



Dip.Ing. Martha Nerida Escobar Castillo

**Experimentelle und numerische Untersuchungen zum
Beulen von dünnen Scheiben aus UHPFRC unter
Druckbeanspruchung**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktorin der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Em. Univ.-Prof. Dip.-Ing.Dr.techn Lutz Sparowitz
Institut für Betonbau

Graz, September 2015

EIDESSTATATLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutz, und die den benutzen Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Ich möchte diese Gelegenheit nutzen, um meinen tiefen und herzlichen Dank zum Ausdruck zu bringen. Ganz besonders bei Em.O.Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr. Lutz Sparowitz und bei Unif.-Doz.Dipl.-Ing.Dr. Bernhard Freytag für ihre umfangreiche Unterstützung, konstruktive Kritiken und ganz besonders für die wertvolle und freundliche Betreuung. Ihre umfassenden fachlichen Erfahrungen, die zahlreichen Diskussionen und die nötigen Hinweise gaben mir die Zuversicht für die Vollendung dieser Arbeit.

Einen besonderen Dank möchte ich an dieser Stelle an den Institutsvorstand für Betonbau Univ.-Pro.Dr.-Ing.habil. Viet Tue Nguyen für Ihre große Unterstützung richten.

Meinen Dank möchte ich auch beim allen meinen Kollegen, insbesondere bei Dipl.-Ing. Josef Linder, Dipl.-Ing. Gehard Santner und Dipl.-Ing. Günter Heinzle ausdrücken, die mich während meiner Arbeit mit zahlreichen konstruktiven Ideen, wertvollen Vorschlägen und umfangreicher Hilfe unterstützt haben.

Ich möchte mich auch bei meinen Kollegen vom Labor für die große Bereitschaft und wertvolle Hilfe während der Herstellung der Versuchskörper und der Durchführung der Versuche bedanken.

Ich möchte mich auch bei all jenen bedanken, die diese Dissertationsarbeit unterstützten, im Besonderen bei

- dem Austrian Science Fund (FWF)
- den Französischen und Österreichischen Repräsentanten der Lafarge-Gruppe
- der Gustav Eirich GmbH
- der Fachhochschule Kärnten.

Kurzfassung

Die hohe Festigkeit des Ultra-Hochfesten Betons und der gute Verbund mit anderen Stoffen, wie Stahlfasern, eröffnen den Weg zu neuen konstruktiven Lösungen. Eine erhebliche Bedeutung bei diesen neuen Konstruktionen gewinnt die Schlankheit. Die hervorragenden Eigenschaften des UHPFRC ermöglichen das Bauen von außergewöhnlich dünnwandigen Bauelementen. Die Schlankheit solcher Konstruktionsteile führt zur starken Erhöhung der Beulgefahr, die im Normalfall in konventionellen Betonkonstruktionen keine Rolle spielen weshalb neue Bemessungsregeln erarbeitet werden müssen.

Hauptsächlich befasst sich die vorliegende Arbeit mit dem grundlegenden Verständnis des Tragverhaltens dünner UHPFRC-Scheiben unter Normalkraft. Anhand von zahlreichen experimentellen Untersuchungen, die einen großen Schlankheitsbereich abdecken und mit zuverlässigen numerischen Berechnungen wird diese Problematik ausführlich analysiert und der Tragmechanismus systematisch und detailliert erläutert. Dadurch werden die ersten Erkenntnisse des Beulverhaltens dünner UHPFRC-Scheiben unter Normalkraft erzielt.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird im letzten Teil der Arbeit die Bodenplatte einer Brücke mit Kastenquerschnitt numerisch analysiert. Die Plausibilität der Ergebnisse bestätigen, dass die Art und Weise der verwendeten FE-Simulation im ersten Teil dieser Arbeit auch sehr gut bei anderen Belastungsfällen und unterschiedlichen Randbedingungen verwendet werden kann.

Abstract

The high strength of UHPC and the good connection with other materials, such as steel fibers, open the way to new constructive solutions. The slenderness of these new structures becomes a significant importance. The excellent properties of UHPFRC allow the construction of unusual, extremely thin-walled construction elements. The slenderness of such construction components leads to a strong increase in the buckling failure risk, which normally does not occur in conventional concrete structures. Therefore, new rules for its structural design have to be developed.

This work mainly deals with the fundamental understanding of the load carrying behaviour of thin-walled UHPFRC panels under compression. Based on numerous experimental investigations, which cover a large area of slenderness and with reliable numerical calculations this Topic is extensively analyzed. The carrying behaviour is systematically explained in detail. Thereby, the first knowledge of the buckling behavior of UHPFRC thin-walled Panels under compressive forces can be achieved.

Based on these findings, the bottom plate of a bridge with box section is numerically analyzed in the last part of this work. The plausibility of the results confirms, that the way how the FE-simulation in the first part of this work was applied, can also be very well used with other load cases and different boundary conditions.

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG	4
ABSTRACT	4
1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	8
2 STAND DER TECHNIK	9
2.1 BEULTHEORIE	9
2.1.1 Linear-elastische Beultheorie	9
2.1.2 Nichtlineare Beultheorien	11
2.1.3 Traglasttheorie	11
2.1.4 Beulen einer imperfektionsbehafteten Platte	14
2.2 ULTRAHOCHFESTER BETON UHPC (ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE)	15
2.2.1 Eigenschaften.....	15
3 PLANUNG DES VERSUCHSAUFBAUS MITTELS FINITE ELEMENTE BERECHNUNG	18
3.1 NUMERISCHE ANALYSE DES GRUNDFALLS EINER VIERSEITIG GELAGERTEN QUADRATISCHEN SCHEIBE	19
3.1.1 Ideelle Beullast	19
3.1.2 Nichtlineare Berechnung der Quadratscheibe	21
3.1.3 Nicht lineare Materialmodelle (ABAQUS)	22
3.2 GEOMETRIE DES VERSUCHSKÖRPERS.....	23
3.2.1 Versuchskörpermodellierung.....	23
3.2.2 Ergebnisse der numerischen Berechnung	24
3.3 VERGLEICH DER ERGEBNISSE DER NUMERISCHEN BERECHNUNG DER VERSUCHSKÖRPERN MIT DER NUMERISCHEN BERECHNUNG DEN QUADRATSCHNITTEN.....	26
3.4 DETAILLIERTE AUSWERTUNG EINER AUSGEWÄHLTE VERSUCHSKÖRPER ALS GRUNDLAGE FÜR DIE MESSANORDNUNG	27
3.4.1 Tragverhalten des Versuchskörpers in Richtung x	28
3.4.2 Tragverhalten des Versuchskörpers in Richtung y	32
3.4.3 Schlussfolgerung.....	33
4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG	34
4.1 MATERIALEIGENSCHAFTEN DER VERSUCHSKÖRPER	36
4.1.1 Biegezugversuche	36

4.1.2	Ductal G®	37
4.1.3	E-Modul und Druckfestigkeit	38
4.2	HERSTELLUNG DER VERSUCHSKÖRPER	41
4.2.1	Schalung und Rahmenschalung	41
4.2.2	Betoniervorgang	43
4.2.2.1	Betoniervorgang der Beulserien 75-00 und 50-00	43
4.2.2.2	Betoniervorgang der Beulserie 100-00, 150-00 und 200-00	44
4.2.3	Eigenschaften der Versuchskörpern	46
4.2.3.1	Wandstärke / Imperfektionen	46
4.2.3.2	Vorkrümmung	52
4.2.3.3	Fasergehalt und Faserverteilung	55
4.2.3.4	Mechanische Eigenschaften des Versuchskörpers	71
4.3	VERSUCHSAUFBAU UND MESSANORDNUNG	72
4.3.1	Versuchsaufbau	72
4.3.1.1	Auslenkungskraft F_z (Planmäßige Imperfektion)	72
4.3.1.2	Belastung	73
4.3.1.3	Stahl Platte Befestigung (Einleitungsmanschetten)	74
4.3.2	Messanordnung und Montage der Messinstrumente	75
4.4	VERSUCHSAUFBAU UND AUSWERTUNG DER VERSUCHE GESTÜTZT DURCH NUMERISCHE ERGEBNISSE	85
4.4.1	Durchführung und Auswertung der Versuchsserie 50-00	86
4.4.1.1	Versuch 50-01	86
4.4.1.2	Versuch 50-02	87
4.4.1.3	Versuch 50-03	88
4.4.2	Durchführung und Auswertung der Versuchsserie 75-00	90
4.4.2.1	Versuch 75-02	91
4.4.2.2	Versuch 75-04	92
4.4.2.3	Versuch 75-01	92
4.4.3	Durchführung und Auswertung der Versuchsserie 100-00	95
4.4.3.1	Versuch 100-02	95
4.4.3.2	Versuch 100-01	100
4.4.3.3	Versuch 100-03	104
4.4.4	Durchführung und Auswertung der Versuchsserie 150-00	110
4.4.4.1	Versuch 150-01	110
4.4.4.2	Versuch 150-02	116
4.4.5	Durchführung und Auswertung der Versuchsserie 200-00	122
4.4.5.1	Versuch 200-01	122
4.4.5.2	Versuch 200-02	128
4.4.5.3	Versuch 200-03	136

4.5	SCHLUSSFOLGERUNG DER ERGEBNISSE	141
5	ZUM TRAGVERHALTEN DER VERSUCHSKÖRPER.....	142
5.1	TRAGVERHALTEN DER BEULSERIE 50-00 (SCHLANKHEIT 15).....	144
5.2	TRAGVERHALTEN DER BEULSERIE 75-00 (SCHLANKHEIT 22).....	146
5.3	TRAGVERHALTEN DER BEULSERIE 100-00 (SCHLANKHEIT 30).....	149
5.4	TRAGVERHALTEN DER BEULSERIE 150-00 (SCHLANKHEIT 40).....	152
5.5	TRAGVERHALTEN DER BEULSERIE 200-00 (SCHLANKHEIT 60).....	157
5.5.1	Einfluss der Druck-und Zugeigenschaften auf das Tragverhalten.....	162
5.6	SCHLUSSFOLGERUNGEN DES BEULTRAGVERHALTENS	164
6	NUMERISCHE BEULUNTERSUCHUNG DER DRUCKGURTSCHIEBE EINER BRÜCKE MIT KASTENQUERSCHNITT.....	166
6.1	ERGEBNISSE FÜR SCHEIBENDICKE 8 CM	169
6.2	ERGEBNISSE FÜR SCHEIBENDICKE 9 CM	171
6.3	TRAGFÄHIGKEIT DER SCHEIBEN.....	172
6.4	SCHLUSSFOLGERUNG	173
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	174
8	LITERATURVERZEICHNIS	180

1 Einleitung und Zielsetzung

Die mechanischen Eigenschaften von ultrahochfestem Beton haben sich in den letzten Jahren im Vergleich zum Normalbeton sehr weit entwickelt, diese neuen Eigenschaften eröffnen den Weg zu neuen konstruktiven Lösungen, welche deutliche Vorteile bieten.

In Verbindung mit Stahlfasern zeigt der UHPC sehr hohe Festigkeiten, was das Bauen von äußerst dünnwandigen Elementen ermöglicht und neue Versagensmechanismen wie das Beulen oder Stabilitätsversagen auftreten können, welche bis jetzt im klassischen Stahlbetonbau keine wesentliche Rolle spielten. Die Schlankheit derartiger Bauteile übersteigt den üblichen Bereich, weshalb neue Bemessungsregeln erarbeitet werden müssen.

Im vom Austrian Science Fund (FWF) geförderten Projekt *UHPC-Panels* (L280-N07) werden die notwendigen Grundlagen zu dieser Thematik erforscht. Gedanklicher Ausgangspunkt der Untersuchungen sind dünnwandige Brückenquerschnitte, wo sowohl die Bodenplatte im Stützbereich als auch die Stege nicht nach bestehenden Vorschriften bemessen werden können. Dieses Projekt gliedert sich in drei Teile: Schub, Normalkraft-Beulen und Schub-Beulen. Die vorhinadene Arbeit befasst sich mit dem Fall Normalkraft-Beulen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die grundlegenden Erkenntnisse über das Tragverhalten und die Versagensmechanismen von dünnwandigen UHPFRC Scheiben unter Druckbeanspruchung zu gewinnen und zu verstehen. Zu diesem Zweck wurden umfangreiche theoretische Recherchen sowie zahlreiche numerische Analysen und experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die einen großen Schlankheitsbereich abdecken. Die Auswertung und Interpretation der Versuchsergebnisse werden ebenfalls mit ausführlichen numerischen Berechnungen ergänzt.

Um die experimentell gewonnenen Erkenntnisse auf beliebige Belastungen und Lagerungsbedingungen übertragen zu können, bedarf es verlässlicher numerischer Simulationen. Daher soll in dieser Arbeit auch die Tauglichkeit bestehender FE-Software für die realitätsnahe Wiedergabe der gegenständlichen Phänomene geprüft werden.

Ein sehr relevanter Punkt in dem Ablauf dieser Arbeit ist, das Last-Beulverformungs-Diagramm der dünnen, stabilitätsgefährdeten Scheiben genau zu interpretieren, um die kritischen Zeitpunkte des Tragverhaltens zu erkennen. Diese Analyse soll einerseits dazu beitragen, die Auswertung der Laborergebnisse zu vereinfachen und andererseits den Tragmechanismus der UHPFRC Scheibe besser zu verstehen. Um verlässliche experimentelle Last-Beulverformungs-Diagramme zu bekommen wurde für die Laborversuche eine spezielle Regelungstechnik entwickelt, mit der das plötzlich eintretende Stabilitätsversagen so langsam abläuft, dass es sowohl messtechnisch als auch visuell über die Traglast hinaus erfasst werden kann.

Ein weiteres relevantes Thema ist der Einfluss einiger Parameter wie der Wandstärke und des Fasergehalts auf das Beulverhalten der Scheiben, welches in der Arbeit ausführliche analysiert wird.

Im letzten Teil dieser Arbeit wird aufbauend auf den erzielten Erkenntnissen die Bodenplatte einer Brücke mit Kastenquerschnitt numerisch untersucht. Der Zweck ist die kleinste Scheibendicke zu ermitteln, für die kein Beulgefahr besteht und die Tragfähigkeit zu überprüfen.

2 Stand der Technik

2.1 Beultheorie

Unter dem Konzept "Beulen" versteht man die Instabilität dünnwandiger Flächentragwerke, in deren Ebene Normalspannungen und/oder Schubspannungen wirken. Unter idealen Voraussetzungen handelt es sich bei Plattenbeulen um ein Verzweigungsproblem. [1].

Wie beim Knicken eines zentrisch gedrückten Stabes tritt auch beim Beulen ein kritischer Belastungszustand auf, bei dem sich das System in einem indifferenten Gleichgewichtszustand befindet. Diese kritische Belastung wird ideale Beulspannung genannt (lineare Beultheorie).

Im Gegensatz zum Knicken und Kippen, bei denen die elastische Knicklast die obere Grenze der Tragfähigkeit darstellt, kann die Last einer ausgebeulten Platte noch über die ideale Beullast erhöht werden, diese Belastbarkeit "wird überkritisches Tragverhalten" genannt.

