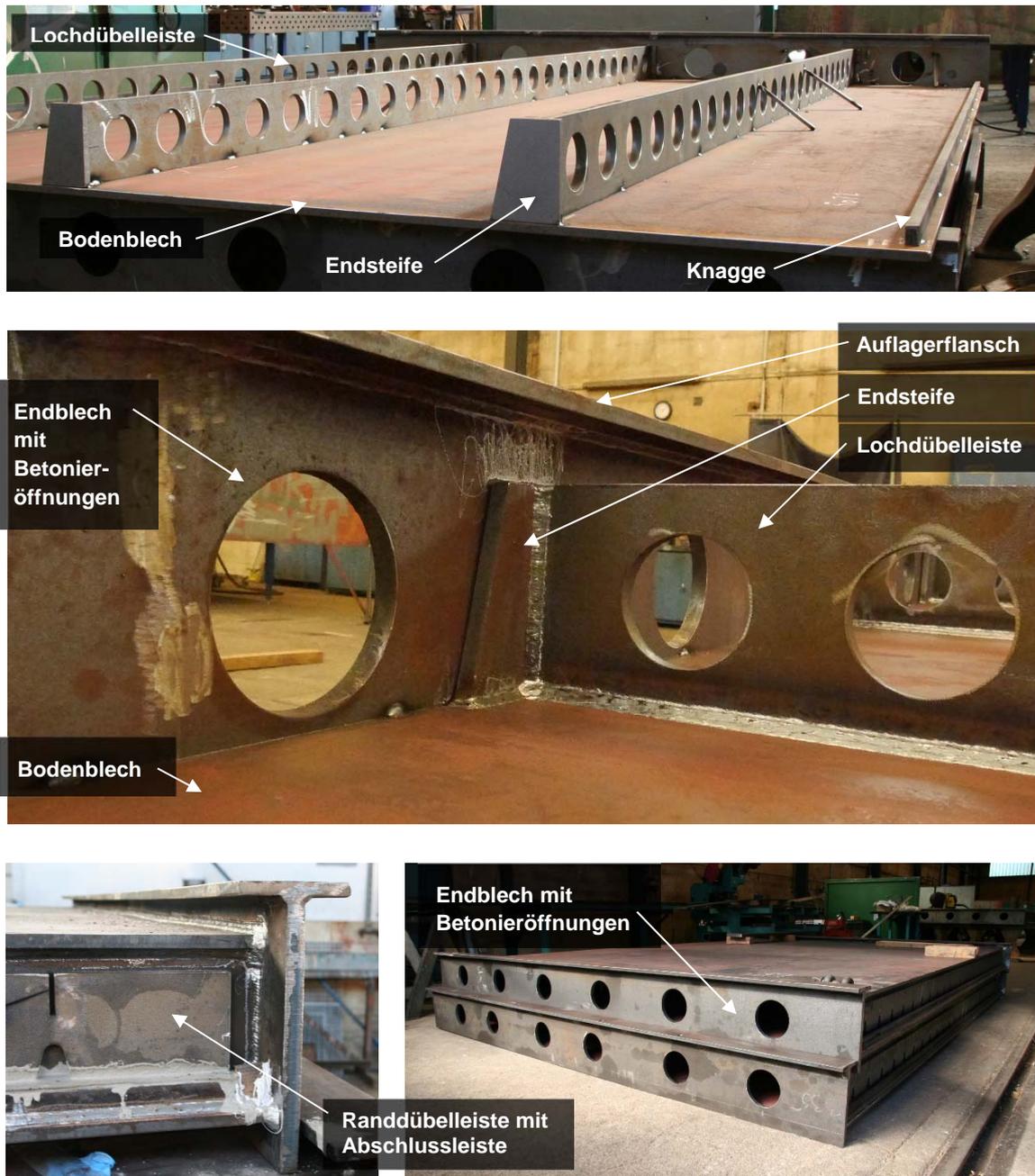


Abbildung 26: Stahlteile der SCSC-Hauptversuchskörper während der Fertigung; oben und mitte: unterer Stahl-Teilquerschnitt (Bodenblech, Lochdübelleisten) mit Auflagerkonstruktion (Endblech, Auflagerflansch) verbunden; unten links: Auflagerbereich mit vergossener Fuge zwischen Knagge und Randdübelleiste sowie aufgeschweißter sägeblattförmiger Abschlussleiste; unten rechts: Ansicht zweier Hauptversuchskörper vor der Betonage

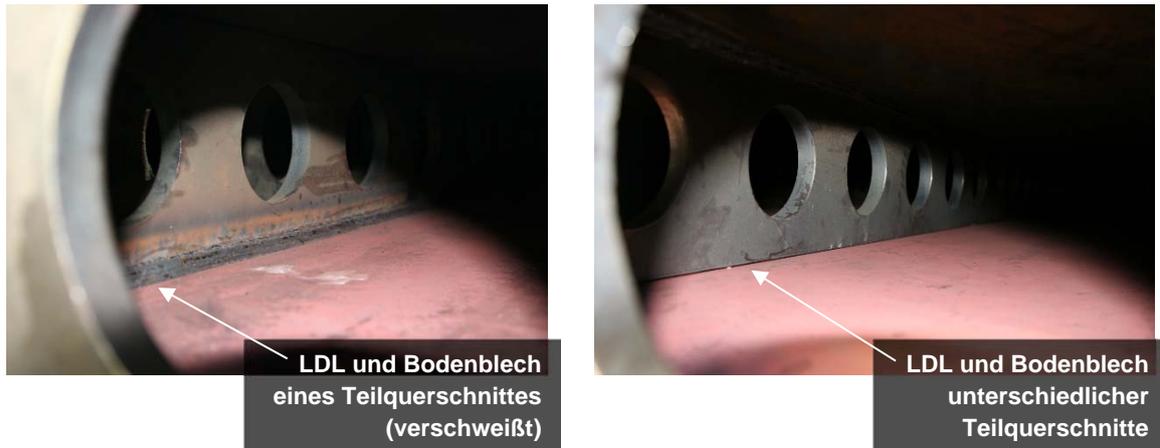


Abbildung 27: Blick durch je eine Betonieröffnung im Endblech in das Innere von Hauptversuchskörpern vor der Betonage; links mit und rechts ohne längslaufende Kehlnaht zwischen Lochdübelleiste (LDL) und Bodenblech

Als Vorbereitung für die Betonage des Kernbetons erfolgte das Verfüllen der Fuge zwischen den Randdübelleisten des oberen Teilquerschnitts und den Knaggen des unteren Teilquerschnitts mit schwindarmen Vergussmörtel. Zusätzlich wurden die eingeschnittenen Gewinde (Ansatzpunkte der Anschraubwirbel) mit Schrauben gegen Verschmutzung und Verziehen gesichert (siehe Abbildung 28).



Abbildung 28: Vorbereitungen an den Stahlteilen der SCSC-Hauptversuchskörper vor der Betonage des Kernbetons

Für die Betonierarbeiten wurden jeweils drei Hauptversuchskörper desselben Querschnittstyps mittels einer temporären Hilfskonstruktion gegeneinander verspannt und mithilfe einer Rahmenkonstruktion in vertikaler Position gesichert (siehe Abbildung 29 links). Die Hilfsträger der Verspannung aus Doppel - U - Profilen wurden derart dimensioniert, dass die räumliche Durchbiegung der Deckbleche zufolge des hydrostatischen Druckes des Frischbetons (nach DIN 18218) den rechnerischen Wert von 3 mm an keinem Punkt überschreitet. Die Betonage mit einer Betonpumpe erfolgte aufgrund der großen Höhe der Betonierfelder von über 4 m kontinuierlich mit einem Schlauch von unten, welcher entsprechend dem Betonierfortschritt gezogen wurde (siehe Abbildung 29 rechts oben und unten). Zur Gewährleistung einer gleichmäßig guten Betonstruktur wurde der eingefüllte Beton mit einem Flaschenrüttler verdichtet.

Die drei Versuchskörper einer Serie A bzw. B wurden jeweils mit Beton derselben Charge verfüllt. Die Betonierarbeiten erfolgten am 23.11.2015 (Serie A) sowie am 3.12.2016 (Serie B), das Umlegen der verfüllten Verbundplatten wurde nach 3 Tagen durchgeführt.



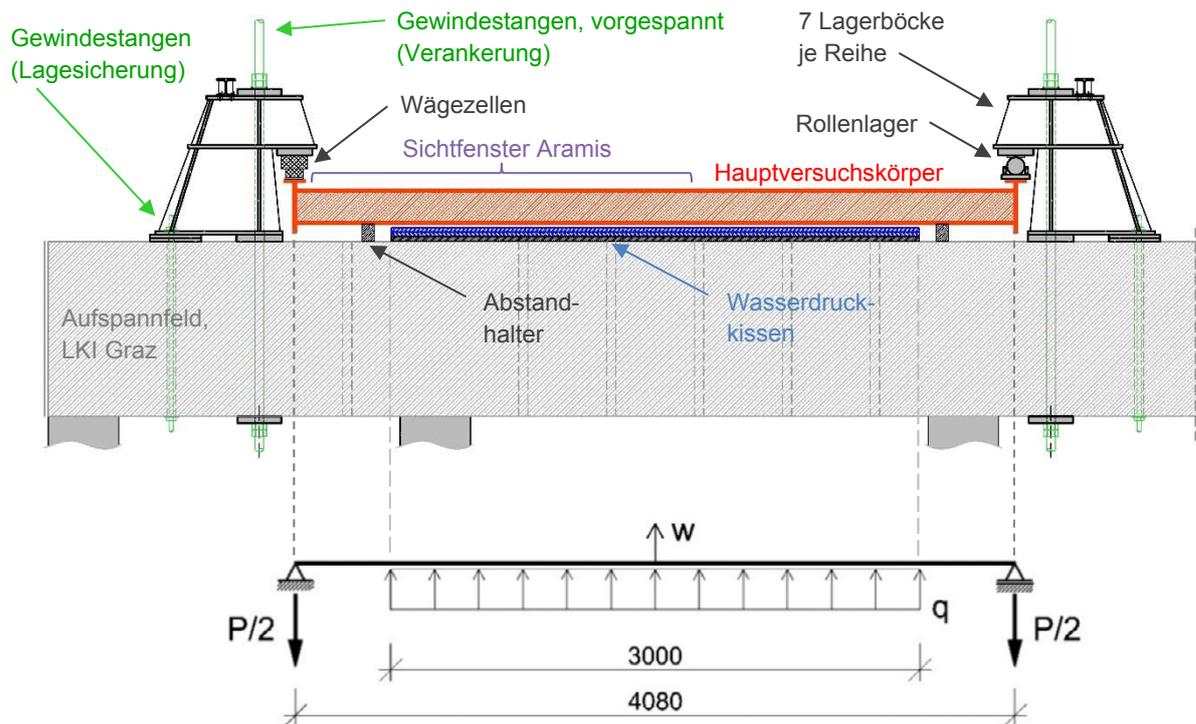
**Abbildung 29: Betonage der SCSC-Hauptversuchskörper der Serie A;
links: temporär verspannte und aufgestellte Hauptversuchskörper;
rechts oben: Betonage mit Betonpumpe und Schlauch; rechts unten: Blick ins Innere
eines QS-Typ 1-Versuchskörpers durch eine Betonieröffnung eines Endbleches**

Zur Ermittlung der Betondruckfestigkeit des Kernbetons zum jeweiligen Zeitpunkt der Versuchsdurchführung wurden im Zuge der Betonage je Hauptversuchskörper zwei Probewürfel hergestellt.

3.2.1.2. Versuchsanlage und Messkonzept der Hauptversuche

Auf Grundlage des Kriterienkatalogs wurde die im Folgenden beschriebene und in Abbildung 30 bis Abbildung 32 dargestellte Versuchsanlage der SCSC-Hauptversuche entwickelt:

- Die Auflagerung der Versuchskörper erfolgte durch sieben Lagerböcke je Lagerreihe, welche jeweils mit einer Gewindestange im Aufspannfeld rückverankert sowie mit einer zusätzlichen Gewindestange in der Lage gesichert wurde.
Zufolge des geringen Überstands der Lagerböcke über die Auflagerflansche der Versuchskörper konnte ein freies Sichtfenster auf das obere Deckblech (= Biegezugseite des Versuchskörpers) für die optische Dehnungsmessung mit dem System Aramis/GOM erreicht werden.
- Das statische System der SCSC-Hauptversuchskörper entsprach einem Einfeldträger. Die Lagerung erfolgte an einer Lagerreihe gelenkig mittels sieben Kraftmessdosen, welche zugleich zur Messung der eingebrachten Versuchslast dienten. Die zweite Lagerreihe wurde als verschiebliches Rollenlager ausgebildet.
- Als Belastung wurden zwei Wasserdruckkissen mit der Abmessung 3,1 x 3 m gewählt. Diese wurden zwischen dem Aufspannfeld des Versuchsfeldes und dem Versuchskörper positioniert und erzeugten durch das Aufpumpen mit Wasser eine entgegen der Schwerkraft wirkende Flächenlast auf die Sandwichplatte.
Die Ausdehnung der Flächenlast entsprach jener Fläche auf dem Deckblech des Versuchskörpers, welche bei dem Einsatz der Sandwichplatte als Fahrbahnplatte einer eingleisigen Eisenbahnbrücke in Trogbauweise (siehe exemplarisches Beispiel entsprechend Abbildung 1) bei Zugsüberfahrt durch die Lastausbreitung Schiene – Schwelle – Schotteroberbau – Fahrbahnplatte belastet wird.
- Als Standort wurde das Labor für konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Graz gewählt, welches über die erforderliche Infrastruktur (Aufspannfeld, Portalkran etc.) für die Durchführung der SCSC-Hauptversuche verfügte.



P ... Versuchslast
 q ... verteilte Flächenlast (Wasserdruckkissen)
 w ... Durchbiegung in Feldmitte
 Abmessungen in [mm]

Abbildung 30: Übersichtsskizze der Versuchsanlage der SCSC-Hauptversuche sowie statisches System der Hauptversuchskörper

Die Lagerkomponenten der SCSC-Hauptversuchskörper sind in Abbildung 31 im Detail dargestellt. Zur Gewährleistung der Verschieblichkeit der Rollenlager in Plattenlängsrichtung wurden die Lagerschlitten auf zwei Lagen von mit Silikonfett geschmierten, selbstklebenden Teflonfolien eingebaut.



Abbildung 31: Lagerkomponenten der SCSC-Hauptversuche; links: gelenkiges Lager (Wägezelle); rechts: verschiebliches Rollenlager

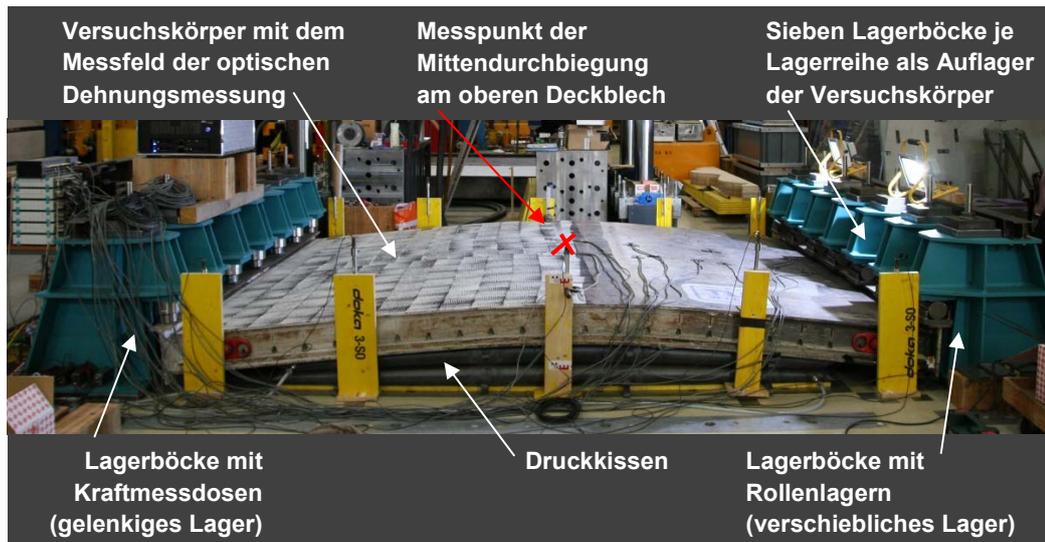


Abbildung 32: Versuchsaufbau der SCSC-Hauptversuche; Versuchsanlage während eines laufenden Versuches von Hauptversuchskörper H_1 bei maximaler Durchbiegung $w \approx 170$ mm

Für die Ermittlung aussagekräftiger Messergebnisse wurde eine Vielzahl von Messwertaufnehmern an den SCSC-Hauptversuchskörpern installiert (siehe Abbildung 33).

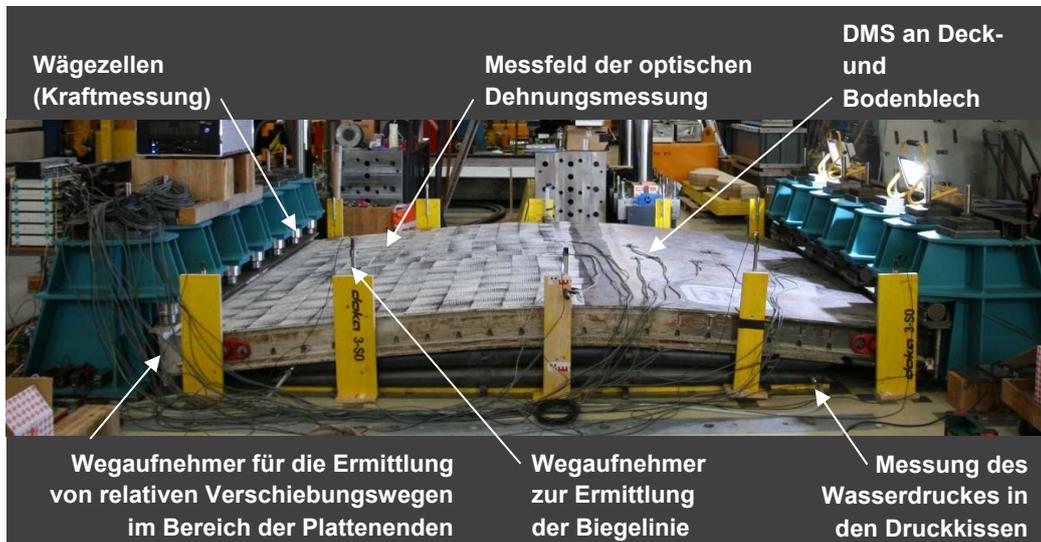


Abbildung 33: Übersicht zum Messkonzept der SCSC-Hauptversuche

Zu den Messwertaufnehmern zählten neben der optische Dehnungsmessung mit dem System Aramis/GOM (Ermittlung von Dehnungen, Spannungen und räumlichen Verschiebungen der Versuchskörper einer Deckblechhälfte) im Weiteren induktive Wegaufnehmer sowie Seilzugwegaufnehmer für die Messung von relativen und absoluten Verschiebungswegen im Bereich der Randdübelleisten der Versuchskörper. Zusätzlich

kamen Dehnmessstreifen (DMS) in linearer Bauweise und Rosettenbauweise für Kontrollmessungen zur Anwendung. Darüber hinaus erfolgte die Kraftmessung mittels sieben Wägezellen der gelenkigen Auflagerreihe als auch über den gemessenen Wasserdruck in den Wasserdruckkissen.

3.2.2. Der Ablauf der Hauptversuche

In Abbildung 34 ist der Versuchsablauf der SCSC-Hauptversuche exemplarisch für Versuchskörper H_1 ersichtlich. Hierbei ist der Aufbau der Versuchsanlage (Abbildung 34 a und b), der Versuchskörpereinbau (Abbildung 34 c), der Einbau der Lagerkomponenten zwischen dem Versuchskörper und den Lagerböcken (Abbildung 34 d) als auch die Instrumentierung mit Messwertaufnehmern (Abbildung 34 e) bildhaft dargestellt. In Abbildung 34 f ist der Vollständigkeit halber der SCSC-Hauptversuchskörper H_1 während des laufenden Versuches bei der maximalen Durchbiegung w in Feldmitte von rund 170 mm (vgl. Abbildung 32 und Abbildung 33) ersichtlich.

Das Messkonzept der Hauptversuche umfasste für die Versuchskörper der Serien A und B Halteintervalle von ungefähr 10 Minuten bei den Laststufen 630 kN, 920 kN, 1.260 kN, 1.800 kN, 3.000 kN, 4.000 kN sowie 5.000 kN. Die Steigerung der Last betrug im Mittel zwischen 3 bis 4 kN je Sekunde abhängig von der manuell gesteuerten Durchflussmenge des Wassers bei der Befüllung der Wasserdruckkissen. Die Steigerung des Druckes in den Kissen über jenen der örtlichen Trinkwasserleitung hinaus erfolgte mittels einer Kreiseldruckpumpe, welche in Verbindung mit einem Niederspannungsumrichter stufenlos angesteuert wurde. Ent- und Wiederbelastungsschleifen erfolgten fallweise nach dem erstmaligen Erreichen von 630 kN, 1.260 kN, 1.800 kN, 3.000 kN und 4.000 kN auf die minimale Last von rund 240 kN mit direkt anschließender Wiederbelastung. Im Einzelfall wurde der Versuchsablauf aufgrund von Dichtigkeitsproblemen bei einem der beiden Belastungskissen in geringem Maß während des laufenden Versuchs adaptiert.

Die Aufzeichnung der Messwerte von Kraftmessdosen, Wegaufnehmern und DMS erfolgte laufend, jene der optischen Dehnungsmessung alle 2 bzw. 5 Sekunden. Darüber hinaus wurden die Versuchskörper bei jedem Halteintervall einer optischen Sichtprüfung unterzogen.

Parallel zu den Hauptversuchen in Graz wurde an den Prüftagen im Labor des Instituts für Tragkonstruktionen der TU Wien die Festigkeitsprüfung (Betondruckfestigkeit) an jeweils zwei Betonwürfeln durchgeführt. Die Messwerte hierzu sind Anhang B4 zu entnehmen.



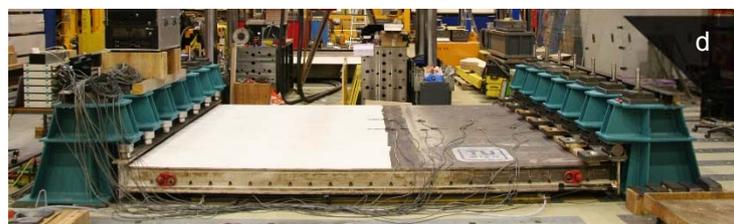
Versuchsfeld der SCSC-Hauptversuche mit den ausgerichteten Lagerböcken beider Lagerreihen als Auflager der Hauptversuchskörper sowie dem auf einem Hilfsträger montierten Kamerabalken der optischen Dehnungsmessung



Zwei mit Schalttafeln unterlegte Wasserdruckkissen



Versuchskörper mit dem Portalkran in die Versuchsanlage eingehoben



Versuchsanlage mit eingebauten Lagerkomponenten (Rollenlager, Wägezellen)



Versuchskörper fertig instrumentiert; Messfeld der optischen Dehnungsmessung mit Punktmuster versehen



Versuchsanlage während des laufenden Versuches von Hauptversuchskörper H_1 bei maximaler Mittendurchbiegung von rund 170 mm

Abbildung 34: Versuchsanlage der SCSC-Hauptversuche (hier: Versuch H_1)

3.3. Ergebnisse der Hauptversuche

3.3.1. Ergebnisse der experimentellen Laboruntersuchung der SCSC-Platte

3.3.1.1. Arbeitslinien – Das Tragverhalten von SCSC-Hauptversuchskörpern

Wie einleitend erwähnt, wurden bei den SCSC-Hauptversuchen zwei Versuchsserien zu je drei Versuchskörpern gleicher Bauart untersucht. Als Variationsparameter zur Unterscheidung der Serien wurde hierbei die Anordnung der Lochdübelleisten im Inneren der Versuchskörper (entsprechend den QS-Typen 1 und 2, siehe Abbildung 25) gewählt.

Neben den Arbeitslinien der Hauptversuchskörper (gemäß Abbildung 35) wurden speziell die Spannungen und Dehnungen des oberen Deckbleches sowie die Messergebnisse der relativen und absoluten Verschiebungswege für Vergleiche mit dem Ergebnis der numerischen Simulation herangezogen.

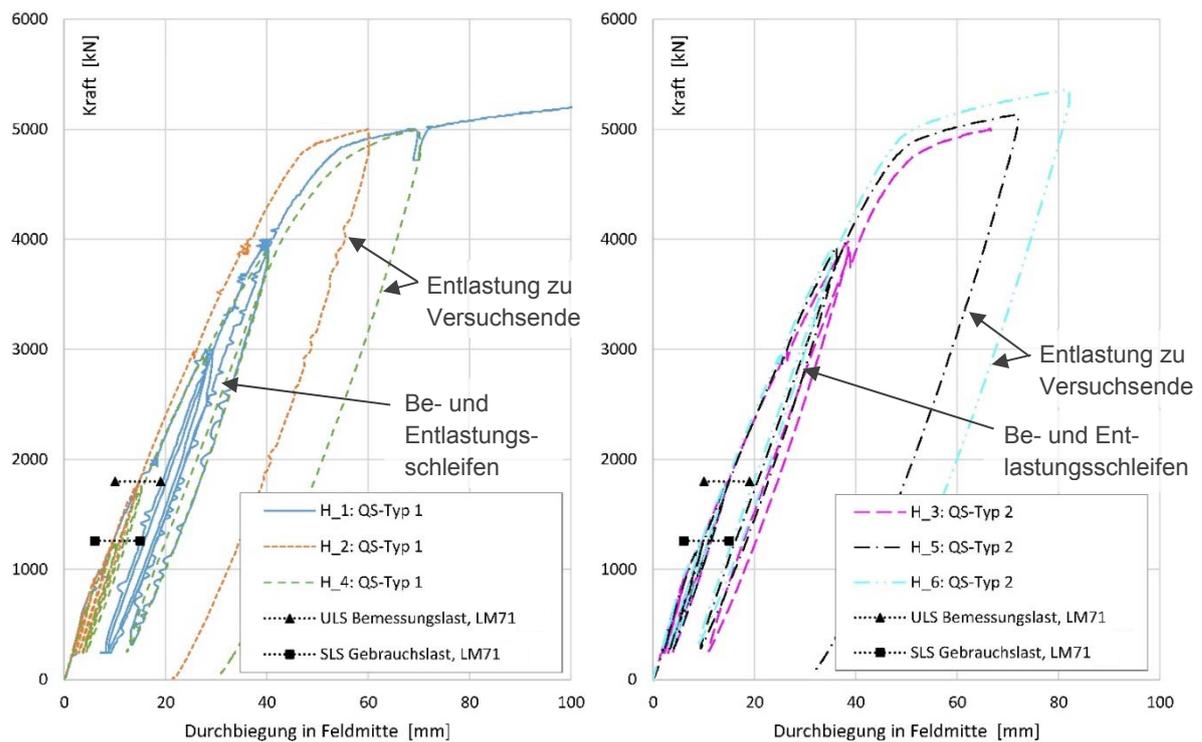


Abbildung 35: Ausschnitt der Kraft-Verschiebungs-Diagramme der Hauptversuchskörper;
links: Versuchskörper H_1, H_2 und H_4 der Serie A (QS-Typ 1);
rechts: Versuchskörper H_3, H_5 und H_6 der Serie B (QS-Typ 2)

Die in Abbildung 35 dargestellten Arbeitslinien der Hauptversuchskörper zeigen die gemessene Versuchskraft (Summe der Kraftwerte aller sieben Wägezellen – als Lagerkomponenten der gelenkig gelagerten Lagerreihe – mit dem Faktor 2 beaufschlagt, da nur an einer Lagerlinie Kraftmessdosen angeordnet wurden) über die Durchbiegung des Versuchskörpers in Feldmitte des als ungestört angesehenen Plattenfeldes (Verschiebungswert des Messpunktes auf der Oberfläche des oberen Deckbleches in Kraftrichtung entsprechend Abbildung 32 als Ergebnis der optischen Dehnungsmessung).

Hauptversuchskörper mit Querschnitts-Typ 1

Die drei Hauptversuchskörper mit QS-Typ 1 weisen unter niedrigen Versuchslasten eine nahezu idente Anfangssteifigkeit auf, siehe Abbildung 35 links. Die Abnahme der Biegesteifigkeit bis zum Erreichen des Gebrauchslastniveaus (SLS) erklärt sich durch die Ausbildung von Biegerissen im Kernbeton. Bei weiterer Laststeigerung auf 4.000 kN zeigen die Versuchskörper H_1, H_2 und H_4 mit Querschnitts-Typ 1 ein annähernd ideal-elastisches Kraft-Verformungs-Verhalten. Durch die Ausbildung von teilplastischen Bereichen in den Stahlblechen in Kombination mit dem Auftreten von plastischen Verformungen der Betonscheiben nimmt bei einer gemittelten einwirkenden Kraft von rund 4.900 kN die Biegesteifigkeit signifikant ab, wodurch die Durchbiegungen in Feldmitte deutlich anwachsen. Bezogen auf die Bemessungslast für Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) ergibt sich für die geprüften Bauteile ein Laststeigerungsfaktor von rund 2,7. Der weitere Verlauf der Arbeitslinien – bedingt aufgrund des Durchplastizierens des jeweiligen Stahlquerschnittes in Feldmitte – ist durch die Verfestigung des Materials Stahl gekennzeichnet.

Hauptversuchskörper mit Querschnitts-Typ 2

QS-Typ 2-Versuchskörper der SCSC-Hauptversuche weisen dieselben Charakteristika der Arbeitslinien (gemäß Abbildung 35) wie Versuchskörper mit Querschnitts-Typ 1 auf. Einzig eine geringe Abflachung der Arbeitslinien im Kraft-Verschiebungs-Diagramm bei Versuchskörpern mit Dübelleistenpaaren ist im Lastbereich zwischen dem ULS-Lastniveau und 4.900 kN erkennbar.

Alle sechs Versuchskörper weisen eine hohe Steifigkeit bis zum Auftreten von plastischen Zonen der Stahlteile in Feldmitte auf. Die Arbeitslinien der Versuchskörper der Serien A und B – und somit das Tragvermögen von SCSC-Platten unter statischer Erstbelastung – können auf Basis der auf den experimentellen Messergebnissen abgeleiteten Arbeitslinien als nahezu gleichwertig angesehen werden.

3.3.1.2. Messergebnisse der optischen Dehnungsmessung mit Aramis

Die Ergebnisse der optischen Dehnungsmessung mit dem System Aramis/GOM wurden einerseits für die Erstellung der Arbeitslinien gemäß Kapitel 3.3.1.1 herangezogen als auch in Form von Contour Plots dargestellt. Zusätzlich dienen die Konturdiagramme zur Kontrolle der Messwerte von Dehnungsmessstreifen und Wegaufnehmern.

Abbildung 36 und Abbildung 37 zeigen beispielhaft die Ergebnisblätter der Deckblechverschiebung [mm] in Krafrichtung (Verschiebung Z, positiv nach oben) als auch der Dehnungen Epsilon Y [%] (Dehnung des Deckbleches in Plattenlängsrichtung) der halbseitig betrachteten Deckbleche von Versuchskörpern mit QS-Typ 1 bei ca. 3.000 kN Versuchslast (entspricht 1.000 kN Belastung je Laufmeter Platte) und ca. 5.000 kN Versuchslast. Dem gegenübergestellt sind die Messwerte der QS-Typ 2-Versuchskörper in Abbildung 38 und Abbildung 39. Die jeweilig als maximal gewählten Zahlenwerte der Legendeneinträge der Ergebnisdarstellungen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Es sei darauf hingewiesen, dass die nachfolgend dargestellten Konturdiagramme an den mit DMS und Wegaufnehmern bestückten Stellen im Messfeld keine bzw. fehlerhafte Messwerte ausgeben. Diese Bereiche zeigen entweder keine farbliche Markierung bzw. weisen dunkelblaue, -rote oder -grüne Bereiche von rechteckiger Form auf.

Tabelle 1: Legendendefinition von Abbildung 36 bis Abbildung 41

Versuchslast	Verschiebung Z [mm]	Epsilon Y [%]
SLS-Lastniveau	--	0,08
ca. 3.000 kN	30	0,15
ca. 5.000 kN	80	0,30

Hinweis:

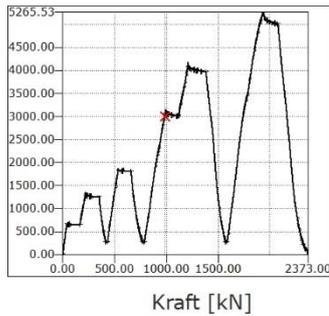
Die Definition einheitlicher Farbskalen der Legenden der Aramis-Konturdiagramme über den gesamten Kraftbereich von 0 bis > 4.900 kN ist aufgrund der bei niedrigen Versuchslasten sehr geringen Dehnungswerte für die optische Auswertung nicht praktikabel.

Alle Versuchskörper zeigen durchwegs Abweichungen im Verlauf der Deckblechdehnungen zwischen den Randfeldern und dem als ungestört angesehenen mittig liegenden Plattenfeld, siehe Konturdiagramme in Abbildung 36 bis Abbildung 39. Dieser Effekt ist ebenfalls bei Betrachtung der Durchbiegungen in Z-Richtung (Verschiebung Z) erkennbar. Aus diesem Grund bezieht sich die im Folgenden angeführte Interpretation der Ergebnisse ausschließlich auf das mittig liegende Plattenfeld.