2.1.1 Linear-elastische Beultheorie

Die linear elastische Beultheorie stützt sich auf das Verzweigungsproblem des Gleichgewichts. Ein Verzweigungsproblem liegt vor, wenn für ein verformbares System neben der idealisierten Ursprungslage eine benachbarte Gleichgewichtslage möglich ist. Das Gleichgewicht wird indifferent [2].

Idealisierungen der linearisierten Beultheorie sind:

- bei Belastungsbeginn ideal ebene Platte
- ideal mittige Lasteinleitung
- ideal elastischer, isotroper Werkstoff
- die Beulverformung rechtwinklig zur Plattenebene ist klein
- keine Eigenspannung

Die Last bei der sich der plötzlichen Auslenkung der Platte eintritt und dabei der Gleichgewichtslage der Platte zu einem labilem Zustand übergeht wird als Verzweigungslast oder kritische Beullast bezeichnet, die Platte übergeht nach diesem Zustand zu einem überkritischen Bereich, dieses Verhalten liegt im Bereich der nicht linearen Beultheorie.

Im Jahr 1891 gelang Bryan [3] als Ersten die Differentialgleichung (2-1) der Beulfläche aufzustellen und auf rein theoretischem Wege die ideale Beullast zu ermitteln. Unter Berücksichtigung des Gleichgewichtes der perfekten Platte, kann die Differentialgleichung einer Platte (Bild 2-1) als Folge geschrieben werden.

Beulgleichung einer Platte

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \Delta \Delta w = \frac{N_x \partial w}{B \partial x^2} \quad (2.1)$$

- ν Querdehnungszahl
- w Verformung der Platte, lotrecht zur Plattenebene
- N_x Normalkraft pro Längeneinheit ($N_x = \sigma_x \cdot t$)
- E Elastizitätsmodul
- t Plattendicke
- B Plattensteifigkeit bezogen auf die Einheitsbreite b

$$B = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2.2)$$

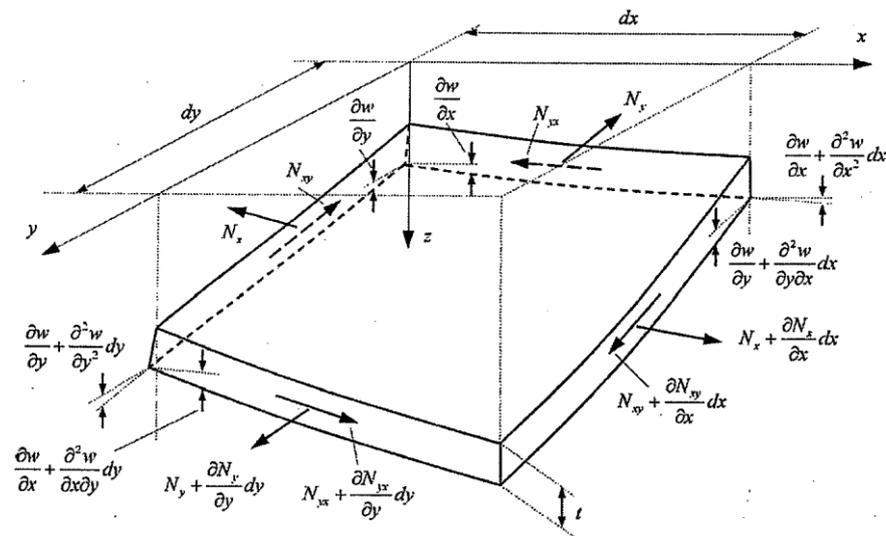


Bild 2-1 Gleichgewichtsbedingungen an einem Plattenelement [4]

Geschlossene Lösungen der Differentialgleichung lassen sich nur für die einfachsten Fälle finden. Unter der Annahme, dass die Scheibenverformung die sinusförmige Verläuft der Gleichung (2.3) besitzt, kann für das vorliegende System durch Einsetzen von w (2.3) in (2.1) die ideale Beullast ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der Plattenrandbedingungen und bei Annahme einer Halbwelle in Querrichtung ergibt sich nach Integration der Gleichung (2.4). Die ideale Beulspannung wird dann mit der Gleichung (2-6) ermittelt, diese hängt von der Anzahl der Halbwellen in Längs- und Querrichtung und dem Seitenverhältnis a/b der Scheibe ab (Bild 2-2)

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} w_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2.3)$$

- m Anzahl der Halbwellen der Beulfigur in x Richtung [5]
- n Anzahl der Halbwellen der Beulfigur in y Richtung [5]

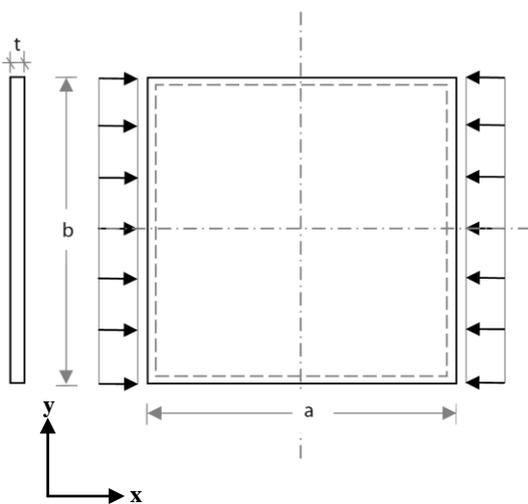


Bild 2-2 Scheibe unter Druckkraft

Ideelle Beullast:

$$N_{cr} = \left(\frac{mb}{a} + \frac{a}{bm} \right)^2 \frac{\pi^2 Et}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (2-4)$$

K Beulwert

$$K = \left(\frac{mb}{a} + \frac{a}{bm} \right)^2 \quad (2-5)$$

Ideelle Beulspannung:

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{t} = K \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (2.6)$$

Aus der Gleichung 2-6 ist zu sehen, dass der Beulwert direkt proportional zur ideellen Beullast ist. Unter konstanter Druckbeanspruchung und bei Seitenverhältnissen $a/b=1$ erreicht der Beulwert den minimalen Wert 4. Ab einem Seitenverhältnissen $a/b > 1$ ändert sich der Beulwert nur sehr geringfügig. Trägt man K über die Seiten Verhältnis a/b (Bild 2-2) für gegebene m auf, erhält man

für verschiedene Halbwellen eine so genannte Girlandenkurve (Bild 2-3). Je größer das Verhältnis a/b ist, umso größer wird die Anzahl der Halbwellen. In der Literatur [5] finden sich Angaben zu den Beulwerten "K" für unterschiedliche Randbedingungen und Belastungsarten.

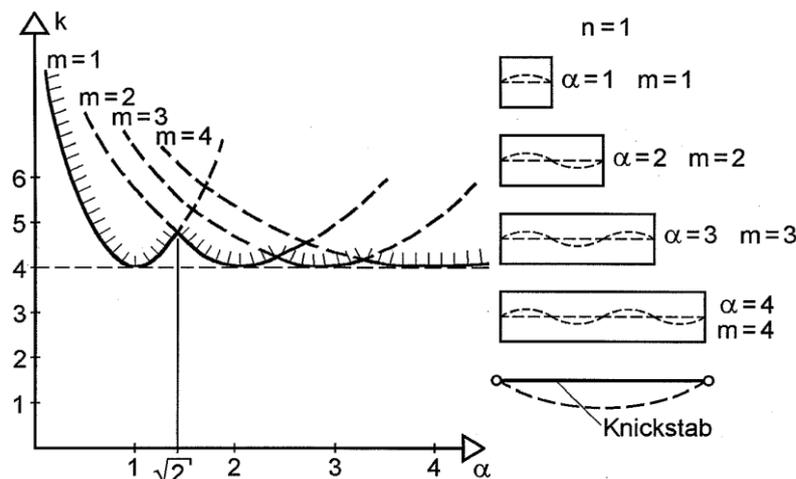


Bild 2-3 Girlandenkurve einer druckbeanspruchten Scheibe [2]

α – Seitenverhältnissen, $\alpha = a/b$

2.1.2 Nichtlineare Beultheorien

Die erste mathematische Formulierung der Differentialgleichungen des nichtlinearen Beulverhaltens von Platten wurde erstmals von Kármán [6] hergeleitet [(2.7) und (2.8)]. Wegen des hohen Rechenaufwands gegenüber der numerischen Lösung wird die Anwendung der nicht linearen Beultheorie als Grundlage für FE-Programme verwendet.

$$B \left(w'''' + 2w'''' + w'''' \right) + t \left(\sigma_x w'' + 2\tau_{xy} w'' + \sigma_y w'' \right) = q_z(x, y) \quad (2.7)$$

$$\sigma_x'' - 2\tau_{xy}' + \sigma_y'' = E \left(w'' - w'' w'' \right) \quad (2.8)$$

$$' = \frac{\partial}{\partial x}, \quad \bullet = \frac{\partial}{\partial y}$$

B – Plattensteifigkeit

2.1.3 Traglasttheorie

Konzept der wirksamen Breite

Bei der nicht linearen Beultheorie kann die Last über die Verzweigungslast hinaus erhöht werden. Dabei bildet sich nach dem Überschreiten der kritischen Beullast durch die zunehmende Verformung w der Platte senkrecht zur Plattenebene und durch die Spannungumlagerungen ein räumlicher Membranspannungszustand σ_y , aus (Bild 2-4), der von der Steifigkeit der Ränder abhängt. Diese Membranzugspannungen wirken entgegen der Plattenverformung und bewirken eine beträchtliche Steigerung der Tragreserve, die als überkritische Tragreserve bezeichnet wird. Im überkritischen Bereich sind die Spannungen nicht mehr gleichmäßig verteilt, wie bei der linearen Beultheorie, aufgrund der zunehmenden Verformung w verlagern sich die Druckspannungen σ_x immer mehr von dem mittleren ausgebeulten Bereich zu den steiferen Plattenrändern hin (Bild

2-4). Die Lastabtragung wird dann im überkritischen Bereich hauptsächlich von diesen steiferen Rändern mehr übernommen. [1], [7].

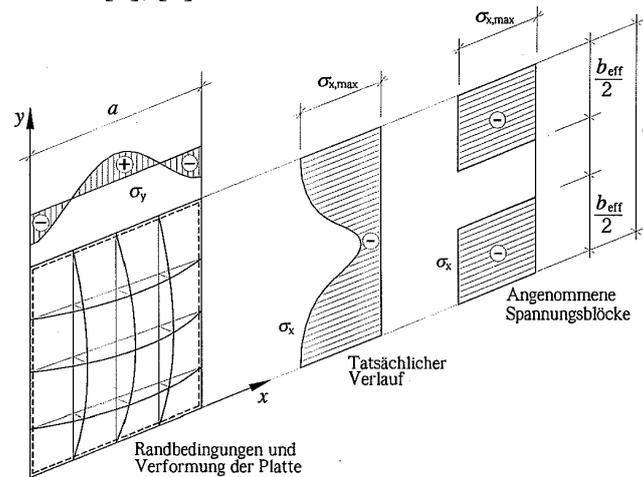


Bild 2-4 Wirksame Breite einer zentrisch gedrückten Scheibe [7]

Wegen des komplexen Verhaltens einer Platte im überkritischen Bereich ist für die praktische Berechnung sinnvoll die Einführung einer wirksamen Breite zu berücksichtigen. Das Konzept der wirksamen Breite geht von der Idee aus, dass die tatsächliche Spannungsverlauf am Plattenrand durch fiktive Spannungsblöcke mit dem Größtwert $\sigma_{x,max}$ (Bild 2-4) ersetzt wird, diese Spannungsblöcke wirken auf einer reduzierten Breite, die als wirksame Breite bezeichnet wird b_{eff} [7].

Eine der bekanntesten Definitionen der wirksamen Breite geht auf Kármán [6] zurück, er ging davon aus, dass die Maximalspannung am Plattenrand σ_{max} durch die ideale Beulspannung σ_{cr} einer fiktiven Platte begrenzt wird. Der Beulwert K der fiktiven Platte gleich dem Beulwert K der tatsächlichen Platte [7].

$$\sigma_{cr} = K \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (2.10)$$

$$\sigma_{max} = K \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b_{eff}}\right)^2 \quad (2.11)$$

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{max}} = \left(\frac{b_{eff}}{b}\right)^2 \quad (2.12)$$

Daraus lässt sich die wirksame Breite ermitteln:

$$b_{eff} = b \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{max}}} \quad (2.13)$$

σ_{max} Maximalspannung am Plattenrand

σ_{cr} ideale Spannung der Platte unter Berücksichtigung der Gesamtbreite b

Im Allgemeinen wird der Größtwert σ_{max} mit der Fließgrenze f_y ersetzt

$$\frac{b_{eff}}{b} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{max}}} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}} \quad (2.14)$$

Analog zum Knicken wird eine bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ wie folgt definiert:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\sigma_{fy}}{\sigma_{cr}}} \quad (2.15)$$

$\bar{\lambda}_p$ bezogene Plattenschlankheit

Es ergibt sich somit:

$$\frac{b_{eff}}{b} = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \quad (2.16)$$

Die rechte Seite der Gleichung kann als Abminderungsfaktor κ aufgefasst werden.

$$\kappa = \frac{b_{eff}}{b} = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \quad (2.17)$$

Die Verzweigungslast der linear elastischen Beultheorie ist durch die quadratische Hyperbelfunktion (2.18) gegeben.

$$\kappa = \frac{1}{\bar{\lambda}_p^2} \quad (2.18)$$

Da die geometrischen und strukturellen Imperfektionen der Platte in der Beziehung (2.13) nicht berücksichtigt wurde, liefert die Theorie von Kármán [6] ungünstige Ergebnisse. Eine Erweiterung der von Kármán'schen Lösung wurde von Winter [8] vorgeschlagen (2.19), durch die Einführung eines Reduktionsfaktors wird diese Imperfektionen berücksichtigt [7].

$$k = \frac{b_{eff}}{b} = \left(\frac{1}{\bar{\lambda}} - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_p^2} \right) \leq 1 \quad (2.19)$$

Bild 2-5 zeigt den Einfluss der bezogenen Schlankheit auf den Abminderungsfaktor κ . Mit zunehmender Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ liegen die Traglasten nach Winter [8] und Kármán [6] deutlich über der Verzweigungslast nach Euler. Dieses Verhalten zeigt die überkritische Tragreserve der Platten.

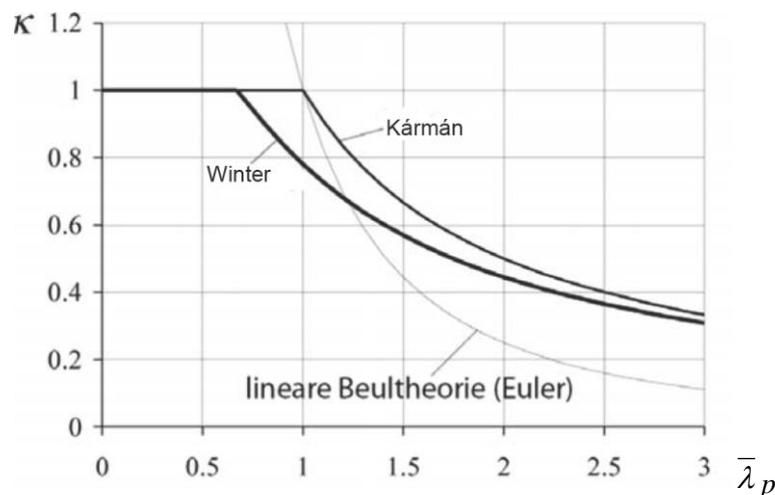


Bild 2-5 Vergleich Winterkurve, Kármán'scher Kurve, Eulerhyperbel [7]

2.1.4 Beulen einer imperfektionsbehafteten Platte

Tatsächlich hergestellte Platten sind nicht perfekte Eben, sie besitzen von Anfang an eine Vorverformung. Diese unvermeidbaren Imperfektionen können je nach ihrer Größe einen beträchtlichen Einfluss auf das Beulverhalten haben.

Eine Erweiterung der Theorie von Kármán [6] ist die Formulierung von Marguerre (1937) [9], [10], er berücksichtigt als Erster die Anfangsverformung einer Platte w_0 .

Das Tragverhalten einer imperfektionsbehafteten Platte kann wie bei einer perfekten ebenen Platte in zwei Bereiche aufgeteilt werden. In einen Teil bis zum Erreichen der ideellen Beulspannung (Verzweigungslast) und in einem Bereich über die ideale Beulspannung (überkritischer Bereich) (Bild 2-6).

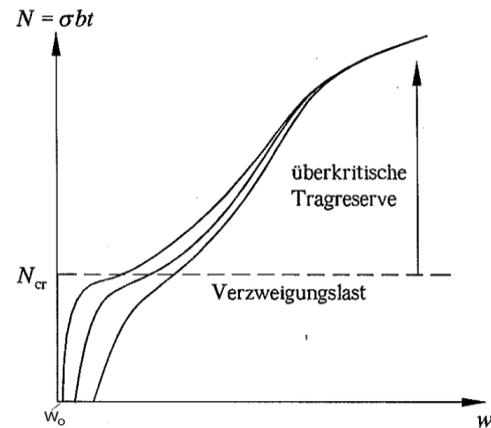


Bild 2-6 Tragverhalten einer imperfektionsbehafteten Platte [7]

Mit der vorgeschlagenen Gleichung von Wolmir (1962) [11], lässt sich die Last-Verschiebungskurve einer imperfekten Platte ermittelt.

$$\sigma = E \left(\frac{t}{a} \right)^2 \left\{ \frac{\pi^2}{3(1-\nu^2)} + \frac{\pi^2}{8} \left[\left(\frac{w}{t} \right)^2 + 3 \frac{w}{t} \frac{w_0}{t} + 2 \left(\frac{w_0}{t} \right)^2 \right] \right\} \frac{w}{w + w_0} \quad (2.9)$$

w_0 Anfangsverformung einer Platte

Ausreichend Information über diese Thematik ist in [4], [5], [7] und [13] zu finden.

2.2 Ultrahochfester Beton UHPC (Ultra High Performance Concrete)

Als ultrahochfest bezeichnet man in der Regel Betone, die eine Druckfestigkeit von mehr als 150 N/mm² aufweisen. Dank ihrer extrem hohen Gefügedichtigkeit zeigen Sie eine außergewöhnliche Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit. Im Vergleich zum Normalbeton und hochfestem Beton ist der UHPC aufgrund des sehr kleinen Gehalts an Kapilarporen nahezu vollständig dicht gegenüber Wasser und chemisch greifenden Stoffen (z.B. Chloride) und wird dadurch widerstandsfähig gegen Frost.

Voraussetzung für eine maximale Gefügedichtigkeit, ist die Optimierung der granulometrischen Zusammensetzung des Gesteinsmehls und der Bindemittel. Als Bindemittel werden neben Zementen hoher Festigkeitsklassen reaktive Zusatzstoffe, insbesondere Silikatstäube verwendet. Aufgrund des geringeren Wasserbedarfs und des hohen Anteils von Bindemittel werden hochwirksame Fließmitteln angewendet, um eine Verflüssigung des Gemisches zu erzielen.

Die Verbindung mit anderen Stoffen, wie Stahlfasern ist sehr gut, dadurch wird der Beton duktil und kann eine Zugfestigkeit über 15 N/mm² erreichen, was den Weg zu neuen konstruktiven Lösungen eröffnet.

2.2.1 Eigenschaften

Grobe Gesteinkörnung

Bei der Auswahl der groben Gesteinkörnung werden nur feste Gesteinkörnungen eingesetzt. Die Druckfestigkeiten dieser sollten grundsätzlich mindestens 200 N/mm² betragen. Am häufigsten werden quarzitisches Gesteinkörnungen und Basalt verwendet [15].

Bei der Wahl der Gesteinkörnung ist darauf zu achten, dass die Steifigkeit der Gesteinkörnung sich nicht wesentlich von der Steifigkeit des Zementsteines unterscheidet. Anderenfalls kann es zu Spannungsspitzen und infolge dessen zu Mikrorissen kommen. Diese können zu einem Steifigkeitsverlust führen.

Je nach der Größe des Größtkorns unterscheidet man zwischen ultrahochfesten Feinkornbetonen mit einem Größtkorn ≤ 1 mm und grobkörnige UHPC über 1mm. Meisten wird als der höchste Größtkorn ≤ 2 mm verwendet. Es wurden aber auch ultrahochfester Betonen mit 8 mm Größtkorn entwickelt [16] [17].

Quarzmehle

Sie dienen als Mikrofüller, durch Ansetzen von Quarzmehl erhöht sich die Packungsdichte und verringern damit den Wasser- und des Bindemittelsbedarf [16]. Sein mittlerer Korndurchmesser beträgt 10 μ m. Und ist besonders bei ultrahochfesten Betonen, der wärmebehandelt wird, eingesetzt. Anstelle von Quarzmehl konnte auch Hüttensand oder Kohlenfluchasche verwendet werden.

Zement

Bei der Herstellung des ultrahochfesten Betons werden in wesentlichen Portlandzementen der Festigkeitsklasse 42,5 und 52,2 verwendet. Besonders geeignet sind Zemente mit geringerem C₃A-Gehalt und mit hohem Sulfatwiderstand (HS), diese Zemente haben einen niedrigeren Wasseranspruch als normale Portlandzemente. Es können aber auch hüttensandhaltige Zemente höherer Festigkeitsklasse eingesetzt werden [16], [17]

Nach [16], [17] haben die HS-Zemente den Vorteil das chemische Schwinden zu begrenzen, verbessern die Verarbeitbarkeit des Frischbetons und erlauben höhere Nachbehandlungstemperaturen ohne Risiken hinsichtlich einer Sekundär-Ettringitbildung.

Silikatstaub

Der Hauptbestandteil von Silikastaub ist amorphes Siliciumdioxid (SiO_2). Die Silikastaubkörner können zwischen 0,1 und 0,3 μm liegen.

Aufgrund ihrer Gestalt und Größe wirkt die Silikapartikel als Mikrofüller der kleinen Hohlräume zwischen den Zusatzstoffpartikeln und den Zementkörnern, deren Größe zwischen 5 und 20 μm liegen. Dadurch erhöht sich die Packungsdichte und reduziert sich der Wasserbedarf der Mischung [17].

Durch die puzzolinische Reaktion zwischen den SiO_2 - und den $\text{Ca}(\text{OH})_2$, die durch den Hydrationsprozess des Zementes entsteht, bilden sich Calciumsilikathydrate (CSH). Diese chemische Reaktion reduziert das Calciumhydroxid-Anteil des Gemisches, verringert die Porosität und hat dadurch einen festigkeitssteigernden Effekt [18].

Fasern

Durch die Zugabe von Fasern wird die Duktilität des Betons wesentlich verbessert, ohne diese verhält sich der UHPC sehr spröde und versagt schlagartig. Als Fasern werden in der Regel Stahlfasern mit einer Zugfestigkeit von über 2000 N/mm^2 verwendet. In bestimmten Fällen ist die Anwendung von Kohlenstoff- und Kunststofffasern (korrosionsfrei) möglich. In besonderen korrosionsbeanspruchten Bereichen können auch Fasern aus Edelstahl vorteilhaft sein [16].

Durch die Verwendung von Stahlfasern im UHPC lässt sich die innere Rissausbreitung verhindern, dadurch verbessert sich das Nachbruch-Tragverhalten und erhöhen sich deutlich die Zug- und Biegedruckfestigkeit.

In Allgemeinen können die Durchmesser der Stahlfasern zwischen 0,1 und 0,20 mm, und die Faserlänge zwischen 9 und 17 mm liegen. Die Festlegung der optimalen Faserlänge richtet sich nach der jeweiligen Rezeptur und der Größtkorndurchmesser. Die Wirksamkeit der Fasern in der Betonmatrix ist von dem Verhältnis der Faserlänge und Faserndurchmesser (L/D) abhängig und sollte zwischen 40-65 liegen [16], [17]. Bei höheren Werten kann eine Agglomeration der Fasern entstehen. Als Fasermenge werden 2,5 bis 3,5 Vol-% empfohlen [18]. Es wurde aber festgestellt, dass bis 2,5 Vol-% Fasergehalt eine eindeutige Steigerung der Druck- und Biegezugfestigkeit erreicht wird.

Fließmittel

Wegen der hohen Feinstoffanteil und des geringeren Wassergehalts (w/b -Wert $\leq 0,25$) werden für die Herstellung des ultrahochfesten Betons hoch wirksame Fließmittel erforderlich. Geeignet sind Fließmittel auf Basis von Polyacrylaten und Polycarboxylatethern (PCE) [17], [18]. Durch Anwendung solcher Fließmittel im UHPC lässt sich das Agglomerieren des Zementes und der Feinstoffe begrenzen. Die Mischung erreicht damit einer fließfähigen Konsistenz [16]. Je nach dem verwendeten Zementtypen können diese Fließmittel sehr unterschiedlich wirken.

Mechanische Eigenschaften

Das Spannungsdehnungs- Verhalten beim ultrahochfesten Beton ohne Fasern [16] verhält sich fast bis zur Hochlast linear elastisch. Nach diesem Zeitpunkt folgt ein spröder Bruch. Die Zugabe von Stahlfasern verhindert den Rissfortschritt und verbessert eindeutig das Nachbruchtragverhalten auf Zug wie auf Druck [16]. Das Nachbruchverhalten wird von der Fasergehalt, Fasergeometrie, Faserorientierung, Verbund zwischen Fasern und Matrix und Steifigkeit der Faser abhängig. Der Einfluss der Stahlfasern in der steigenden Spannungsdehnungs-Beziehung [16] ist gering.

In der Regel kann die Druckfestigkeit bei UHPC 200 N/mm^2 erreichen. Bei moderater Wärmebehandlung können diese sich bis zu ca. 250 N/mm^2 erhöhen [18]. Bei 90 °C Wärmebehandlung kann die Druckfestigkeit bis 400 N/mm^2 ansteigen.

Je nach Betonzusammensetzung, Gesteinskörnung, Druckfestigkeit und Prüfverfahren wurde nach [18] für UHPC Elastizitätsmoduls-Werte bis ca. 70000 N/mm² gemessen. In der Regel liegen die E-Modulswerte zwischen 45 und 55 N/mm².

Die Zugfestigkeiten ultrahochfester Betonen sind von der Betonzusammensetzung abhängig. Mit der Zugabe von Stahlfaser wird das Nachbruchtragverhalten auf Zug deutlich verbessert. Typische Zugfestigkeits-Werte liegen in der Größenordnung zwischen 7 bis 11 MPa [16].

Je nach der Mischungs-Zusammensetzung des UHPC kann die Biegezugfestigkeit in der Regel zwischen 15 und 40 N/mm² liegen.

Dauerhaftigkeit

Aufgrund der sehr dichten Mikrostruktur und der niedrigeren Kapillarporosität zeigt der UHPC einen hohen Widerstand gegen aggressive Angriffe. Untersuchungen zeigten, dass bei einem Wasserzementwert nicht größer als 0,22 die UHPC praktisch kapillarfrei ist. [16]. Bei einer Wärmebehandlung erreichen die Kapillarporenanteile nur noch 1,5 bis 1,8 Vol.%. Mit diesen Eigenschaften ist UHPC praktisch dicht gegen Flüssigkeiten, Gase und auch Chloride. Somit hat der ultrahochfeste Beton im Vergleich zum normal oder hochfesten Beton eine wesentlich höhere Dauerhaftigkeit.

Eine ausführliche Information über den bisherigen Stand des Wissens des UHPC ist in den Publikationen [16], [18], [17], [18], [19], [20], [21] zu erhalten.

3 Planung des Versuchsaufbaus mittels Finite Elemente Berechnung

Für den Erfolg des Versuches ist eine gewissenhafte Planung des Versuchsaufbaues und die wirklichkeitsnahe numerische Voraussage der Auswirkungen (Verformung, Spannungen, etc.) unter den geplanten Einwirkungen (Lastpfad) während der Versuchsdurchführung ausschlaggebend. Nur wenn man das Tragverhalten des Versuchskörpers vorweg genau kennt, kann man die Anordnung der Messaufnehmer und die erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen zielführend planen.

Für die Planung des Versuchsaufbaus wurde zuerst der Grundfall des Beulens an quadratischen Scheiben analysiert. Die erzielten Ergebnisse wurden nicht nur als Basis für die Festlegung der Geometrie des Versuchskörpers angewendet, sondern auch als Vergleichspunkt für das tatsächliche Tragverhalten des Versuchskörpers herangezogen.

Für die Berechnungen der numerischen Simulation wurde die Finite Elemente Methode Abaqus angewendet. Dieses Kapitel enthält eine Beschreibung des Rissmodells für die UHPC. Die angewendeten Material-Eigenschaften wurden aus den Messergebnissen des Biegezugversuches (siehe Kapitel 4.1.1) und aus der Dissertation “Die Glasbeton-Verbundbauweise” [22] übernommen.

Ein weiterer Teil dieses Kapitels befasst sich mit der Modellierung des Versuchskörpers, die Abmessungen des Versuchskörpers wurden so ausgewählt, dass es sich der Scheibe nur einwellig in der Mitte beult.

Die Ergebnisse der FE- Simulation werden so dargestellt, dass das überkritische Tragverhalten der Versuchskörper ersichtlich bleibt. Ein genereller Überblick des Tragverhaltens wird auch in einem Last-Verschiebungs-Diagramm dargestellt.

Da die Abmessungen der Versuchskörper große Dickenunterschiede zeigten, wurde für die Festlegung der Schlankheit des Versuchskörpers die Dicke des Bereiches der Scheibe, welcher eine ziemlich homogene Wandstärke zeigte, herangezogen. Damit wird sichergestellt, dass die Fasernorientierung, die von der Dicke stark beeinflusst wird, in allen Versuchskörpern annähernd gleich ist. Für diesen Zweck werden die erhaltenen Abmessungen der Quadratscheiben ($d \times d$) aus Kapitel 3.3 berücksichtigt. Die Schlankheit wird bei konstanter Wandstärke durch Variation der Scheibengröße ermittelt (d/t) (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1 Schlankheit des Versuchskörpers

Schlankheit d/t				
Beulserie 50-00	Beulserie 75-00	Beulserie 100-00	Beulserie 150-00	Beulserie 200-00
15	22	30	44	60

Um den Versagensmechanismus des Versuchskörpers verstehen zu können, wurde vor dem Versuch eine detaillierte Analyse des Tragverhaltens eines ausgewählten Versuchskörpers (150-240) durchgeführt. Die Vorgehensweise dieser Untersuchung dient als Grundlage für die Auswertung der Versuchsergebnisse im Kapitel 5.