Versuchskörper H_4 (QS-Typ 1)

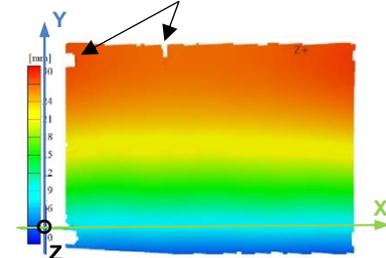
Kraft 3001 kN

Stufe 987

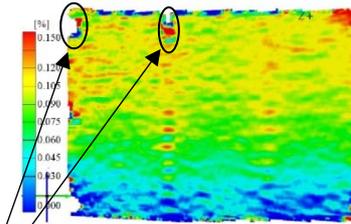


Bereiche mit fehlerhaften Messsignalen

Bereiche mit fehlerhaften Messsignalen



Verschiebung Z → Uz

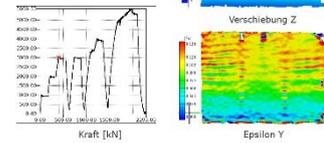


Epsilon Y → εy

H_1 (QS-Typ 1)

Kraft 3000 kN

Stufe 407



H_2 (QS-Typ 1)

Kraft 3000 kN

Stufe 1765

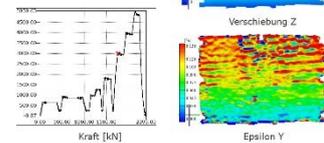
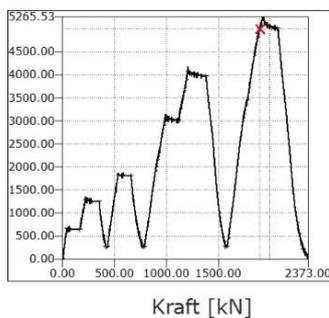


Abbildung 36: Contour Plots der Aramis-Messungen von SCSC-Hauptversuchskörpern mit QS-Typ 1 bei ca. 3.000 kN Versuchslast; links: Versuchskörper H_4 mit der Definition der lokalen Achsen am Ergebnisfeld der optischen Dehnungsmessung; rechts oben: Versuchskörper H_1; rechts unten: Versuchskörper H_2

Versuchskörper H_4 (QS-Typ 1)

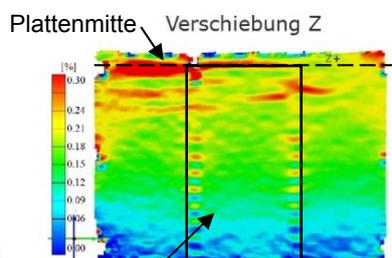
Kraft 5000 kN

Stufe 1906



ungestörtes Plattenfeld

Epsilon Y
gelenkige Auflagerlinie

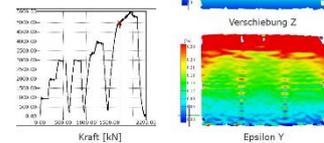


Plattenmitte Verschiebung Z

H_1 (QS-Typ 1)

Kraft 5000 kN

Stufe 1725



H_2 (QS-Typ 1)

Kraft 5001 kN

Stufe 2155

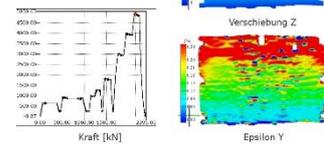
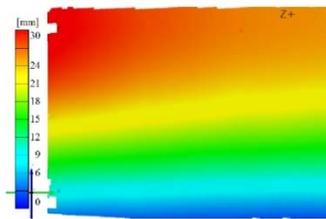
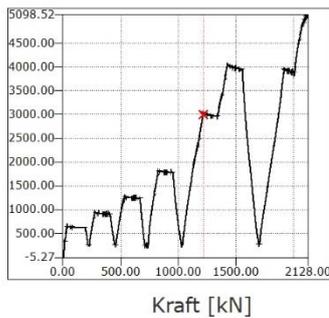


Abbildung 37: Contour Plots der Aramis-Messungen von SCSC-Hauptversuchskörpern mit QS-Typ 1 bei ca. 5.000 kN Versuchslast; links: Versuchskörper H_4; rechts oben: Versuchskörper H_1; rechts unten: Versuchskörper H_2

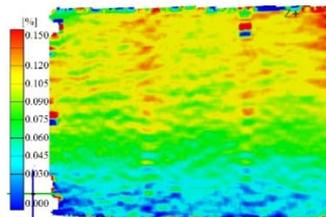
Versuchskörper H_3 (QS-Typ 2)

Kraft 2998 kN

Stufe 1218



Verschiebung Z

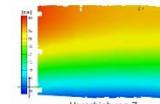
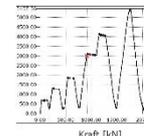


Epsilon Y

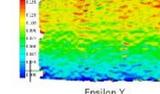
H_5 (QS-Typ 2)

Kraft 3004 kN

Stufe 914



Verschiebung Z

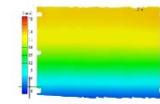
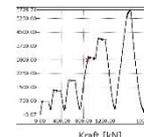


Epsilon Y

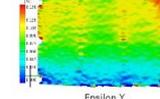
H_6 (QS-Typ 2, verstärkt)

Kraft 2999 kN

Stufe 874



Verschiebung Z



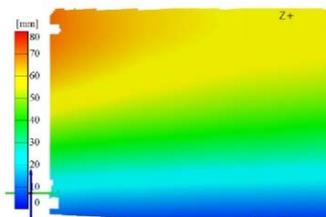
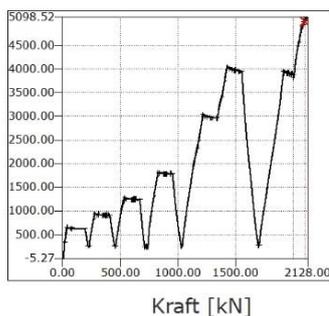
Epsilon Y

Abbildung 38: Contour Plots der Aramis-Messungen von SCSC-Hauptversuchskörpern mit QS-Typ 2 bei ca. 3.000 kN Versuchslast; links: Versuchskörper H_3; rechts oben: Versuchskörper H_5; rechts unten: Versuchskörper H_6 (verstärkt)

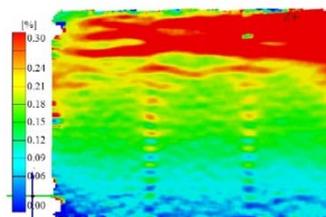
Versuchskörper H_3 (QS-Typ 2)

Kraft 5002 kN

Stufe 2103



Verschiebung Z

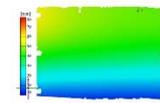
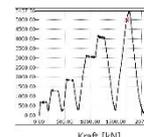


Epsilon Y

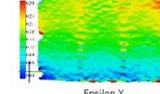
H_5 (QS-Typ 2)

Kraft 4997 kN

Stufe 1715



Verschiebung Z

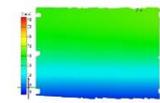
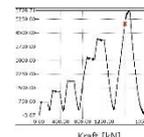


Epsilon Y

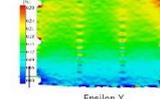
H_6 (QS-Typ 2, verstärkt)

Kraft 5000 kN

Stufe 1581



Verschiebung Z



Epsilon Y

Abbildung 39: Contour Plots der Aramis-Messungen von SCSC-Hauptversuchskörpern mit QS-Typ 2 bei ca. 5.000 kN Versuchslast; links: Versuchskörper H_3; rechts oben: Versuchskörper H_5; rechts unten: Versuchskörper H_6 (verstärkt)

Hauptversuchskörper mit Querschnitts-Typ 1

Abbildung 40 stellt die Arbeitslinien der SCSC-Hauptversuchskörper mit Querschnitts-Typ 1 (vgl. Abbildung 35 links) samt den zugeordneten Deckblechdehnungen von Versuchskörper H_1 sowohl auf Gebrauchslastniveau (SLS) als auch bei den Lastwerten von rund 3.000 kN und 5.000 kN dar. Die Konturdiagramme zeigen einerseits bei dem Lastniveau SLS und 3.000 kN Versuchslast den Tragzustand des Versuchskörpers im linear-elastischen Bereich und andererseits bei 5.000 kN Versuchslast jenen Tragzustand nach Überschreiten der plastischen Grenzlast (Verfestigungsbereich Stahl).

Die Deckblechdehnungen in Längsrichtung im linear-elastischen Tragzustand bei 3.000 kN Versuchslast zeigen ein wellenförmiges Dehnungsmuster (respektive eine wellenförmige Verteilung der Längsspannungen) in den Bereichen der an das Deckblech angeschweißten längslaufenden Lochdübelleisten des SCSC-Versuchskörpers H_1 auf, was ursächlich durch die bereichsweise Einleitung der inneren Schubkräfte über die Betonscheiben zufolge der Verbundwirkung zwischen den Stahl-Teilquerschnitten und dem Kernbeton entsteht. Das genannte Wellenmuster wurde durch die Auswertung der punktuellen DMS-Messergebnisse sowie durch das Ergebnis der numerischen Simulation (gemäß Kapitel 3.3.2) bestätigt. Die Dehnung des oberen Deckbleches zwischen den Lochdübelleisten erweist sich als annähernd gleichmäßig verteilt, mit schwach ausgeprägter Varianz der Dehnungswerte. Daraus wird abgeleitet, dass die Deckbleche bei der Bemessung von SCSC-Platten über die gesamte Breite als mittragend angesetzt werden können.

Im niedrigen Lastbereich der Gebrauchslast (SLS) ist das angesprochene Wellenmuster mit geringer Maximalauslenkung der Längsdehnungswerte erkennbar. Die maximale Längsdehnung des Deckbleches beträgt bei Versuchskörper H_1 (als auch den Versuchskörpern H_2 und H_3 mit QS-Typ 1) rund 0,07 – 0,08 %. Dadurch ergibt sich, dass die oberen Deckbleche der Serie A-Hauptversuchskörper unter Gebrauchslast an den höchstbeanspruchten Randfasern in Feldmitte ca. 150 - 170 N/mm² Längsspannungen aufweisen, welche unter der ertragbaren Fließspannung der Deckbleche von 393 N/mm² (vgl. Materialprüfzeugnisse gemäß Anhang B3) und damit im elastischen Bereich des Materials liegen.

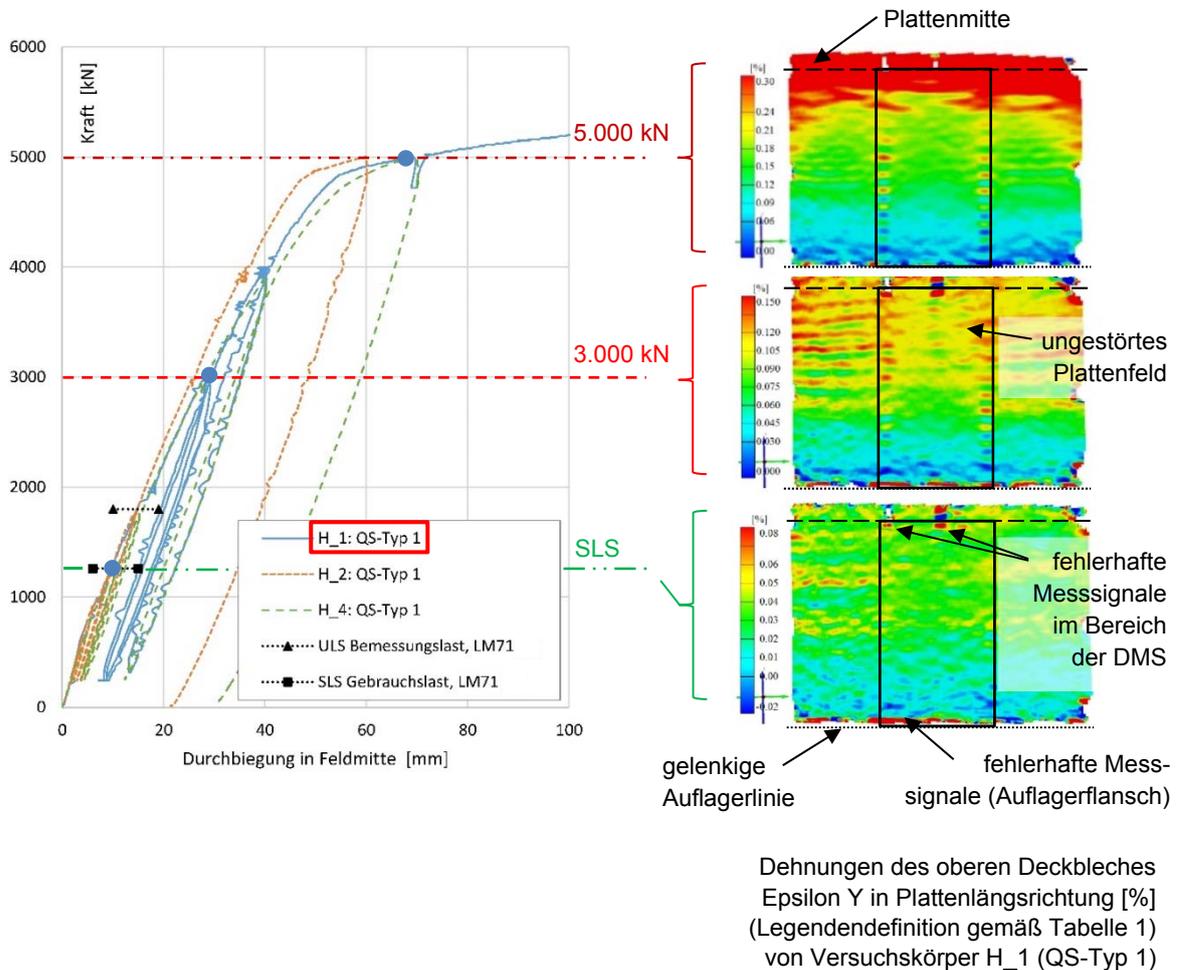


Abbildung 40: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Arbeitslinie mit den Deckblechdehnungen ϵ_y von Hauptversuchskörper H_1 (QS-Typ 1) bei SLS-Lastniveau, 3.000 kN und 5.000 kN Versuchslast

Das in Kapitel 3.3.1.1 erläuterte vollständige Plastizieren der Stahl-Teilquerschnitte in Plattenmitte der Hauptversuchskörper mit Querschnitts-Typ 1 bei einer Versuchslast von rund 4.900 kN und darüber ist im Konturdiagramm von Versuchskörper H_1 bei 5.000 kN Versuchslast in Abbildung 40 eindeutig an dem stark ausgeprägten rot eingefärbten Bereich ersichtlich. Der plastische Verlauf der Arbeitslinie über den Wert der Versuchslast von 5.000 kN hinaus ist durch das stetige Anwachsen der Durchbiegung in Feldmitte infolge des Wachstums der Fließzonen der Stahlquerschnitte in Plattenmitte charakterisiert.

Hauptversuchskörper mit Querschnitts-Typ 2

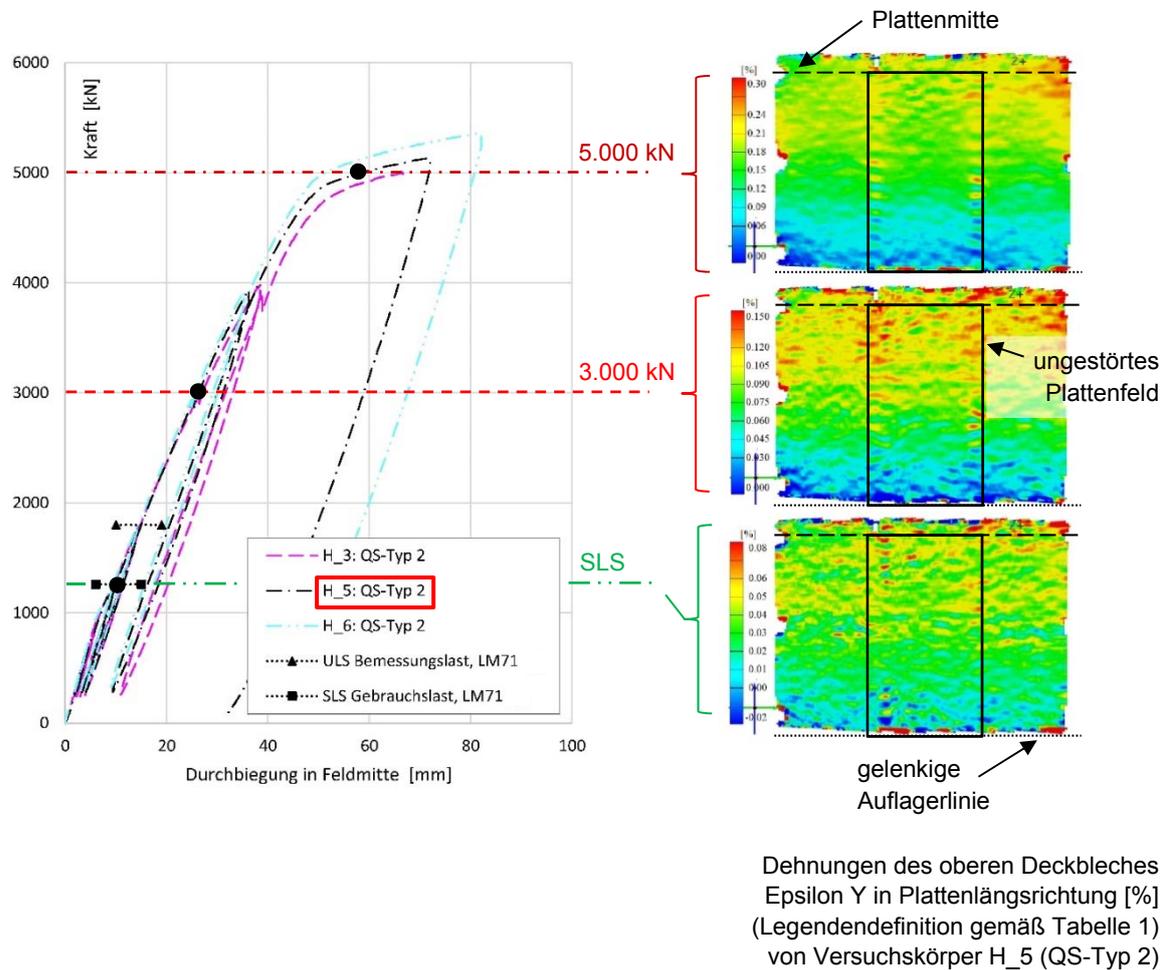


Abbildung 41: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Arbeitslinie mit den Deckblechdehnungen ϵ_y von Hauptversuchskörper H_5 (QS-Typ 2) bei SLS-Lastniveau, 3.000 kN und 5.000 kN Versuchslast

Die Konturdiagramme der SCSC-Hauptversuchskörper mit Querschnitts-Typ 2, hier im Speziellen die baugleichen Versuchskörper H_3 und H_5, weisen ebenfalls ein wellenförmiges Dehnungsbild in Längsrichtung auf (siehe Abbildung 38, Abbildung 39 und Abbildung 41). Diese zeigen jedoch – aufgrund der über die Plattenbreite ungleichmäßig verteilten Biegesteifigkeit der Randfelder (vgl. Konturdiagramm „Verschiebung Z“) als Folge der asymmetrisch angeordneten Lochdübelleisten des oberen und unteren Teilquerschnittes aus Stahl – im Vergleich zu QS-Typ 1-Versuchskörpern einen unregelmäßigen, gering geneigten Verlauf der Durchbiegung in Z-Richtung respektive der Längsdehnung über die Plattenbreite.

Aus diesem Grund wurde zur Beurteilung des Einflusses der Auswirkung der in der Breite beschränkten, unsymmetrischen Versuchskörpergeometrie („ungestörtes Plattenfeld als Ausschnitt einer in der Breite unendlich erstreckten, zweiseitig gelagerten SCSC-Platte“) bei Hauptversuchskörper H_6 (QS-Typ 2) die einzeln angeordnete Randdübelleiste (lt. Plan gemäß Abbildung 25 unten) mittels einer unterbrochenen Kehlnaht kraftschlüssig mit dem Bodenblech verbunden.

Die durch diese Maßnahme erhöhte Steifigkeit des planmäßig weicheren Randfeldes führte zu einer über die Plattenbreite gleichförmigeren Durchbiegung. Die gering gesteigerte Tragfähigkeit verglichen mit den beiden Hauptversuchskörpern H_3 und H_5 der Serie B wird aufgrund der baulichen Veränderung an Versuchskörper H_6 bei der Auswertung der Versuchsergebnisse nicht berücksichtigt.

3.3.1.3. Erläuterungen zum Vergleich der Querschnitts-Typen 1 und 2

Alleine aus den experimentellen Messergebnissen der Hauptversuche (hier: Kraftmessung, Wegmessung, optische Dehnungsmessung) kann an dieser Stelle kein Rückschluss auf typspezifische Tragmechanismen der Sandwichplatten mit gleichmäßig verteilten Lochdübeln und Lochdübelnpaaren getroffen werden.

3.3.2. Ergebnisse der Finite Elemente-Analyse der Sandwichplatte

3.3.2.1. Allgemeines zu der numerischen Simulation der Hauptversuchskörper

Die numerische Simulation der SCSC-Hauptversuche zur ganzheitlichen Untersuchung der Tragwirkung der Verbundplattenkonstruktion wurde mit dem Finite Elemente-Programm (FE-Programm) Abaqus durchgeführt. Die FE-Modelle der Hauptversuchskörper mit den Querschnitts-Typen 1 und 2 wurden nach den in Kapitel 4.5 dargelegten Grundsätzen und Empfehlungen für das SCSC-Grundlagemodell erstellt. Für die Eingabewerte der Materialmodelle von Stahl und Kernbeton flossen die Erkenntnisse aus der numerischen Analyse der experimentellen Vorversuche (siehe Kapitel 2) mit ein. Hierbei wurden lediglich die Arbeitslinien der bei den Hauptversuchskörpern eingebauten Verbundmaterialien an die Festigkeitswerte der Prüfzeugnisse der Stahlbleche bzw. der Festigkeitsprüfung der Betonwürfel angepasst.

Das FE-Modell der SCSC-Hauptversuchskörper mit gleichmäßig verteilten Lochdübeln (Querschnitts-Typ 1) entsprach dem in Abbildung 50 rot markierten Ausschnitt eines Zwölftels der Verbundplattengeometrie.

Die Simulation der QS-Typ 2-Plattenelemente erfolgte anhand eines 1 m breiten und auf die halbe Plattenlänge von 2.040 mm begrenzten Streifens mit einem Dübelleistenpaar, siehe Abbildung 42.

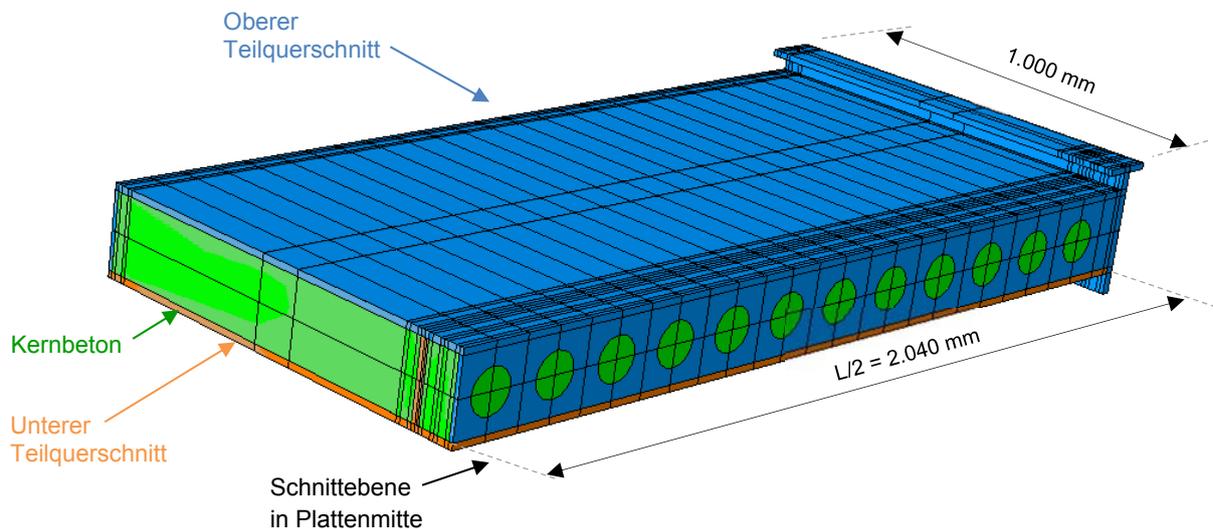


Abbildung 42: Numerisches Modell des SCSC-Hauptversuchskörpers mit QS-Typ 2

Die Geometriewerte der einzelnen FE-Grundbausteine wurden entsprechend den Planmaßen modelliert. Bei der Herstellung der SCSC-Versuchskörper traten aufgrund der temporären Hilfsverspannung während der Betonage ausschließlich vertretbar geringe Verformungen der Deckbleche – bezogen auf das Sollmaß zufolge des hydrostatischen Druckes des eingefüllten Frischbetons – auf. Die stahlbaumäßig gefertigten Teilquerschnitte sowie die fertig verschweißten Stahlboxen der Versuchskörper wiesen teilweise geringfügige Abweichung in der Lage auf, welche innerhalb der üblichen Lagetoleranzen lagen. Auf die Berücksichtigung von geometrischen Imperfektionen wurde bei der Erstellung der beiden numerischen SCSC-Modelle verzichtet.

3.3.2.2. Ergebnisse der numerischen Simulation an SCSC-Plattenelementen

Abbildung 43 zeigt die experimentell ermittelten Arbeitslinien der Hauptversuchskörper gegliedert nach den Serien A und B im Vergleich mit den Ergebniskurven der numerischen Simulationen. Die dargestellten Kraft-Verschiebungs-Diagramme entsprechen hierbei jenen von Abbildung 35, Abbildung 40 und Abbildung 41.

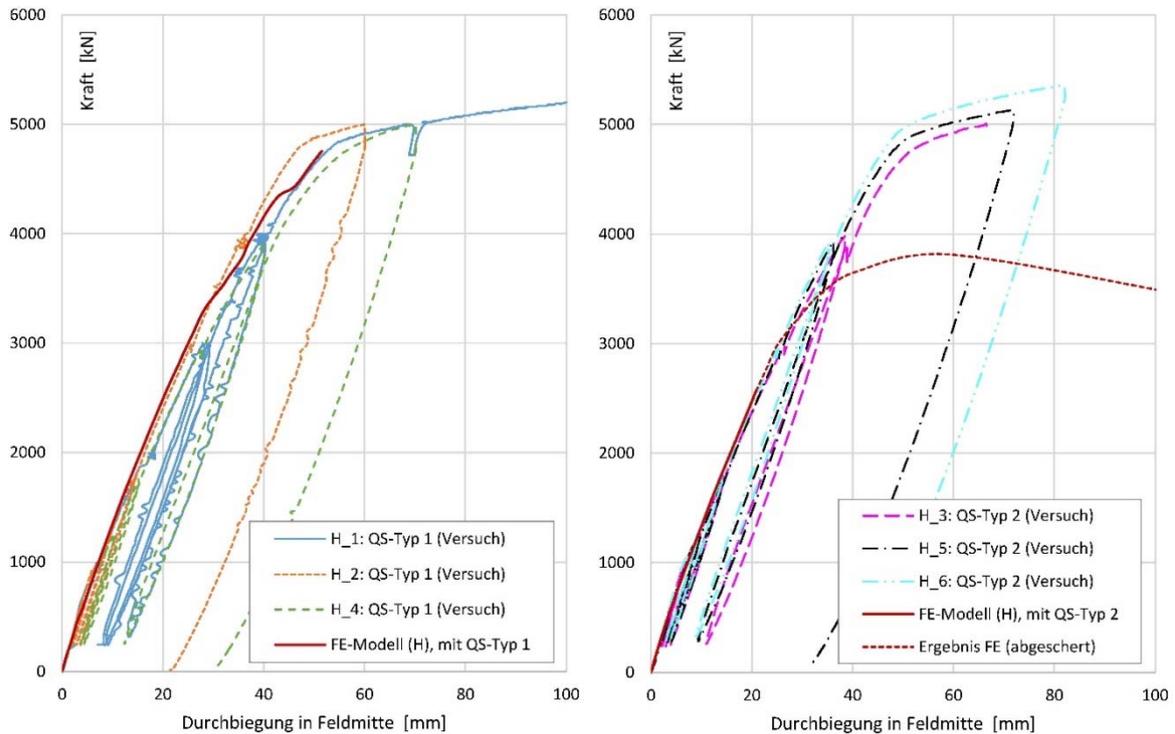


Abbildung 43: Ausschnitt der Kraft-Verschiebungs-Diagramme der SCSC-Hauptversuchskörper im Vergleich zu dem Ergebnis der numerischen Simulation; links: Arbeitslinien der Versuchskörper und Ergebnis des FE-Modells mit QS-Typ 1; rechts: Arbeitslinien der Versuchskörper und Ergebnis des FE-Modells mit QS-Typ 2

Hauptversuchskörper mit Querschnitts-Typ 1

Das in Abbildung 43 links ersichtliche Kraft-Verschiebungs-Diagramm von SCSC-Hauptversuchskörpern mit QS-Typ 1 zeigt im Vergleich mit dem Ergebnis der Finiten Elemente-Analyse eine sehr gute Übereinstimmung im Tragverhalten bis zum Erreichen der elastischen Grenzlast von rund 4.900 kN. Berechnungsergebnisse darüber hinaus konnten aufgrund von Konvergenzproblemen bei der Simulation des QS-Typ 1-Hauptversuchskörpers nicht erreicht werden. Die erhaltene Ergebniskurve deckt allerdings die für normengerechte Bemessungen interessanten Lastniveaus sowie den für eine ingenieurmäßige Auswertung erforderlichen Analysebereich vollständig ab und ist somit als im Umfang hinreichend zu bewerten.

Neben der außerordentlich guten Übereinstimmung der Ergebniskurve mit den Arbeitslinien zeigt das FE-Simulationsergebnis darüber hinaus ein zu der gemessenen Deckblechdehnung gleichartiges Längsdehnungsverhalten (siehe Abbildung 44).

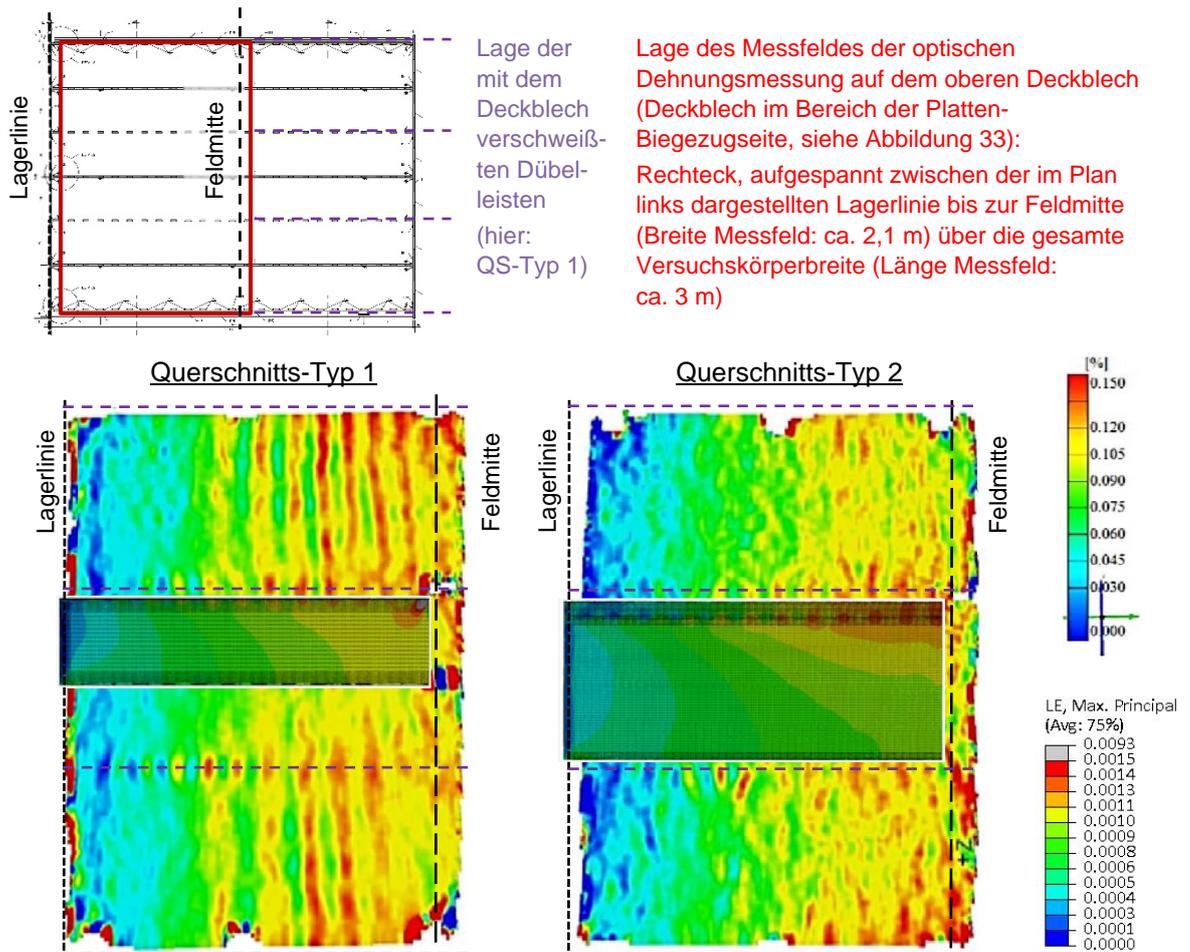


Abbildung 44: Bildhafte Darstellung der Dehnungen des oberen Deckbleches in Plattenlängsrichtung bei 3.000 kN Versuchslast (± 1.000 kN je m Platte); oben: Lage des Messfeldes der optischen Dehnungsmessung am oberen Deckblech der VK dargestellt am Grundriss eines Querschnitts-Typ 1-Versuchskörpers; unten: Ergebnisbilder der optischen Dehnungsmessung in [%] überlagert mit dem zugehörigen Color Plots der Deckblech-Dehnung (LE [-]) in Plattenlängsrichtung der numerischen Simulationen (unten links: VK H_1, unten rechts: VK H_5)

Hauptversuchskörper mit Querschnitts-Typ 2

Die numerische Simulation des Querschnitts-Typ 2-Modells eines SCSC-Hauptversuchskörpers mit Lochdübeln weist auf das vollständige Abscheren einzelner Betondübel im Verlauf eines statischen Traglastversuches hin. Dieser Umstand zeigt sich durch das Entstehen von Zonen von benachbarten FE-Elementen im Bereich von Betonscheiben, welche die maximale Betondruckschädigung d_c aufweisen. Die betroffenen finiten Elemente können nach Erreichen der vollen Betonschädigung keine zusätzlichen inneren Schnittgrößen ertragen und erfordern somit bei weiterer Laststeigerung die Um-

leitung der Tragwirkung an die nächstliegenden Betonscheiben – eine Kettenreaktion im lokalen Versagen der Betonscheiben des numerischen Modelles ist die Folge. Dieser Verlust des Tragvermögens zeigt sich deutlich im Abdriften der Ergebniskurve (siehe Abbildung 43 rechts, rote unterbrochene Ergebniskurve). Im realen Hauptversuchskörper mit Querschnitts-Typ 2 stellt sich hingegen nach dem vollständigen Abscheren einer Betonscheibe der Tragmechanismus „Gleitreibung zwischen der Betonscheibe und dem umgebenden Kernbeton“ (siehe Kapitel 2.3, Vorversuche) ein. Dadurch kann weiterhin – eine bezogen auf eine nicht geschädigte Betonscheibe geringere, jedoch ausreichend große – Schubkraftübertragung im Bereich der geschädigten Betonscheiben stattfinden, wodurch ein messbarer aber dennoch nicht versagenseinleitender Verlust an globaler Steifigkeit der Verbundplatte auftritt. Dieser Effekt ist jedoch durch das bei der FE-Analyse angewendete Materialmodell CDP für Beton nicht abbildbar.