3.1 Numerische Analyse des Grundfalls einer vierseitig gelagerten quadratischen Scheibe

3.1.1 Ideelle Beullast

Die erste Untersuchung des Versuchskörpers wurde mit einer numerischen Beulanalyse an einfach vierseitig gelagerten UHPC Quadratscheiben durchgeführt. Für den Zweck wurde die ideale Beullast mittels der Gleichung (5-2) ermittelt und die numerische Berechnung für das nichtlineare Verhalten der Quadratscheiben mit dem Finite Element Programm Abaqus durchgeführt.

Die Randbedingungen von den vertikalen und horizontalen Rändern der Scheiben wurden so gestellt, dass eine Verschiebung aus der Ebene (u_z) verhindert bleibt. Um mögliche horizontale Verschiebung zu vermeiden wurden die Knoten 1, 2, 4 in x Richtung gesperrt und zusätzlich die Knoten 3, 4, 5 in y Richtung festgehalten (Bild 3-1).

$$\text{Ideelle Beulspannung} \quad \sigma_{cr} = K \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (5-1)$$

$$\text{Kritische Beullast} \quad N_{cr} = \sigma_{cr} \cdot b \cdot t \quad (5-2)$$

- a Scheibenhöhe
- b Scheibenbreite
- t Wandstärke der Scheibe
- E E-Modul
- ν Querdehnzahl
- K Beulwert, für $a/b = 1$, $K = 1$

Zuerst wurden die ideellen Beullasten von mehreren Quadratscheiben ($a=1\text{m}$, $b=1\text{m}$) mit unterschiedlichen **Wandstärken** (t) gerechnet. Die Scheiben sind von zwei gegenüber liegenden Seiten auf Druck belastet (Bild 3-1). Der Zweck besteht darin, die minimale Wandstärke der Scheibe zu schätzen, die einerseits die Herstellung des Versuchskörpers ermöglicht und andererseits die höchste aufnehmbare Last des Versuchskörpers die maximale Prüflast im Labor nicht überschreitet. Die Ergebnisse sind im Bild 3-2 dargestellt.

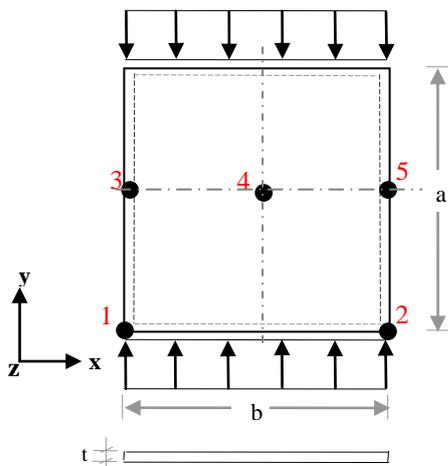


Bild 3-1 Quadratscheibe unter Druck

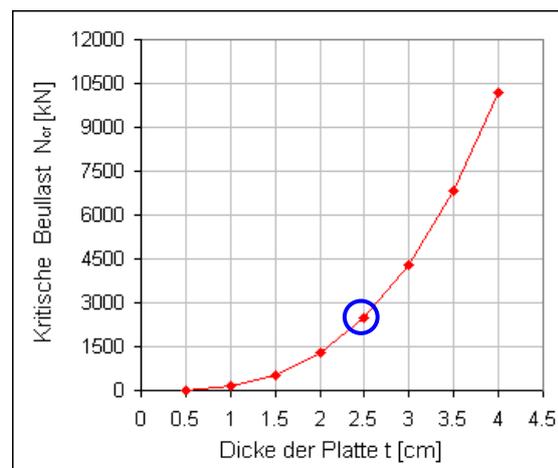


Bild 3-2 Lasttragfähigkeit der Scheibe mit unterschiedlichen Wandstärke

Da im Labor die verwendete Prüfmaschine eine maximale Prüflast von 4000 kN zur Verfügung stellt und da die Herstellung von großen UHPC Scheiben (>200cm Breite) mit einer Wandstärke unter 2,5 cm schwierig ist, wurde für die weitere Analyse des Beulenverhaltens der Scheibe eine Wandstärke von 2,5 cm ausgewählt (blau markierte Stelle im Bild 3-2).

Als nächstens wurde die **ideelle Beullast** von mehreren Quadratscheiben mit unterschiedlichen Dimensionen aber mit der konstanten Wandstärke von 2,5 cm ermittelt. Je größer die Dimensionen der Scheibe desto geringer wurde die Tragfähigkeit. Mit den erzielten Ergebnissen lassen sich die Dimensionen der Versuchkörper abgrenzen. Aufgrund der Tragfähigkeit wird die geringste Breite mit 0,75 m angenommen und, um Herstellungsproblem zu vermeiden, als maximale Breite 2,5 m.

Die als Ergebniss erzielte kritische Beullast, wurde hier in einem Last-Breitediagramm (Eulerhyperbel) dargestellt (Bild 3-3), in dem gleichen Diagramm wurde auch die Materialversagensgrenze abgebildet (schwarze Gerade).

Bild 3-4 zeigt die Tragfähigkeit der Scheiben in Bezug auf ihre Schlankheiten (λ_k), welche als ein Abminderungsfaktor-Schlankheitsdiagramm dargestellt ist. Nach der im Stahlbau verwendeten Theorie ist die maximale Beullast für die Scheiben erreicht, wenn die kritische Beulspannung (σ_{cr}) die Fließgrenze (f_y) des Materials erreicht ($k=1$). Bei $k=1$ geht die Versagensart von so genanntem Spannungsfall ($k < 1$) in einem Stabilitätsfall ($k > 1$) über. In der vorhandenen Analyse tritt der Fall bei der Scheibe mit den Dimensionen 75cm x 75 cm ein. Die entsprechende maximale kritische Beullast beträgt 3300 kN.

Die bis jetzt erlangten Ergebnisse werden als Basis für die Festlegung der Geometrie des Versuchkörpers verwendet.

$$\text{Schlankheiten} \quad \lambda_k = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}} \quad (5-3)$$

$$\text{Abminderungsfaktor} \quad k = \frac{\sigma_{cr}}{f_y} \quad (5-4)$$

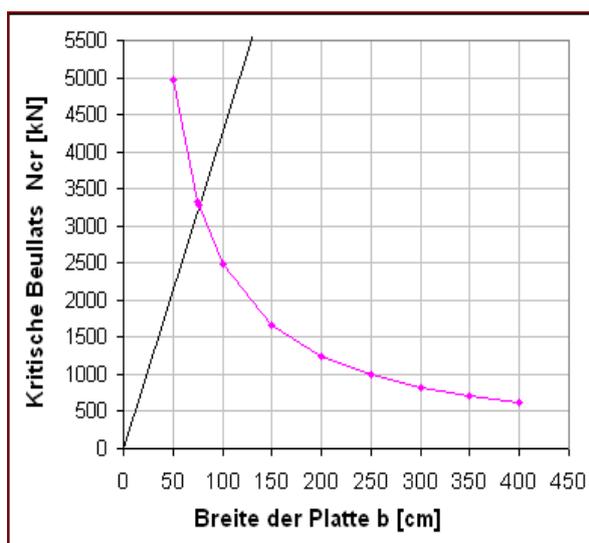


Bild 3-3 Lasttragfähigkeit der Quadratscheiben

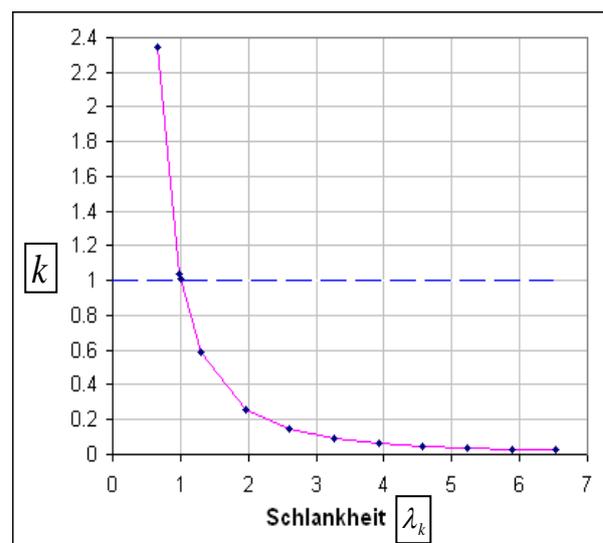


Bild 3-4 Tragfähigkeit im Bezug auf die Schlankheit

3.1.2 Nichtlineare Berechnung der Quadratscheibe

Mit den im Punkt 3.1.1 festgelegten Dimensionen der UHPC Scheiben wurden die nichtlinearen Berechnungen mit dem Programm Abaqus durchgeführt. Für die Modellierung der Quadratscheibe wurden 3D Scheiben Elemente S8R5 verwendet. Für den Druckbereich wurden die Arbeitslinie von [22] übernommen und für den Zugbereich wurden die Messergebnisse aus dem Biegezugversuch verwendet (Kapitel 4.1.1). Die numerische Simulation wurde mit einer 1 mm Imperfektion in der Form der ersten Eigenform durchgeführt.

Die Ergebnisse der nichtlinearen Berechnungen (grüne Verlauf) sind zusammen mit den Ergebnissen des linearen Verhaltens (rosa Verlauf) der Quadratscheiben in einem Last- Breite Diagramm dargestellt (Bild 3-5), in dem gleichen Diagramm wurde auch die Materialversagenslinie eingezeichnet (schwarze Gerade).

Im Stahlbau wird das Tragverhalten von Scheiben, deren kritische Beullasten über der Eulerkurve liegen (rosa Verlauf) als ein überkritisches Tragverhalten bezeichnet. Nach den Ergebnissen der numerischen Berechnungen ist ab einer Scheibenbreite von 200 cm ein solches Verhalten gegeben. (Bild 3-5.)

Im Bild (Bild 3-6) sind die gleichen Ergebnisse in Form einer Traglast-Verschiebung Diagramm dargestellt. Die Kurvenverläufe für die Quadratscheiben, welche ein überkritisches Tragverhalten aufweisen, zeigen bis zum Ende der Kurve einen kontinuierlich ansteigenden Verlauf.

Die Scheibe mit 50 cm Breite zeigt ein reines Druckspannungsversagen (hellblauer Verlauf). Bei einer Scheibenbreite von 75 cm stellt sich ein ausgeprägtes Kurvenmaximum (Instabilität) ein, mit einem abfallenden Kurvenverlauf hinter dem Maximum.

Die hier erzielten Ergebnisse werden als Vergleichspunkt der numerischen Simulation des untersuchten Versuchskörpers verwendet.

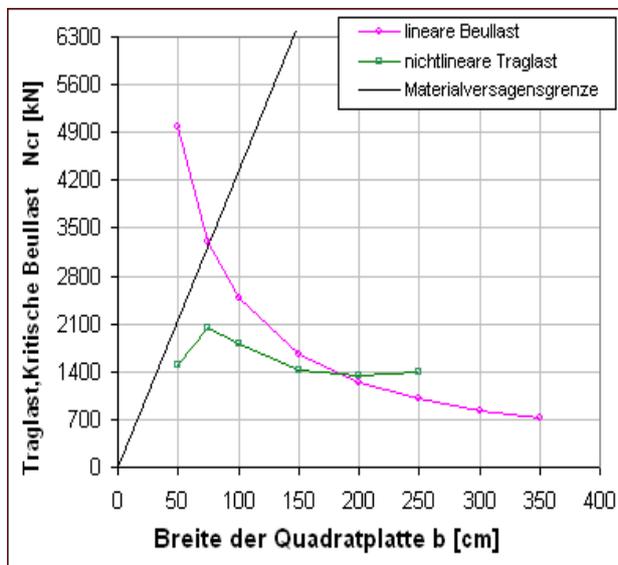


Bild 3-5 Lineares und nichtlineares Verhalten der Quadratscheiben

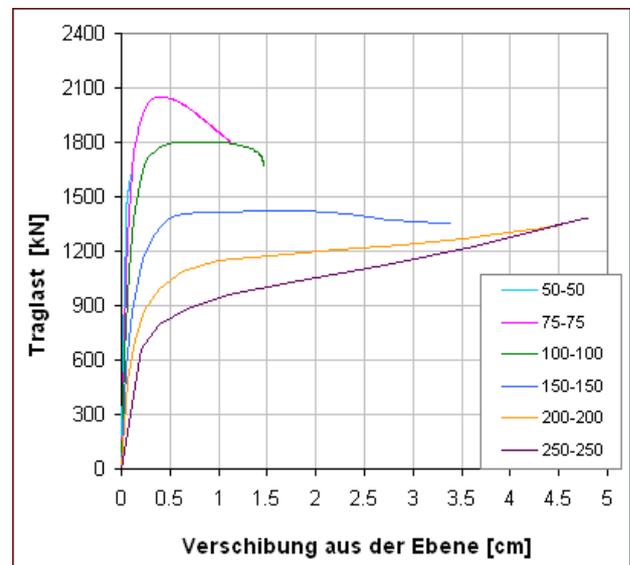


Bild 3-6 Kraft-Verschiebungs-Diagramm der Quadratscheiben

3.1.3 Nicht lineare Materialmodelle (ABAQUS)

Rissmodell für UHPFRC ([22], [23])

Das in Abaqus Programm implementierte Materialmodell für Beton basiert auf der verschmierten Rissmodellierung im Zugbereich und einem Plastizitätsmodell in Druckbereich.

Abaqus verwendet das Modell gleichmäßig verteilter Mikrorisse. Dabei gehen einzelne Makrorisse nicht direkt in das Berechnungsmodell ein. Das auftreten von Rissen spiegelt sich viel mehr in einer veränderten Materialsteifigkeit wieder. Überschreitet der Spannungstensor in einem Integrationspunkt die im Bild 3-7 gezeigte biaxiale Versagenskurve im Zug-Zug oder Zug-Druck-Bereich, geht das isotrope Materialgesetz in ein orthotropes über.

Die Rissrichtung ist durch den Hauptspannungszustand knapp vor der Rissbildung bestimmt und bleibt für den jeweiligen Integrationspunkt bis zum Ende der Berechnung erhalten. Risse können sich während der Berechnung wieder schließen und Druckkräfte übertragen. Das Nachrissverhalten bei Dehnungszunahmen in bereits gerissenem Bereich ist durch das Zugversteifungsmodell bestimmt. Dieses Nachrissverhalten ist durch die Spannungs-Dehnungs-Beziehung Bild 3-7 gelegt.

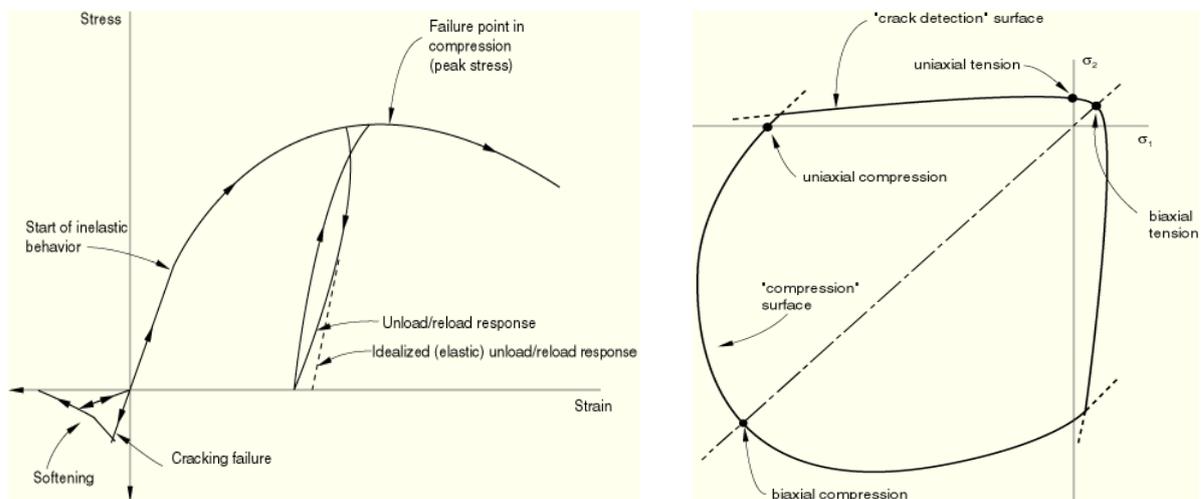


Bild 3-7 Einaxiale und biaxiale Versagenskriterien [23]

Für die Modellierung des Materials wird ein in Abaqus zur Verfügung stehendes Modell verwendet, bei dem sowohl die Zug- als auch die Druckarbeitslinie für einaxiale Beanspruchung als Polygon im Spannungs-Dehnungs-Raum angegeben werden kann.

Die Form der Druckarbeitslinie für das verwendete Material Ductal® wird eigenen Vorarbeiten entnommen [22] und mittels Druckversuchen an Würfeln sowie E-Modul-Prüfungen an Prismen entsprechend den Vorgaben in [31] an die vorhandenen Gegebenheiten angepasst.

Die Spannungs-Dehnungsbeziehung der Zugseite wird durch numerische Nachrechnung von 4-Punkt-Biegeversuchen an 5 cm dicken Scheibenstreifen aus demselben Material iterativ ermittelt (siehe 4.1.1). Das biaxiale Risskriterium wird in Abaqus durch einen Verlauf nach Lubliner [24] ergänzt durch Änderungen von Lee und Fenves [25] beschrieben. Für UHPFRC gibt es zwar erste experimentelle Untersuchungen im Zug-Druck-Bereich [31], eine Versagenskurve lässt sich daraus aber nicht ableiten, da von der im Experiment aufgebrachten Zugbeanspruchung nur die Dehnung bekannt ist. Aus diesem Grund werden mit Ausnahme der Berechnung der Serie 200 (siehe Bild 5-37) die im Programm für Normalbeton vorgeschlagenen Werte verwendet. Für den Druck-Druck-Bereich wird auf Angaben für UHPFRC in [32] zurückgegriffen.

3.2 Geometrie des Versuchskörpers

3.2.1 Versuchskörpermodellierung

Die Modellierung des Versuchskörpers erfolgte mit den Finiten Elementen Programm Abaqus. Es wurden 3D Scheibenelemente (S8R5) mit acht Knoten und reduzierter Integration über 4 Integrationspunkte angewendet. Der Versuchskörper besteht aus einer UHPC Scheibe, UHPC Flanschen und einer Last (Einleitungs-Konstruktion) aus Stahl.

Auf den vertikalen unbelasteten Rändern der Scheibe sind Flanschen angeordnet, welche die Verschiebung der Ränder aus der Ebene (u_z) verhindert, aber auf Grund der geringen Torsionssteifigkeit der Flansche sind Verdrehungen möglich. Der obere und untere Teil der Scheibe bleibt eingespannt. Die Belastung F_y wird über eine Einleitungs-konstruktion aus Stahl an den Versuchskörper weiter geleitet (Bild 3-8). Die Scheibe, Flansche und die Einleitungs-konstruktion wurden als ein Körper modelliert (Bild 3-9).

Aufgrund des komplexen Herstellungsprozesses der Versuchskörper wurde für die Wandstärke der Scheibe 2,5cm angenommen, für die Scheibenbreite (b) wurden 50cm, 75cm, 100cm, 150cm und 200cm ausgewählt.

Für die Dimensionierung der Scheibenhöhe (a) wurde ein Verhältnis in Bezug auf die Scheibenbreite gesucht, welche zulässt, dass der Versuchskörper nur einwellig in der Mitte beult. Damit sollte auch die entstehende Beulfigur im mittleren Bereich des Versuchskörpers eine ähnliche Form und ein ähnliches Verhalten wie die Beulfigur einer Quadratscheibe mit der Breite und Höhe " d " (Bild 3-8) aufweisen. Wie im Abschnitt 3.3 ausführlich begründet wird, stellt sich die im Bild 3-8 skizzierte quadratische Ersatzscheibe ($d \times d$) unter den realen Randbedingungen des Versuchskörpers ein, wenn das Seitenverhältnis des Versuchskörpers $1,6b$ beträgt.

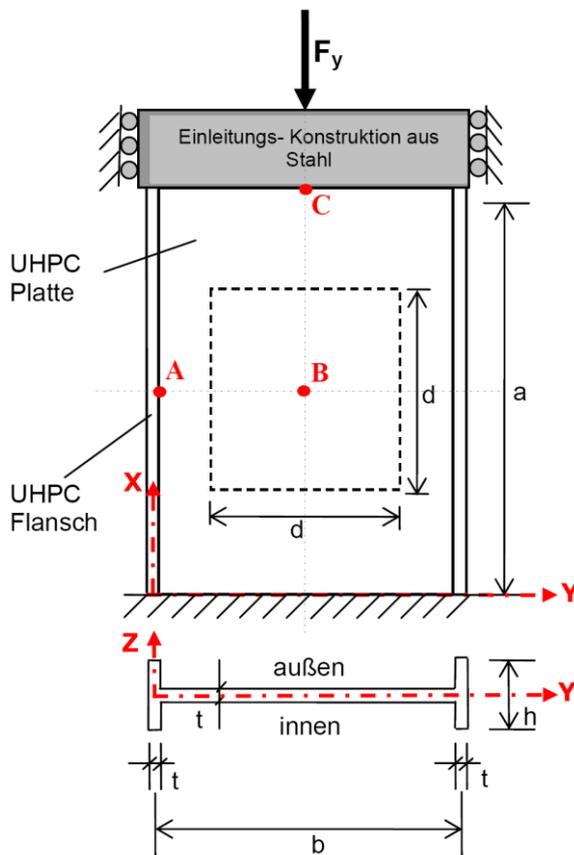


Bild 3-8 Versuchsanordnung

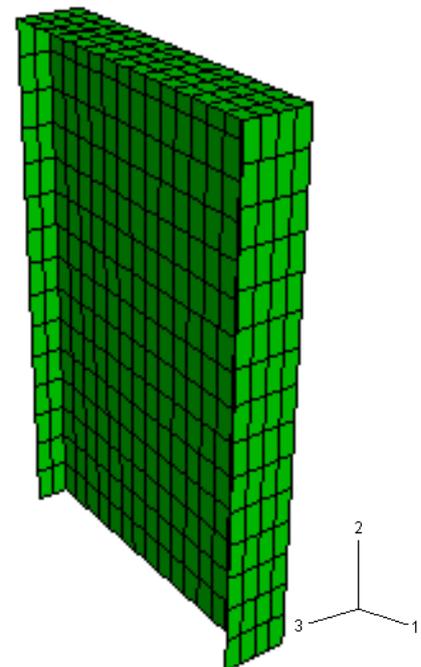


Bild 3-9 FE- Modell eines Versuchskörpers

Dimensionierung der Flansche: Das Ziel ist, dass das Last-Verschiebungsdiagramm für die Scheibenmitte B (Bild 3-8) ein gleiches oder sehr ähnliches Verhalten aufweist, wie die von einer Quadratscheibe. Dabei spielt die Höhe der Flansche “ h ” eine bedeutende Rolle. Um die Dimensionierung der Flansche festzulegen, wurden der Versuchskörper mit unterschiedlichen Flanschhöhen (h) modelliert, die ideelle Beullast ermittelt und dann das lineare Beulverhalten analysiert. Die Wandstärke der Flansche wurde gleich wie bei der Scheibe mit 2,5 cm angenommen.

Die Ergebnisse dargestellt in einer Last-Breite Diagramm (Bild 3-10) zeigt die ideelle Beullast der Versuchskörper mit drei Flanschhöhen $h = b/5$, $b/10$ und $b/15$. Als Vergleichskurve wurden im gleichen Diagramm die kritischen Beullasten der Quadratscheiben mit Dimensionen “ $b \times a$ ” von Kapitel 3.1.1 (Bild 3-3) eingezeichnet (Bild 3-10, blaue Kurve).

Der Kurvenverlauf des Versuchskörpers mit der Flanschhöhe $h=b/5$ (Bild 3-10, violette Kurve) zeigt die beste Übereinstimmung mit der Quadratscheibe. Wenn auch beide Kurven nicht genau übereinstimmen wird für die weiteren Untersuchungen die Flanschhöhe $h=b/5$ angenommen.

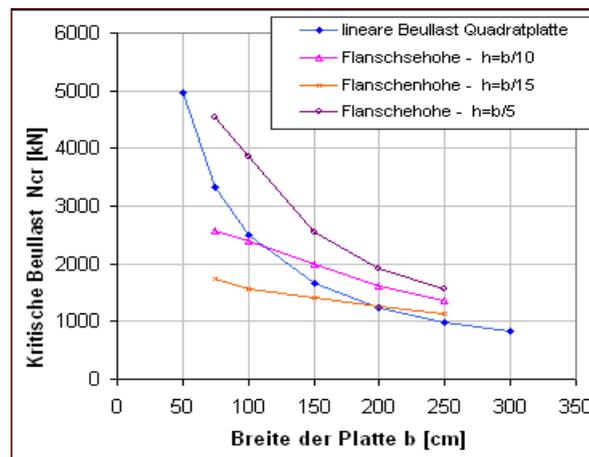


Bild 3-10 Lineares Verhalten der Versuchskörper mit verschiedener Höhe der Flansche

3.2.2 Ergebnisse der numerischen Berechnung

Für die numerische Simulation wurde gleich wie im Kapitel 3.1.2 eine Imperfektion von 1 mm in der Form der ersten Eigenform angewendet. Das lineare und nichtlineare Beulverhalten der modellierten Versuchskörper zeigt ein sehr ähnliches Verhalten wie das der Quadratscheiben (siehe Kapitel 3.1.1 und 3.1.2). Die Ergebnisse zeigen, dass bei linearem Verhalten (Bild 3-11, rosa Kurven) die Versuchskörper mit 50 cm und 75 cm Breite eine ideelle Beullast aufweisen, die weit über der Materialversagensgrenze (Bild 3-11 schwarze Linie) liegen. Deshalb ist für beide Versuchskörper im Laborversuch ein Materialversagen zu erwarten.

Als Ergebnis der nichtlinearen Berechnung (grüne Kurve) erhält man Traglastwerte, die bei den Versuchskörpern ab einer Breite von $b=2$ m über der ideellen Beullast (Eulerhyperbel) liegen. Wie bereits in der Analyse des nichtlinearen Verhaltens der Quadratscheiben erwähnt wurde, ist ab dieser Schlankheit das überkritische Tragverhalten des Versuchskörpers zu berücksichtigen.

Um eine bessere Vorstellung des Beulverhaltens zu erhalten, wurden die Ergebnisse auch als Normkraft- Verschiebungsdiagramm dargestellt (Bild 3-12). Die Verschiebung aus der Ebene wurde für die Scheibenmitte B (Bild 3-8) dargestellt.

Da die Tragfähigkeit des Versuchskörpers mit der Breite $b=150$ cm ungefähr seiner ideellen Beullast entspricht (Bild 3-11), wird ab dieser Schlankheit ein überkritisches Beulverhalten erwartet. Das Lastverschiebungsdiagramm weist ab dieser Schlankheit in Vergleich zu den kleinen Versuchskörpern einen steileren Verlauf auf. Die maximale Normkraft wird etwa am Ende der berechneten Kurve erreicht (Bild 3-12, rosa Kurve).

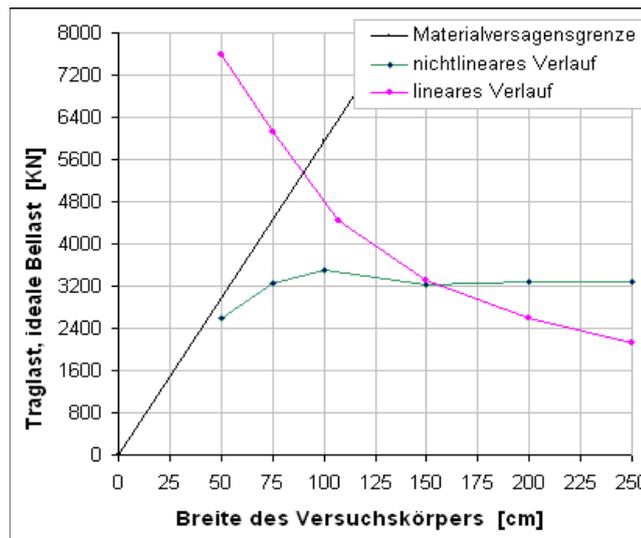


Bild 3-11 Ideale Beullast und nichtlineares Verhalten des Versuchskörpers

Die Versuchskörper 75/120 und 100/160 (Bild 3-12, hellblaue und blaue Kurve) zeigen Kurvenverläufe mit einem ausgeprägten Maximum (Instabilitätspunkt) und dahinter mit einem abfallenden Kurvenast. Es handelt sich hier um echtes Beulversagen. Beim kleinsten Versuchskörper 50/80 (Bild 3-12, orange Kurve) tritt dagegen ein so genannter Spannungsfall auf. Das heißt dieser Versuch bricht durch ein Druckversagen des Materials (UHPC).

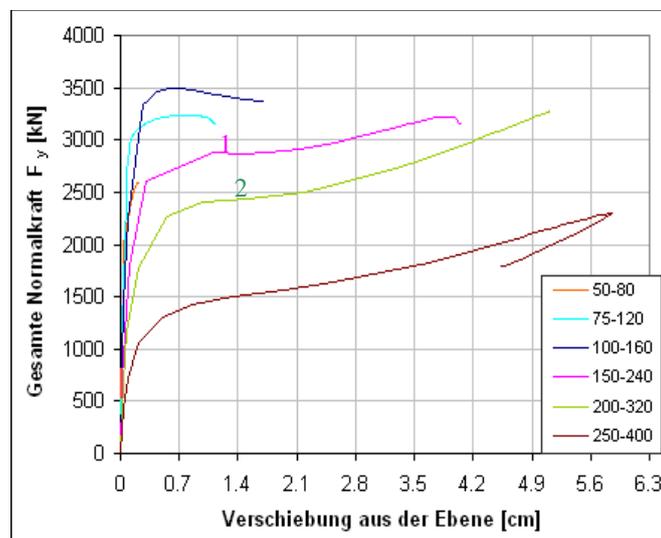


Bild 3-12 Last-Verschiebungsverlauf aus FE- Simulationen

Nach einer ausführlichen Analyse der FE- Ergebnisse lässt sich ableiten, dass für den Versuchskörper 150/240 das Erreichen der kritischen Beullast und der Übergang zu einem überkritischen Beulverhalten sich mit einem leichten Lastausfall in dem Last- Verschiebungsdiagramm manifestiert (Bild 3-12, rosa Kurve, Zeitpunkt 1) und als einen Wendepunkt bei den größeren Schlankheiten zu erkennen ist (Bild 3-12, grüne Kurve, Zeitpunkt 2). Es wird darauf hingewiesen, dass je größer der Versuchskörper wird, desto schwieriger lässt sich diesen Übergang zu erkennen. Für die weiteren Untersuchungen des Beulverhaltens wurde nicht zuletzt wegen des schwierigen Herstellungsprozesses die größte Abmessung des Versuchskörpers auf 200cm x 320cm begrenzt.