3.3.3. Erkenntnisse nach dem Öffnen der beprobten Hauptversuchskörper

3.3.3.1. Allgemeines

Nach Abschluss der Traglastuntersuchung in Graz wurde jeweils ein Hauptversuchskörper je Querschnitts-Typ von einer Spezialfirma auf einem Freigelände in Wien geöffnet (vgl. Abbildung 46), um basierend auf den Schadensmustern an den innenliegenden Stahl- und Betonteilen Rückschlüsse auf die Versagensmechanismen in den Verbundbauteilen ziehen zu können.

3.3.3.2. Darstellung der geöffneten Hauptversuchskörper H_3 und H_4

Einen groben Überblick zu den geöffneten Hauptversuchskörpern H_3 (QS-Typ 2) und H_4 (QS-Typ 1) geben Abbildung 45 und Abbildung 46.

Hierbei sind einerseits die Sichtfenster auf die Oberfläche der Biegezugseite des Betonkerns (siehe Abbildung 45) als auch Details der durch Längsschnitte durchtrennten und gesäuberten Hauptversuchskörper (siehe Abbildung 46) dargestellt. Zusätzlich zu Biegezugrissen und Rissen zufolge der Betondruckstrebenwirkung konnte bei Versuchskörper H_3 mit Querschnitts-Typ 2 an einem Längsschnitt des ungestörten Plattenfeldes das vollständige Abscheren von sechs der zwölf Betonscheiben einer Plattenhälfte festgestellt werden. Das Ergebnis der Untersuchung deckt sich mit dem Ergebnis der numerischen Simulation und weist den Versagensmechanismus des Abscherens von Betonscheiben beginnend bei ca. 2.570 kN Versuchslast (entspricht ca. 856 kN je m Platte) aus.

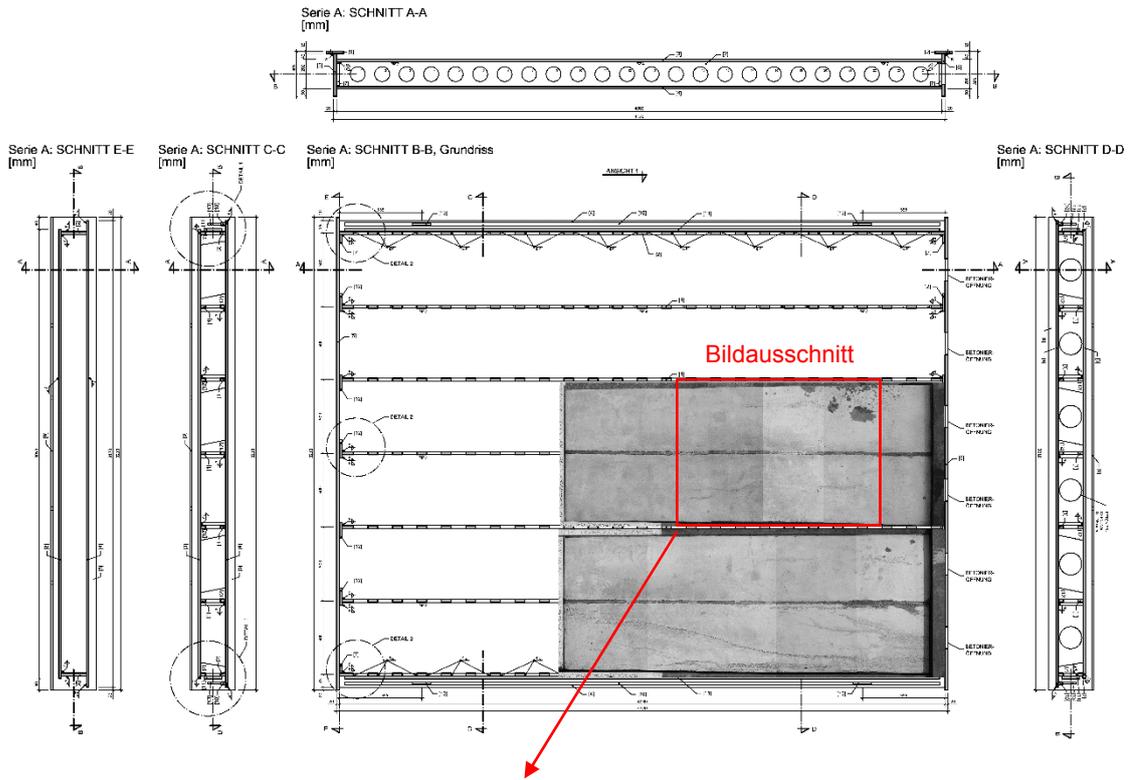


Abbildung 45: Rissbild des freigelegten Betonkerns von Hauptversuchskörper H_4 (QS-Typ 1) hinterlegt mit der Plandarstellung der Serie A-Versuchskörper



Abbildung 46: Geöffnete SCSC-Hauptversuchskörper; Teilbilder a und b: abgetrennter Teil von Versuchskörper H_4 (QS-Typ 1) mit Biegezugrisen im Betonkern in Feldmitte; Teilbild c: Detailansicht des Auflagerbereiches eines Längsschnittes von H_3 (QS-Typ 2); Teilbild d: intakte Betonscheiben bei Versuchskörper H_4 (QS-Typ 1); Teilbild e: vollständig abgescherte Betonscheiben bei Versuchskörper H_3 (QS-Typ 2)

3.3.4. Zusammenfassung der Ergebnisse nach den SCSC-Hauptversuchen

3.3.4.1. Überblick über die Ergebnisse der Hauptversuche

Alle SCSC-Hauptversuchskörper besitzen unter statischer Belastung im baupraktisch interessanten Bereich bis über das ULS-Lastniveau hinaus eine ausgesprochen hohe Biegesteifigkeit. Sowohl die SCSC-Hauptversuchskörper mit QS-Typ 1 als auch QS-Typ 2 zeigen nachweislich auf Gebrauchslastniveau ausschließlich Längsspannungen des oberen Deckbleches weit unter der Fließgrenze der betreffenden Bauteile auf. Beide Versuchskörper-Typen weisen bei Betrachtung der Deckblechdehnungen in Plattenlängsrichtung im linear-elastischen Bereich der Arbeitslinien einen wellenförmigen Verlauf. Das Plastizieren des oberen Deckbleches mit anschließender Ausbildung von Fließzonen bei einer Versuchslast von ca. 4.900 kN kann bei allen SCSC-Hauptversuchskörpern als globaler Versagensmechanismus beobachtet werden.

Im Zuge der optischen Sichtprüfung der Hauptversuchskörper wurde bei jenen Versuchskörpern mit Querschnitts-Typ 1 Risse in den vertikalen Schweißnähten zwischen den Randdübelleisten und den Endblechen festgestellt. Dieser Umstand ist wie folgt erklärbar: Die Schweißverbindungen wurden auf Grundlage der mit dem bestehenden Ingenieurmodell nach [Her13] ermittelten Horizontalschubkräften dimensioniert. Die Rissbildung in den Schweißnähten während den laufenden Versuchen zeigt eine Schwäche des vorhandenen Tragmodelles hinsichtlich der Anwendung auf die gegenständlichen Versuchskörper auf, welches sich durch einen im Vergleich zu den getroffenen Bemessungsannahmen abweichenden Neigungswinkel der Betondruckstreben ergab. Dies muss bei der geplanten Überarbeitung der bestehenden Ingenieurmodelle berücksichtigt werden (siehe Kapitel 5 und 6).

Die geringe, jedoch stetige Abnahme der Biegesteifigkeit bei Versuchskörpern mit Dübelleistenpaaren – vornehmlich im Bereich zwischen dem ULS-Lastniveau und 4.900 kN Versuchslast – begründet sich durch die Untersuchungsergebnisse sowohl der nach Versuchsende geöffneten Versuchskörper als auch der FE-Analyse:

Wie in Abbildung 46 e sowie Abbildung 47 dargestellt, weist der Querschnitts-Typ 2-Versuchskörper H_3 Scherfugen zwischen den Betonscheiben und dem umliegenden Kernbeton auf. Der an dem geöffneten Bauteil ersichtliche lokale Versagenszustand des Abscherens von Betonscheiben wurde durch das Ergebnis der numerischen Vergleichsrechnung (gemäß Kapitel 3.3.2) bestätigt. Das vollständige Abscheren von Betonscheiben (vgl. Versagensmechanismus der experimentellen Vorversuche, Kapitel 2.3) stellte sich bei

den Versuchskörpern der Hauptversuche mit Querschnitts-Typ 1 nicht ein. Die numerisch ermittelte Schädigung des Kernbetons des QS-Typ 1-Modells – bildhaft dargestellt im Längsschnitt durch die SCSC-Platte anhand des Druckschädigungsparameters d_c gemäß Abbildung 47 – im Vergleich mit dem beprobten und anschließend geöffneten Hauptversuchskörper H_4 weist ein entsprechend hohes Tragvermögen der Betonscheiben der Sandwichplatte mit gleichmäßig verteilten Lochdübeln unter statischer Belastung aus. Das differenzierte Tragvermögen der Verbundmittel der beiden Querschnitts-Typen ist auf die unterschiedlichen Raten der auftretenden Normal- und Schubspannungen in den konzentrierten Lasteinleitungszonen der Betonscheiben zurückzuführen.

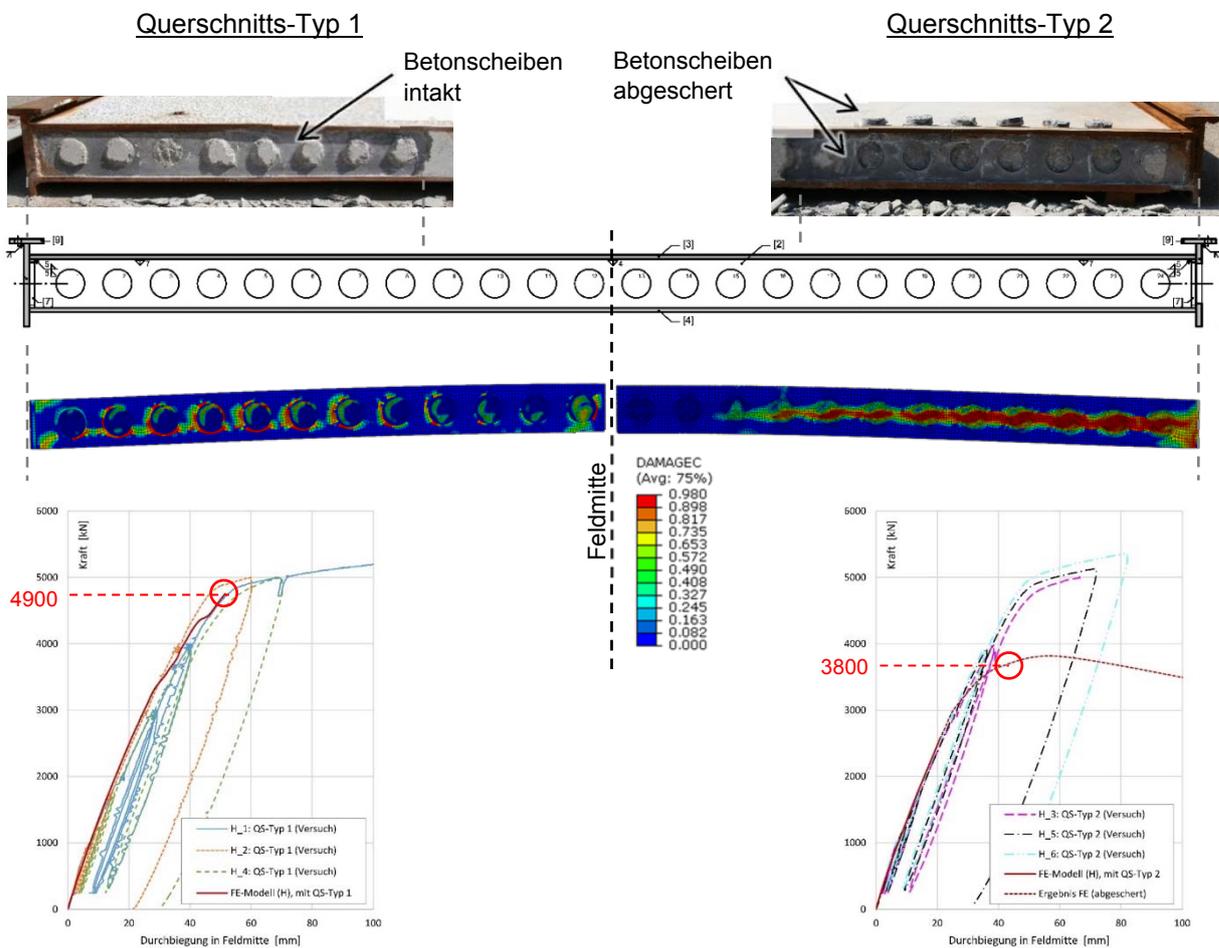


Abbildung 47: Analyse beprobter SCSC-Hauptversuchskörper im Längsschnitt; oben: Freigelegte Betonscheiben beprobter Versuchskörper - links oben: VK H_4 (QS-Typ 1) mit intakten Betonscheiben, rechts oben: VK H_3 (Typ 2) mit abgescheren Betonscheiben; mitte: Planliche Darstellung des Längsschnittes durch einen SCSC-Hauptversuchskörper; unten: Color Plots der Druckschädigung des Betons in der Ebene der Längsschnitte der FE-Modelle für die QS-Typen 1 (4.900 kN Belastung) und 2 (3.800 kN Belastung) mit der jeweiligen Ergebniskurve der FE-Analyse im Kraft-Verschiebungs-Diagramm

3.3.4.2. Vergleich des Tragverhaltens von Versuchskörpern mit QS-Typ 1 und 2

Aufgrund der gesammelten Erkenntnisse auf Basis der experimentellen Hauptversuche, der Öffnung der beprobten Versuchskörper H_3 und H_4 sowie der numerischen Analyse an SCSC-Plattenelementen mit zwei unterschiedlichen Querschnittsformen zeigt sich die SCSC-Sandwichplatte mit Querschnitts-Typ 1 als die Konstruktionsart mit dem günstigeren Tragverhalten.

3.3.4.3. Beurteilung der Anwendbarkeit des numerisch Modells

Das angewendete FE-Modell erwies sich als entsprechend passend für die Abbildung und ganzheitliche Untersuchung von SCSC-Sandwichplatten mit Querschnitts-Typ 1 und kann dahingehend aus Sicht des Autors für weiterführende Analysen als Grundlagemodell gemäß Kapitel 4.5 ohne Einschränkung eingesetzt werden.

4. FE-GRUNDLAGEMODELL FÜR WEITERFÜHRENDE NUMERISCHE ANALYSEN DER SCSC-PLATTE UNTER STATISCHER BELASTUNG

4.1. Einleitung

In diesem Kapitel werden grundlegende Informationen zu der Finiten Elemente Methode (FEM) selbst, dem FE-Programm-Paket ABAQUS (Dassault Systèmes) als auch im Speziellen zu der numerischen Modellierung von SCSC-Sandwichplatten des Querschnitt-Typs 1 gegeben.

Hierbei wird insbesondere auf anwendungsspezifische Eingabewerte und Einstellungen im FE-Programm ABAQUS eingegangen. Alle in diesem Kapitel angeführten Empfehlungen ergaben sich auf Grundlage der Erfahrungen, welche bei der Erstellung von FE-Modellen der Verbundplatten sowohl bei vorangegangenen FE-Untersuchungen als auch während den im Zuge des gegenständlichen Forschungsprojektes durchgeführten Analysen gesammelt wurden.

Detaillierte Hinweise in Hinsicht auf die Erstellung eines FE-Modells für den Anwendungsfall der SCSC-Platte beziehen sich im Einzelnen auf

- die Einteilung des Gesamtbauteils in Grundbausteine,
- die Form und die Größe der finiten Elemente,
- den Elementtyp,
- die Definition der Materialien Stahl und Beton,
- die Art der Belastung,
- die Festlegung von Kontaktformulierungen und Randbedingungen,
- die Wahl des Integrationsalgorithmus sowie auf
- die Auswahl der Ausgabewerte.

Allgemeine Informationen zu der FEM als auch dem FE-Programm ABAQUS darüber hinaus sind der einschlägigen Fachliteratur bzw. den Abaqus Manuals [Aba13] zu entnehmen.

4.2. Die Methode der Finiten Elemente

Literatur: [MH00], [Wit10], [Bat86], [Gab16]

4.2.1. Grundlagen

Die analytische Ermittlung des Verschiebungs- und Spannungszustandes eines deformierbaren, festen Körpers im belasteten Zustand ist lediglich bei einfachen Ingenieurproblemen exakt möglich. Komplexe statische als auch dynamische Aufgabenstellungen mit geometrischer und/oder materieller Nichtlinearität erfüllen oftmals nicht die Voraussetzungen für herkömmliche Methoden oder Verfahren der Festigkeitslehre, weshalb diese aus Sicht der Analytik als unlösbar gelten. Parallel mit der Entwicklung immer leistungsfähigerer Computersysteme in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde eine Reihe von numerischen Diskretisierungsverfahren zur Lösung von Feldproblemen etabliert. Hierzu zählen

- die Randelementemethode (BEM),
- die Finite Differenzen Methode (FDM),
- die Finite Elemente Methode (FEM) sowie
- gitterlose Verfahren.

Im Bauwesen, hier speziell im Bereich der Statik, hat sich die Finite Elemente Methode als das wichtigste Integrationsverfahren zur näherungsweise Lösung von Festigkeits- bzw. Stabilitätsproblemen von vorrangig flächenhaften Strukturen erwiesen.

Die FEM wird neben dem genannten Einsatz in der Strukturmechanik für stationäre oder instationäre Feldprobleme (z. Bsp. Strömungsprobleme, Akustik, Temperaturprobleme etc.) sowie zum Zweck der Optimierung von Formen oder Parametern eingesetzt. Durch das umfangreiche Leistungsspektrum findet das Integrationsverfahren mit finiten Elementen im Weiteren in den Bereichen Maschinen- und Apparatebau, Fahrzeug- und Schiffbautechnik, Luft- und Raumfahrttechnik aber auch in der Biomechanik Anwendung.

Der Grundgedanke der FEM ist die Zerlegung der betrachteten Struktur in eine beliebige Anzahl analytisch lösbarer Teilgebiete – den sogenannten finiten Elementen. Dieser Vorgang wird mit dem Begriff Diskretisierung beschrieben. Mittels Knoten in den Ecken der diskreten Bausteine ist die jeweilige Elementform festgelegt. Je nach Elementtyp können darüber hinaus weitere Knotenpunkte fixiert werden, wie beispielsweise Knoten in den Seitenhalbierenden von Dreiecken oder die Volumenschwerpunkte von Hexaedern. Alle

Knoten eines Bausteines sind durch Koordinaten im lokalen Koordinatensystem des Elements eindeutig definiert. Als Werkzeug zur Beschreibung des Verformungsverhaltens der finiten Elemente werden in einem weiteren Schritt problemgerechte Verschiebungsansätze an den Knoten formuliert.

Sämtliche diskreten Bausteine werden anschließend in Form eines Netzes als Abbild der betrachteten Gesamtstruktur zusammengefügt. Dieser Schritt kennzeichnet den Übergang von den lokalen Koordinatensystemen der finiten Elemente auf das globale Koordinatensystem des Netzmodells. Hierbei erfolgt die Definition von Transformationsgleichungen an den jeweiligen Kontaktknoten. Durch Zuweisung einer materialabhängigen Steifigkeit je Element, Rand- und Kontaktformulierungen sowie anhand der Definition einer schrittweisen Belastungsgeschichte wird die Gesamtsteifigkeitsmatrix des FE-Modells hergeleitet und die Arbeitsgleichung aufgestellt. Als Ergebnis der numerischen Berechnung werden physikalisch deutbare Freiheitsgrade (Verschiebungen und Verdrehungen) für alle Knoten ausgedrückt. Der Zustand eines finiten Elementes wird durch Interpolation der Freiheitsgrade der dem Element zugehörigen Knoten approximiert.

Das Wesen der Methode der Finiten Elemente besteht zusammengefasst darin, dass die untersuchte Gesamtstruktur mittels einer endlichen Anzahl von Freiheitsgraden abgebildet wird. Für jedes Element der untersuchten Struktur kann an den definierten Berechnungsschritten der Verschiebungs- und Spannungszustand näherungsweise abgebildet werden.

4.2.2. Vorgehensweise bei FE-Analysen

In der nachfolgenden Übersicht werden die wesentlichen Schritte bei der Durchführung einer FE-Berechnung grob vorgestellt. Eine detaillierte Zusammenstellung der für FE-Simulationen von SCSC-Platten empfohlenen Modellierungsansätze, Einstellungen und Parameterkombinationen im FE-Programm ABAQUS ist in Kapitel 4.5 gegeben.

4.2.2.1. Preprocessor

Prinzipiell beschreibt der Begriff Preprocessing das Erstellen einer Modelldatenbank, welche auf eine gegebene Aufgabenstellung zugeschnitten ist. Diese umfasst neben der Eingabe der Geometrie des Modells Einträge zu den diskreten Bausteinen selbst (Elementtyp, Anzahl und Größe der Elemente), zu deren Verknüpfung zu einem FE-Netz sowie Angaben über Materialkennwerte, Randbedingungen und Belastung.

Für die Weiterverarbeitung der Modelldaten im Solver (siehe Kapitel 4.2.2.2) wird die Gesamtheit der Modelldaten in einer Eingabedatei abgespeichert. Dieser Vorgang setzt die erfolgreiche Prüfung der Eingabewerte auf Vollständigkeit und Plausibilität voraus.

4.2.2.2. Solver

Im sogenannten Löser wird basierend auf den Modelldaten der Eingabedatei das mathematische Gleichungssystem erstellt und berechnet. Je nach Aufgabenstellung kann hierbei eine implizite oder explizite Integration zum Einsatz kommen.

Im Detail betrachtet erfolgt im Solver zunächst die Berechnung der Elementsteifigkeitsmatrizen und der Elementlastvektoren. Nach der Aufstellung der Struktursteifigkeitsmatrix werden die Lastvektoren aufgebaut und die Randbedingungen eingearbeitet. Die Lösung des Gleichungssystems liefert als Zwischenergebnis die einzelnen Knotenverschiebungen. Anschließend wird die Rücksortierung der Elementverschiebungen durchgeführt und in einer Nachlaufrechnung die Dehnungen und Spannungen in den Elementen berechnet. Zudem werden die ermittelten Zustandsgrößen in einer Ergebnisdatenbank zusammengefasst.

4.2.2.3. Postprocessor

Die zuvor vom Solver bereit gestellten Rechen- und Simulationsergebnisse können in einem Viewer mittels Contour Plots (graphische Darstellung von Daten) visualisiert werden oder in tabellarischer Form für weiterführende Auswertungen exportiert werden.

4.3. Das kommerzielle FE-Programm ABAQUS

4.3.1. Allgemeines

Die numerische Vergleichsanalyse der experimentellen Laboruntersuchungen an SCSC-Plattenelementen der Vor- und Hauptversuche erfolgte mit dem Programm-Paket ABAQUS 6.11-2 sowie 6.13-2 der Firma Dassault Systèmes.

Das FE-Programm ABAQUS stellt ein leistungsstarkes Simulationswerkzeug mit einer Modellierungsdatenstruktur und integrierter Solver-Technologie dar. Die derartig gestaltete FE-Komplettlösung ermöglicht eine Vielzahl von Anwendungsbereichen sowohl bei der Untersuchung von komplexen Problemstellungen aus der Praxis als auch als Analysetool bei Forschungs- und Entwicklungsaufgaben.

ABAQUS wurde von der Firma HKS (heute: Dassault Systèmes) im Jahr 1978 als Finite Elemente Programm veröffentlicht und seither mit umfangreichen Erweiterungen und Zusatzmodulen ergänzt. Das Mehrzweckprogramm ABAQUS 6.13-2 [Aba13] umfasst unter anderem die nachfolgend angeführten Programm-Pakete:

- ABAQUS/CAE:
Complete Abaqus Environment (kurz: CAE) bezeichnet eine Komplettlösung für die Modellierung, Visualisierung und Prozessautomatisierung von Finite Elemente Analysen (Pre- und Postprocessor)
- ABAQUS/Standard:
Analysetool für statische und dynamische Low-Speed Ereignisse – im Speziellen für Fragestellungen mit hohem Anspruch an Genauigkeit der Belastungs- und Kontaktformulierungen (Variationsansatz mit impliziter Integration)
- ABAQUS/Explicit:
Das Produkt Explicit eignet sich insbesondere für die Simulation von Strukturen, deren Lösung auf nichtlinearen oder instationären Abläufen beruht sowie bei High-Speed Reaktionen (explizite Lösungstechnik)
- ABAQUS/CFD:
Computational Fluid Dynamics (kurz: CFD) umfasst den Anwendungsbereich der numerischen Strömungsmechanik
- ABAQUS Multiphysics
Analysen mit thermischen oder elektrischen Kopplungen, Wellenbelastungen etc.
- Add-on tools (benutzerspezifische Zusatzapplikationen)

4.3.2. Finite Elemente und deren Vernetzung

Mit dem Begriff Diskretisierung, auch Vernetzung genannt, wird der Vorgang des Unterteilens eines Modelles – oder eines Teilbereiches davon – in eine endliche Zahl von finiten Elementen beschrieben.

Die Festlegungen in diesem Arbeitsschritt haben maßgeblichen Einfluss auf die Güte und die Dauer einer numerischen Berechnung. Daher ist besonderes Augenmerk auf die Auswahl der Elementtypen als auch auf deren Größe, Form und Anordnung zu legen.

4.3.2.1. Finite Elemente

Ein finites Element stellt die kleinste Einheit eines Berechnungsmodelles mit der Finiten Elemente Methode dar. Die unterschiedlichen Elementtypen werden im Allgemeinen entsprechend ihrer Form und ihrer charakteristischen Eigenschaften in vier Elementklassen eingeteilt. Eine Übersicht über Elementtypen und deren Zuteilung in Elementklassen sowie spezifische Besonderheiten hat Wittmann in [Wit10] angeführt.

Die 4 Elementklassen, auch Elementfamilien genannt, lauten:

- 1D Linienelemente: Stab, Balken, Rohr, Feder, Dämpfer etc.
- 2D Flächenelemente: Dreieck, Viereck, Scheibe, Platte, Schale, Kontaktelemente etc.
- 3D Volumenelemente: Hexaeder, Pentaeder, Tetraeder etc.
- Sonstige Elemente: Punktmassen, unendliche Elemente, starre Körper (Rigids) etc.

Alternativ können die Elementtypen entsprechend [BFT16] nach der Art der mathematischen Formulierung der FEM in Strukturelemente, Kontinuumselemente und spezielle Elemente unterteilt werden.

Die Diskretisierung von stabartigen Konstruktionen sowie von Platten und Schalen bei flächenhaften Konstruktionen erfolgt mittels Strukturelementen. Hierbei wird die untersuchte Struktur durch die Stabachse bzw. die Mittelfläche idealisiert abgebildet und mit relativen Steifigkeiten (Dehnsteifigkeit, Biegesteifigkeit, Schubsteifigkeit, Torsionssteifigkeit) verknüpft. Diese Art der Modellierung ermöglicht durch die Reduzierung der Freiheitsgrade je Knoten kurze Rechenzeiten.

Allgemeine ebene und räumliche Aufgabenstellungen der Kontinuumsmechanik werden hingegen mit Kontinuumselementen untersucht. Diese weisen als Freiheitsgrade vorrangig die Verschiebungskomponenten in den Knotenpunkten eines finiten Elements auf und

können darüber hinaus mit rotatorischen Freiheitsgraden ausgestattet sein. Bei der Vernetzung werden die Knoten von Kontinuumselementen auf die gesamte Geometrie angewendet.

Unter den Typ der speziellen Elemente fallen alle jene Elemente, welchen den oben angeführten Eigenschaften und Charakteristika nicht entsprechen.

Als Kriterien für die Auswahl eines bestimmten Elementtyps können die Art der Abmessungen, die Belastungen, die Analyseart, verlangte Resultate (global oder lokal), die Rechnerkapazität und die Simulationszeit genannt werden. Jedes finite Element ist durch die Anzahl der zugehörigen Knoten, die Anzahl der Freiheitsgrade je Knoten, die Elementsteifigkeitsmatrix und eine Reduktionsregel zur Beschreibung der Aufteilung von Elementlasten auf statisch äquivalente Knotenlasten charakterisiert. Je umfangreicher die Definition der Charakteristika eines Elementes gewählt wird, umso mehr Deformationsmoden und Deformationszustände stehen für die numerische Berechnung bereit. Gleichzeitig wirkt sich die höhere Genauigkeit der Element-Geometriedaten in Form einer längeren Rechenzeit auf die Simulation aus.

Auf dem Gebiet des konstruktiven Ingenieurbaus kann eine Vielzahl an Fragestellungen mittels der FEM untersucht werden:

- Analysen mit 1D Linienelementen können etwa bei Simulationen von Fachwerken oder Rahmentragwerken angewendet werden.
- Konstruktionen, bei welchen eine Dimension wesentlich kleiner als die beiden anderen Dimensionen ist, werden der 2D Elementfamilie zugeschrieben. Gebräuchliche Flächenelemente stellen Scheiben-, Platten oder Schalenelemente dar.
- Bei Simulationen von Auflagern, Detailanschlüssen, Verbundkonstruktionen oder dicken Bauteilen werden generell Volumenelemente zu Grunde gelegt.
- Unter die Kategorie der sonstigen Elemente fallen neben jenen mit unendlicher Ausbreitung Punktmassen sowie die Gruppe der Starrkörper (Rigids). Diese werden häufig als Begrenzungselemente eingesetzt oder dienen der Modellierung von Auflagern, welche für das Modell unerlässlich sind, jedoch nicht direkt Teil des Untersuchungsbereiches darstellen.
- Einige Aufgabenstellungen ermöglichen die Anwendung verschiedener Elementtypen für ein und dieselbe Struktur. Dies trifft beispielsweise auf Berechnungen von

Rohrleitungen zu, welche sowohl mit eindimensionalen Elementen als auch mit zweidimensionalen Schalen modelliert werden können.

Eine Erläuterung zu den Anwendungsregeln und -grenzen sowie den Besonderheiten von Volumenelementen und Rigids ist in den Kapiteln 4.4.2 und 4.5.5 zusammengestellt. Informationen darüber hinaus als auch zu anderen Elementtypen sind der einschlägigen Fachliteratur zu entnehmen.

4.3.2.2. *Das FE-Netz*

Mit dem Begriff Diskretisierung wird das Ersetzen der Gesamtstruktur des FE-Modells durch ein FE-Netz, bestehend aus endlich vielen finiten Elementen, bezeichnet. Je nachdem, wo der Fokus der Anforderungen an das Ergebnis einer FE-Analyse liegt, können hierbei unterschiedliche FE-Netze für ein und dieselbe Modellgeometrie zum Einsatz kommen.

Das Aussehen des Netzes hängt vorrangig von der gewählten Elementklasse der finiten Elemente ab. Im Weiteren gilt es grundsätzlich zu beachten, dass die Rechenzeit einer numerischen Simulation sowie der Umfang eines Modells von der Komplexität der verwendeten Elementtypen abhängen. Folglich führen beispielsweise Elemente mit einem höheren Grad der Ansatzfunktion (hohe Knotenanzahl) zu einem größeren Rechenaufwand. Demgegenüber verringert sich die Berechnungsdauer einer Analyse durch Reduktion der Elementanzahl bei gleichzeitiger Vergrößerung der Elementabmessungen.

Zusätzlich erweisen sich gewisse Elementgeometrien im FE-Netz als ungünstig hinsichtlich der Güte der Berechnungsergebnisse. Dazu zählen lange, rechteckige Elemente mit einem Seitenverhältnis von 1:2 und darüber als auch ein stark abweichendes Verhältnis der Größe benachbarter Elemente. Im Weiteren sind Elemente mit sehr spitzen Winkeln oder einspringenden Ecken unzulässig. In diesem Zusammenhang gilt die Faustregel: „FE-Modelle mit ästhetischen Netzen weisen in der Regel bei geeigneter Netzfeinheit gute Berechnungsergebnisse auf.“

4.3.3. Stoffgesetze

Mittels Stoffgesetzen wird eine funktionale Beziehung von der Reaktion eines verformbaren Körpers eines bestimmten Materials auf eine definierte Einflussgröße hergestellt.

Das FE-Programm ABAQUS bietet neben anderen Materialkatalogen eine umfangreiche Auswahl an Materialmodellen für Baustoffe wie Metall, Beton, Mauerwerk, Kunststoff und diverse Verbundwerkstoffe an. Die Materialdefinition erfolgt hierbei grundlegend über die Eingabe einer Arbeitslinie durch Spannungs-Dehnungs-Wertepaare.

Im Weiteren können beispielsweise Elastomere, granulare Medien oder Flüssigkeiten untersucht werden. Zusätzlich steht dem Benutzer die Möglichkeit von selbst-definierten Materialien für numerische Berechnungen zur Verfügung.

In dieser Arbeit werden ausschließlich die für FE-Analysen an SCSC-Plattenelementen angewendeten Materialmodelle *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) für Beton sowie *Classic Metal Plasticity* für Stahl behandelt. Eine Darstellung der genannten Stoffgesetze ist in Kapitel 4.5.6 im Detail zusammengestellt.

4.3.4. Die mathematische Formulierung der FEM

Die Methode der inkrementellen Lösung einer Aufgabenstellung bildet gleichfalls die mathematische Grundlage der Finiten Elemente Methode. Weiterführende Informationen zu dieser Thematik sind der einschlägigen Fachliteratur zu entnehmen. Eine anschauliche Zusammenfassung zu Grundgleichungen der Verschiebungsmethode sowie zu expliziten und impliziten Gleichungslösern gibt unter anderen *Herrmann* in [Her13].

4.4. Vorausgegangene numerische Berechnungen von Sandwichplatten

4.4.1. Übersicht zu vorausgegangenen numerischen Analysen

Das breite Anwendungsspektrum des FE-Programmes ABAQUS bietet dem Benutzer die Möglichkeit aus einer Vielzahl an Modellierungsvarianten zu wählen, setzt jedoch dahingehend ein hohes Maß an Grundlagenwissen zu den jeweiligen Analyseverfahren und Modelleinstellungen voraus.

Das Ziel der vorliegenden numerischen Simulation besteht im Speziellen darin, mit den erhaltenen Berechnungsergebnissen die Messergebnisse der experimentellen Tragfähigkeitsuntersuchungen hinreichend genau nachzubilden. Eine Reihe von Forschungsarbeiten zu FE-Analysen von Plattenkonstruktionen in Verbundbauweise mit längslaufenden Dübelleisten wurde in den vergangenen Jahren publiziert. Diese zeigen Besonderheiten von verschiedenartigen Modellspezifikationen auf und führen häufig Empfehlungen zu Kombinationen der zahlreichen Eingabewerte an. Bezogen auf die numerische Simulation von SCSC-Platten sind insbesondere die Eingaben zu Elementtypen und Netzformen, die Wahl des Integrationsalgorithmus, die Definition der Materialparameter unterschiedlicher Stoffgesetze sowie die Kontaktformulierung zwischen den Teilquerschnitten aus Stahl und Beton von Interesse.

Nachfolgend ist eine Zusammenstellung der für die numerische Simulation von SCSC-Platten wichtigsten Forschungsarbeiten ersichtlich:

- **Petraschek** [Pet08] dokumentierte Push-Out-Tests an Versuchskörpern mit Kronendübeln und bewehrtem Beton, welche mit FE-Modellen im Programm ABAQUS vergleichend analysiert wurden. Die Arbeit enthält Empfehlungen zu der Verwendung von Materialmodellen für Beton unter hohen mehraxialen Spannungszuständen.
- Eine ausführliche Beschreibung der Materialdefinition für Beton veröffentlichten **Pavlović et al.** [PMVB13] im Jahr 2013 für die numerische Simulation von Träger-Stützen-Anschlüssen in Verbundbauweise.
- Erste numerische Simulationen an SCSC-Platten wurden im Zuge einer umfangreichen Parameterstudie von **Herrmann** [Her13] unter Mitarbeit von Frank [Fra12a], [Fra12b] durchgeführt. Die FE-Analysen mit dem Programmpaket

ABAQUS/EXPLICIT erfolgten begleitend zu experimentellen Sondierungsversuchen an Sandwichplattenelementen mit vier unterschiedlichen Dübelleistengeometrien am Institut für Tragkonstruktionen – Stahlbau der Technischen Universität Wien. *Herrmann* beschäftigte sich im Rahmen seiner Dissertation mit der ingenieurmäßigen Modellbildung zum Tragverhalten von SCSC-Platten als Fahrbahnplatten für eingleisige Eisenbahnbrücken unter statischer Beanspruchung.

4.4.2. Wesentliche Festlegungen für numerische Simulationen von SCSC-Platten aus Erkenntnissen vorausgegangener Forschungsarbeiten

In diesem Kapitel werden Empfehlungen zu FE-Analysen an plattenförmigen Verbundkonstruktionen aus vorausgegangenen numerischen Untersuchungen zusammengefasst wiedergegeben.

4.4.2.1. Festlegungen zur Wahl des Integrationsalgorithmus

Bei der numerischen Analyse der SCSC-Platte unter statischer Last handelt es sich an sämtlichen Berührflächen der Verbundwerkstoffe Stahl und Beton um ein nichtlineares Kontaktproblem. Anders als für Aufgabenstellungen aus dem Bereich der klassischen Kontaktmechanik, wie etwa bei dem Kontakt einer Kugel mit einem elastischen Halbraum oder bei Kontakt zwischen zwei Zylindern mit parallelen Achsen, stehen für allgemeine Kontaktprobleme keine analytischen Formeln zur Bestimmung der kontaktmechanischen Größen (Kontaktdruck, Abplattung der Kontaktpartner bei Kontakt, Abmessungen der Kontaktflächen) zur Verfügung. Für Anwendungsfälle mit komplizierten, zeitabhängigen Kontaktproblemen ist demzufolge ein inkrementelles Lösungsverfahren unumgänglich.

Überdies stellen der Umfang und die Art der geforderten Ergebniswerte einer numerischen Untersuchung eine Fülle von Anforderungen an den Gleichungslöser. Im Fall der SCSC-Platte sind – wie auch bei vorausgegangenen Untersuchungen an plattenförmigen Verbundkonstruktionen mit Kronendübeln – insbesondere der Versagensmechanismus im Bereich der Verbundfuge zwischen Dübelleiste und Kernbeton als auch das Tragverhalten der Plattenkonstruktion im Nachbruchbereich von besonderem Interesse. Folglich untersuchten [FPO07], [Iwa07] und [Her13] den Einfluss der unterschiedlichen Integrationsalgorithmen auf die Ergebnisse sowie die Konvergenz von Analysen an Plattenkonstruktionen in Verbundbauweise anhand einer Reihe numerischer Simulationen mit den Integrationsmethoden STATIC/GENERAL, STATIC/RIKS als auch DYNAMIC/EXPLICIT mit dem FE-Programm ABAQUS.

Die Studienautoren wiesen den Gleichungslöser DYNAMIC/EXPLICIT für die Anwendung bei Simulationen von Plattenkonstruktionen in Verbundbauweise mit längslaufenden Dübelleisten als die geeignetste Anwendung der möglichen Integrationsmethoden aus. Die Einschätzungen, in Bezug auf die oben erwähnte Empfehlung des dynamischen Gleichungslösers, stützen sich auf die Kriterien einer möglichst stabilen und genauen Berechnung.

4.4.2.2. Festlegungen zu der Modellierung der Grundbausteine einer SCSC-Platte

Wie bereits erwähnt wurde die SCSC-Platte erstmalig in der Arbeit von *Herrmann* [Her13] beschrieben. Die Dissertation beinhaltet unter anderem eine umfassende Arbeitsanweisung für die Erstellung von numerischen Modellen der SCSC-Platte im FE-Programm ABAQUS. Zusätzlich führt *Frank* Informationen und Ergebnisse zu Parameterstudien, welche jeweils auf einzelne Eingabewerte begrenzt sind, in [Fra12a] und [Fra12b] an.

Die nachstehend angeführten Themen der genannten Publikationen stellen wertvolle Grundlagen für die Erstellung eines Grundlagemodells einer SCSC-Platte dar:

- Die Gesamtstruktur sollte in möglichst einfache und nach den Materialien getrennte Teilbereiche (Grundbausteine) untergliedert werden, welche wiederum über die Funktion Partitionierung systematisch in *partition cells* unterteilt werden. Dies vereinfacht die spätere Vernetzung der Grundbausteine mit finiten Elementen.
- Eine frühe Benennung von *Surfaces*, darunter sind zusammenhängende Teilbereiche der Oberflächen von Grundbausteine zu verstehen, ist bei der nachfolgenden Kontaktformulierung von Vorteil. Gleiches gilt für die Definition von benannten *Sets*. Ein *Set* kann einen gesamten Grundbaustein oder auch einzelne *partition cells* umfassen und ermöglicht sowohl im Preprocessing als auch im Postprocessing die eindeutige Auswahl von Teilbereichen des Modells.

4.4.2.3. Festlegungen zu der Vernetzung der Grundbausteine mit finiten Elementen

Die Art und Weise der Diskretisierung eines Modelles oder Teilbereichen davon hat maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis einer FE-Analyse. Die vorliegende räumliche Struktur bedarf speziell für die Querschnittsteile im Nahbereich der Verbundfuge – hierzu zählen die Lochdübelleisten, alle an den Stahl angrenzenden Bereiche des Kernbetons als auch die Betonscheiben selbst – eine fein strukturierte Abbildung mit Volumenelementen. Diese Forderung entsteht vorrangig aus der Komplexität des Plattentragwerkes, bei dem in den stark beanspruchten Bereichen hohe dreiaxiale Spannungszustände zu erwarten sind.

Zu dieser Thematik empfiehlt *Herrmann* in [Her13] die Verwendung von Hexaederelementen mit linearer Ansatzfunktion.

Die erforderliche Netzfeinheit hängt neben anderen Faktoren maßgeblich von der Geometrie der einzelnen Grundbausteine ab. Ein allgemein gültiger Grundsatz der FEM stellt den direkten Zusammenhang zwischen einer engmaschigen Untergliederung eines Modelles mit finiten Elementen zu der steigenden Qualität der Berechnungsergebnisse dar. Aus diesem Grund sind nach [Ant07] und [FPO07] schlanke Querschnittsteile der SCSC-Platte mit zumindest drei Reihen von finiten Elementen über die Dickenrichtung der Bauteile zu diskretisieren.

4.4.2.4. Festlegungen zu der Wahl des Elementtyps

In [Her13] werden für FE-Untersuchungen von SCSC-Platten mit ABAQUS/EXPLICIT Hexaederelemente mit linearer Ansatzfunktion des Typs C3D8R empfohlen.

Der Einfluss der Option *Element Deletion* wurde ebenfalls in [Ant07] behandelt. Die genannte Funktion regelt den rechnerischen Ausschluss einzelner Elemente während einer laufenden Simulation, welche einen definierten Grenzwert der Materialschädigung oder eine auffällig hohe Verformungsrate erreicht haben. Die Ergebnisse einer Vergleichsanalyse mit und ohne aktivierter Option *Element Deletion* weist keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse der Simulationen auf. Allerdings kann *Element Deletion* den frühzeitigen Abbruch einer Berechnung aufgrund des Herausfilterns von finiten Elementen mit einem theoretisch negativen Volumen verhindern.

4.4.2.5. Festlegungen zu den Materialmodellen für Stahl und Beton

In allen eingangs genannten Veröffentlichungen wird das Materialmodell *Classic Metal Plasticity* als das geeignetste Modell für Querschnittsteile aus Stahl hervorgehoben. *Herrmann* verweist in [Her13] auf die Notwendigkeit der Berücksichtigung des Verfestigungsbereichs in der Arbeitslinie.

Für den Verbundwerkstoff Beton empfiehlt sich die Anwendung des Stoffmodells *Concrete Damaged Plasticity* (CDP). Diese Aussage stützt sich auf die Ergebnisse von umfangreichen Untersuchungen und Vergleichsanalysen von *Petraschek*, *Herrmann* und *Pavlović*. Demzufolge eignet sich CDP insbesondere für dynamische Modellanalysen mit nichtlinearem Materialverhalten und ermöglicht die Implementierung von dehnungsabhängigen Schädigungsparametern sowohl für Zug- als auch Druckbeanspruchungen. Als

wesentliche Festlegungen gehen die folgenden Punkte in die gegenständliche Arbeit mit ein:

- Der Formfaktor K_c , welcher die Abweichung der Form der deviatorischen Ebene der Versagensfläche im Betonmodell CDP bezogen auf einen Kreis beschreibt, wird mit $K_c > 2/3$ festgelegt.
- Die Geometrie der Erzeugenden in der Meridianebene der Versagensfläche wird neben dem Asymptotenwinkel ψ auch durch den Parameter *eccentricity* ε beeinflusst. Die Standardeinstellung für den Parameter *eccentricity* $\varepsilon = 0,1$ wird übernommen.
- Das Verhältnis zwischen zwei- und einaxialer Druckfestigkeit σ_{bo}/σ_{co} (auch: f_{bo}/f_{co}) liegt für Beton üblicherweise zwischen 0,08 und 0,12. Der von ABAQUS [Aba13] empfohlene Default Wert von 1,16 wird beibehalten.
- Das Spannungs-Dehnungsverhalten von Beton unter einaxialer Druckbeanspruchung wird bis zu einer Dehnung von 0,1 definiert und bestimmt gleichzeitig den Verlauf des dehnungsabhängigen Druckschädigungsparameters d_c . Hierbei ist zu beachten, dass der Beginn der Schädigung von auf Druck hochbeanspruchten finiten Elementen aus dem Material Beton erst mit Erreichen der mittleren Betondruckfestigkeit f_{cm} eintritt.
- Zur Beschreibung des Verhaltens von unbewehrtem Beton unter Zugbeanspruchung hat sich das Modell CDP2 aus der Arbeit [Her13] als gut geeignet erwiesen.

4.4.2.6. Festlegungen zu Kontaktformulierungen

Aufgrund der Konstruktionsweise der SCSC-Platte weist diese eine Reihe von unterschiedlichen Kontaktflächen zwischen Beton und Stahl auf. Von Interesse zeigt sich in diesem Zusammenhang der Mechanismus der Kraftübertragung zwischen den Kontaktpartnern Stahl und Beton im Inneren der Verbundkonstruktion. An jeder der vorhandenen Berührflächen kann theoretisch – bei Betrachtung von unterschiedlichen Lastniveaus eines belasteten SCSC-Plattentragwerkes – Haftreibung und/oder Gleitreibung auftreten. Die Ermittlung der Kontaktkräfte in den jeweiligen Kontaktflächen ist jedoch versuchstechnisch nicht eindeutig möglich. Aus diesem Grund muss auf ein numerisch handhabbares Modell zur Abbildung des im realen Tragwerk tatsächlich auftretenden Tragmechanismus für FE-Analysen zurückgegriffen werden. *Herrmann* empfiehlt hierzu in seiner Arbeit die Berücksichtigung von Gleitreibung allein an den Berührflächen aller Dübelstirnflächen mit einer Reibzahl von ca. $\mu = 0,3$.

4.5. Die Simulationen von SCSC-Platten mit ABAQUS – Das SCSC-Grundlagemodell

4.5.1. Einleitung

Gegenstand dieses Kapitels ist die Darlegung der projektspezifischen Einstellungen bei der Anwendung des FE-Programm-Paketes ABAQUS für numerische Analysen von SCSC-Platten. Die Ausarbeitung umfasst hierbei alle wesentlichen Bearbeitungsschritte, die für die Simulation eines Hauptversuchskörpers des Querschnitts-Typs 1 durchgeführt wurden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die nachfolgenden Ausführungen nicht als Schritt-für-Schritt-Anleitung einer entsprechenden FE-Modellierung verstanden werden sollen. Vielmehr kann bei Berücksichtigung der dargelegten Empfehlungen auf die Erkenntnisse, welche bei den bisherigen FE-Analysen von SCSC-Platten gewonnen wurden, für die Erstellung eines ABAQUS-Grundlagemodells zurückgegriffen werden. Darüber hinaus sei angemerkt, dass sich die nachfolgende Zusammenfassung ausschließlich auf jene Programminhalte und Posten im Modell- und Ergebnisbaum von ABAQUS bezieht, welche für die Simulation von Sandwichplatten von Bedeutung sind. Informationen darüber hinaus sind den ABAQUS-Handbüchern der Firma Dassault Systèmes [Aba13] zu entnehmen.

4.5.2. Abaqus CAE

Mit der Simulationssoftware ABAQUS/CAE steht dem Anwender eine umfassende, modulare Arbeitsumgebung zur Verfügung, welche die drei Arbeitsschritte Preprocessing, Simulation und Postprocessing in einem Programm vereint.

In Abbildung 48 ist das Hauptfenster des FE-Programmes ABAQUS/CAE im Modus *Model* und dem Modul Part dargestellt. Für die Bearbeitung eines Modells stehen dem Anwender zu den Modulen zugehörige Posten (Icons) zur Verfügung, welche als Übersicht im Modellbaums ersichtlich sind. Jedem Modul ist ein Werkzeugsatz (Toolset) in der Werkzeugfläche zugeordnet. Ein Auszug der für FE-Analysen von SCSC-Platten verwendeten Posten ist in Tabelle 2 aufgelistet.

Die Modellerstellung umfasst generell verschiedene Posten für die Definition von Grundbausteinen, Materialdaten, Elementtyp und -form, Rand- und Kontaktformulierungen sowie der Belastung.

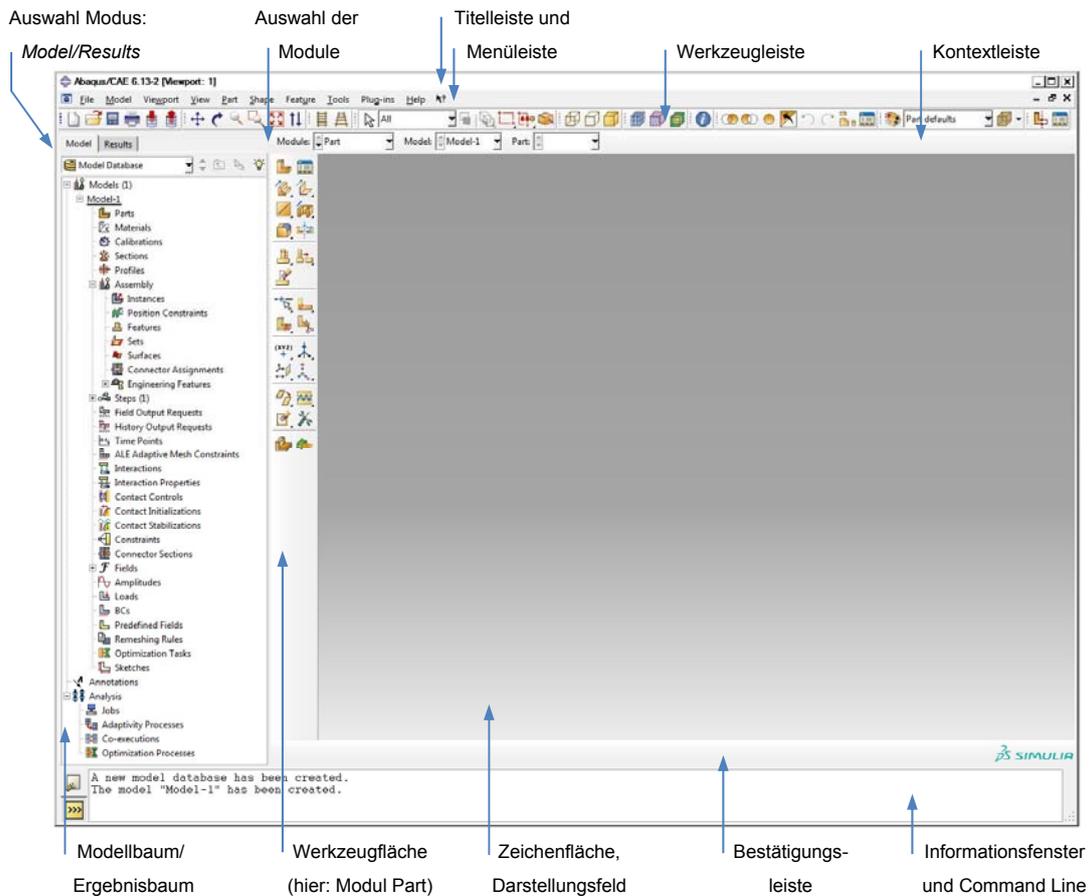


Abbildung 48: ABAQUS/CAE Hauptfenster der Version 6.13-2 [Aba13], [Her13]

Der Begriff Simulation umschreibt alle Berechnungsabläufe, welche im Solver bis zur erfolgreichen Erstellung der Ergebnisdatenbank durchlaufen werden.

Abschließend erfolgt die Interpretation der Ergebnisdaten im Modus Results (siehe Abbildung 48). Im Zuge des Postprocessing hat der Anwender ferner die Aufgabe auf Grundlage der erhaltenen Verformungs- und Spannungswerte der untersuchten Struktur die Güte der Eingabewerte zu überprüfen.

**Tabelle 2: Wichtige Module und Posten in ABAQUS/CAE 6.13-2 [Aba13]
für die Erstellung des SCSC-Grundlagemodells**

Modus	Modul	Posten im Modellbaum bzw. Ergebnisbaum
<i>Model</i> (Preprocessing)	Part	PARTS
	Property	MATERIALS SECTIONS
	Assembly	INSTANCES SETS SURFACES
	Step	STEPS FIELD OUTPUT REQUESTS HISTORY OUTPUT REQUESTS
	Interaction	INTERACTIONS INTERACTION PROPERTIES CONSTRAINTS
	--	AMPLITUDES
	Load	LOADS BCs (Boundary Conditions)
	Mesh	--
	Optimization	--
	Job	JOBS
<i>Results</i> (Postprocessing)	Visualization	OUTPUT DATABASE MODEL DATABASE XY PLOTS XY DATA PATHS
<i>Model</i>	Sketch	--

4.5.3. Einheiten

Das FE-Programm ABAQUS verlangt im Bearbeitungsverlauf keine Auswahl der Einheiten von Eingabeparametern. Der Nutzer hat dahingehend bei der Erstellung eines Modelles die Aufgabe, alle Werte in einem konsistenten Einheitensystem zu definieren. Das bedeutet im Detail, dass die sieben Basisgrößen (Länge, Masse, Zeit, Stromstärke, thermodynamische Temperatur, Stoffmenge und Lichtstärke) des Internationalen Einheitensystems, auch SI-Einheitensystem, sowie deren abgeleitete Größen (z.B.: Spannungen, Dehnungen etc.) zwingend einheitlich angegeben werden müssen.

Für das SCSC-Grundlagemodell werden generell die Grundeinheiten [mm] und [N] verwendet.

4.5.4. Das Modul Part

4.5.4.1. Allgemeines zu Parts

Der Posten PARTS dient der Erstellung von individuellen Geometrie-Grundbausteinen mit lokalem Koordinatensystem, den gleichnamigen *Parts*. Diese Einzelteile werden im weiteren Bearbeitungsverlauf mit Materialeigenschaften verknüpft (Modul Property) und als sogenannte *Instances* zu verschiedenen Baugruppen bzw. der Gesamtstruktur mit globalem Koordinatensystem zusammengefügt (Modul Assembly). Als *Instance* kann demzufolge die Abbildung eines *Parts* verstanden werden, welches im Zusammenwirken mit weiteren Abbildungen von Grundbausteinen einen globalen Baukörper abbildet. Ein *Part* kann hierbei auch mehrfach im Modul Assembly Anwendung finden.

Geometriedaten können einerseits direkt mittels Konstruktionswerkzeugen erzeugt oder andererseits als Vektor- oder Volumenmodell aus einem CAD-Programm importiert werden. Für Simulationen der SCSC-Platte wurden sämtliche *Parts* mittels Geometrieobjekten in der ABAQUS Umgebung CAE erstellt. Hierfür stehen dem Benutzer im Allgemeinen Koordinatenobjekte (Punkte), Linienobjekte (Linie, Bogen, Spline etc.) und Flächenobjekte (Rechteck, Dreieck, Kreis etc.) zur Verfügung. Dreidimensionale Objekte werden aus 2D Schnittflächen mittels Extrusion, Rotation oder durch Verschieben entlang einer vorgegebenen Bahn zu Volumenelementen (Würfel, Quader, Zylinder etc.) erweitert.

Ein *Part* kann aus einem einzelnen Geometrieobjekt erzeugt oder aus mehreren Geometrieobjekten, den Teilbereichen, zusammengesetzt werden. Zu jedem Objekt bzw. Teilbereich eines *Parts* werden neben den geometrischen Daten zusätzliche Informationen (*Features*) gespeichert, welche die endgültige Form eines *Parts* definieren. Hierbei besteht beispielsweise unter anderem die Möglichkeit der Modellierung von Durchdringungen oder das Manipulieren von Geometrieobjekten mittels Zeichenwerkzeugen wie drehen, skalieren oder spiegeln.

Eingabewerte, welche bei der Erstellung des SCSC-Grundlagemodells im FE-Programm ABAQUS der Version 6.13-2 als Empfehlungen gegeben sind, werden in nachstehenden Ausführungen gekürzt wiedergegeben. Hierbei sind die wesentlichen Bezeichnungen bzw. Eingabewerte in Kurzschreibweise innerhalb einer geschwungenen Klammer angeführt. Die Reihenfolge der Klammereinträge orientiert sich an der jeweiligen Gliederung des ABAQUS-Eingabefensters. Die Vereinbarung wird am Beispiel der Erstellung eines neuen *Parts* (Eingabefenster «Create Part») samt der zugehörigen Kurzschreibweise in Abbildung 49 erklärt.

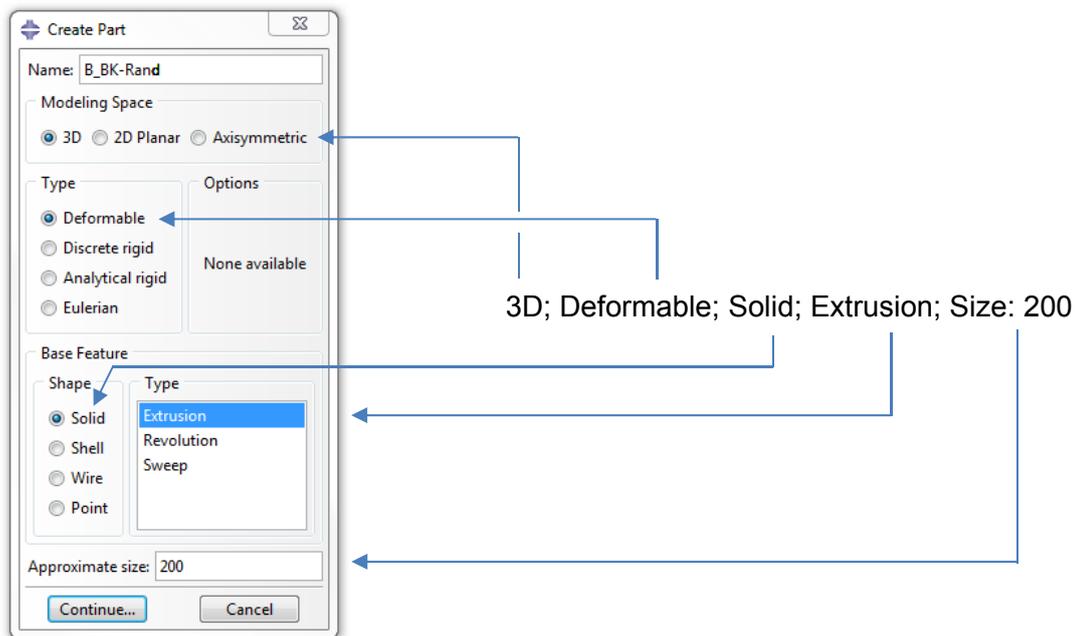


Abbildung 49: Vereinbarung zur Kurzschreibweise von ABAQUS-Eingaben für die Erstellung des SCSC-Grundlagemodells

Der erklärende Hinweis «*Create Part: {Modeling Space: 3D; Type: Deformable; Base Feature: Solid, Extrusion; Approximate Size: 200}*» bezieht sich demnach auf die Auswahl der Einstellungen im Eingabefenster «Create Part».

- (1) *Modeling Space* beschreibt die Dimension des Raumes der Modellierungsumgebung, welche für das gezeigte Beispiel an *Part 1 – B_BK-Rand* mit 3D (geometrischer Raum mit 3 Dimensionen) zu wählen ist.
- (2) Der Typ eines Grundbausteines, engl. *Part Type*, definiert den Umfang der vorgegebenen Eigenschaften eines *Parts*.

Hierin wird unterschieden zwischen den im Folgenden angeführten Typen:

- Die Auswahl *Deformable* bezeichnet einen zwei- oder dreidimensionalen Körper, welcher sich unter Last (mechanische, thermische oder elektrische Belastung) verformen kann.
- Das *Discrete rigid* wird für einen starren Körper mit komplexer Geometrie angewendet, wobei das *Part* über ein finites Netz verfügt.
- Ein *Analytical rigid* stellt eine starre Fläche dar, welche auf einfache geometrische Formen beschränkt ist und keine Diskretisierung erfordert.

- Der *Part-Typ Eulerian* wird bei der gleichnamigen Eulerian analysis angewendet. Es beschreibt im Wesentlichen einen durch Randbedingungen abgegrenzten Raum, welcher einen verformbaren Körper beinhaltet.
- (3) Das ergänzende *Base Feature* bezieht sich auf die Art und Weise der Erzeugung eines Grundbausteines. Beispielsweise bedeutet die Konfiguration *Solid – Extrusion*, dass ein Volumenobjekt mittels Extrusion aus einem ebenen Quellobjekt entwickelt wird.
- (4) Unter *Approximate size* kann der Benutzer eine beliebige Seitengröße des sogenannten *Sketchers* vorgeben – jenem Eingabefenster zur Erstellung der Skizze eines Quellobjektes. Da diese Vorgabe (hier *Size: 200*) ausschließlich Einfluss auf den anfänglich dargestellten Maßstab der Grafikoberfläche hat, wird beispielsweise dieser Passus in der nachfolgenden Kurzbeschreibungen nicht angeführt.

Die Punkte (3) und (4) der oben angeführten Auflistung können für das SCSC-Grundlagemodell je nach Erfordernis durch den Anwender frei gewählt werden. Diese beiden Einstellungen haben keinen direkten Einfluss auf die Güte der Berechnung bzw. auf die Simulationsdauer.

4.5.4.2. Überblick zu den Parts der SCSC-Hauptversuchskörper mit QS-Typ 1

In diesem Abschnitt sind die wesentlichen Geometrie-Festlegungen für die Erstellung eines FE-Modelles der SCSC-Hauptversuchskörper im Programm-Paket ABAQUS dargestellt.

Abbildung 50 stellt einen Hauptversuchskörper der SCSC-Platte mit Querschnitts-Typ 1 planlich dar. Hierin ist jener Ausschnitt des Plattentragwerkes in Rot markiert, welcher für die numerische Vergleichsrechnung der experimentellen Traglastuntersuchung modelliert wurde.

Bei FE-Analysen komplexer Aufgabestellungen erweist es sich in Hinsicht auf einen vertretbaren Modellierungsaufwand sowie zur Reduzierung der Berechnungsdauer als zweckdienlich, vorhandene Symmetrieeigenschaften der untersuchten Struktur in die Modellierung mit einzubeziehen:

- Das vorliegende System besitzt bezogen auf die Geometrie und die flächige Belastung eine Spiegelachse (y-z-Ebene) in Feldmitte. Dieses Schnittufer wird gegen Verschieben in Plattenlängsrichtung und Verdrehen gehalten. Die gewählten kinematischen Rand- und Übergangsbedingungen stellen eine vereinfachte Abbildung der realen Tragstruktur dar und erfordern dahingehend zur Erfüllung des

Gleichgewichts am globalen System eine Anpassung der Lagerungsbedingungen des Auflagers im Modell. Genauere Informationen hierzu sind in Kapitel 4.5.10.3 gegeben.