3.3 Vergleich der Ergebnisse der numerischen Berechnung der Versuchskörpern mit der numerischen Berechnung den Quadratscheiben

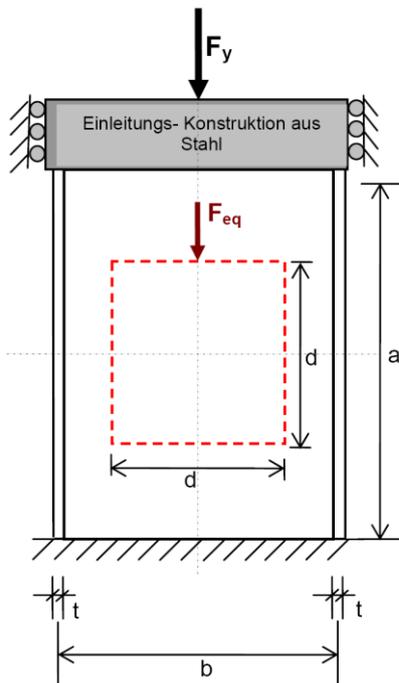


Bild 3-13 Versuchskörper mit der Quadratscheibe ($d \times d$)

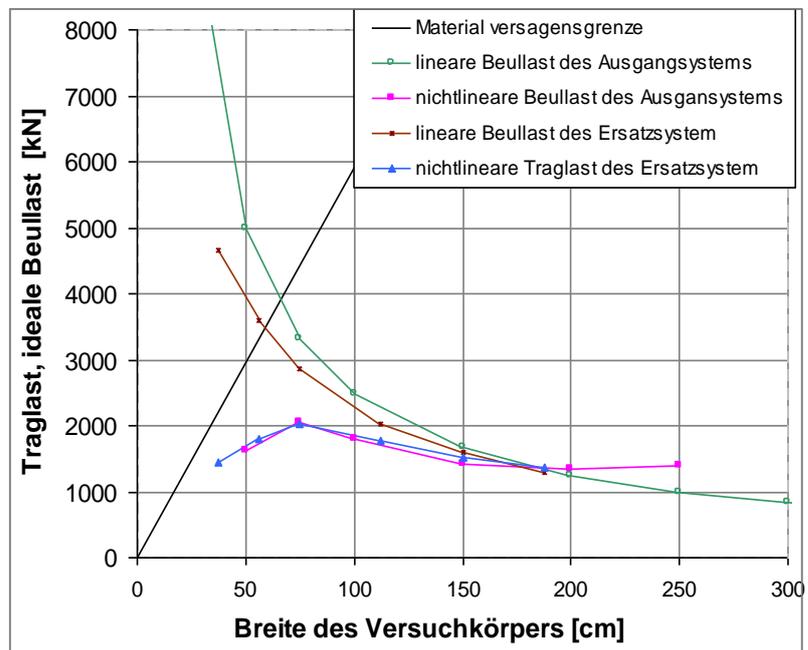


Bild 3-14 Berechnete Traglasten und ideale Beullasten am Ausgangs- und Ersatzsystem

Mit der Überlegung, dass sich im mittleren Teil des Versuchskörpers ein Beulverhalten ähnlich wie von einer Quadratscheibe manifestiert [Bild 3-13 ($d \times d$)], wird zunächst ein Vergleich zwischen den Beulverhalten einer Quadratscheibe mit den Dimensionen " $b \times a$ " (siehe Kapitel 3.1.1 und 3.1.2), die als Ausgangsystem definiert wird und einer fiktiven Quadratscheibe mit den Dimensionen " $d \times d$ " (Bild 3-13), die als ein Ersatzsystem bezeichnet wird durchgeführt. Die fiktive Quadratscheibe ($d \times d$) sollte sich im mittleren Bereich des Versuchskörpers ausbilden (Bild 3-13, roter strichlierter Quadrat).

Der Zweck ist einen linearen und nicht linearen Kurvenverlauf der fiktiven Quadratscheiben ($d \times d$) zu erhalten, welcher so gut wie möglich dem linearen und nicht linearen Tragverhalten der Quadratscheiben des Ausgangsystems ($b \times a$) entspricht.

Dafür wurde für die untersuchten Dimensionen der fiktiven Scheibe ($d \times d$) eine Ersatzbreite " d " gesucht, die als einen äquivalenten Wert der Breite des Ausgangsystems (b) ermittelt wird ($d = b_{eq}$). Am Schluss wurde für die Ersatzbreite ein äquivalenten Wert von $d = 0,74b$ festgestellt, die solche Überlegungen abdecken.

Mit der auf diese Weise festgelegten Dimension " d " wurde aus dem Ergebnissen der numerischen Berechnung des Ausgangsystems die auf die Breite d entfallende Lastenteil entnommen, welche als eine äquivalenten Kraft F_{eq} definiert wurde (Bild 3-13). Dieser Vorgang wurde für jeden Versuchskörper durchgeführt.

Die Ergebnisse, dargestellt in einem Last-Breitediagramm (Bild 3-14), zeigen, dass sowohl die linearen Kurvenverläufe als auch die nichtlinearen Kurvenverläufe des Ausgangsystems und Ersatzsystems zwar nicht gleich sind, aber doch ziemlich gut zusammenpassen. Damit kann man zusammenfassen, dass sich im mittleren Bereich des Versuchskörpers tatsächlich ein sehr ähnliches Beulverhalten einstellt, wie bei der Ersatz-Quadratscheibe. Es drängt sich hier der Vergleich mit Druckstäben auf, wo man ebenfalls mit einer Ersatzstablänge nämlich der Knicklänge arbeitet.

3.4 Detaillierte Auswertung einer ausgewählte Versuchskörper als Grundlage für die Messanordnung

In diesem Teil der Arbeit wird das Beulverhalten eines gewählten perfekten ebenen Versuchskörpers ausführlich analysiert. Der Vorgehensweise dieser Analyse wird als Ausgangspunkt für die im Kapitel 4.4 Nachrechnung des Tragverhaltens des Versuchskörpers genommen. Die erzielten Ergebnisse werden verwendet, um die Anordnung des Messaufnehmers im Versuchskörper festzulegen.

Nach den numerischen Berechnungen weisen die Versuchskörper mit großen Schlankheiten ein ähnliches Beulverhalten auf. Abgesehen davon zeigen die FE-Berechnungen bei diesen Schlankheiten ein überkritisches Tragverhalten. Deshalb wird die Analyse an dem Versuchskörper mit der Abmessungen 150 cm x 240 cm durchgeführt. Der Versuchskörper wurde, wie mehr Fach erwähnt, mit der konstanten Wandstärke von 2,5 cm modelliert. Außerdem wird eine Imperfektion affin zur ersten Eigenform von 1mm angestrebt. Die verwendete Arbeitslinie für diesen Teil der Arbeit ist die gleiche wie bei der numerischen Berechnung des Biegezugversuches (siehe Kapitel 4.1.1).

Für eine einfache Auslegung der Ergebnisse wurde einige Parameter und Stellen im Versuchskörper definiert (Bild 3-15). Der mittlere Teil des Versuchskörpers (Scheibe) wird als **Platte** bezeichnet. Die horizontale Verschiebung der Scheibe in z Richtung wird als **Beulverformung** bezeichnet. Es wird je nach der Beulverformung eine Außen- und Innenseite der Platte definiert.

Die Stellen **A** (Einspannstellen) und **B** (Plattenmitte) werden bei Beulen am meisten beansprucht (Bild 3-15). Aus der numerischen Analyse ergab sich, dass sich in den Flanschen keine hohen Beanspruchungen einstellen. Deswegen dies wurde für die Untersuchung des Tragverhaltens nicht berücksichtigt.

Im Bild 3-15 ist die Scheibe ohne Flansche und Lasteinleitungsstruktur dargestellt, diese enthält einige Bezeichnungen, die in den folgenden Ausführungen verwendet werden. Zusätzlich ist im gleichen Bild das verwendete Koordinatensystem (x, y, z) dargestellt. Ausführliche Auswertungen wurden nur in den am meist gefährdeten Stellen ausgeführt (**A, B**).

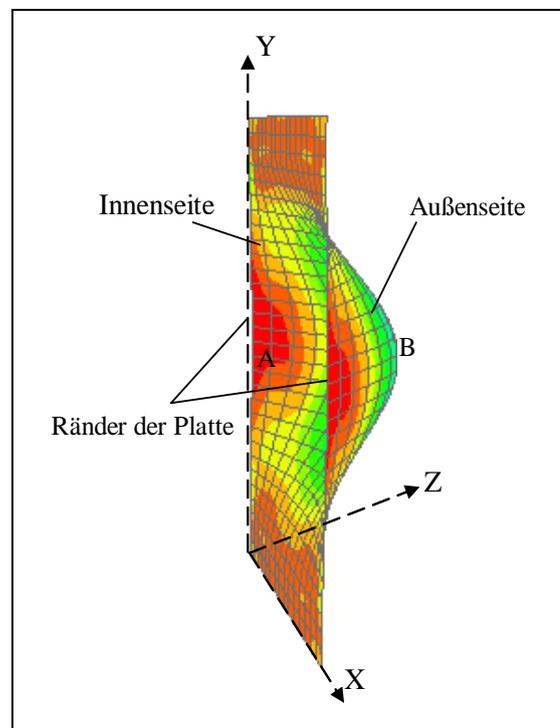


Bild 3-15 Definition einiger Bezeichnungen in der Scheibe

Um das Tragverhalten der Platte genau zu verstehen, wurde die Analyse in einer Außen- und Innenseite getrennt. Es sollte auch erwähnt werden, dass diese Untersuchungen vor dem Herstellen des Versuchskörpers durchgeführt wurden.

3.4.1 Tragverhalten des Versuchskörpers in Richtung x

Außenseite ($S_{11} = \sigma_{11}$)

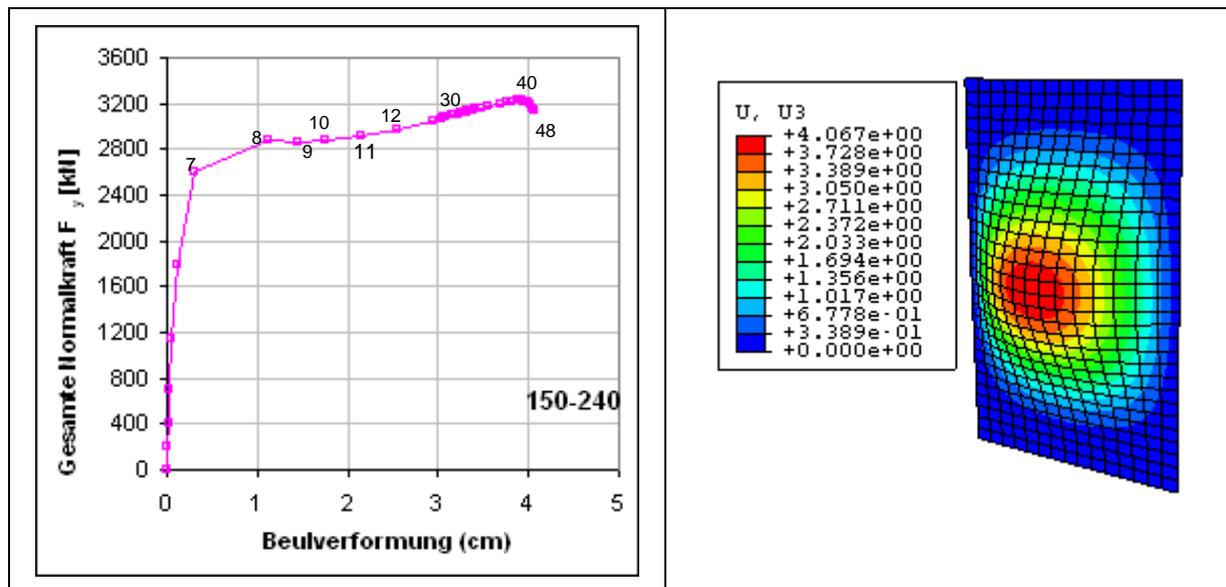


Bild 3-16 Last-Verschiebungsdiagramm

Bild 3-17 Beulverformung- Zeitpunkt 48

Im (Bild 3-16) sind die berechneten Horizontalverschiebungen w (in z Richtung) des Mittelpunktes B in Abhängigkeit der einwirkenden vertikalen Last F dargestellt. Auf dem Kurvenverlauf sind einige Punkte mit Nummern bezeichnet, die jeweils eine bestimmte Phase des Tragverhaltens repräsentieren. Zusätzlich ist im Bild 3-17 die Beulverformung der Platte am Ende der FE-Berechnung dargestellt. Der Kurvenverlauf zeigt eine stetige Zunahme der Kraft bis zum Zeitpunkt 7 die Matrixfestigkeit $0,9 \text{ kN/cm}^2$ in der Plattenmitte erreicht wurde. Nach diesem Zeitpunkt nimmt die Beulverformung (im B) stark zu.