- Der Querschnitt der SCSC-Hauptversuchskörper kann in Plattenquerrichtung gedanklich in 1 m breite Abschnitte unterteilt werden. Diese Teilbereiche bestehen ihrerseits wiederum aus zwei spiegelgleichen Hälften um x-z parallele Ebenen mit jeweils 500 mm Breite. Als Schnittrufer sind hierbei jeweils die Systemmittelebenen zweier benachbarter Lochdübelleisten (längs halbiert) und die Mittelebenen der Betonscheiben sowie Schnittflächen durch Deck-, Boden- und Endbleche definiert, welche nachfolgend im Posten BCs (Boundary Conditions) mit entsprechenden Randbedingungen verknüpft werden.

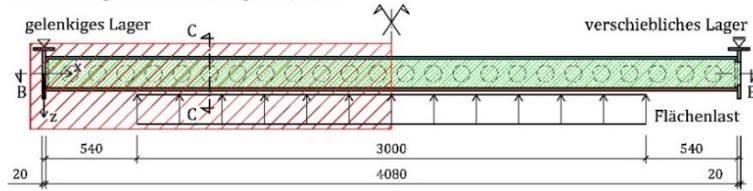
Hierbei ist jedenfalls zu beachten, dass der beschriebene Ausschnitt eines SCSC-Hauptversuchskörpers ausschließlich zur Beschreibung des Tragverhaltens von Sandwichplatten als Fahrbahndeck im Regelbereich von Brückenkonstruktionen herangezogen werden kann. Untersuchungen im Einflussbereich der Brückenaufleger erfordern eine gesonderte Betrachtung und werden in der vorliegenden Arbeit nicht behandelt.

Unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Symmetrieeigenschaften ergibt sich somit als Ausschnitt für die numerische Simulation der SCSC-Hauptversuchskörper mit Querschnitts-Typ 1 ein Zwölftel der tragenden Gesamtstruktur. Dieser umfasst eine Betonkammer über die halbe Plattenlänge sowie alle Stahlteile und Betonscheiben, welche sich über einen halben Meter Plattenbreite entlang der Systemmittellinien zweier benachbarter Lochdübelleisten erstrecken (siehe Abbildung 50).

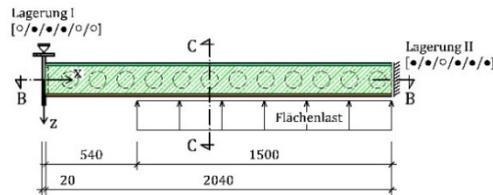
Die Unterteilung des in Abbildung 50 markierten Ausschnittes einer SCSC-Platte in *Parts* kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Jedenfalls vorteilhaft ist die Aufgliederung nach den Materialien Stahl und Beton sowie gegebenenfalls nach verschiedenen Festigkeiten der einzelnen Stahlbleche. Zusätzlich ist es zweckmäßig, die Struktur jeweils mittels Teilbereichen von einfacher geometrischer Form abzubilden.

SCHNITT A-A
[mm]

SCSC-Hauptversuchskörper QS-T1:



Ausschnitt FE-Modell:

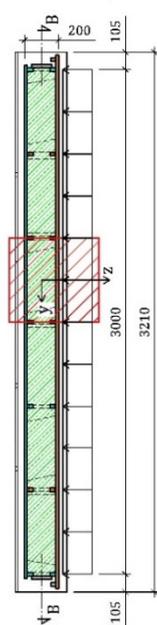


Legende:

- Beton
- Stahl
- Stahl, Teil-QS unten
- Stahl, Teil-QS oben
- Stahl, Ansicht

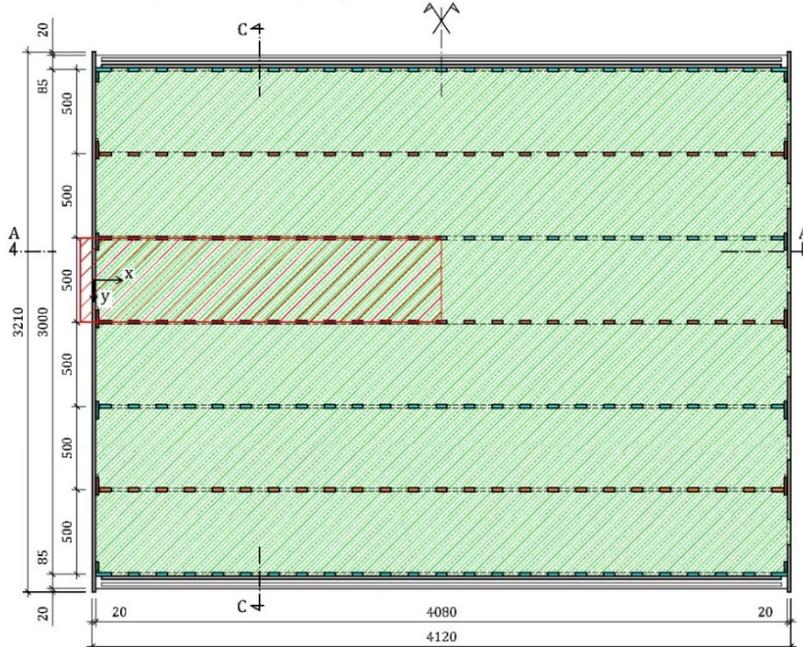
SCHNITT C-C
[mm]

SCSC-HV QS-T1:

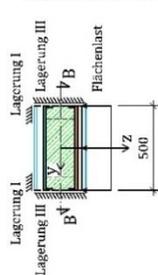


SCHNITT B-B, Grundriss
[mm]

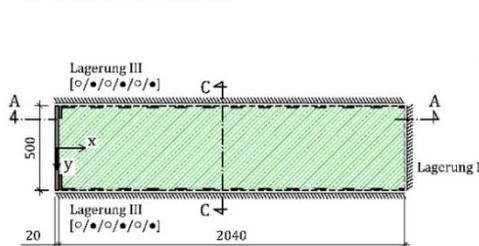
SCSC-Hauptversuchskörper QS-T1:



Ausschnitt FE-Modell:



Ausschnitt FE-Modell:



Lagerkomponenten:

- [U1/U2/U3/UR1/UR2/UR3]
- Verschiebungen U1/U2/U3 in x/y/z-Richtung
- Verdrehungen UR1/UR2/UR3 um x/y/z-Achse
- Lagerkomponente frei ○
- Lagerkomponente fest ●

Abbildung 50: SCSC-Hauptversuchskörper sowie der rot markierte Ausschnitt des FE-Grundlagensmodells von Sandwichplatten mit QS-Typ 1

Das SCSC-Grundlagemodell wird entsprechend der nachfolgenden Erläuterung aus 13 *Parts* zusammengesetzt. Eine Auflistung der einzelnen Geometrie-Grundbausteine ist in Tabelle 3 gegeben. Die Namen der *Parts* geben im Sinne einer Kurzbezeichnung Aufschluss über das anzuwendende Material, den Typ und den geometrischen Einsatzbereich. Es kommen sowohl dreidimensionale, verformbare Körper (*3D, Deformable, Solid*) als auch zweidimensionale, nicht verformbare Flächen (*Analytical rigid*) zur Anwendung. Die Materialmodelle für Beton und Stahl der verformbaren Körper sind im Namen der *Parts* anhand der Buchstaben B und S ausgedrückt. Die Abkürzung R steht für die Gruppe der *Rigids*, welche für starre Elemente verwendet werden.

Tabelle 3: Übersicht über die 13 *Parts* des SCSC-Grundlagemodells

	Bezeichnung <i>Part</i>	Beschreibung	Material	<i>Part Type, Shape</i>
1	B_BK-Rand	Betonkern im Randbereich	Beton	<i>3D, Deformable, Solid</i>
2	B_BK	Betonkern	Beton	<i>3D, Deformable, Solid</i>
3	S_BB	Bodenblech	Stahl	<i>3D, Deformable, Solid</i>
4	S_DB	Deckblech	Stahl	<i>3D, Deformable, Solid</i>
5	S_EB	Endblech	Stahl	<i>3D, Deformable, Solid</i>
6	S_LDL	Lochdübelleiste	Stahl	<i>3D, Deformable, Solid</i>
7	S_Steife	Endsteife der Lochdübelleiste	Stahl	<i>3D, Deformable, Solid</i>
8	S_T-Blech	Flansch des Auflagerträgers	Stahl	<i>3D, Deformable, Solid</i>
9	R_Rigid B Kern	Rigid y-z-Schnittufer Betonkern	--	<i>Analytical rigid</i>
10	R_Rigid B Rand	Rigid y-z-Schnittufer Betonkern im Randbereich	--	<i>Analytical rigid</i>
11	R_Rigid Lager	Rigid x-y-Ebene Auflagerbereich	--	<i>Analytical rigid</i>
12	R_Rigid S	Rigid y-z-Schnittufer von Deckblech und Bodenblech	--	<i>Analytical rigid</i>
13	R_Rigid S LDL	Rigid y-z-Schnittufer der Lochdübelleisten	--	<i>Analytical rigid</i>

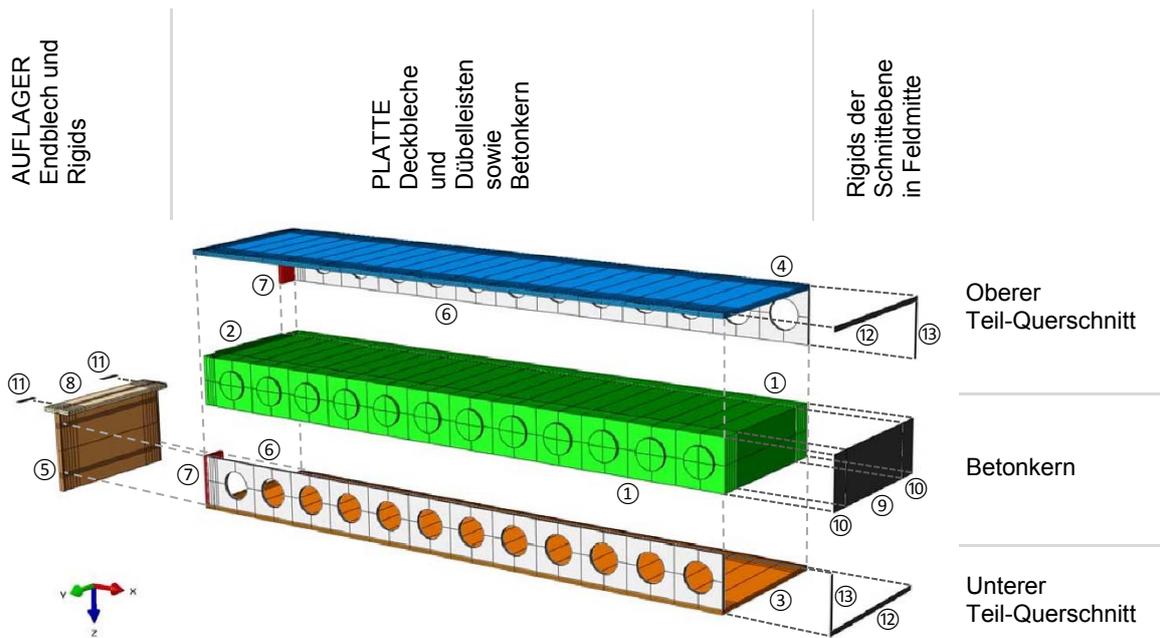
Der Aufbau des SCSC-Grundlagemodells mit Querschnitts-Typ 1, welcher für numerische Simulationen an den Hauptversuchskörpern der Sandwichplatte herangezogen wurde, ist in Abbildung 51 ersichtlich. Die 20 *Instances* des gezeigten FE-Modells sind sowohl farblich gekennzeichnet als auch mit Nummern entsprechend der Gliederung der *Parts* in Tabelle 3 bezeichnet. Die *Parts* 1 - Betonkern im Randbereich, 6 - Lochdübelleiste, 7 - Endsteife der Lochdübelleiste, die *Rigids* 10, 12 und 13 am y-z-Schnittufer sowie das *Rigid* 11 in der

x-y-Ebene wurden jeweils zweimal in das Modul Assembly importiert. Die übrigen *Parts* (Part 2 – 5 und 8 – 9) sind durch jeweils ein *Instance* in der FE-Gesamtstruktur abgebildet.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit stellt Abbildung 51 das SCSC-Grundlagemodell als Explosionszeichnung dar. Räumliche Zugehörigkeiten zwischen den *Instances* sind hierbei mit grauen Strichlinien dargestellt. Die Berührflächen der *Instances* untereinander werden mittels Interaktionsbeziehungen und Zwangsbedingungen, den sogenannten *Interactions* bzw. *Constraints*, verknüpft. Nähere Informationen zu diesem Thema sind in Kapitel 4.5.9 dargelegt.

Zum Zweck einer ingenieurmäßigen Modellbildung werden die *Instances* entsprechend ihrer Anordnung und Tragfunktion zu Teil-Querschnitten zusammengefasst. Diese sind:

- AUFLAGER: ⑤ Endblech, ⑧ Flansch des Auflagerträgers, 2 x *Rigids* ⑪ als Auflager
- OBERER TEIL-QUERSCHNITT: ④ Deckblech, ⑥ Lochdübelbleiste, ⑦ Endsteife sowie die *Rigids* ⑫ und ⑬
- BETONKERN: 2 x ① Betonkern im Randbereich, ② Betonkern sowie die *Rigids* ⑨ und 2 x ⑩
- UNTERER TEIL-QUERSCHNITT: ③ Bodenblech, ⑥ Lochdübelbleiste, ⑦ Endsteife sowie die *Rigids* ⑫ und ⑬



Legende:

Querschnittsteile mit dem Material Stahl

- Deckblech
- Bodenblech
- Lochdübelleisten
- Endsteifen
- Endblech
- T-Blech

Querschnittsteile mit dem Material Beton

- Betonkern
- Betonkerne im Randbereich

Rigids

- nicht verformbare Flächen

① - ⑬ Nummerierung der einzelnen *Parts* entsprechend Tabelle 3

Abbildung 51: Explosionszeichnung der FE-Gesamtstruktur mit globalem Koordinatensystem und farblich unterlegten *Instances* der 13 *Parts* eines SCSC-Hauptversuchskörpers

Die folgenden Erläuterungen zu der Generierung von *Parts* mit verformbaren Volumenkörpern sowie starren Elementen sind stellvertretend jeweils für einen Grundbaustein eines *Part Types* angegeben. Diese gelten sinngemäß für die nicht im Detail beschriebenen *Parts* des SCSC-Grundlagemodells mit den Nummern 2 – 8 und 10 – 13.

4.5.4.3. Die Erstellung eines verformbaren Grundbausteins am Beispiel von Part 1

Part 1: B_BK-Rand – Beton_Betonkern im Randbereich

«Create Part: {Modeling Space: 3D; Type: Deformable; Base Feature: Solid, Extrusion}»

Der erstgenannte Buchstabe B in der Abkürzung B_BK-Rand steht allgemein für das Material Beton. BK-Rand = „Betonkern im Randbereich“ beschreibt jene Bereiche des

modellierten Betonkörpers, welche seitlich an die beiden Lochdübelleisten aus Stahl angrenzen. *Part 1* wird demzufolge für zwei *Instances* in der Gesamtstruktur angewendet.

Bei der Modellierung von *Part 1* wird zu Beginn im *Sketcher* das sogenannte *Base Feature* erstellt. Hierbei wird ein Rechteck mit den Abmessungen 170 mm auf 2.025 mm gewählt, welches mittels Extrusion in einen Quader mit einer Höhe von 70 mm umgewandelt wird. Alle weiteren Geometriedaten des *Parts* werden als zusätzliche *Features* hinzugefügt.

In einem weiteren Schritt werden 12 Zylinder mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 10 mm im Abstand von jeweils 165 mm auf eine Grundfläche des Volumenkörpers aufgesetzt. Alternativ können passende Zylinder aus dem Quader herausgeschnitten werden, und anschließend die Öffnungen mit einseitig 10 mm überstehenden Zylindern wieder aufgefüllt werden. Von *Part 1* ist nach Abschluss der genannten Schritte die äußere Form des Körpers inklusive der 12 Betonscheiben festgelegt, siehe Abbildung 52.

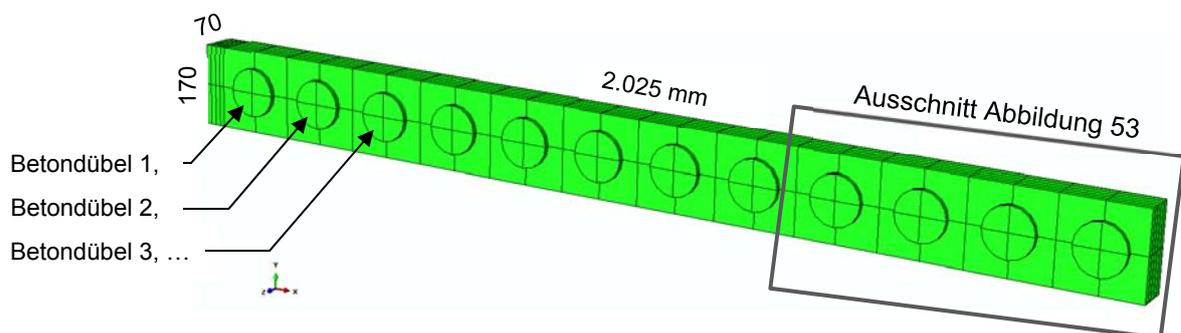


Abbildung 52: Axonometrie von *Part 1* des SCSC-Grundlagemodells im Modul Part mit lokalem Koordinatensystem

Punkte oder Knoten, welche im Pre- oder Postprocessing von besonderer Bedeutung sind, können mittels *Datum points* in ihrer Lage am *Part* lokal markiert werden. Diese Punkte dienen etwa als Eckpunkte für *Partition cells* oder als Koordinatenpunkte für *Sets*.

Der Begriff *Partition cell* steht für die Abgrenzung von Teilbereichen eines Körpers mittels Trennebenen (siehe Abbildung 52, schwarze Trennlinien an den Oberflächen von *Part 1*). Diese Unterabschnitte eines *Parts* können in vielerlei Hinsicht für die weitere Modellierung als auch für die Auswertung eines Modelles herangezogen werden. Im vorliegenden Fall erfolgt die Partitionierung vorrangig als Grundlage für die Diskretisierung der einzelnen *Parts*. Zusätzlich können die Oberflächen der abgegrenzten Zellen unter anderem rasch und übersichtlich als festgelegte *Surfaces* für diverse Kontakt- oder Übergangsformulierungen bereichsweise abgegriffen werden.

Die Unterabschnitte können ihrerseits mit dem Befehl *Sets* zu einer Gruppe von *Partition cells* verbunden werden. Überdies erlaubt *Sets* dem Anwender die Benennung von einzelnen *Datum points* oder Knotenpunkten des FE-Netzes, auf welche im weiteren Verlauf der Geometriedefinition zurückgegriffen werden kann.

Im Detail betrachtet erfolgt die Festlegung der *Partition cells* an *Part 1* wie in Abbildung 53 gezeigt. Die systematische Zerlegung von *Parts* ermöglicht das Erzwingen von Elementfugen an den Trennflächen der *Partition cells*. Die Empfehlungen von *Herrmann* [Her13] zum Thema Partitionierung wurden für die Modellierung der SCSC-Hauptversuchskörper in der gegenständlichen Forschungsarbeit übernommen.

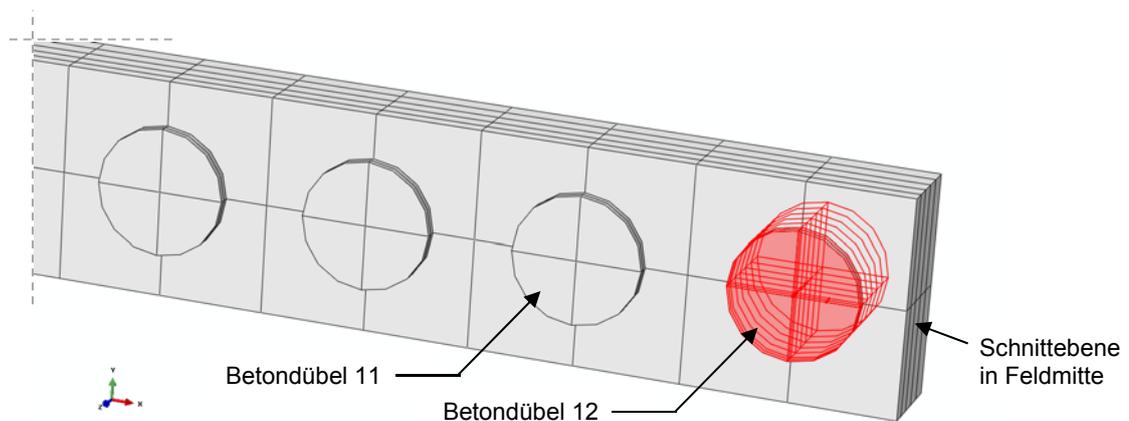


Abbildung 53: *Partition cells* von *Part 1* im Modul *Part*

Zusammenfassend sind bei der Elementteilung im SCSC-Grundlagemodell drei grundlegende Modellierungsregeln zu beachten:

1. *Partition cells* sind generell vollständig durch ein *Part* hindurch zu führen. Darüber hinaus ist die Partitionierung von *Parts*, deren *Instances* über Kontaktbeziehungen mit starrem oder schubnachgiebigem Verbund an Flächen mit partsfremden *Instances* angrenzen in deren Geometrie und Lage zueinander anzugleichen.
2. Elementfugen werden in den einzelnen *Parts* überall dort angeordnet, wo im *Assembly* Ecken oder Kanten unterschiedlicher *Instances* zusammentreffen.
3. Besonderes Augenmerk ist auf einfache Formstrukturen der *Partition cells* zu legen. Dies betrifft im Speziellen die zylindrischen Betonscheiben, deren Querschnitt in vier halbkreisförmige Segmente unterteilt werden sollte.

Die Wahl der geometrischen Form von *Partition cells* hat weitreichende Folgen auf die Diskretisierung der einzelnen Bausteine einer FE-Simulation. Dies trägt dem Umstand Rechnung, dass komplizierte Volumenkörper – wie etwa die 10 mm vorspringenden zylindrischen Betondübel auf dem quadratischen Grundkörper bei *Part 1* des Grundlagemodells von SCSC-Platten – bei automatischer Netzgenerierung oftmals nicht mit einer adäquaten Verteilung der finiten Elemente abgebildet werden kann. Ein nachträgliches händisches Optimieren des automatischen Netzes ist zwar möglich, erweist sich jedoch als zeitaufwendig und führt nicht in jedem Fall zu dem gewünschten Ergebnis der Diskretisierung.

Aus diesem Grund empfiehlt es sich, die Partitionierung eines Grundbausteines in einfache Teilbereiche bereits im Modul Part durchzuführen. In diesem Zusammenhang hat sich die Untergliederung aller Volumenkörper im Modul Mesh mittels *seeds* als Zwangsvorgabe für Größe, Anzahl und räumliche Anordnung der finiten Elemente als die zu bevorzugende Vorgangsweise erwiesen, siehe Kapitel 4.5.5.

Die benannten *Surfaces* von *Part 1* sind in Abbildung 54 ersichtlich. Hierin sind die Stirn- und Mantelflächen der vorhandenen 12 Betondübel stellvertretend durch jene von Betondübel 1 dargestellt.

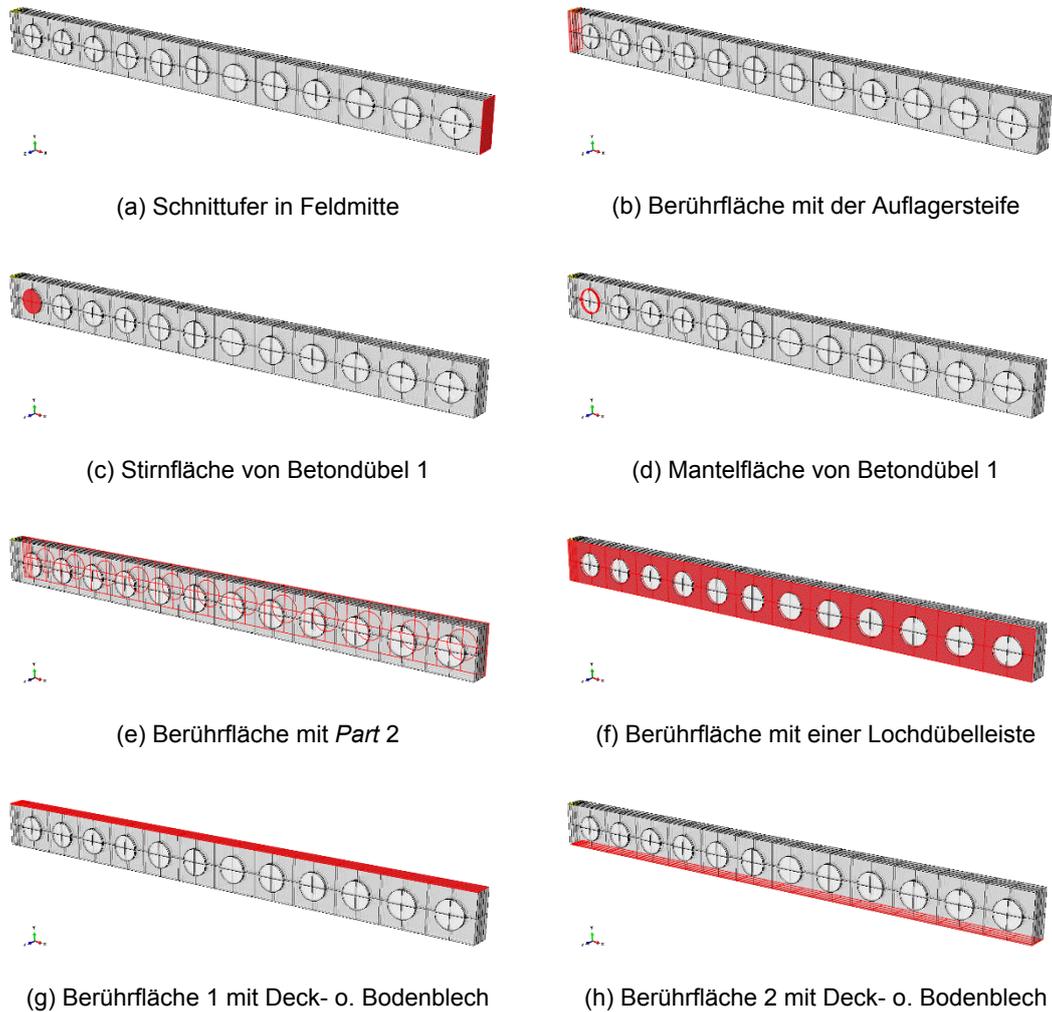


Abbildung 54: Ausgewählte Surfaces von Part 1 im Modul Part (lokal)

4.5.4.4. Die Erstellung eines starren Grundbausteins am Beispiel von Part 9

Part 9: R_Rigid B Kern – Rigid y-z-Schnittufer Betonkern

«Create Part: {Modeling Space: 3D; Type: Analytical rigid; Base Feature: Extruded shell}»

Bei der Erzeugung eines *Analytical rigids* werden zu Beginn, analog zu der Erstellung der Geometrie eines verformbaren Körpers, Geometriedaten definiert. Für das betreffende *Rigid* von *Part 9*, welches die Form eines Rechteckes erhält, ist im *Sketcher* eine Linie mit der Abmessung einer der beiden Seitenlängen zu zeichnen. Die endgültige Form des Geometrieobjektes wird durch Eingabe der zweiten Seitenlänge als *Extrusion depth* in der Bestätigungsleiste des ABAQUS-Eingabefensters definiert. Das betrachtete rechteckige *Rigid* weist die Abmessungen 340 mm auf 170 mm auf.

Anschließend wird der Schwerpunkt des Rechteckes mittels eines *Datum points* markiert und im Weiteren als *Reference Point* (RP) „Rigid B Kern“ ausgewählt. Um spätere Verwechslungen aus der Namensgebung heraus ausschließen zu können, wird das erzeugte rechteckige Geometrieobjekt als *Set* mit dem Namen „PartSet_Rigid B Kern“ bezeichnet.

Zusätzlich ist dem *Rigid* aus rechentechnischen Gründen die Eigenschaft einer Masse zuzuweisen. Dies erfolgt über den Posten ENGINEERING FEATURES des jeweiligen *Parts* mit der Einstellung:

```
«Create Inertia: {Type: Point mass/inertia ↵ Region Selection: PartSet_Rigid B Kern ↵  
Magnitude – Mass: Isotropic: 1 – Rotary Inertia: I11 = I22 = I33: 1; CSYS: Global}».
```

4.5.5. Das Modul Mesh

4.5.5.1. Allgemeines zu der Vernetzung mit finiten Elementen in ABAQUS

Vor der eigentlichen Vernetzung eines Körpers ist die Auswahl eines Elementtyps erforderlich. Hierfür steht im Modul Mesh in der gleichnamigen Registerkarte *Mesh* die Option „Element Type“ zur Verfügung. Je *Part* kann durch die Wahl eines zuvor definierten *Sets* oder direkt mittels Definition einzelner *Partition cells* der zu bearbeitende Bereich abgegriffen werden. Anschließend wird im Eingabefenster «Element Type» in der Elementbibliothek der Elementtyp festgelegt.

Die Diskretisierung selbst kann generell auf drei Arten oder durch Mischformen dieser erfolgen. Einerseits wird bei der indirekten automatischen Vernetzung die Anordnung und Größe der finiten Elemente des modellierten Körpers durch das FE-Programm selbst festgelegt. Dies kann sowohl lokal am *Part* oder an dessen Abbildung im globalen Koordinatensystem, dem *Instance*, erfolgen. Das Werkzeug «Mesh Part» oder «Mesh Region» im Modul Mesh erfordert hierbei keine speziellen Eingaben des Benutzers zu der Austeilung oder Anzahl der finiten Elemente. Eine weitere Möglichkeit für die Generierung eines FE-Netzes besteht für den Anwender in der Modellierung einzelner kleiner Elemente und Knoten, wobei die Geometrie des gesamten Körpers im Vorhinein nicht vorgegeben wurde. Neben der genannten direkten Elementgenerierung können für einen Grundbaustein eines Modelles auch Unterteilungen – die sogenannten *seeds* – manuell definiert werden, nach deren Vorgabe die Vernetzung erfolgt (manuelle Netzanpassung).

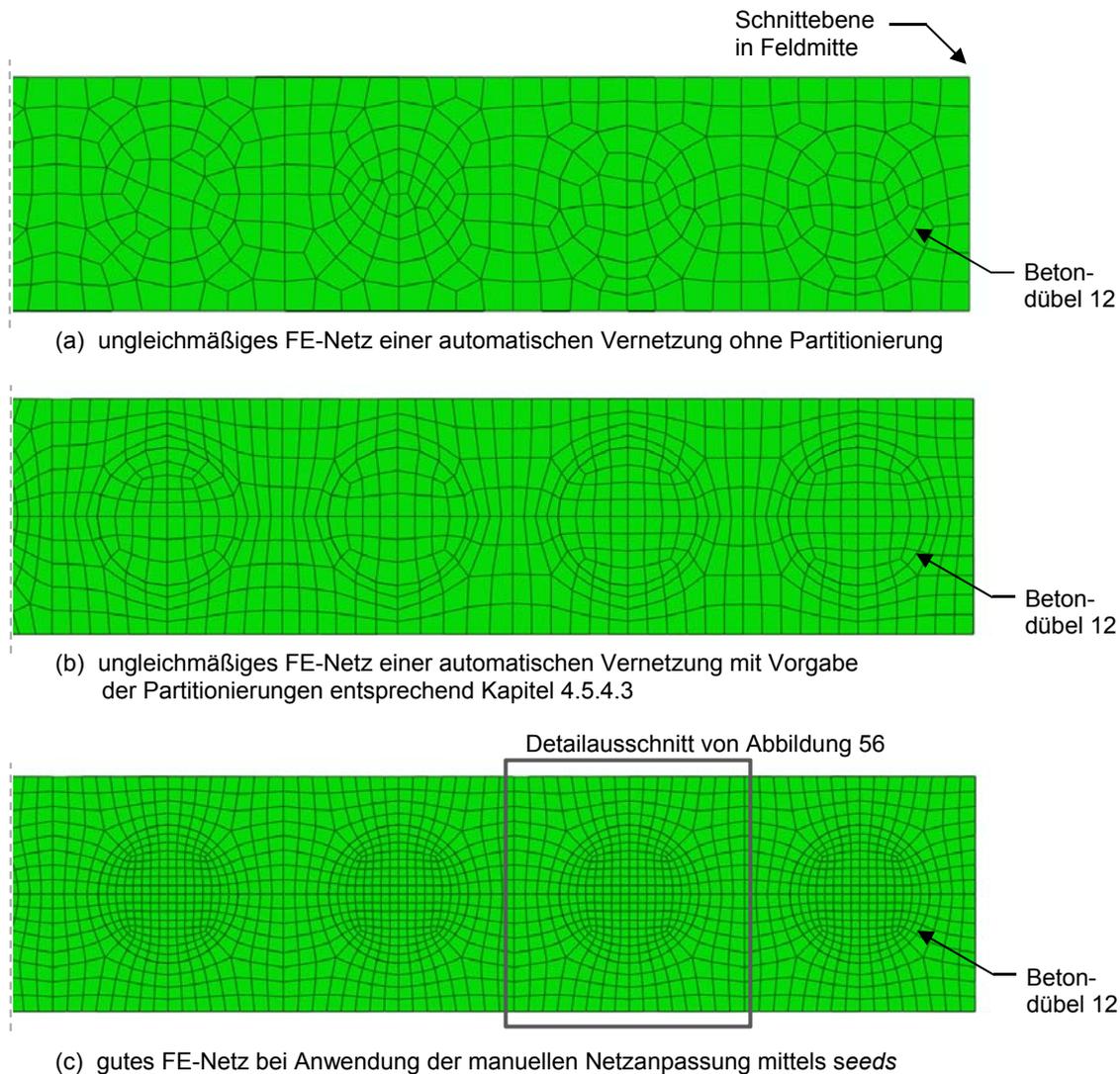
4.5.5.2. Die Diskretisierung der Parts des SCSC-Grundlagemodells

Nach erfolgter Geometriedefinition und Partitionierung der Grundbausteine werden die *Parts* aus verformbaren Körpern in ein feines Netz aus finiten Elementen unterteilt. Aufgrund der für eine materiell und geometrisch nichtlineare FE-Analyse relativ großen Hauptabmessungen des SCSC-Grundlagemodells von 2.110/500/305 mm ergeben sich als entscheidende Kriterien für die Wahl des Elementtyps die Dauer einer Berechnung sowie die Größe des Ergebnisfiles. Um hinreichend genaue Ergebnisse in Hinsicht auf die Spannungen und Dehnungen in den einzelnen Querschnitts-Teilen zu erhalten, ist die Verringerung der Elementanzahl nicht ratsam. Demzufolge wurde auf Elemente mit reduzierter Knotenanzahl und linearer Ansatzfunktion zurückgegriffen. Eine umfassende Erläuterung der zu Grunde liegenden Überlegungen in Bezug auf die Wahl des Elementtyps ist in [Her13, Kapitel 4.2.1] anschaulich angeführt.

Zusammenfassend werden für die gegenständlichen numerischen Untersuchungen von SCSC-Platten mit ABAQUS/EXPLICIT ausschließlich Hexaederelemente mit linearer Ansatzfunktion angewendet. Der Kurzname des gewählten Elementtyps C3D8R setzt sich aus den Bezeichnungen (3D) für dreidimensionale, (C) für Kontinuumselemente, (8) für 8 Knoten je Element und (R) für reduzierte Integration zusammen.

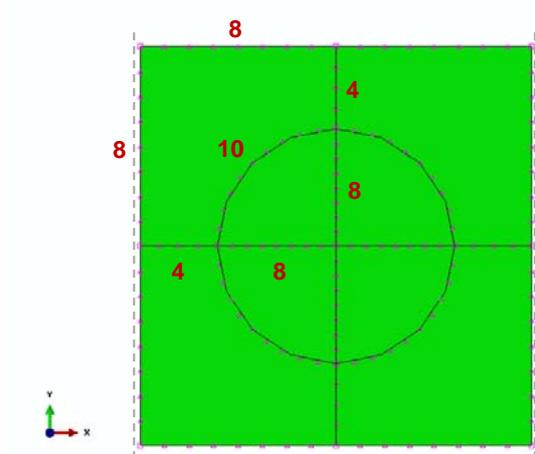
Die „Element Type“-Einstellungen der verformbaren FE-Elemente aus Stahl und Beton sind entsprechend der Empfehlung von *Frank* in [Fra12b, Kapitel 5.8.4] anzusetzen (Die Auswahl der Elementtypen erfolgt im Modul Mesh – Registerkarte *Mesh – Element Type...*).

Zum Thema einer ausgewogenen Netzgeometrie sind drei unterschiedliche FE-Netzte von *Part 1* in Abbildung 55 vergleichend dargestellt. Hierin zeigt Abbildung 55 (a) die Struktur einer automatischen Diskretisierung mit verhältnismäßig großen finiten Elementen. Aufgrund der unregelmäßigen Anordnung sowie der Form der Elemente ist das gezeigte Netz als unzulässig anzusehen. Dies resultiert aus der unzureichenden Modellierung von *Partition cells* am Grundbaustein – verknüpft mit dem angewendeten indirekten Vernetzungsalgorithmus. Für das FE-Netz in Abbildung 55 (b) wurden alle Partitionierungen entsprechend der Empfehlung von Herrmann in [Her13] definiert – jedoch ohne Vorgabe der Anzahl oder der Größe der finiten Elemente, wodurch ebenfalls kein regelmäßiger Netzaufbau erzielt werden konnte. Erst durch die manuelle Vorgabe von *seeds* (händisch definierte Zwangspunkte als Knotenpunkte für die Netzgenerierung) wurde ein ausgewogenes FE-Netz für *Part 1* entwickelt, siehe Abbildung 55 (c).

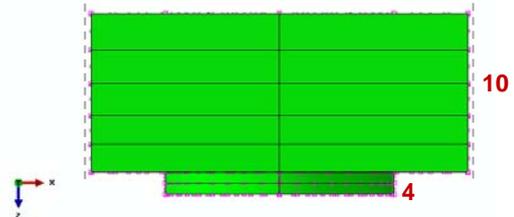


**Abbildung 55: Ausschnitt der Ansicht von Part 1 entgegen der positiven z-Achse im lokalen Koordinatensystem;
Optischer Vergleich von drei unterschiedlichen Netzgeometrien:
(a) und (b) ungünstige sowie (c) günstige Anordnung der finiten Elemente**

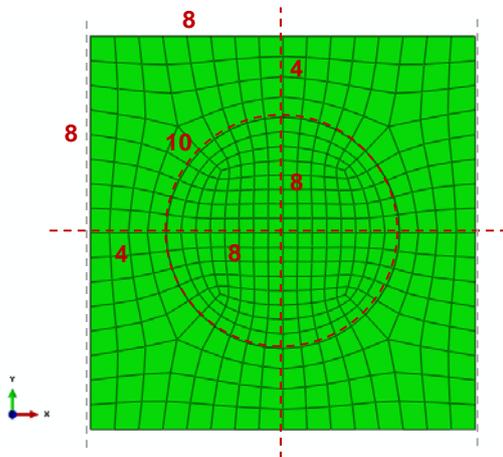
Die Festlegung der Zwangsknoten (*seeds*) als Berandung für finite Elemente erfolgt im Modul Mesh mittels dem Werkzeug «Seed Edges». Für ausgewählte Kanten kann im Eingabefenster «Local Seeds» entweder die angestrebte Größe oder die vorgesehene Anzahl von finiten Elementen vorgegeben werden. Im gegenständlichen Fall wurde jeweils die Methode „By number“ ohne Vorgabe von „Seed Constrains“ gewählt. In diesem Zusammenhang ist in Abbildung 56 eine Empfehlung zu der Anordnung der *seeds* von Part 1 skizziert.



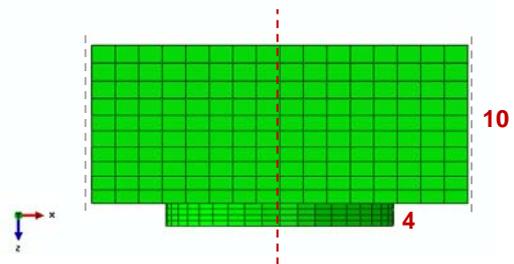
(a) Einteilung der seeds in der Ansicht entgegen der positiven z-Achse (lokal)



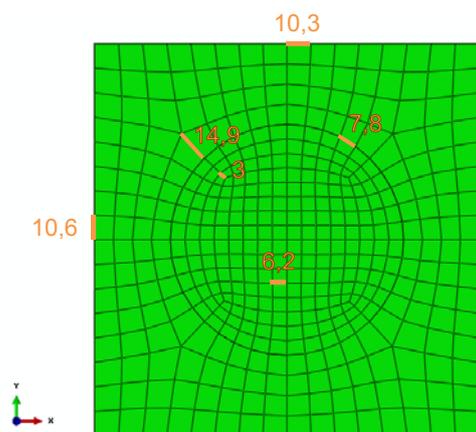
(b) Einteilung der seeds in der Ansicht entgegen der positiven y-Achse (lokal)



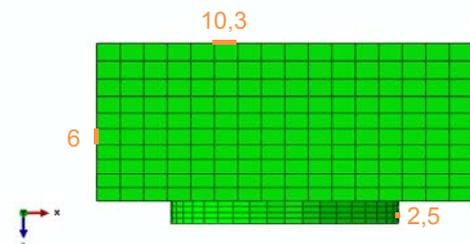
(c) FE-Netz in der Ansicht entgegen der positiven z-Achse (lokal)



(d) FE-Netz in der Ansicht entgegen der positiven y-Achse (lokal)



(e) Kantenlängen der finiten Elemente in der Ansicht entgegen der positiven z-Achse (lokal)



(f) Kantenlängen der finiten Elemente in der Ansicht entgegen der positiven y-Achse (lokal)

Abbildung 56: Detailausschnitt von Part 1 (vgl. Abbildung 55) mit definierten seeds (a) und (b) sowie nach erfolgter Diskretisierung mit finiten Elementen (c) und (d); Kantenlängen von ausgewählten finiten Elementen gemäß (e) und (f) in [mm]

Eine Übersicht über die Bandbreite der – bei dem Grundlagemodell der SCSC-Sandwichplatte angewendeten – Elementkantenlängen ist in Tabelle 4 gegeben. In der genannten Tabelle ist jeweils die minimale als auch die maximale Länge der maßgebenden finiten Elemente je *Part* eingetragen. Für Vergleichszwecke sind hierzu ausgewählte Elementkantenlängen in Abbildung 56 (e) und (f) des *Part 1* beziffert.

Tabelle 4: Empfehlung zu den Elementkantenlängen der einzelnen Parts des SCSC-Grundlagemodells

	Bezeichnung <i>Part</i>	Material	Minimale Länge von Elementkanten in [mm]	Maximale Länge von Elementkanten in [mm]
1	B_BK-Rand	Beton	2,5	14,9
2	B_BK	Beton	2,5	24,3
3	S_BB	Stahl	2,5	24,3
4	S_DB	Stahl	2,5	24,3
5	S_EB	Stahl	2,5	24,3
6	S_LDL	Stahl	2,5	14,9
7	S_Steife	Stahl	2,5	10,6
8	S_T-Blech	Stahl	2,5	24,3
9	R_Rigid B Kern	(Rigid)	--	--
10	R_Rigid B Rand	(Rigid)	--	--
11	R_Rigid Lager	(Rigid)	--	--
12	R_Rigid S	(Rigid)	--	--
13	R_Rigid S LDL	(Rigid)	--	--

4.5.6. Das Modul Property - Materials und Sections

4.5.6.1. Allgemeines zu Stoffmodellen und der Vergabe von Materialeigenschaften

Den im Modul *Part* erzeugten verformbaren Körpern werden in einem weiteren Schritt mechanische Kennwerte zugewiesen. Dies erfolgt mittels der Posten MATERIALS und SECTIONS im Modul Property.

4.5.6.2. Der Posten MATERIALS

Das Programmpaket ABAQUS bietet eine Reihe von Stoffmodellen für die Modellierung unterschiedlichster Materialien. Für FE-Analysen der Sandwichplatte finden die beiden Materialmodelle

- *Classic Metal Plasticity* für die *Parts* der verschiedenen Stahlbleche sowie
- *Concrete Damaged Plasticity (CDP)* für Grundbausteine aus dem Material Beton

Anwendung.

Für finite Elemente Analysen zum Zweck der Nachrechnung von versuchstechnisch ermittelten Kennwerten ist die Kenntnis der Materialeigenschaften der verwendeten Baustoffe und Bauprodukte als wesentlich anzusehen. Im Zuge der Modellierung der SCSC-Hauptversuchskörper wurden daher – basierend auf den Ergebnissen der Festigkeitsprüfungen von Beton-Probewürfeln als auch auf den Materialkennwerten der Stahlbleche entsprechend den Prüfzeugnissen (siehe Anhang B3 und B4) – drei Materialien definiert. Nachfolgend werden die Materialien „Stahl 393“, „Stahl 440“ sowie „Beton HV54“ im Detail erläutert.

Das Materialmodell *Classic Metal Plasticity*

Bei den Versuchskörpern der SCSC-Hauptversuche wurden Stahlbleche mit unterschiedlichen Festigkeiten verwendet. Diesem Umstand wurde im Zuge der FE-Analyse durch die Definition von zwei Materialien „Stahl 393“ und „Stahl 440“ Rechnung getragen.

Für die Erstellung eines neuen Materials im FE-Programm ABAQUS steht dem Anwender im Modul Property das Werkzeug «Create Material» zur Verfügung. Die Einstellungen und Vorgaben für das Material „Stahl 393“ wurden für die SCSC-Hauptversuchskörper mit Querschnitts-Typ 1 wie folgt definiert (siehe Tabelle 5 und Tabelle 6):

«Create Material: {General – Density – Mass Density: 7.85E-006; Mechanical – Elasticity – Elastic: Type: Isotropic – Data: siehe Tabelle 5; Mechanical – Plasticity – Plastic: Hardening: Isotropic – Data: siehe Tabelle 6}»

**Tabelle 5: ABAQUS Einstellungen; Material: Stahl 393;
«Edit Material: {..; Mechanical-Elasticity-Elastic; ..}»**

Young's Modulus E_{cm} [N/mm ²]	Poisson's Ratio ν [-]
210000	0.3

**Tabelle 6: ABAQUS Einstellungen; Material: Stahl 393;
«Edit Material: {..; Mechanical-Plasticity-Plastic}»**

Lfd. Nr.	Yield Stress [N/mm ²]	Plastic Strain [-]
1	393.00	0
2	393.00	0.03
3	467.23	0.0588
4	523.41	0.0889
5	572.48	0.118
6	613.64	0.147
7	646.04	0.174
9	668.85	0.201

Die tabellarisch in Tabelle 6 angegebene Arbeitslinie des Materials „Stahl 393“ beschreibt das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Materials bis zum Erreichen der Zugfestigkeit von 668,85 N/mm². Unbedingt zu beachten ist an dieser Stelle die Umrechnung von nominalen in wahre Dehnungswerte des Materials Stahl. Auf die Definition des Materialverhaltens über die Zugfestigkeit hinaus (Einschnürung) wird verzichtet, da die in den numerischen Analysen der SCSC-Hauptversuche untersuchten Stahlteile bei maximaler Versuchslast nicht bis zur Gleichmaßdehnung verformt wurden.

Das Materialmodell Concrete Damaged Plasticity

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.4.2.5 beschriebenen Empfehlungen zu dem Materialmodell CDP aus vorangegangenen Forschungsarbeiten wurden die im Folgenden definierten mechanischen Kennwerte für das Material „Beton HV54“ festgelegt.

«Create Material: {General – Density – Mass Density: 2.33E-006; Mechanical – Elasticity – Elastic – Type: Isotropic – Data: siehe Tabelle 7; Mechanical – Plasticity – Concrete Damaged Plasticity: siehe Tabelle 8 - Tabelle 12}»

Angaben zu den Zahlenwerten von Elastizitätsmodul und Poissonzahl sind Tabelle 7 zu entnehmen. Die plastischen Eingabewerte entsprechend Tabelle 8 dienen der Anpassung der im Stoffmodell CDP für Beton hinterlegten Versagenskurve für Beton unter mehraxialer Beanspruchung nach der erweiterten Anstrengungshypothese von Drucker-Prager (siehe Abbildung 57).

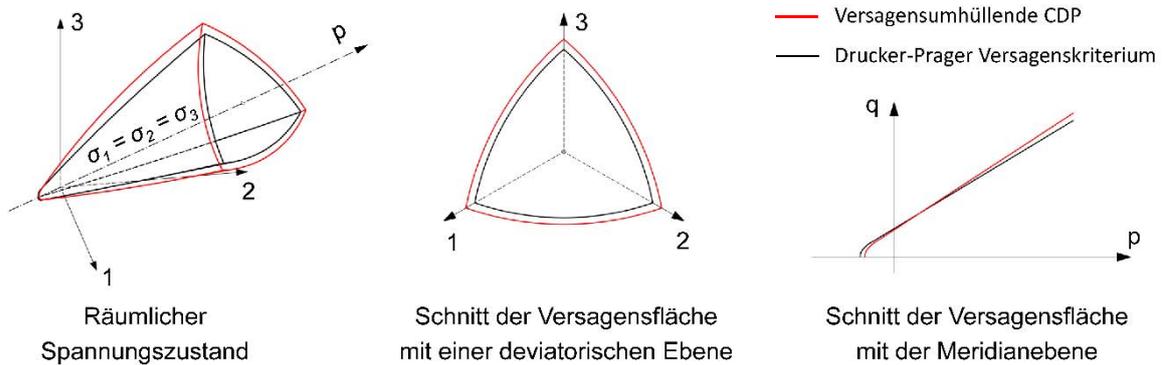


Abbildung 57: Schematische Darstellung der Anpassung (rot) der Versagensfläche der erweiterten Anstrengungshypothese nach Drucker-Prager des Stoffmodelles CDP (ABAQUS) an die mechanischen Kennwerte des Kernbetons der Hauptversuchskörper

**Tabelle 7: ABAQUS Einstellungen; Material: Beton HV54;
«Edit Material: {..; Mechanical-Elasticity-Elastic; ..}»**

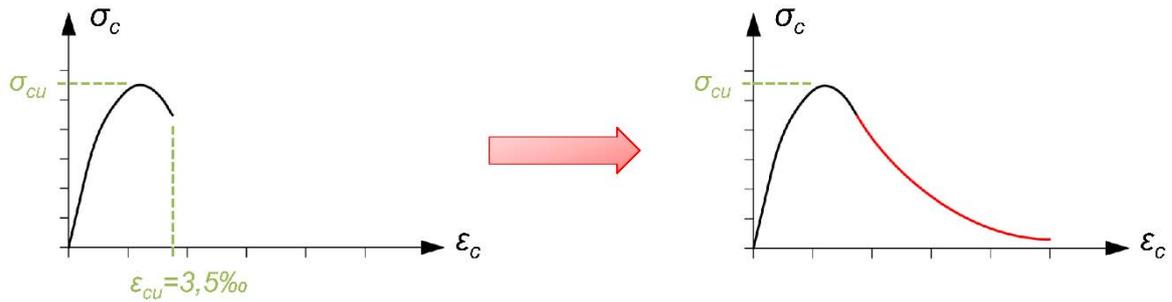
Young's Modulus [N/mm ²]	Poisson's Ratio ν [-]
37400	0.2

**Tabelle 8: ABAQUS Einstellungen; Material: Beton HV54;
«Edit Material: {..; Mechanical-Plasticity-Concrete Damaged Plasticity-Plasticity}»**

Dilation Angle [-]	30
Eccentricity ε [-]	0.1
f_{bd}/f_{co}	1.16
K_c bzw. K	0.777
Viscosity Parameter*	0

* Der Viscosity Parameter hat bei FE-Analysen mit ABAQUS/EXPLICIT keinen Einfluss auf das Berechnungsergebnis

Im Weiteren sind die Arbeitslinien für Beton unter einaxialer Druck- und Zugbeanspruchung tabellarisch anzugeben. Die jeweiligen Wertegruppen sind in Tabelle 9 und Tabelle 11 zusammengestellt. Die zugehörigen dehnungsabhängigen Schädigungsparameter im Druckspannungsbereich d_c sowie im Zugspannungsbereich d_t sind Tabelle 10 und Tabelle 12 zu entnehmen. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die Arbeitslinie von Beton unter einaxialer Druckbeanspruchung in jedem Fall vollständig anzugeben ist, wie in Abbildung 58 ersichtlich.



(a) einaxiale Betondruckfestigkeit für Bemessungssituationen nach [EN2]

(b) erweiterte einaxiale Betondruckfestigkeit für numerische Simulationen

Abbildung 58: Schematische Darstellung der einaxialen Betondruckfestigkeit des Stoffmodelles CDP (ABAQUS); (a) unzureichende und (b) erweiterte Arbeitslinie für FE-Analysen der SCSC-Sandwichplatte

Tabelle 9: ABAQUS Einstellungen; Material: Beton HV54; «Edit Material: {..; Mechanical-Plasticity-Concrete Damaged Plasticity-Compressive Behavior}»

Lfd. Nr.	Compressive Behavior	
	Yield Stress σ_c [N/mm ²]	Inelastic Strain $\tilde{\epsilon}_c^{in}$ [-]
1	15.96	0
2	28.30	0.00015
3	37.05	0.00037
4	42.27	0.00068
5	44.00	0.00109
6	42.58	0.00154
7	38.35	0.00206
8	31.34	0.00266
9	20.89	0.00455
10	12.73	0.00822
11	6.86	0.01367
12	3.29	0.02092
13	2.36	0.02521
14	2.00	0.02995
15	1.00	0.09997

**Tabelle 10: ABAQUS Einstellungen; Material: Beton HV54;
«Edit Material: {...; Mechanical-Plasticity-Concrete Damaged Plasticity-
Suboption: Compression Damage}»**

Suboption: Compression Damage		
Lfd. Nr.	Damage Parameter d_c [-]	Inelastic Strain $\tilde{\epsilon}_c^{in}$ [-]
1	0	0
2	0	3E-005
3	0	0.00015
4	0	0.00037
5	0	0.00068
6	0.002	0.00099
7	0.0081	0.00124
8	0.0181	0.00142
9	0.0206	0.00145
10	0.0322	0.00154
11	0.1284	0.00206
12	0.2877	0.00266
13	0.5252	0.00455
14	0.7106	0.00822
15	0.844	0.01367
16	0.9253	0.02092
17	0.9464	0.02521
18	0.9545	0.02995
19	0.9773	0.09997

Bei der Beschreibung des Verhaltens von Beton im Zugspannungsbereich wird auf das Modell CDP2 von *Herrmann* [Her13] aufgebaut. Hierin steht δ_{ck} für die angenommene Rissverformung in Abhängigkeit der vorhandenen Spannung im Beton.

Der Zugschädigungsparameters d_t ist in der Form zu definieren, dass der Beginn der Schädigung von auf Zug beanspruchten finiten Elementen aus dem Material Beton erst nach Überschreiten der mittleren Betonzugfestigkeit f_{ctm} eintritt.

**Tabelle 11: ABAQUS Einstellungen; Material: Beton HV54;
«Edit Material: {..; Mechanical-Plasticity-Concrete Damaged Plasticity-
Tensile Behavior, Type: Displacement}»**

Tensile Behavior, Type: Displacement		
Lfd. Nr.	Yield Stress σ_c [N/mm ²]	Displacement δ_{ck} [mm]
1	3.06 (= f_{ctm})	0
2	3.06	0.033
3	2.01	0.068
4	1.19	0.102
5	0.61	0.137
6	0.25	0.171
7	0.138	0.206
8	0.14	0.24

**Tabelle 12: ABAQUS Einstellungen; Material: Beton HV54;
«Edit Material: {..; Mechanical-Plasticity-Concrete Damaged Plasticity-
Suboption: Tension Damage, Type: Displacement}»**

Suboption: Tension Damage, Type: Displacement		
Lfd. Nr.	Damage Parameter d_t [-]	Displacement δ_{ck} [mm]
1	0	0
2	0	0.033
3	0.344	0.068
4	0.611	0.102
5	0.802	0.137
6	0.917	0.171
7	0.955	0.206
8	0.999	0.24

4.5.6.3. *Der Posten SECTIONS*

Mit dem Posten SECTIONS wird die Verknüpfung der zuvor festgelegten Materialkenndaten mit den einzelnen Grundbausteinen, den *Parts*, hergestellt. Dementsprechend wird für jedes Material eine zugehörige *Section* angelegt. In diesem Arbeitsschritt ist darüber hinaus die Festlegung der Homogenität des Materials erforderlich. Für die gegenständliche FE-Analyse der SCSC-Hauptversuchskörper wird für alle Materialien ein homogenes Gefüge vorgegeben. Am Beispiel des Materials „Stahl 393“ erfolgt die *Section*-Definition mit dem Namen „Mat_S393“ wie nachfolgend beschrieben:

«*Create Section: {Category: Solid; Type: Homogeneous ↯ Material: Stahl 393}*»

Nun kann im Modul Part mittels der Option «Section Assignments» den jeweiligen *Parts* durch die Auswahl der entsprechenden *Sets* das zugehörige Material zugewiesen werden. Allen Finiten Elementen, welche in dem gewählten Set liegen, werden demgemäß einheitliche Materialkennwerte zugeschrieben.

4.5.7. *Das Modul Assembly*

4.5.7.1. *Allgemeines zu dem Gesamtmodell mit globalem Koordinatensystem*

Die im Modul Part erstellten Grundbausteine mit lokalem Koordinatensystem werden im Modul Assembly mittels deren Abbildungen, den *Instances*, zu einem Gesamtmodell mit globalen Koordinaten zusammengefügt. Alle vorgegebenen räumlichen Zugehörigkeiten entsprechend der Geometrie der realen Struktur eines SCSC-Hauptversuchskörpers sind in Abbildung 51 skizziert bzw. in den Planunterlagen der Hauptversuche in Anhang A2 dokumentiert.

4.5.7.2. *Die Option Instances*

Die im Posten ASSEMBLY eingegliederte Option «Instances» dient der Übersicht über alle erzeugten Abbildungen der *Parts* im globalen Gesamtmodell der jeweiligen FE-Analyse. Für die Erstellung eines *Instance* steht das Werkzeug «Create Instance» zur Verfügung:

«*Create Instance: {Parts; Instance Type – Dependent; Auto-offset from other instances}*»

Durch die Auswahl der Funktion *Dependent Instance Type* wird das Abbild des gewählten *Parts* mit allen zuvor definierten Einstellungen – diese betreffen alle *Sets*, *Surfaces*, die Diskretisierung, das Material etc. – in das globale Gesamtmodell eingelesen. Mittels der Manipulationswerkzeuge «Translate Instance» sowie «Rotate Instance» können die

Instances durch Verschieben und/oder Verdrehen in ihre endgültige Position im globalen Koordinatensystem gesetzt werden.

4.5.7.3. Die Option Sets

Zusätzlich zu den automatisch eingelesenen *Sets* je *Instance* aus dem Modul Part können weitere *Sets* auf dem Gesamtmodell spezifiziert werden. Dies betrifft beispielsweise das Zusammenfassen aller *Instances* mit dem Material „Beton HV54“ zu dem *Set* „Beton_gesamt“. In einem späteren Arbeitsschritt werden im Zuge der Bearbeitung der *Output Requests* für das genannte *Assembly-Set* „Beton_gesamt“, d. h. gesammelt für alle Betonteile des Gesamtmodells, diverse Ausgabewerte gefordert (siehe Kapitel 4.5.11).

4.5.7.4. Die Option Surfaces

Analog der Vorgehensweise bei der Option *Sets* können dem Gesamtmodell – wenn erforderlich – zusätzliche *Assembly-Surfaces* hinzugefügt werden.

4.5.8. Das Modul Step

4.5.8.1. Allgemeines zu Berechnungsschritten

Im Modul Step bzw. dem Posten STEP werden die Festlegungen zu Rechenalgorithmus, Lastschritten sowie zu der Belastungsgeschichte getätigt. Das Anlegen der erforderlichen *Steps* bzw. Rechenschritte ist direkt im Anschluss an die Bearbeitung des *Assembly-Moduls* noch vor der Definition von *Interactions*, *Constraints*, *Boundary Conditions* sowie der *Output Requests* erforderlich. Dieser Umstand ergibt sich aus der Tatsache, dass die genannten Eingaben jeweils auf die einzelnen Rechenschritte oder den lastfreien Ausgangszustand (*Initial Step*) des FE-Modells bezogen werden müssen.

4.5.8.2. Der Initial Step

Der durch das Programm ABAQUS automatisch erstellte *Initial Step* dient zum Einlesen aller Grundeinstellungen des Gesamtmodells in den Solver. Hierin werden die zum *Initial Step* zugehörigen Vorgaben zu den Optionen *Interactions* (siehe Kapitel 4.5.9.3) sowie den Lagerungsbedingungen - den BC's (siehe Kapitel 4.5.10.3) - von den in der Bearbeitungsreihenfolge nachlaufenden Posten übernommen.

4.5.8.3. Der Analyse-Step

Bei der numerischen Analyse der SCSC-Hauptversuchskörper wird ein *Analyse-Step* für die Abbildung einer linear anwachsenden Flächenlast je Rechenschritt modelliert. Dieser nichtlineare *Analyse-Step* „Belastung“ umfasst eine *Time Period* von 50 *frames* (bzw. *steps*), wodurch sich die Berechnungsschritte 0 bis 50 darstellen lassen:

«*Create Step: {Name: Belastung; Insert new step after: Initial;
Procedure type: General; Dynamic, Explicit ↯ Basic – Time period: 50; Nlgeom: On}*»

Die Belastungsvorgaben erfolgen im Detail mittels der Posten *AMPLITUDES* und *LOADS* (siehe Kapitel 4.5.10.2). Auf die Berücksichtigung der bei den Hauptversuchen durchgeführten Ent- und Wiederbelastungsschleifen wird hierbei verzichtet.

Zu dem *Analyse-Step* ist zudem im Modellbaum eine Übersicht zu den Optionen *Interactions*, *Loads* und *BC's* sowie den *Output Request* (siehe Kapitel 4.5.11) einsehbar.

4.5.9. Das Modul *Interaction* – *Interactions* und *Constraints*

Das Modul *Interaction* umfasst neben dem namengebenden Posten *INTERACTIONS* auch die Funktionen *Interaction Properties*, welche für den Gebrauch von *Interactions* zwingend anzugeben sind, als auch *Constraints* (fixe Verbindungen, Kopplungen oder Halterungen von Knoten).

4.5.9.1. Die Anwendung des Moduls *Interaction*

Das zu Beginn der Modellerstellung in einzelne *Parts* aufgegliederte und im späteren Bearbeitungsverlauf mittels *Instances* zusammengesetzte FE-Modell erhält im Modul *Interaction* Eingaben zu den Kontaktflächen der einzelnen Grundbausteine untereinander. Hierbei können beispielsweise die aus geometrischen Gründen in mehrere *Parts* zerschnittenen Bauteile – wie etwa die *Instances* der *Parts* 1 und 2 des Betonkörpers – wiederum zu einem als Gesamtheit wirkenden Körper verbunden werden (Funktion *Constraint*). Ein weiterer Anwendungsfall für das SCSC-Grundlagemodell stellt der Reibungsverbund zwischen den Betondübeln und den Lochdübelleisten dar (Funktion *Interaction*).

4.5.9.2. Der Posten INTERACTION PROPERTIES

Bevor in einem Modell Interaktionsformulierungen für alle Arten nicht fixer Verbindungen (z.B.: äußere Reibung aber auch Wärmeübertragung bzw. -strahlung, akustische Widerstände etc.) festgelegt werden können, erfolgt die Bestimmung der jeweiligen Kontakteigenschaften. Dies geschieht mit der Funktion «Interaction Properties».

Für das SCSC-Grundlagemodell werden gemäß der Empfehlung von *Herrmann* [Her13] zwei unterschiedliche Einstellungen in Bezug auf die Gleitreibung (G) zwischen Kontaktpartnern aus Stahl und Beton definiert:

- *friction* – Einstellungen zur äußeren Reibung (G) zweier Kontaktpartner
→ Definition der übertragbaren Kraftkomponenten tangential und normal auf die Kontaktfläche

«Create Interaction Property: {Name: friction; Type: Contact ↵
Mechanical - Tangential Behavior - Friction formulation: Penalty –
Friction: Isotropic, Friction Coeff: 0.3 – Shear Stress: No limit;
Mechanical – Normal Behavior - Pressure-Overclosure: “Hard” Contact}»

- *frictionless* – reibungsfreier Kontakt von Punkten oder Flächen zweier *Instances*
→ Definition der übertragbaren Kraftkomponente normal auf die Kontaktfläche

«Create Interaction Property: {Name: frictionless; Type: Contact ↵
Mechanical - Tangential Behavior - Friction formulation: Frictionless;
Mechanical – Normal Behavior - Pressure-Overclosure: “Hard” Contact}»

Der Festlegung des Reibbeiwertes für Gleitreibung μ ging eine Parameterstudie mit Werten zwischen $\mu = 0,2$ und $\mu = 0,95$ voraus. Hierbei wurden numerische Modelle der SCSC-Hauptversuche mit den Reibbeiwerten $\mu = 0,2 - 0,3 - 0,5 - 0,7$ und $0,95$ analysiert. Es wurde festgestellt, dass die Berechnungen mit den Reibbeiwerten $\mu = 0,3$ und $\mu = 0,5$ stabile Simulationen mit weitgehend zufriedenstellender Konvergenz aufwiesen. Die FE-Untersuchungen mit den Parameterwerten $\mu = 0,2$; $\mu = 0,7$ und $\mu = 0,95$ des Reibbeiwertes ergaben unzureichende Berechnungsergebnisse, welche sich jeweils in Form eines frühzeitigen Simulationsabbruches darstellten. Aufgrund der erhaltenen Ergebnisse sowie Berücksichtigung der Empfehlung des Reibbeiwertes $\mu = 0,3$ von *Herrmann* gemäß [Her13] (siehe Kapitel 4.4.2.6) wird für die Kontaktflächen zwischen den Mantelflächen der Betondübel und den Stirnflächen der runden Ausschnitte der Lochdübelleisten an dieser Stelle ebenfalls der Beiwert $\mu = 0,3$ empfohlen.