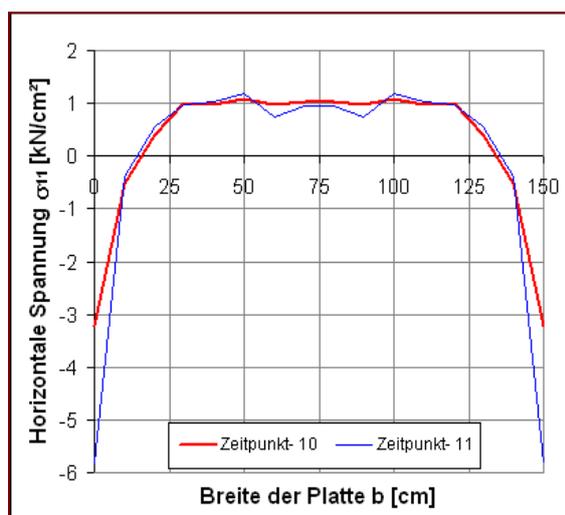
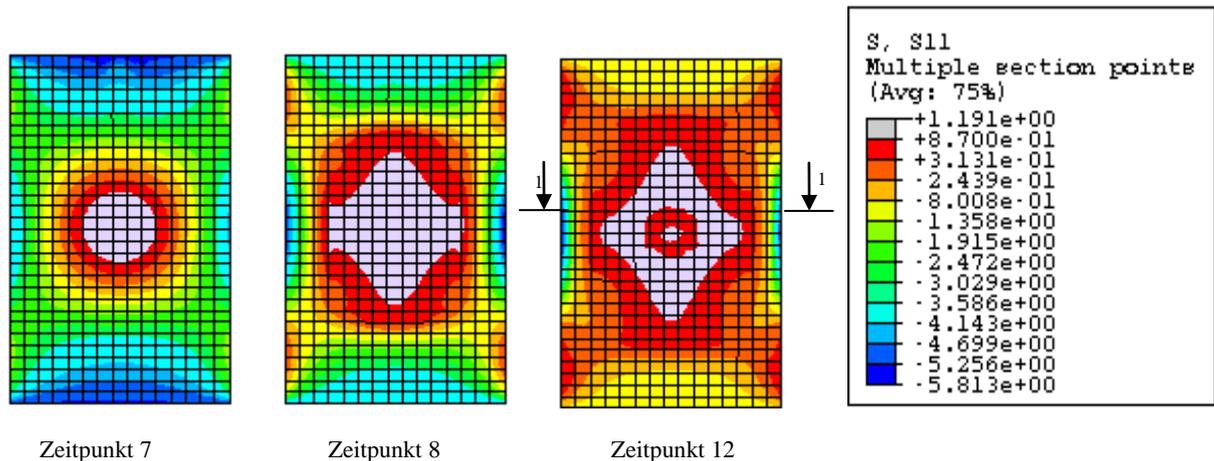


Bild 3-18 Normalspannung σ_y zum Zeitpunkt 10 und 11 -Schnitt 1-1

Zum Zeitpunkt 8 wurde die Matrixfestigkeit an den Rändern der Platte (Innenseite) erreicht. Das manifestiert sich mit einer leichten Lastausfall im Last-Verschiebungsverlauf (Bild 3-16, Zeitpunkt 8-9). Die horizontale Zugspannung in der Plattenmitte beträgt at der Zeitpunkt 1 kN/cm^2 .

Die Spannungen σ_{11} im mittleren Bereich der Platte nehmen weiter zu, bis sie an der Außenseite der Platte die Nachrissfestigkeit $1,1 \text{ kN/cm}^2$ im B etwa zum Zeitpunkt 10-11 erreicht. Die Beanspruchung des mittleren Teils der Platte ist in dem Zugspannungsverlauf entlang der horizontalen Hauptachse zu folgen, die Spannungswerte wurden zum Zeitpunkt 10, 11, entnommen (Bild 3-18).

Ein genauerer Einblick in der Spannungsentwicklung lässt sich aus dem Zugspannungsbild zum Zeitpunkt 7, 8, und 12 gewinnen. Um genau die Rissbildung zu folgen, wurde die Darstellung des Spannungswertes auf $0,9 \text{ kN/cm}^2$ begrenzt. Der Bereich, wo dieser Wert überschritten ist, wurde in hellgrauer Farbe dargestellt (Bild 3-19).

Bild 3-19 Spannungverteilung σ_{11} zum Zeitpunkt 7,8 und 12 –Außenseite

Bei weiterer zunehmender Last lagern sich die Spannungen mehr zu den vertikalen Rändern hin. Im mittleren Teil der Scheibe (B) kommt es zu fortgeschrittener Rissausbildung.

Ab dem Zeitpunkt 11 wird die weitere steigende Belastung mehr von den Rändern übernommen, bis dort die Zugfestigkeit in einem großen Teil dieses Randes überschritten wird (Innenseite), und es zum Versagen des Versuchskörpers kommt. Zum Zeitpunkt 12 erreichen bereits die Zugdehnungen an den Rändern 5.1 ‰ (Bild 3-20. - Innenseite).

Bei einer Last von 3150 kN vor Erreichen der rechnerischen maximalen Belastung (Zeitpunkt 33) ist die Beanspruchung in der Platte bereits so groß, dass im mittleren Bereich der Innenseite Zugdehnungen entstehen (Bild 3-21). Das lässt sich mit der räumlichen Membranspannungszustand erklären, der sich infolge der großen Beulverformungen einstellt, während die Last über die Ränder übertragend wird.

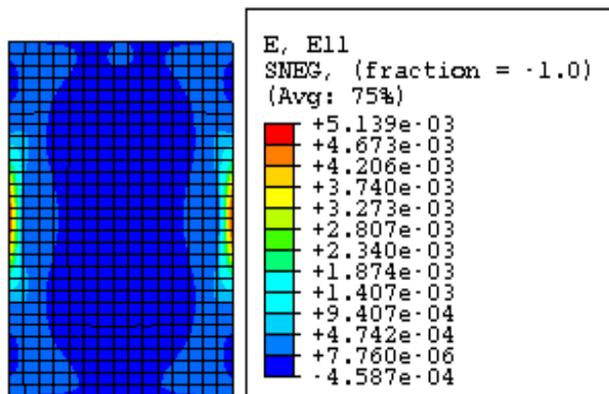


Bild 3-20 Horizontale Dehnungen - Zeitpunkt 12 - Innenseite-

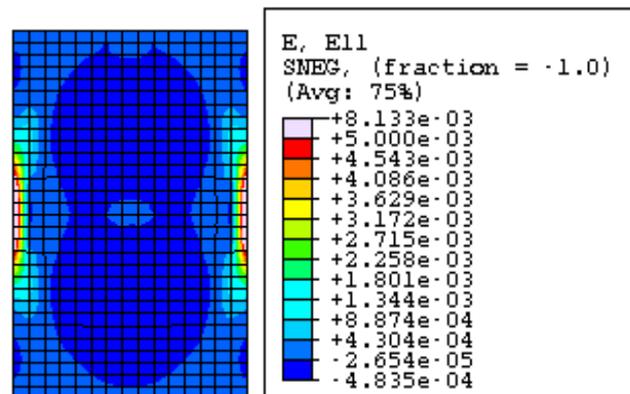


Bild 3-21 Horizontale Dehnungen - Zeitpunkt 33 - Innenseite

Im gesamten System wurde die maximale Belastung ($F = 3222$ kN) zum Zeitpunkt 40 erreicht (Bild 3-16), zu dem Zeitpunkt beträgt die Zugdehnungen in B 4,5‰ (Außenseite).

Die zunehmenden Zugspannungen (horizontale Richtung) in der Außenseite verlagern sich ab diesem Zeitpunkt mehr im Bereich der vertikalen Rändern (Bild 3-23, Stelle E). Die Plattenmitte (B) bleibt gleich beansprucht.

Die Darstellung des Spannungsverlaufs entlang der horizontalen Hauptachse (Bild 3-19, 1-1) lässt dieses Verhalten erkennen (Bild 3-23, Stelle E). Die vertikalen Ränder (Außenseite) befinden sich unter hohen Druckspannungen (-13.5 kN/cm²). Spätestens ab Zeitpunkt 40 beteiligt sich die Plattenmitte (B) kaum mehr an der Übernahme der weiteren Belastung.

Die horizontale Spannungsverteilung in der Platte am Ende der FE-Berechnung ist im Bild 3-22 abgebildet. Die Zugspannungen sind mit einem Grenzwert von 1,1 kN/cm² (Nachrisszugfestigkeit) dargestellt, etwa 80% der Plattenbreite wird hoch belastet ($\sigma_{11} > 0.93 \text{ kN/cm}^2$).

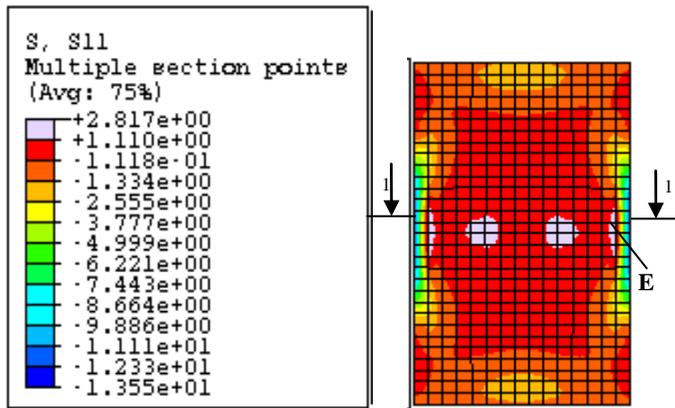


Bild 3-22 Horizontale Spannungen σ_{11} zum Zeitpunkt 48- Außenseite

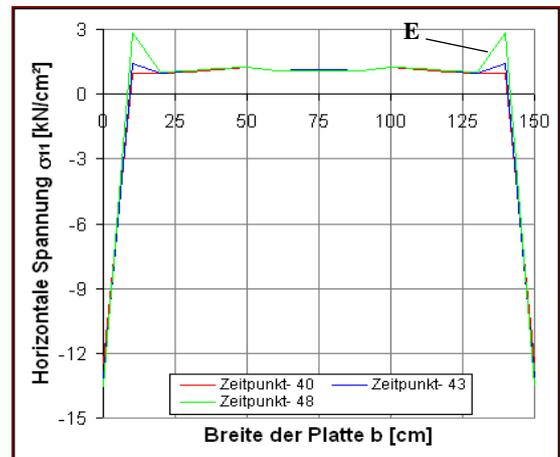


Bild 3-23 Spannungsverlauf σ_{11} zum Zeitpunkt 40 bis 48- Außenseite -Schnitt 1-1

Das Diagramm des Dehnungsverlaufs entlang der horizontalen Hauptachse 1-1 zeigt das oben genannte Verhalten des Versuchskörpers ausführlich (Bild 3-25). Gemäß diesen Ergebnissen verlagert sich bereits ab dem Zeitpunkt 30 die Lastabtragung zu den Rändern hin. Der mittlere Teil der Platte bleibt bis zum Berechnungs-Ende weniger beansprucht

In der Endphase (Bild 3-16, Zeitpunkt 40-48) bleibt die Plattenmitte gleich belastet. Die Zugdehnungen wachsen an und lagern sich immer mehr zur Seite (EL-748). Im Bild 3-24 ist die Dehnungsverteilung in der Platte am Berechnungsende dargestellt.

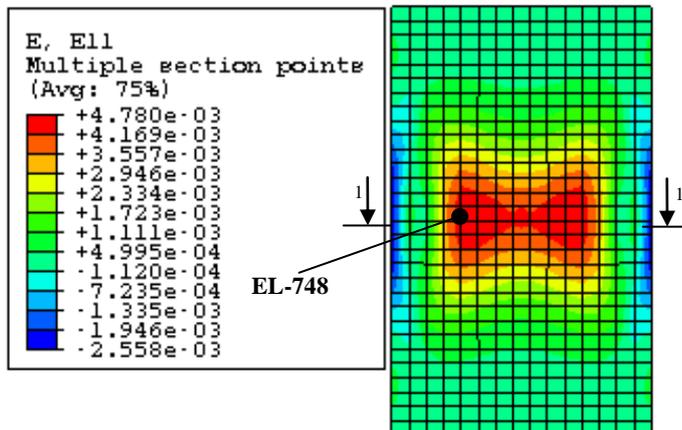


Bild 3-24 Horizontale Dehnungen ϵ_{11} zum Zeitpunkt 48- Außenseite

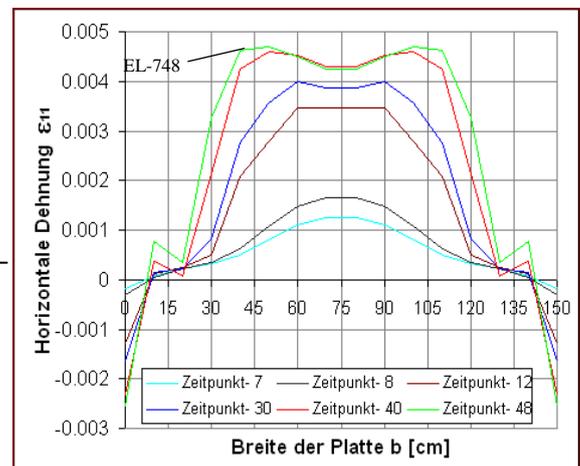


Bild 3-25 Horizontale Dehnungsverlauf ϵ_{11} zum Zeitpunkt 7 bis 48 -Schnitt 1-1

Innenseite ($S_{11} = \sigma_{11}$)

Entsprechend der Spannungsverteilung im Bild 3-26 konzentrieren sich am Beginn der numerischen Berechnung die höchsten Druckspannungen in der Mitte der Platte. Je höher der Versuchskörper belastet wird, desto mehr wandern die Druckspannungen zu den vertikalen Rändern und die Plattenmitte bleibt weniger beansprucht (Bild 3-26, Zeitpunkt 30).

Zum Zeitpunkt 8 wurde die Matrixfestigkeit und zum Zeitpunkt 11-12 ist die Nachrissfestigkeit an den Rändern (A) erreicht. Die Beanspruchung konzentriert sich bis zum Zeitpunkt 30 mehr auf der Mitte liegenden Element EL-348 (Bild 3-26, Zeitpunkt 30), danach fallen die Zugspannungswerte in EL-348 fast komplett zurück und verlagern sich jetzt mehr zu den weiter oberen und unteren liegenden Elementen EL-353 (Bild 3-26, Zeitpunkt 40)

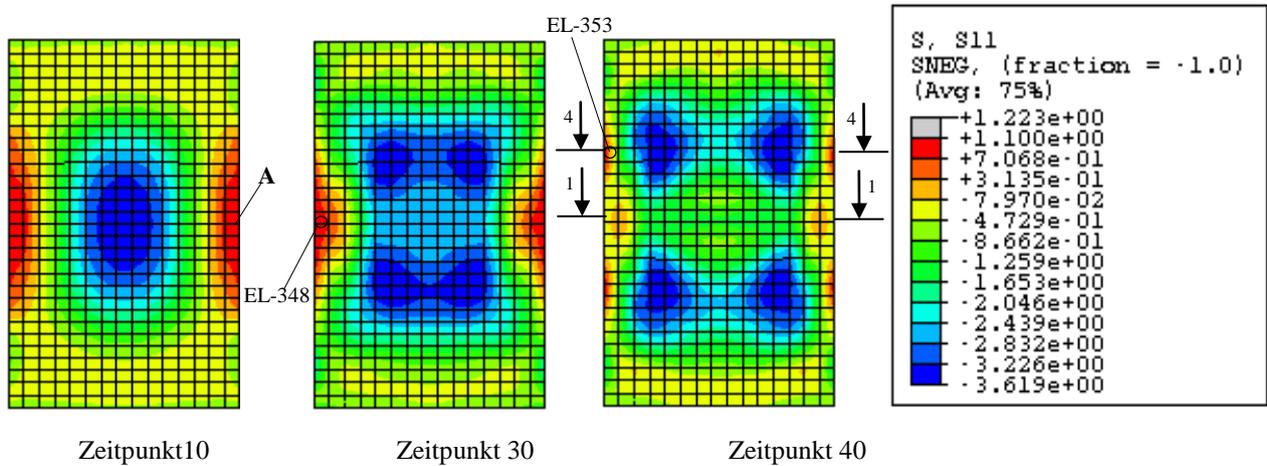


Bild 3-26 Horizontale Spannungen in der Innenseite zum Zeitpunkt 10, 30 und 40

Die Spannungsverläufe entlang der horizontalen Hauptachse 1-1 zeigen detailliert dieses Tragverhalten (Bild 3-27). Die Plattenmitte wurde bis zum Erreichen der Nachrissfestigkeit an den Rändern am höchsten beansprucht (Bild 3-27, Zeitpunkt 10, hellblaue Kurve). Die weitere zunehmende Beanspruchung nach diesem Zeitpunkt wird offensichtlich hauptsächlich von den Rändern übernommen. Der Rückgang der Spannungswerte in den Einspannstellen (A) am Ende der Berechnung (Bild 3-27, Zeitpunkt 40, 48, rote und grüne Kurve) wird weiter unter ausführlich analysiert. Die Nachrisszugfestigkeit im Element 348 wird zum Zeitpunkt 20 bei einer Last von 3110 kN erreicht, die horizontale Dehnung beträgt zu dem Zeitpunkt 5,1 %. Es ist zu berücksichtigen, dass genau am Rand der Platte die Nachrisszugfestigkeit bereits zum Zeitpunkt 11-12 erreicht wurde. Im Bild 3-28 ist der Spannungs-Dehnungsverlauf von dem untersuchten Element EL-348 dargestellt (Innenseite).