4.5.9.3. Der Posten INTERACTIONS

Bei der Erstellung von Verbindungen zwischen den *Instances* des SCSC-Grundlagemodells ist vorab das Verhalten der jeweiligen Kontaktpartner von sich berührenden Bauteilen zu analysieren. Aus Vergleichen zwischen FE-Untersuchungen mit den Ergebnissen der Vorversuche als auch der Hauptversuche konnten wesentliche Aussagen hierzu abgeleitet werden:

- Jedenfalls erforderlich ist die Modellierung eines Reibverbundes (Gleitreibung G, hier: „*friction*“) zwischen den Betondübeln und den Lochdübelleisten in der berührenden Stirnfläche. Alle übrigen Kontaktflächen zwischen Stahl und Beton werden lediglich mit der Kontaktformulierung „*frictionless*“, welche sich auf Kräfte in Richtung der Flächennormalen bezieht, beaufschlagt.
- Effekte zufolge einer Haftreibung (H) zwischen dem Kernbeton und Stahlteilen, welche sich ausschließlich und in geringem Ausmaß in niedrigen Lastbereichen auswirken (siehe Kapitel 2.3), können bei der Analyse von SCSC-Platten unter statischen Lasten als vernachlässigbar angesehen werden.
- Sich berührende, jedoch nicht verschweißte Stahlbleche werden mit dem reibungsfreien Kontakt „*frictionless*“ (Übertragung von Kräften in Richtung der Flächennormalen – ohne Reibungseffekte) beaufschlagt.

Kontaktformulierungen mit der Funktion *Interaction* finden bei Kontaktpartnern des SCSC-Grundlagemodells ausschließlich zwischen jeweils zwei verformbaren Parts Anwendung.

Interaction zwischen zwei verformbaren Parts

«*Create Interaction: {Step: Initial* → alle Interactions wirken bereits ab der Grundstufe;

Types for Selected Step: Surface-to-surface contact (Explicit) ↴

→ Grafische Eingabe der beteiligten Bauteile im Darstellungsfenster ↴

Mechanical constraint formulation: Penalty contact method - Sliding formulation: Finite sliding - *Contact interaction property:* → Auswahl der Kontakteigenschaft}»

Alle Kontaktformulierungen des SCSC-Grundlagemodells wirken entsprechend ihren Grundeinstellungen, welche im *Initial Step* definiert werden, in vollem Umfang und ohne Änderung im *Analyse-Step* weiter. Demgemäß ist keine anschließende Modifikation der gewählten Einstellungen im Modul Steps erforderlich.

4.5.9.4. Der Posten CONSTRAINTS

Constraints dienen der Definition von Kopplungen einzelner Knoten zueinander oder eines Knotens mit einer Fläche als auch der Verbindung zweier Flächen miteinander. Hierbei werden die betreffenden Knoten der als Stammoberfläche ausgewählten *Master Surface* mit jenen Knoten der Nebenfläche, der sogenannten *Slave Surface*, gekoppelt. Für die Gewährleistung einer guten Verbindungsrate sind die finiten Elemente der beiden Kopplungspartner bereits im Zuge der Diskretisierung in ihrer Form, Lage und Größe möglichst ähnlich zu wählen.

Für das SCSC-Grundlagemodell wurden ausschließlich zuvor benannte *Surfaces* untereinander verbunden, wie beispielsweise die einzelnen *Instances* des Betonkerns sowie Stahlbleche im Bereich der Schweißnähte. Zusätzlich erfolgte die kraftschlüssige Verbindung der starren Auflagerflächen (*Rigids*) mit den zugehörigen Bereichen auf den Oberflächen der verformbaren *Instances* mittels der Funktion *Constraints*.

Constraint zwischen zwei verformbaren Parts

«*Create Constraint: {Tie ↵ → Grafische Eingabe der Master- und der Slave-Surface – Discretization method: Surface to surface; Position Tolerance: Specify distance: 0.15}*»

Constraint zwischen einem Rigid und einem verformbaren Part

Aufgrund des Umstands, dass auf *Analytical Rigids* keine *Surfaces* definiert werden können, ist für *Constraints* mit starren Körpern stets die Option «Find Contact Pairs» anzuwenden. In diesem Zusammenhang sei darauf verwiesen, dass allen *Rigids* als Kontaktpartner die Eigenschaft der *Master Surface* zugewiesen werden sollte.

«*Find Contact Pairs: {Search Options - Search domain: Instance → Grafische Eingabe der beteiligten Bauteile mittels „Edit Region...“ bzw. Search domain: Displayed entities → nach vorheriger Auswahl der beteiligten Instances im Zeichenfenster – FIND CONTACT PAIRS ↵ – Type: Tie - Discretization: Surf-Surf}*»

4.5.10. Das Modul Load – Loads und Boundary Conditions

4.5.10.1. Allgemeines zu Randbedingungen

Das Modul Load bietet die Möglichkeit, verschiedenartige Randbedingungen zu den sechs räumlichen Freiheitsgraden je Knoten mittels der Posten LOADS und BCs entsprechend ihrer Wirkungsweise und -dauer vorzugeben. Für Fragestellungen des konstruktiven Ingenieurbaus stehen unter anderem Lasten (verteilte Einzellasten, Linienlasten, Flächenlasten, Momente etc. in den Analyse-Steps) als auch Zwangsverschiebungen und Lagerungsbedingungen (Verschiebungs- und Verdrehungsvorgaben ausgewählter Knoten zu allen Berechnungsschritten) zur Verfügung.

4.5.10.2. Die Posten AMPLITUDES und LOADS

Lasten können ausschließlich in Analyse-Steps wirksam sein. Die zusätzlich erforderlichen Vorgaben zu Verlauf und Dauer einer Belastung werden mit der Funktion «Amplitudes» eingestellt.

Die Belastung des SCSC-Grundlagemodells unter statischer Last wird mittels einer Flächenlast mit linear anwachsender Größe abgebildet. Hierzu wird eine Amplitude des Typs *Tabular* definiert (siehe Tabelle 13):

«Create Amplitude: {Name: linear ramp - Tabular ↵
Time Span: Total time; Amplitude Data: siehe Tabelle 13}»

**Tabelle 13: ABAQUS Einstellungen;
«Create Amplitude: {..; Amplitude Data}»**

	Time/Frequency	Amplitude
1	0	0
2	50	1

Die vorgegebene Amplitude wird auf die gesamte Berechnungszeit – die sogenannte *Total time* – bezogen und besitzt aus diesem Grund dieselbe Anzahl an anzuwendenden Zeitschritten wie der betreffende Analyse-Step „Belastung“ (vgl. Kapitel 4.5.8.3).

Die Abbildung des Wasserdruckkissens als lasteintragendes Element der Hauptversuche im FE-Modell erfolgt hier durch eine gerichtete Flächenlast, welche auf einen Teil der Oberfläche des unteren Deckbleches angreift:

«Create Load: {Step: Belastung (Analyse-Step); Category: Mechanical;
Types for Selected Step: Pressure ↴ → Grafische Eingabe der zu belastenden Oberfläche ↴
Distribution: Total Force; Magnitude: 583333; Amplitude: „linear ramp“}»

Die Lastgröße von 583.333 N ergibt sich in diesem Fall als 1/12 einer angenommenen maximalen Gesamtlast von 7.000 kN im letzten Belastungsschritt – Schritt 50 – bezogen auf die Geometrie des realen Versuchskörpers der SCSC-Hauptversuche. Als Lastangriffsfläche bietet sich ein Bereich von 500 mm Breite und 1.485 mm Länge an, welcher durch die eingangs festgelegte Form der Partitionierung bereits vorgegeben ist. Die Modellierung einer Fläche mit genau 1.500 mm Länge entsprechend der realen Belastungsvorgabe und der damit einhergehenden geänderten Partitionierung der betroffenen *Parts* kann aufgrund des dadurch erzwungenen bereichsweise stark unregelmäßigen FE-Netzes nicht empfohlen werden.

4.5.10.3. Der Posten BCs – Boundary Conditions

Lagerungsbedingungen (*Boundary Conditions*) ermöglichen vorrangig die Modellierung von wahlweise verschieblichen, beweglichen oder fixen Auflagern unterschiedlicher Größe und Ausrichtung. Im Weiteren können mit dieser Funktion auch Zwangsverschiebungen oder Zwangsverdrehungen definiert werden. Als zusätzliche Maßnahme kann mit der Funktion *Amplitudes* in den *Analyse-Steps* Einfluss auf die Dauer und auf den Verlauf der Lagerwirkung genommen werden.

Die nachfolgend aufgelisteten *Boundary Conditions* des SCSC-Grundlagemodells stellen einerseits die Lagerung des Gesamtmodells sicher und dienen andererseits der Erfüllung des globalen Gleichgewichts am herausgeschnittenen FE-Modell. Die letztgenannte Anforderung ergibt sich durch die Ausnutzung von Symmetrieeigenschaften der SCSC-Platte und die damit einhergehende Reduzierung des Grundlagemodells auf 1/12 der Versuchskörpergeometrie.

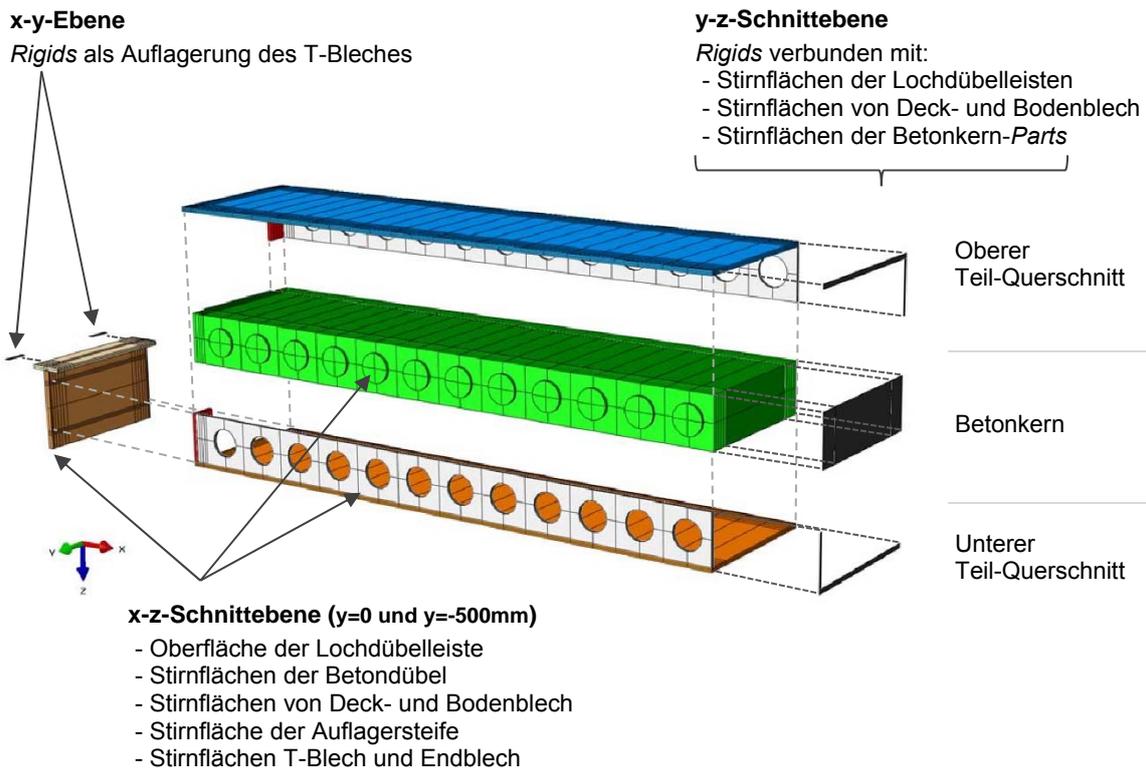


Abbildung 59: Explosionszeichnung des FE-Grundlagemodells mit globalem Koordinatensystem (vgl. Abbildung 51); Definition der gewählten Lagerungsbedingungen

Abbildung 59 gibt einen Überblick über jene Bereiche des Grundlagemodells, welchen *Boundary Conditions* zugewiesen werden. Die notwendigen Eingaben zu den Lagerungsbedingungen sind nach *Steps* gegliedert in Tabelle 14 und Tabelle 15 angeführt.

Alle Lagerungsbedingungen des SCSC-Grundlagemodells können direkt im Posten BCs erstellt werden. Dazu steht dem Anwender die Funktion «Create Boundary Condition» zur Verfügung. Die Grundeinstellungen für die *BCs* werden jeweils für den *Initial Step* erstellt

und anschließend – wenn erforderlich – im Unterordner des *Analyse-Steps* im Posten STEPS modifiziert.

«Create Boundary Condition: {Step: Initial; Category: Mechanical;
Types for Selected Step: Displacement/Rotation ↵
→ Grafische Eingabe der zu bearbeitenden Region ↵
CSYS: (Global); → Auswahl der festen Freiheitsgrade}»

Tabelle 14: ABAQUS Einstellungen; Freiheitsgrade im Initial Step

Ebene/ Schnitt- ebene	Bauteil bzw. der betroffene Bereich davon	Freiheitsgrade					
		Translation			Rotation		
		U1	U2	U3	UR1	UR2	UR3
x-y	Rigid an Endblech	●	●	●	●	○	●
x-z	Oberfläche Lochdübelreihe	○	●	○	●	○	●
	Stirnfläche Deckblech	○	●	○	●	○	●
	Stirnfläche Auflagersteife	○	●	○	○	○	○
	Stirnfläche Betondübel	○	●	○	●	○	●
	Stirnfläche T-Blech	○	●	○	●	○	●
	Stirnfläche Endblech	○	●	○	●	○	●
y-z	Rigid an Deck-/Bodenblech	●	●	●	●	●	●
	Rigid an Lochdübelreihe	●	●	●	●	●	●
	Rigids an Betonkern	●	●	●	●	●	●

Translatorische Freiheitsgrade U1/U2/U3 in globale x/y/z-Richtung wirkend

Rotatorische Freiheitsgrade UR1/UR2/UR3 wirken um globale x/y/z-Achse

- Lagerkomponente frei
- Lagerkomponente fest

Die Grundeinstellungen der aufgelagerten Bereiche in der x-z-Schnittebene wirken uneingeschränkt bis inklusive des letzten Berechnungsschrittes. Bei allen übrigen Bereichen erfolgt eine Modifikation der Lagerkomponenten mit Beginn der Belastung im Analyse-Step. Die adaptierten Einstellungen zu den genannten Lagerflächen sind in Tabelle 15 ersichtlich.

«Posten STEPS – Analyse-Step – Edit Boundary Condition:

{ → Modifikation der Freiheitsgrade durch Auswahl der jeweiligen Lagerkomponente;
Amplitude: *Instantaneous* (für konstant wirkende Funktionen)}»

Tabelle 15: ABAQUS Einstellungen; Modifizierte Freiheitsgrade im Analyse-Step

Ebene/ Schnitt- ebene	Bauteil bzw. der betroffene Bereich davon	Freiheitsgrade					
		Translation			Rotation		
		U1	U2	U3	UR1	UR2	UR3
x-y	Rigid an Endblech	○	●	●	●	○	○
y-z	Rigid an Deck-/Bodenblech	●	●	○	●	●	●
	Rigid an Lochdübelreihe	●	●	○	●	●	●
	Rigids an Betonkern	●	●	○	●	●	●

Translatorische Freiheitsgrade U1/U2/U3 in globale x/y/z-Richtung wirkend

Rotatorische Freiheitsgrade UR1/UR2/UR3 wirken um globale x/y/z-Achse

- Lagerkomponente frei
- Lagerkomponente fest

4.5.11. Die Posten für Output Requests – Definition der Ausgabewerte

4.5.11.1. Allgemeines zu Anforderungen an den Ergebnisumfang

Den letzten Bearbeitungsschritt bei der Erstellung des SCSC-Grundlagemodells vor der Fertigstellung eines *Jobs* stellt die Definition des Ergebnisumfanges dar. Dabei wählt der Anwender die gewünschten Zustandsgrößen und Parameter als *Outputs* aus, die vom Solver in der Ergebnisdatenbank «*Output Database*» abgespeichert werden. Zusätzlich kann für jeden *Output* die Häufigkeit der Ausgabe vorgegeben werden. Dabei ist jedenfalls zu beachten, dass speziell auch die Anzahl der gespeicherten *Output*-Werte die Größe des Ergebnisfiles stark beeinflusst und die Auswahl dahingehend einer guten Planung bedarf.

Abaqus bietet für die Auswertung der numerischen Ergebnisse im *Postprocessor* zwei unterschiedliche *Output*-Funktionen an.

Diese sind:

- *Field Output Requests*
Ergebnisse zur grafischen Darstellung im Konturdiagramm, z.B. Verschiebungen, Spannungen, Grad der Betonschädigung etc.
- *History Output Requests*
Ergebnisse einzelner Knoten oder finiter Elemente, welche die Entwicklung des jeweiligen Parameters bezogen auf die Berechnungsschritte – die Historie – wiedergeben und direkt tabellarisch ausgelesen werden können.

4.5.11.2. Der Posten FIELD OUTPUT REQUESTS

Ergebnisse des *Field Outputs* ermöglichen dem Anwender im *ABAQUS/Viewer*, die abgefragten Ergebniswerte auf einen Blick grafisch darzustellen (Konturdiagramm, Vektorgrafik etc.).

Für das SCSC-Grundlagemodell zeigt sich die Ausgabe der folgenden *Field Outputs* als empfehlenswert:

```
«Create Field: {Name: concrete; Step: Analyse-Step „Belastung“ ↵
Domain: Set → Auswahl des vorab benannten Sets „Beton_gesamt“ aller Betonteile;
Frequency: Evenly spaced time intervals, Interval: 50;
Timing: Output at approximate times -
Output Variables – Select from list below – Failure/Fracture: DAMAGEC,DAMAGET,SDEG}»
```

```
«Create Field: {Name: whole model; Step: Analyse-Step „Belastung“ ↵
Domain: Whole model oder Set → Auswahl eines vorab benannten Sets ohne Rigids;
Frequency: Evenly spaced time intervals, Interval: 50;
Timing: Output at approximate times -
Output Variables – Select from list below:
CFORCE,CSTRESS,LE,MISES,NFORC,PE,RF,S,U}»
```

Als Intervall wird bei den *Field Output Requests* hier *time interval* 50 entsprechend der Anzahl der Berechnungsschritte gewählt. Dahingehend wird je *frame* (*steptime* 0 bis 50) für jede definierte Output Variable ein Ergebniswert als Field Output im Ergebnisfile *filename.odb* gespeichert. Ist fallweise für eine Output Variable eine über die *steptime* weniger genaue Ergebnisdarstellung möglich, kann beispielsweise mit der Eingabe *time interval* 25 die Anzahl der definierten Laststufen um die Hälfte reduziert werden.

Hinweis: Nachträglich können Ergebnisdaten von Output Variablen, welche im *Output Request* während des *Preprocessing* nicht definiert wurden, im Abaqus/Viewer händisch abgefragt werden. Diese Daten können allerdings nicht im Ergebnisfile als *Output Variable* abgespeichert werden, jedoch für die weitere Verwendung in tabellarischer Form exportiert werden. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass das Ergebnisfile im *Solver* erstellt wird und während des *Postprocessing* vom Benutzer nicht verändert werden kann.

Die Einstellung *Output at approximate times* zeigt sich als ausreichend genau für die gegenständliche numerische Simulation von SCSC-Platten. Die Parameter *DAMAGEC* und *DAMAGET* sowie *SDEG* ermöglichen die Kontrolle des Schädigungsverlaufes des Kernbetons am 3D-Modell über die Analyse-Zeit. Mittels des Parameters *NFORC* und der Funktion *Activate/Deactivate View Cut* können die diskreten Zustandsgrößen einzelner finiter Elemente oder von ausgewählten Bereichen als Schnittgrößen visualisiert werden.

Die grafische Darstellung der Ergebniswerte ermöglicht dem Anwender anfänglich einen groben Überblick über die Güte der Simulation. So liefert beispielsweise die Gesamtverformung des FE-Modells – schrittweise oder als Animation über die *step-time* betrachtet – Aufschluss über die Richtigkeit und Qualität der im *Preprocessing* gewählten Grundeinstellungen (*BCs*; Belastung: Größe, Krafrichtung und zeitlicher Verlauf; Verbindungen der *Instances* etc.).

4.5.11.3. Der Posten HISTORY OUTPUT REQUESTS

Ergebnisse eines Knotens oder eines finiten Elementes, üblicherweise Parameter oder Zustandsgrößen, werden als *History Output* je *time interval* abgespeichert. Diese können im ABAQUS/Viewer als *Output-frame*-Diagramm dargestellt werden sowie in tabellarischer Form exportiert werden.

«Create History: {Step: Analyse-Step „Belastung“ ↵

Domain: Set, Interaction, → Auswahl eines vorab erstellten Features;

Frequency: Evenly spaced time intervals, Interval: 50;

Output Variables – Select from list below

→ Auswahl von Zustandsgröße/n oder Parameter/n}»

Für das SCSC-Grundlagemodell wurden als Basis für die Auswertung der numerischen Analyse Verschiebungen, Verdrehungen, Auflager- und Reaktionskräfte, *Contact* und *Connector Values*, *Failure/Fracture Values* sowie Spannungen und Dehnungen an ausgesuchten Punkten ausgegeben.

Der *History Output* „energy“ ist als Ergebniskontrolle (wie z.B. $ALLKE/ALLIE \leq 0,1$) der numerischen Simulation anzulegen:

«*Create History: {Step: Analyse-Step „Belastung“ ↵*

Domain: Whole model; Frequency: Evenly spaced time intervals, Interval: 50;

Output Variables – Select from list below – Energy: ALLIE,ALLKE,ETOTAL}»

4.5.12. Das Modul Job

Den abschließenden Schritt der Erstellung des SCSC-Grundlagemodells bildet die *Job-Definition*:

«*Create Job: {Source: Model ↵*

Precision - Abaqus/Explicit precision → Auswahl Double bei großer Elementanzahl}»

5. EVALUIERUNG VORHANDENER RECHENMODELLE DER SCSC-SANDWICHPLATTE NACH *HERRMANN*

5.1. Grundlagen

Eine wesentliche Fragestellung des gegenständlichen Forschungsprojektes *SCSC-Platte* betraf die Beurteilung des bestehenden Tragmodells nach *Herrmann* gemäß [Her13] auf dessen Anwendbarkeit bei Sandwichplatten mit realitätsnaher Stützweite sowie normengerechten Belastungsszenarien. Die Evaluierung wurde anhand von Vergleichsrechnungen der Ingenieurmodelle von *Herrmann* mit den Ergebnissen der SCSC-Hauptversuche durchgeführt.

Die Notwendigkeit dieser Untersuchung ergab sich aus dem Umstand, dass das Ingenieurmodell für Querschnitts-Typ 1-Sandwichplatten nach [Her13] lediglich auf den Versuchsergebnissen von je einem Probekörper einer bestimmten Dübelleistengeometrie (2 x Kronendübel sowie 2 x Lochdübel mit jeweils unterschiedlicher Größe und Anzahl der Verbundmittel je Verbundleiste) mit reduzierter Stützweite von rund 2.500 mm und einem stark vereinfachten Lastbild in Form einer Linienlast in Feldmitte basiert. Darüber hinaus wiesen die Versuchskörper der oben beschriebenen experimentellen Sondierungsuntersuchung Deckbleche mit 20 mm Dicke bei einer Bauhöhe von 200 mm auf.

Die realitätsnahen Rahmenbedingungen der experimentellen Hauptversuche der SCSC-Platten wurden aus den in Kapitel 3 erläuterten Gründen wie folgt festgelegt:

- Versuchskörper mit 4.080 mm Spannweite (vgl. exemplarisches Brückentragwerk gemäß Abbildung 1)
- 200 mm Bauhöhe
- Deckbleche von 15 mm Dicke
- flächenförmig und konstant verteilte Belastung auf eine Breite von 3 m symmetrisch um die Plattenmitte

5.2. Beschreibung des Berechnungsverfahrens nach *Herrmann*

Das modulare MATLAB-Berechnungsprogramm nach *Herrmann* gemäß [Her13] dient der ingenieurmäßigen Beschreibung des Tragverhaltens der SCSC-Sandwichplatte. Es ermöglicht durch die Auswahl unterschiedlicher Basiseinstellungen das Kombinieren von

unterschiedlichen Tragmechanismen, welche in ihrem Zusammenwirken ein Tragmodell der Verbundplattenkonstruktion darstellen.

Die oben erwähnten Tragmechanismen können im SCSC-Berechnungsprogramm durch die im Folgenden beschriebenen Grundeinstellungen ausgewählt werden. Diese sind:

- Die Verbundart
ohne Verbund, elastischer Verbund, starrer Verbund
- Berücksichtigung eines Sprengwerks
berücksichtigen, nicht berücksichtigen
- Die mittragende Breite
berücksichtigen, nicht berücksichtigen
- Die Berücksichtigung von Beton in der Druckzone
keine Berücksichtigung, Berücksichtigung- Starrverbund, Berücksichtigung mit Iteration

Die Verbundart beschreibt hierin die Art und Weise, in der die beiden Stahl-Teilquerschnitte der Sandwichplatte durch den Kernbeton miteinander verbunden sind (Schubverbund). Als wesentlichen Tragmechanismus identifiziert *Herrmann* die Verbundart „elastischer Verbund“, dessen theoretische Grundlagen in Kapitel 5 seiner Arbeit [Her13] für den Anwendungsfall der Sandwichplatte dargelegt sind. Die Einstellungen „ohne Verbund“ und „starrer Verbund“ dienen für Plausibilitäts- und Grenzwertbetrachtungen.

Die Basiseinstellung Sprengwerk stellt die Möglichkeit der Abbildung eines unterstützenden Druckstabsystems im Kernbeton dar. Dieses erzeugt bei Aktivierung zusätzliche Zugnormalkräfte im Stahl-Teilquerschnitt in der Zugzone der Verbundkonstruktion.

Mittels der Auswahl mittragende Breite wird der Einfluss von Schubverzerrungen bei Trägern mit breiten Gurten in der Berechnung berücksichtigt. Hierbei stehen die Basiseinstellungen „berücksichtigen“ und „nicht berücksichtigen“ zur Verfügung, welche sich jeweils sowohl auf den Stahl- als auch den Betonquerschnitt gleichermaßen beziehen.

Berücksichtigung von Beton in der Druckzone ermöglicht die differenzierte Berücksichtigung von Querschnittsbereichen des Betonkerns, welche einen Anteil an der Biegetragfähigkeit der Verbundkonstruktion stellen. *Herrmann* hat zu diesem Zweck mit den Basiseinstellungen „Berücksichtigung- Starrverbund“ und „Berücksichtigung mit Iteration“ zwei unterschiedliche Tragmechanismen in dem SCSC-Berechnungsprogramm implementiert.

5.3. Gegenüberstellung Ingenieurmodell – Messergebnisse der experimentellen Tragfähigkeitsuntersuchung

Ausgehend von den Erkenntnissen der Auswertung der experimentellen Hauptversuche sowie der begleitenden numerischen Simulation der SCSC-Hauptversuchskörper mit Querschnitts-Typ 1 wurden die Eingangs- und Variationswerte für die vergleichende Analyse der Versuchsergebnisse mit dem SCSC-Berechnungsprogramm nach *Herrmann* festgelegt. Neben der Federsteifigkeit des Restquerschnittes einer Lochdübelleiste sowie der Koppelfedersteifigkeit der Betondruckstreben des Kernbetons wurde als Variationsparameter einerseits die Mitwirkung des Betons in der Druckzone in Form von Starrverbund bzw. als unterstützendes Sprengwerk sowie die Auswahl der mittragenden Breiten der Stahl- und Betonquerschnitte identifiziert.

Nachfolgend sind die Analyseergebnisse eines Berechnungsbeispiels mit dem SCSC-Berechnungsprogramm nach *Herrmann* für eine beispielhafte Parameterkombination eines SCSC-Verbundplattenelements mit 4.080 mm Stützweite und 1.000 mm Breite unter gleichmäßig verteilter Flächenlast auf 3.000 mm Länge dargelegt. Hierbei kamen die in Tabelle 16 und Tabelle 17 angeführten Parameter- und Eingabewerte zur Anwendung.

Tabelle 16 beinhaltet die Eingabewerte zu der flächigen Belastung des Berechnungsbeispiels im Modul *SCSC_Load*.

Hinweis: Die Lastwerte $q_{1,1}$ und $q_{1,2}$ beziehen sich auf einen 1.000 mm breiten Streifen einer SCSC-Sandwichplatte des Querschnitts-Typs 1 mit 4.080 mm Stützweite.

Tabelle 16: Eingabewerte zu der Belastung des Berechnungsbeispiels mit dem Matlab-Berechnungsprogramm nach *Herrmann* gemäß [Her13]

Bezeichnung der Eingabewerte nach [Her13]	Eingabewert
$x_{qi,1}$	540 mm
$x_{qi,2}$	3.540 mm
$q_{1,1}$	420 kN/m vert. nach unten
$q_{1,2}$	420 kN/m vert. nach unten

In Tabelle 17 sind Angaben zu den Geometriedaten als auch den Grundeinstellungen (Tragmechanismen) zusammengefasst, welche im Grundmodul *SCSC_EIVerb* des SCSC-Berechnungsprogramms von *Herrmann* für das gegenständliche Berechnungsbeispiel definiert wurden.

Tabelle 17: Eingabewerte zu Geometrie und Tragmechanismen des Berechnungsbeispiels mit dem Matlab-Berechnungsprogramm nach *Herrmann* gemäß [Her13]

Bezeichnung der Eingabewert nach [Her13]	Eingabewert
Sprengwerk	nicht berücksichtigen
l_{sp}	4.080 mm
l_{sf}	--
h_{sf}	--
A_{sf1}	--
A_{sf2}	--
Fläche optimiert	nein
Verbundart	elastischer Verbund
b_{eff}	nicht berücksichtigen
Mitwirkung von Beton in der Druckzone	keine Berücksichtigung
E_a	210.000 N/mm ²
E_c	37.400 N/mm ²
f_y	393 N/mm ²
f_c	44 N/mm ²
e_{DL}	1.000 mm
h_{ges}	200 mm
t_t	15 mm
t_b	15 mm
t_{DL}	20 mm
h_{Rest}	35 mm
e_{Ds}	165 mm
h_{Due}	100 mm
k_{Zahn}	1,6E6 N/mm ²
α_0	50°
α_m	50°
Verlauf	1. Ordnung
Ermittlung der Druckstrebengeometrie	automatisch

Hinweis: Die im Berechnungsbeispiel gewählten Grundeinstellungen beinhalten keine Mitwirkung des Betons in der Druckzone (weder in Form eines Sprengwerks noch als Teil des gedrückten Querschnittes in der Druckzone). Aufgrund der Tatsache, dass die Ergebnisse der Auswertung der SCSC-Hauptversuche das Mitwirken des Betons in der Druckzone bestätigen, verstehen sich die in Tabelle 17 dargelegten Eingabewerte als biegeeweiche Näherung zur Abbildung des Tragmechanismus der Sandwichplatte.

In Abbildung 60 sind ausgewählte Ergebniswerte des SCSC-Berechnungsbeispiels des Visualisierungsmoduls *SCSC_Result* dargestellt.

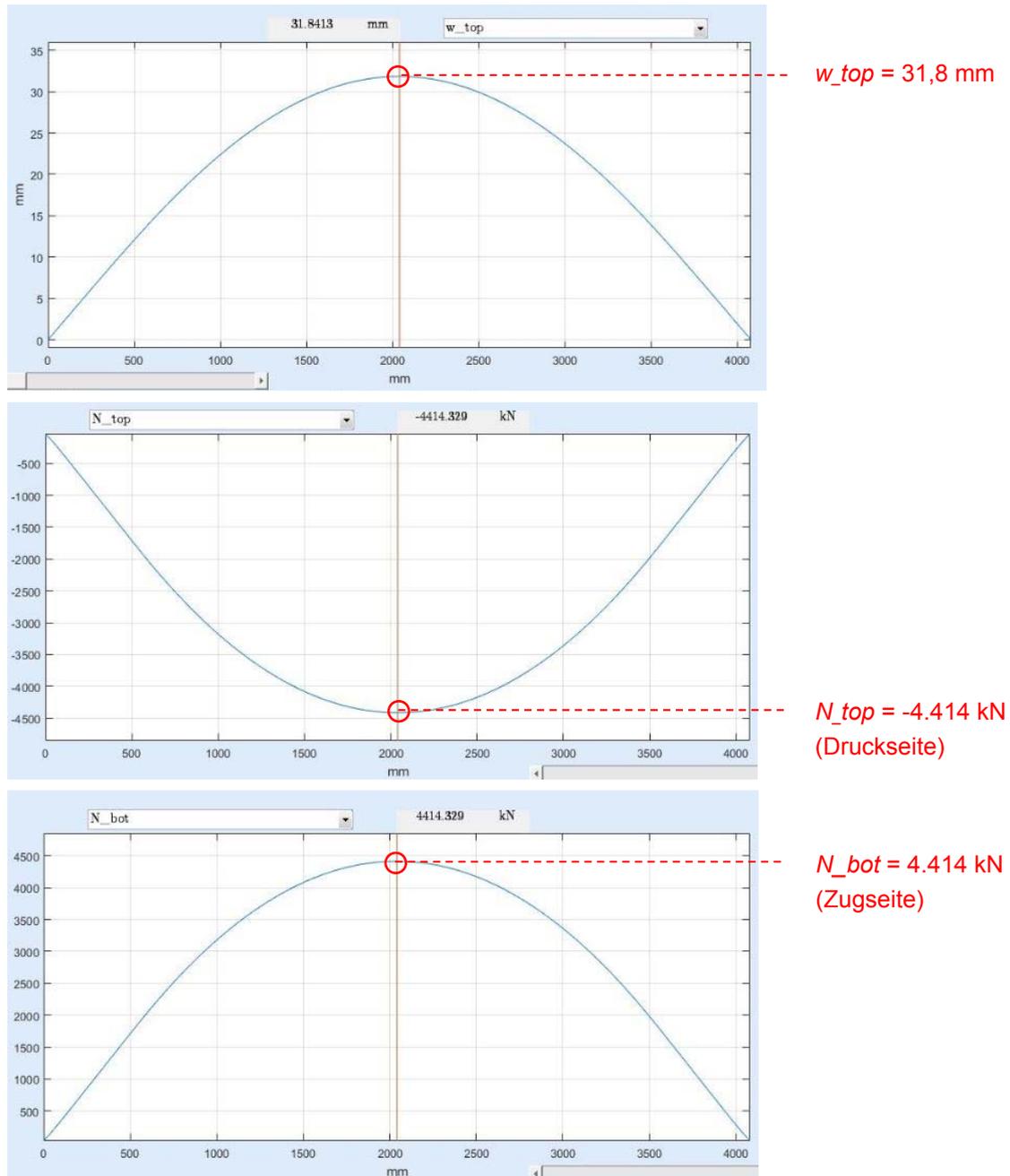


Abbildung 60: Ausgewählte Ergebnisverläufe und –werte des SCSC-Berechnungsbeispiels mit dem Matlab-Berechnungsprogramm nach Herrmann gemäß [Her13]; oben: Durchbiegung w_{top} ; mitte: Normalkraft des oberen Teilquerschnitts N_{top} (Druckseite); unten: Normalkraft des unteren Teilquerschnitts N_{bot} (Zugseite)

Die Ergebnisausgabe (siehe Abbildung 60) des Moduls *SCSC_Result* umfasst an dieser Stelle sowohl den Verlauf der Durchbiegung des elastisch gekoppelten Balkens als auch

die Verläufe der jeweiligen Axialkraft der Stahl-Teilquerschnitte im Zug- und Druckbereich der untersuchten Sandwichkonstruktion (Berechnungsmodell ohne Mitwirkung des Betons in der Druckzone). Darüber hinaus sind die zugehörigen Ergebniswerte w_{top} , N_{top} und N_{bot} in Feldmitte bei der Flächenlast von 420 kN/m (entspricht 3.780 kN Versuchslast der SCSC-Hauptversuche) angeführt.

Abbildung 61 zeigt die experimentell ermittelten Arbeitslinien der SCSC-Hauptversuchskörper sowie das Ergebnis der begleitenden numerischen Simulation und weist die Werte der Durchbiegung in Feldmitte der jeweiligen Ergebnisverläufe bei Laststufe 3.780 kN entsprechend der Größe der Belastung des Berechnungsbeispiels aus.

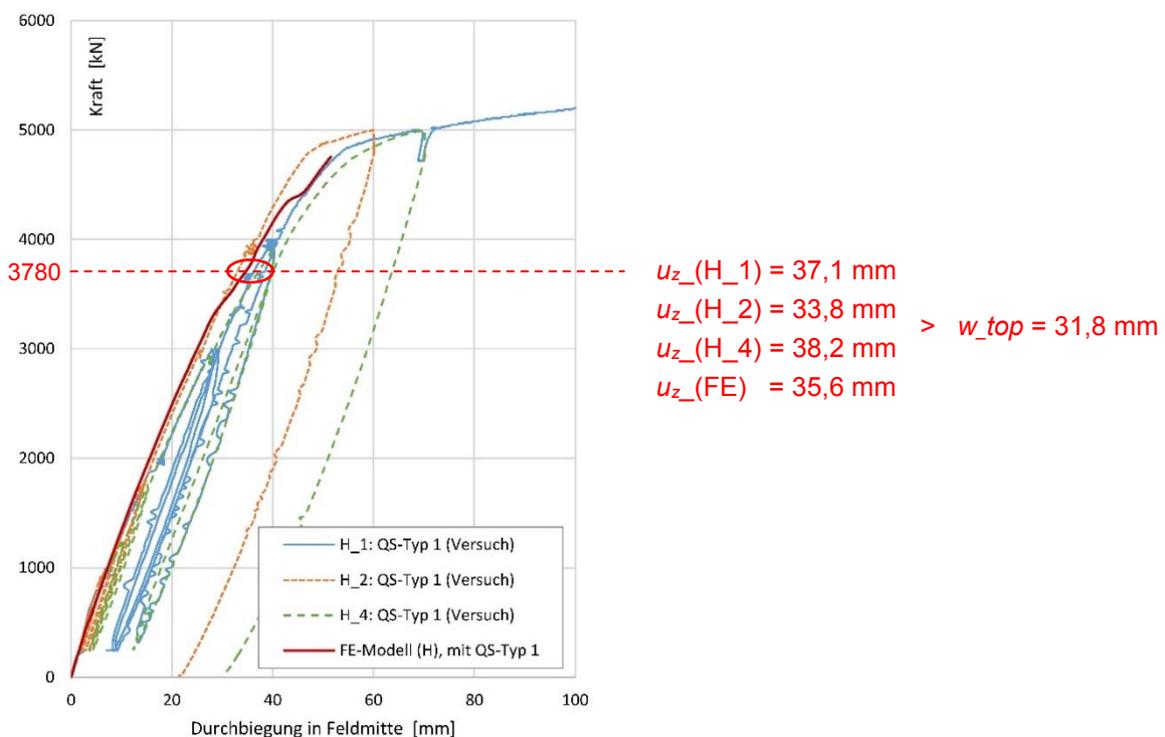


Abbildung 61: Ausschnitt der Kraft-Verschiebungs-Diagramme der SCSC-Hauptversuchskörper inkl. Ergebnis der numerischen Simulation gemäß Abbildung 43; Durchbiegungswerte bei Laststufe 3.780 kN für die vergleichende Analyse mit dem Ergebnis der Beispielrechnung

Aufgrund der speziellen Konstruktion der Versuchsanlage der SCSC-Hauptversuche, erfolgte die Lastaufbringung auf die Versuchskörper mit Hilfe der Wasserdruckkissen entgegen der Wirkungsrichtung der Schwerkraft (vgl. Kapitel 3). Die Vorzeichenkonvention des Berechnungsprogramms nach *Herrmann* verlangt hingegen die Wirkungsrichtung der Belastung im Modul *SCSC_Load* nach unten (in Richtung der Schwerkraft). Dieser Umstand ist bei der Durchsicht der nachfolgenden Auswertung zu berücksichtigen.

In Tabelle 18 ist eine Gegenüberstellung von ausgewählten Ergebnissen der numerischen Simulation der SCSC-Hauptversuche (welche eine sehr gute Näherung der experimentellen Versuchsergebnisse der SCSC-Hauptversuche darstellen und dahingehend an dieser Stelle stellvertretend für Vergleichswerte herangezogen werden) als auch der Ergebnisse des Berechnungsbeispiels gegeben. Die Aufstellung umfasst neben der Durchbiegung einen Vergleich der Axialkräfte der Stahl-Teilquerschnitte in der Druck- und der Zugzone als auch die ermittelten Randspannungen des Deckbleches in der Zugzone des Plattentragwerkes. Die angeführten Ergebniswerte beziehen sich jeweils auf Punkte bzw. Fasern in Feldmitte.

Tabelle 18: Vergleich ausgewählter Ergebnisse der FE-Analyse der SCSC-Hauptversuchskörper mit dem Ergebnis des Berechnungsbeispiels mit dem SCSC-Berechnungsprogramm nach Herrmann gemäß [Her13]

Kriterium	FE-Ergebnis der SCSC-Hauptversuche	Ergebnis Berechnungsbeispiel
Durchbiegung in Feldmitte	35,6 mm	31,8 mm
Axialkraft des Stahl-Teilquerschnitts in der Druckzone	-3.211 kN	-4.414 kN
Axialkraft des Beton-Teilquerschnitts in der Druckzone	-1.550 kN	-- kN
Axialkraft des Stahl-Teilquerschnitts in der Zugzone	4.598 kN	4.414 kN
Randspannung des Deckbleches in der Zugzone in Feldmitte	260 - 375 N/mm ²	314 N/mm ²

Bei Betrachtung der Ergebniswerte in Tabelle 18 und Abbildung 61 können große Abweichungen zwischen dem Ergebnis der beschriebenen Beispielrechnung und dem Ergebnis der numerischen Simulation sowie den experimentellen Versuchsergebnissen der Hauptversuchskörper mit Querschnitts-Typ 1 festgestellt werden. Dieser Umstand ist insbesondere durch die Gegenüberstellung der Durchbiegungswerte in Feldmitte ersichtlich:

Das Berechnungsbeispiel zeigt im Vergleich den geringeren Verformungswert in Plattenmitte, was eine – bezogen auf das numerische Modell sowie auf die realen Hauptversuchskörper (siehe Abbildung 61) – höhere Biege- bzw. Schubsteifigkeit des gewählten Tragmodells im SCSC-Berechnungsprogramm nach Herrmann ausweist. Dies widerspricht jedoch der eingangs gewählten biegeweichen Kombination der Tragmechanismen im

Berechnungsbeispiel ohne Berücksichtigung des Mittragens des Kernbetons auf Druck bzw. ohne Berücksichtigung eines Sprengwerks.

Zusätzlich weisen die Analyseergebnisse Schwächen in Bezug auf die vom SCSC-Berechnungsprogramm ermittelten Dehnungen und Spannungen von Deck- und Bodenblech auf. Im Weiteren sind das Tragverhalten der längslaufenden Schweißnähte zwischen Deck- bzw. Bodenblech und den Endblechen sowie der Tragmechanismus der SCSC-Sandwichplatte in den Auflagerbereichen der Platte nicht hinreichend genau abbildbar.

5.4. Schlussfolgerungen

Die SCSC-Sandwichplatte mit realitätsnahen Rahmenbedingungen der experimentellen Hauptversuche (4.080 mm Spannweite und flächige Belastung) kann mittels des Matlab-Berechnungsprogramms nach *Herrmann* gemäß [Her13] ohne umfangreiche Überarbeitung nicht abgebildet werden.

Jene Programmkomponenten bzw. Modellparameter des SCSC-Berechnungsprogramms nach *Herrmann*, welche aus Sicht des Autors jedenfalls einer Anpassung bedürfen, sind nachfolgend zusammengefasst:

- Abschnittsweise Aufgliederung von Geometrie und Neigung der horizontal liegenden Betondruckstreben des Kernbetons
- Trennung der Eingabe für die Querschnittsteile der Materialien Stahl und Beton bezogen auf die Basiseinstellung der mittragenden Breite
- Berücksichtigung des Mittragens der längslaufenden Kehlnähte zwischen den Deck- bzw. Bodenblechen und den Endblechen (Biegetragmechanismus)
- Implementierung der bereichsweisen Schubkrafteinleitung in der Berechnung der Schnittgrößen der Teilquerschnitte

6. EMPFEHLUNGEN FÜR WEITERFÜHRENDE FORSCHUNGS- AKTIVITÄTEN ZUR SANDWICH-VERBUNDPLATTE

Nach Abschluss des Forschungsprojektes *SCSC-Platte* ergeben sich aus Sicht des Autors Empfehlungen zu Themengebieten für nachfolgende Forschungsaktivitäten in Bezug auf die Sandwichplatte:

Weiterführende Aufgabenstellungen bestehen vornehmlich für die Themengebiete Langzeitverhalten und Ermüdungsfestigkeit der SCSC-Platte. Forschungsthemen, welche als direkte Fortführung zu dem gegenständlichen Forschungsprojekt verstanden werden können, beziehen sich im Wesentlichen auf die Erarbeitung eines Berechnungsmodells für die SCSC-Sandwichplatte unter statischer (flächenhafter) Belastung.

6.1. Rechenmodell für die Bemessung von SCSC-Platten

Als zentraler nachfolgender Forschungsschwerpunkt stellt sich die notwendige Anpassung des bereits vorhandenen Ingenieurmodells nach [Her13] dar. Wie in Kapitel 5 beschrieben, ermöglicht das Berechnungsprogramm nach *Herrmann* eine Fülle an unterschiedlichen Auswahlmöglichkeiten zu einzelnen Teilmechanismen, welche in unterschiedlichen Kombinationen jeweils ein (mögliches) Tragmodell der SCSC-Platte abbilden.

Das Augenmerk bei der Entwicklung des Rechenmodelles liegt hier insbesondere an der Bereitstellung eines universellen Ingenieurmodelles für die Bemessung von SCSC-Sandwichplatten. Dieses umfasst als Zieldefinition all jene Teilmechanismen und Auswahlparameter des Berechnungsprogrammes nach *Herrmann*, welche sich nach Berücksichtigung der Erkenntnisse aus dem gegenständlichen Forschungsprojekt als maßgeblich erweisen.

6.2. Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit der SCSC-Platte

Zum Erlangen der Einsatzreife der SCSC-Sandwichplatte im Eisenbahnbrückenbau ist neben dem Nachweis der Tragfähigkeit unter ruhender Beanspruchung ebenfalls der Nachweis der Ermüdungsfestigkeit der Plattenkonstruktion erforderlich.

Die Untersuchung des Tragvermögens der Verbundkonstruktion unter ermüdungswirksamen Einwirkungen ist zum Zeitpunkt der Berichtslegung im Zuge des Forschungsprojektes VIF2015, Projekt Nr. 854614 (Thema Bautechnik - 2.2.10 Ermüdungsfestigkeit SCSC-Platte) mit dem Kurztitel *FLS SCSC-Platte* am Institut für Tragkonstruktionen –

Forschungsbereich Stahlbau der Technischen Universität Wien unter der Leitung von *Univ.Prof. DI Dr.techn. Josef Fink* in Bearbeitung.

Im Zuge des genannten VIF2015-Forschungsprojektes wird auf Grundlage einer versuchsunterstützten Analyse mit begleitenden numerischen Simulationen ein Rechenmodell zur Prognose des Ermüdungswiderstandes von SCSC-Sandwichplatten erarbeitet.

6.3. Langzeitverhalten der SCSC-Platte

Die im Zuge des gegenständlichen Forschungsprojektes *SCSC-Platte* erhaltenen Erkenntnisse bauen ausschließlich auf Versuchen zur Ermittlung der statischen Kurzzeitfestigkeit auf. Als weitere Fragestellung stellt sich die Auswirkung des zeitabhängigen Materialverhaltens (Kriechen und Schwinden) des Kernbetons auf die dauerhafte Gebrauchstauglichkeit der Verbundplattenkonstruktion dar.

Das Kriechen bezeichnet die Zunahme der Verformungen eines Bauteils (hier: aus Beton) unter Lasteinwirkung über die Zeit. Als wesentliche Einflussfaktoren stellen sich das Betonalter bei erstmaliger Belastung, die Zusammensetzung des Betons, die Bauteilgeometrie sowie die klimatischen Gegebenheiten dar. Der Begriff Schwinden umschreibt im Allgemeinen den Langzeiteffekt der Volumenverminderung des Betons. Hierbei ist neben dem autogenen Schwinden zufolge Gefügeumwandlung während der Hydratation des Betons das Trocknungsschwinden durch das Austrocknen des Betons über die Zeit von Interesse. Neben der Betonzusammensetzung beeinflussen ebenso die Bauteilabmessung wie auch die Umgebungs-Luftfeuchtigkeit den zeitlichen Verlauf des Schwindens eines Bauteils aus Beton.

Die Aufgabenstellung bezieht sich auf die Erfassung der Auswirkung der Effekte Kriechen und Schwinden des vom Stahl vollständig umschlossenen Kernbetons auf das Tragverhalten der SCSC-Sandwichplatte mittels numerischer Simulationen.

7. ZUSAMMENFASSUNG DER WESENTLICHEN ERKENNTNISSE

Die dem Werkvertrag zugrunde liegenden Projektziele des gegenständlichen Forschungsprojekts *SCSC-Platte* – gemäß Kapitel 1.3 – wurden vollinhaltlich erreicht. Als Wesentlich sind die nachfolgend zusammengefassten Erkenntnisse herauszustreichen:

- Die Verbundplattenelemente mit längslaufenden Lochdübelleisten weisen sowohl bei den experimentellen Vorversuchen als auch den experimentellen Hauptversuchen eine ausgesprochen hohe Duktilität auf:
 - Die SCSC-Vorversuchskörper der Querschnitts-Typen 1a und 1b zeigen ein deutlich ausgeprägtes duktiles Nachbruchverhalten, siehe Abbildung 62.

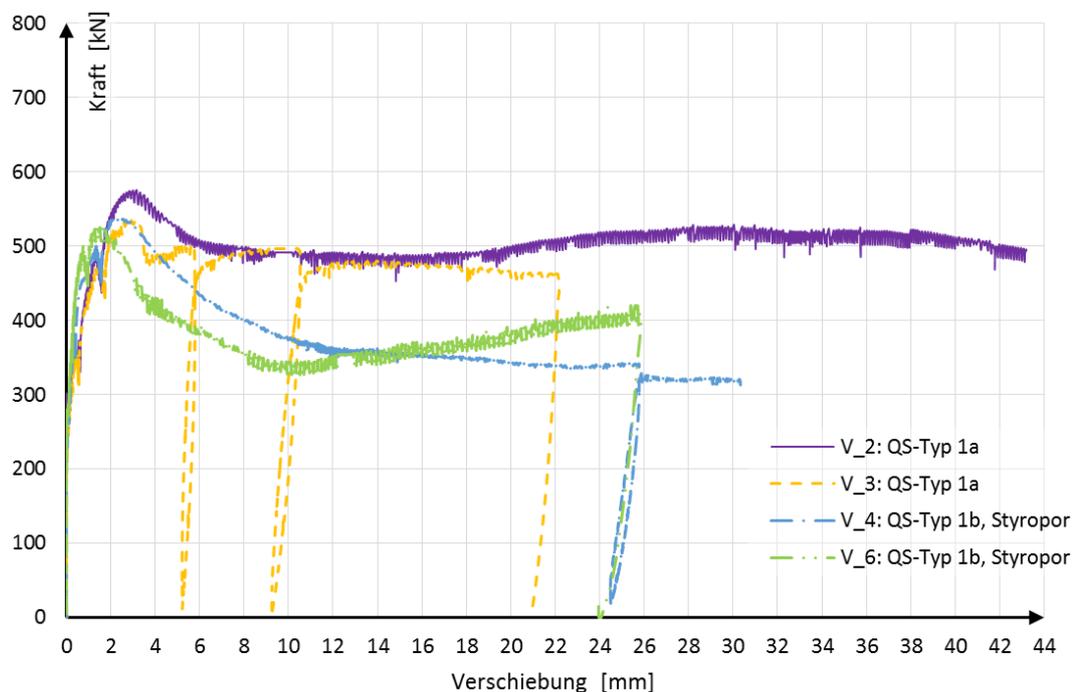


Abbildung 62: Kraft-Verschiebungs-Diagramm ausgewählter SCSC-Vorversuchskörper mit Querschnitts-Typ 1a und 1b

- SCSC-Hauptversuchskörper *H_1* des Querschnitts-Typs 1 mit 4.080 mm Spannweite und einer Bauhöhe von 200 mm (Auflistung der Geometriedaten siehe Kapitel 3) konnte bis zu einer **Durchbiegung von rund 170 mm in Feldmitte** verformt werden (vgl. Arbeitslinie von SCSC-Hauptversuchskörper *H_1* in Abbildung 63).

- Die in Kapitel 4 dargelegte Parameterkombination der Materialkennwerte sowie angepasste Eingabewerte für **numerische Traglastanalysen** der SCSC-Platte mit dem FE-Programm ABAQUS beschreibt das Tragverhalten der Sandwichkonstruktion bis zum **Lastniveau [LM71(ULS) + Eigengewicht] · 2,6** sehr gut.

Hinweis: Der Wert 2,6 entspricht dem Laststeigerungsfaktor zwischen dem Bemessungslastniveau (LM71 + Eigengewicht) und der Traglast der FE-Analyse von ca. 4.750 kN, vgl. Abbildung 63.

- Die **experimentellen Laboruntersuchungen** an Hauptversuchskörpern mit Querschnitts-Typ 1 zeigen eine enorm hohe Tragfähigkeit der SCSC-Sandwichplatte auf:

Traglast \triangleq Lastniveau [LM71(ULS) + Eigengewicht] · 2,7

Hinweis: Der Wert 2,7 entspricht dem Laststeigerungsfaktor zwischen dem Bemessungslastniveau (LM71 + Eigengewicht) und der Traglast von rund 4.900 kN der SCSC-Hauptversuchskörper mit QS-Typ 1, vgl. Abbildung 63.

- Das hohe Tragvermögen der Sandwichplatte ist anhand der Gegenüberstellung der Beanspruchung (Gebrauchslast-, Bemessungslastniveau) mit der Beanspruchbarkeit (experimentell ermittelte Versuchslast, Berechnungsergebnis der FE-Analyse) in Abbildung 63 ersichtlich:

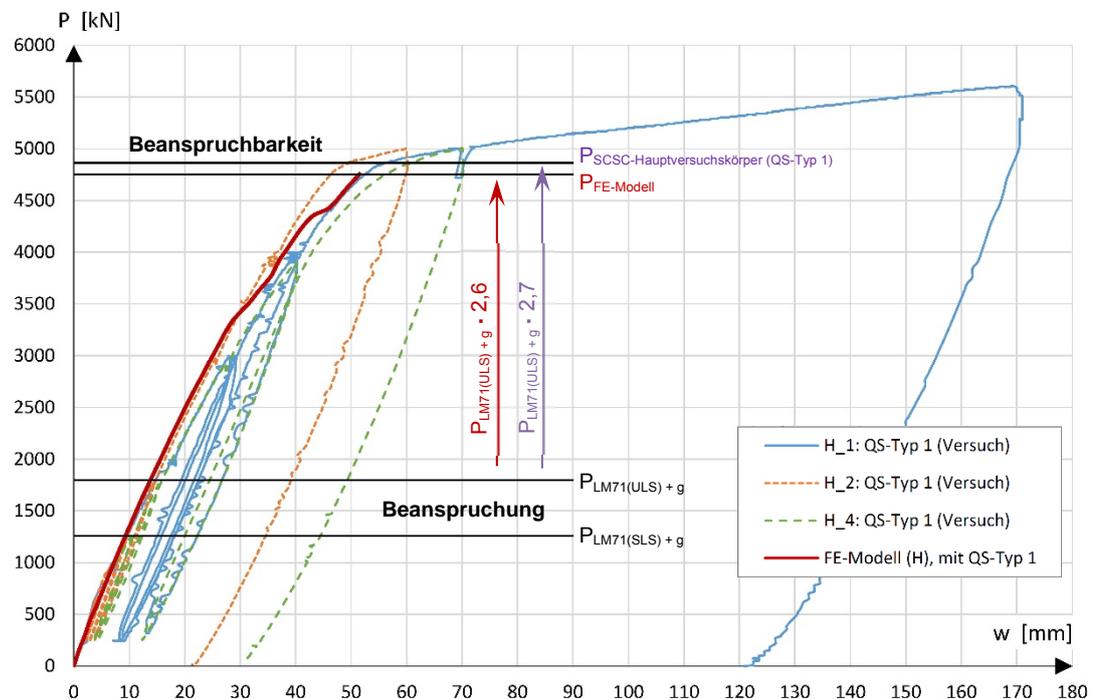


Abbildung 63: Kraft-Verschiebungs-Diagramm der SCSC-Hauptversuchskörper mit QS-Typ 1 inklusive dem Ergebnis der numerischen Simulation; Vergleichsbetrachtung zwischen der normativen Beanspruchung (SLS, ULS) und der Beanspruchbarkeit der Hauptversuchskörper sowie des FE-Modells

SYMBOL- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

A_{SF}	Querschnittsflächen der Druckstreben des optionalen Sprengwerks im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [mm ²]
CDP	Betonmodell „Concrete Damaged Plasticity“, Programm ABAQUS [Aba13]
CDP2	Modell zur Beschreibung des Zugtragverhaltens von Beton nach <i>Herrmann</i> [Her13]
E_a	Elastizitätsmodul von Stahl im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [N/mm ²]
E_c	Elastizitätsmodul von Beton im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [N/mm ²]
E_{cm}	mittlerer Elastizitätsmodul von Beton
FEM	Finite Elemente Methode
K_c bzw. K	Formfaktor des Betonmodells CDP, Programm ABAQUS [Aba13]
LDL	Lochdübelleiste
N_{bot}	Normalkraft des gezogenen Teilquerschnitts (hier: ohne eventueller Anteile aus Zugbandwirkung des Sprengwerks) im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [kN]
N_{top}	Normalkraft des gedrückten Teilquerschnitts im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [kN]
SCSC	Steel-Concrete-Steel-Composite (Sandwichkonstruktion aus Stahl und Beton)
b_{eff}	Reduzierte Breite von Querschnittsteilen aus Stahl- und Beton zur Berücksichtigung des Einflusses von Schubverzerrungen bei Trägern mit breiten Gurten im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [mm]
d_c	Druckschädigungsparameter des Betonmodells CDP, Programm ABAQUS [Aba13]
d_t	Zugschädigungsparameter des Betonmodells CDP, Programm ABAQUS [Aba13]
e_{DL}	Breite des zu untersuchenden Sandwichplattenstreifens im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [mm]
e_{Ds}	Systemabstand der Löcher in den Lochdübelleisten in Plattenlängsrichtung im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [mm]
f_{b0} (σ_{b0})	zweiachiale Betondruckfestigkeit
f_c	Eingabewert der einaxialen Betondruckfestigkeit im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [N/mm ²]
f_{c0} (σ_{c0})	einaxiale Betondruckfestigkeit
f_{cm}	Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit des Betons [EC2]

f_{ctm}	Mittelwert der Zugfestigkeit des Betons [EC2]
f_y	Eingabewert der Fließgrenze von Stahl im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [N/mm ²]
h_{Due}	Durchmesser der Löcher in den Lochdübelleisten im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [mm]
h_{ges}	Bauhöhe des zu untersuchenden Sandwichplattenstreifens im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [mm]
h_{Rest}	Höhe des Bereiches der Lochdübelleisten, welcher keine Querschnittsreduktion zufolge der Löcher aufweist (Restquerschnitt) im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [mm]
h_{SF}	Länge der vertikalen Projektion der schrägen Druckstreben (= Höhe) eines optionalen Sprengwerks im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [mm]
k_{Zahn}	Federsteifigkeit der einzelnen Zähne des Grundwerkstoffs der Lochdübelleisten zwischen den Löchern in Zusammenwirken mit dem Restquerschnitt h_{Rest} im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [N/mm ²]
l_{SF}	Länge der horizontalen Projektion der schrägen Druckstreben eines optionalen Sprengwerks im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [mm]
l_{Sp}	Stützweite der untersuchten Verbundkonstruktion im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [mm]
p	hydrostatische Achse
q	Raumachse von deviatorischen Ebenen
$q_{1,1}$	Größe der Flächenlast an der Stelle der Startkoordinate $x_{qi,1}$ im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [kN/m]
$q_{1,2}$	Größe der Flächenlast an der Stelle der Endkoordinate $x_{qi,2}$ im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [kN/m]
t_b	Dicke des Bodenblechs des Stahl-Teilquerschnitts in der Zugzone im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [mm]
t_{DL}	Dicke der Lochdübelleisten im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [mm]
t_t	Dicke des Deckblechs des Stahl-Teilquerschnitts in der Druckzone im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [mm]
w_{top}	vertikale Durchbiegung des elastisch gekoppelten Balkens im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [mm]
$x_{qi,1}$	Startkoordinate einer flächigen Belastung entlang der Laufkoordinate x in Längsrichtung im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [mm]
$x_{qi,2}$	Endkoordinate einer flächigen Belastung entlang der Laufkoordinate x in Längsrichtung im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [mm]

α_o	Winkel der Betondruckstreben im Auflagerbereich im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [°]
α_m	Winkel der Betondruckstreben in Feldmitte im SCSC-Berechnungsprogramm gemäß [Her13] in [°]
δ_{ck}	Rissverformung von Beton im Zugspannungsbereich, Programm ABAQUS [Aba13]
ε	eccentricity, Formfaktor des Betonmodells CDP, Programm ABAQUS [Aba13]
ε_c	Dehnung des Betons
ε_{cu}	rechnerische Bruchdehnung des Betons [EN2]
$\tilde{\varepsilon}_c^{in}$	Inelastic Strain, Programm ABAQUS [Aba13]: $\tilde{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \sigma_c / E_{cm}$
ε_y	Längsdehnung der Randfasern der Deckbleche der Hauptversuchskörper nach Aramis
μ	Reibbeiwert (Gleitreibung)
ν	Poisson'sche Zahl (Querdehnungszahl, Poissonzahl)
ψ	Asymptotenwinkel
$\sigma_{b0} (f_{b0})$	zweiaxiale Betondruckfestigkeit
σ_c	Spannung im Beton
$\sigma_{c0} (f_{c0})$	einaxiale Betondruckfestigkeit
σ_{cu}	Spannung im Beton bei der rechnerischen Bruchdehnung des Betons ε_{cu}

LITERATURVERZEICHNIS

- [Aba13] Dassault Systèmes: ABAQUS 6.13 Online Documentation. 2013
- [Ant07] ANTESBERGER, E.: Weiterführende numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Kronendübeln. Institut für Tragkonstruktionen – Stahlbau, Technische Universität Wien. Diplomarbeit 2007
- [Bat86] BATHE, K.-J.: Finite-Elemente-Methoden. Springer Verlag, Berlin 1986
- [BFT16] Universität Innsbruck, Arbeitsbereich für Festigkeitslehre und Baustatik: Kurze Einführung in die Methode der finiten Elemente. 2016
- [EN2] ÖNORM EN 1992-1-1. Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Austrian Standards, 2015-02-15
- [Fra12a] FRANK, N.: Beschreibung des Tragverhaltens einer neuartigen Sandwichfahrbahnplatte für Eisenbahnbrücken. Institut für Tragkonstruktionen – Stahlbau, Technische Universität Wien. Interdisziplinäre Seminararbeit 2012
- [Fra12b] FRANK, N.: Finite Elemente-Untersuchung zum Tragverhalten einer neuartigen Sandwichfahrbahnplatte für Eisenbahnbrücken. Institut für Tragkonstruktionen – Stahlbau, Technische Universität Wien. Diplomarbeit 2012
- [FPO07] FINK, J.; PETRASCHKEK, T.; ONDRIS, L.: Push-Out Test Parametric Simulation Study of a New Sheet-Type Shear Connector. Projekte an den zentralen Applikationsservern, Zentraler Informatikdienst (ZID) der Technischen Universität Wien. Berichte 2006 (2007)
- [Gab16] GABBERT, U.: Finite-Element-Methode (FEM-I). Institut für Mechanik - Lehrstuhl für Numerische Mechanik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Skriptum (2016)
- [Her13] HERRMANN, P.: Tragfunktionsanalyse und rechnerische Modellbildung einer neuartigen Sandwich-Verbundplatte (SCSC-Platte) als Fahrbahndeck für Eisenbahnbrücken. Institut für Tragkonstruktionen – Stahlbau, Technische Universität Wien, Dissertation 2013
- [Iwa07] IVANCSICS, M.: Numerische Untersuchungen zu neuartigen Schubverbindern. Institut für Tragkonstruktionen – Stahlbau, Technische Universität Wien. Diplomarbeit 2007
- [LB13] Leistungsbeschreibung (Anbot) zum VIF2012-Forschungsprojekt *SCSC-Platte*; 2. Ausschreibung 2012 (2.2.8 Entwicklung einer neuartigen Sandwich-Verbundfahrbahnplatte für Eisenbahnbrücken). E212 – Institut für Tragkonstruktionen/ Stahlbau, Technische Universität Wien (2013)
- [MH00] MANG, H.; HOFSTETTER, G.: Festigkeitslehre. Springer Verlag, Wien 2000
- [PMVB13] PAVLOVIC, M.; MARKOVIC, Z.; VELJKOVIC, M.; BUDEVAC, D.: Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests. Journal of Constructional Steel Research 88 (2013), p. 134-149. Elsevier

- [Pet08] PETRASCHKEK, T.: Modelle zur Vorhersage des Tragvermögens eines Kronendübels als alternativer Schubverbinder. Institut für Tragkonstruktionen – Stahlbau, Technische Universität Wien, Dissertation 2008
- [Wit10] WITTEL, F.: Eine kurze Einführung in die Finite Elemente Methode. ETH Zürich, Institut für Baustoffe. Skriptum (2010)
- [ZB14] STEURER, M.: Zwischenbericht zum Werkvertrag, VIF2012-Forschungsprojekt *SCSC-Platte*; 2. Ausschreibung 2012 (2.2.8 Entwicklung einer neuartigen Sandwich-Verbundfahrbahnplatte für Eisenbahnbrücken). Institut für Tragkonstruktionen – Stahlbau, Technische Universität Wien, Bericht 2014