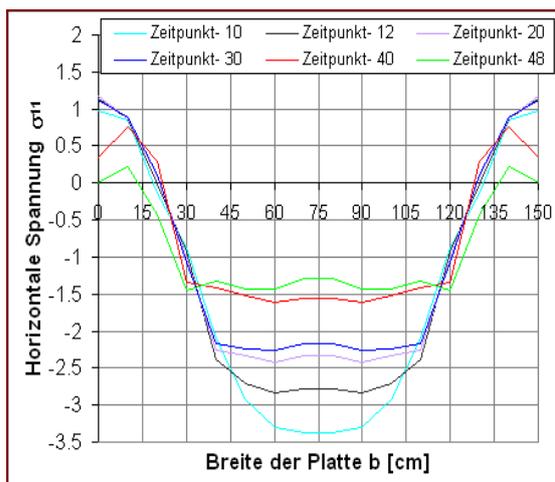


Bild 3-27 Spannungsverläufe σ_{11} zum Zeitpunkt 10 bis 48 - Schnitt 1-1

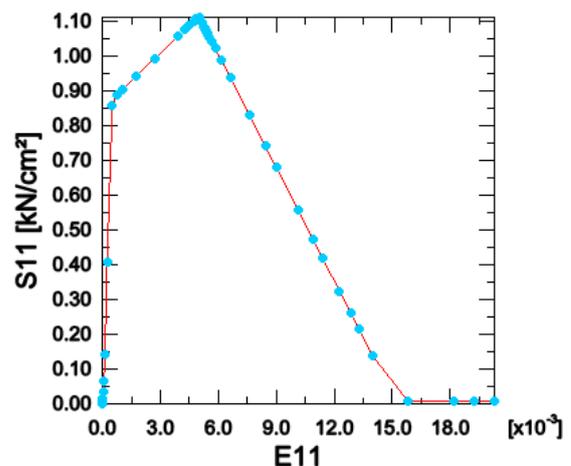


Bild 3-28 Spannungs- Dehnungsverlauf – Element 348

Die Analyse des Spannungs-Dehnungsverhaltens über die Dicke im Element EL-348 (A) zeigt, dass der vertikale Rand der Platte zum Zeitpunkt 20 (Bild 3-29, mitte, blaue Kurve) am höchsten

Beansprucht wurde, nach diesem Zeitpunkt nehmen die Spannungswerte von den äußeren Schichten ab (Bild 3-29, grüne Kurve). Zum Zeitpunkt 45 liegen die Zugspannungswerte in cirka 90 % der Wandstärke über 0,9 kN/cm².

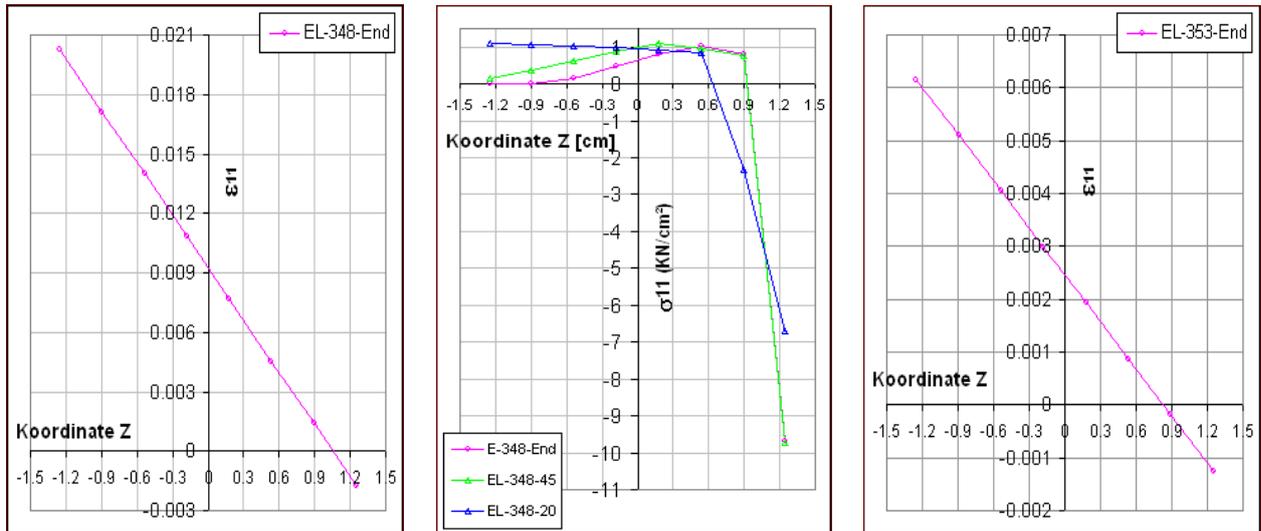


Bild 3-29 Spannungs- Dehnungsverteilung über die Dicke der Element 348 (Links und Mitte) und Dehnungsverteilung über die Dicke des Elements 353 (Rechts)

Am Berechnungs- Ende nehmen die Beanspruchung in der Wandstärke kaum mehr zu, es ist nur ein zunehmende Ausfall des Zugspannungsverlaufs zu erkennen (Bild 3-29, rosa Kurve). Dieses Verhalten kündigt das lokale Versagen des Bereiches an. Mit den erzielten Erkenntnissen ist zu erwarten, dass bei großen Schlankheiten das Rissbruch im Versuchkörper mit großer Wahrscheinlichkeit in der Stelle A (Einspannstellen) eintreten wird.

Zu berücksichtigen ist, dass die Spannungs- und Dehnungswerte der untersuchten Elemente (EL-348), nicht ganz genau von dem Rand der Scheibe entnommen wurde, daher liegen die Werte etwas niedriger als den tatsächlichen Wert am Rand. Die Analyse zeigen auch, dass in Vergleich zu der Stelle A das Element 353 nicht zu hoch beansprucht wurde, die maximale Dehnung erreicht ca. 6 ‰ (Bild 3-29, rechts).

3.4.2 Tragverhalten des Versuchskörpers in Richtung y

Außenseite ($S_{22} = \sigma_{22}$)

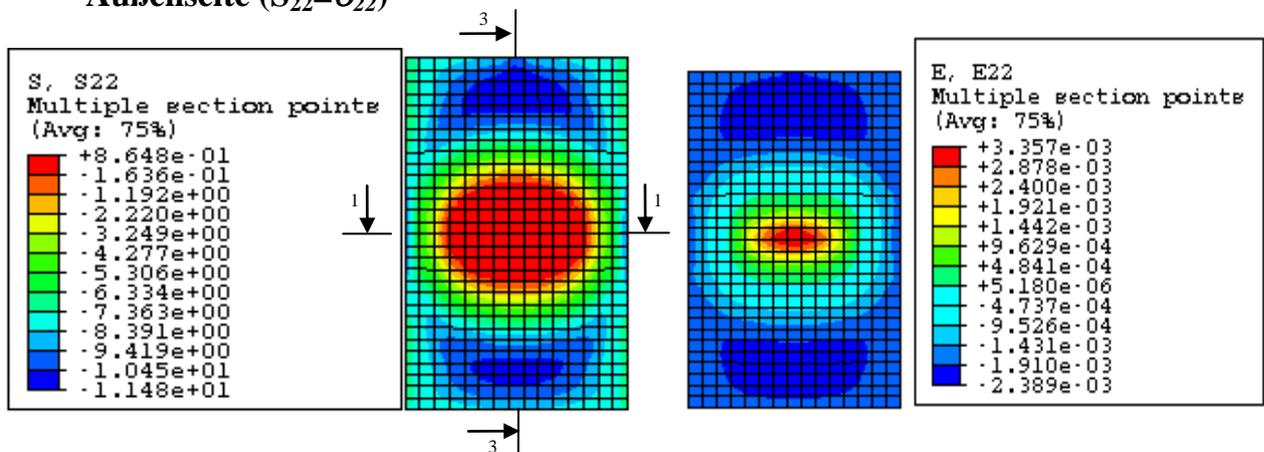


Bild 3-30 Vertikale Spannungen (σ_{22}) und Dehnungen (ϵ_{22}) am Ende der FE-Berechnung- Außenseite

Zum Zeitpunkt 11 mit dem Erreichen der Nachrisszugfestigkeit (horizontale Richtung) in der Plattenmitte bilden sich auch vertikale Zugspannungen im B (Bild 3-30). Bei einer Last von 3553 kN wurde die Matrixfestigkeit in B erreicht. Obwohl das Bild 3-30 (Berechnungs-Ende) hohe Zugspannungswerte zeigt, wurden diese Werte nur auf bestimmte Knoten lokalisiert, generell erreicht die Zugspannung etwa $0,35 \text{ kN/cm}^2$.

Der Spannungsverlauf σ_{22} entlang dem Breite (1-1) und der Höhe der Platte (3-3) zeigen, dass zum Zeitpunkt 11 (Bild 3-31 und Bild 3-32) die Plattenmitte am höchsten belastet wurde, mit dem Steifigkeitsverlust des Bereiches, lasse die vertikale Beanspruchung in B nach. Am Ende der FE-Berechnung beträgt die vertikale Zugdehnung in B $3,35 \text{ ‰}$ (Bild 3-30)

In der **Innenseite** wurde die Druckfestigkeit (18 kN/cm^2) nicht erreicht, die höchste Druckspannung erreichte 14 kN/cm^2 in der Plattenmitte, die dazugehörige Druckdehnung beträgt $3,1 \text{ ‰}$.

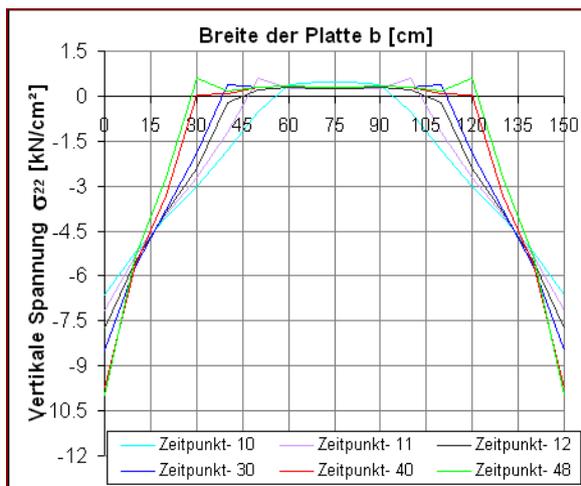


Bild 3-31 Spannungsverlauf σ_{22} - Außenseite - Schnitt 1-1

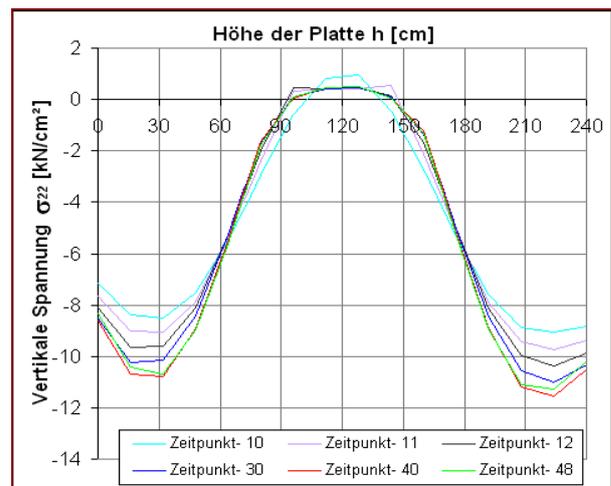


Bild 3-32 Spannungsverlauf σ_{22} - Außenseite - Schnitt 3-3

3.4.3 Schlussfolgerung

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass bis zum Erreichen der Matrixfestigkeit in B (horizontale Richtung) der mittlere Bereich der Scheibe mehr als den restlichen Teil des Versuchskörpers beansprucht wurde. Mit dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte (B) nimmt die Beulverformung stark zu und die horizontalen Zugbeanspruchungen wandern mehr zu den vertikalen Rändern (Innenseite). Die zunehmende Belastung wird nach diesem Zeitpunkt hauptsächlich von diesen Stellen (A) übernommen, bis der Versuchskörper an den Einspannstelle (Innenseite) versagt. In der Spannungs- Dehnungsverteilung über die Dicke in A ist dieses Verhalten sehr gut zu folgen. Die zunehmende Umlagerung der horizontalen Beanspruchung an den vertikalen Rändern und die stetige Erhöhung der Beulverformung deuten auf einem überkritischen Beulverhalten des Versuchskörpers an.

Nach dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte bilden sich auch vertikale Zugspannungen in der Außenseite der Scheibe (B). Das Erreichen der vertikalen Zugfestigkeit im Bereich der Plattenmitte zeigt den Einfluss der Membranzugspannungen in dem Tragverhalten des Versuchskörpers.

Entsprechend der erzielten Ergebnisse werden im Versuch horizontale und vertikale Dehnungen an den gefährdeten Stellen aufgenommen, nämlich im mittleren Bereich der Platte (B) und an den Einspannstellen (A). Um die Beulverformung zu messen werden die Messaufnehmer entlang einer horizontalen und vertikalen Linie platziert, wobei als Referenzpunkt 0,0 die Plattenmitte (B) genommen wird.

4 Experimentelle Untersuchung

Dieses Kapitel befasst sich mit der Herstellung der Versuchskörper. Insgesamt wurden 15 Versuchskörper hergestellt, die in Beulserien gruppiert wurden. Die Montage der Rahmenschalung wird detailliert erklärt. Es folgt eine ausführliche Beschreibung des Betonierungsvorganges. Wegen Problemen bei der Materiallieferung mussten 7 Versuchskörper etwa sechs Monate später betoniert werden. Eine Beschreibung des verwendeten Materials (Ductal G®) sowie der Rezepturen findet sich in Tabelle 4-3 bzw. Tabelle 4-4.

Die Druckfestigkeit wurde an Würfeln (10/10/10 cm) und der E-Modul an Prismen (16/4/4 cm) bestimmt. Mit diesen Ergebnissen wurden die Druckarbeitslinien für die Beulserien festgelegt. Für den Zugbereich wurde aus einer Reihe von Biegezugversuchen eine Spannungs-Dehnungs-Beziehung ermittelt. Diese Arbeitslinien wurden für die numerische Nachrechnung der Versuche verwendet.

Nach dem Ausschalen der Versuchskörper für die Beulversuche wurde Ihre Wandstärke gemessen. Die Messungen ergaben vor allem bei den großen Versuchskörpern erhebliche Dickeunterschiede. Diese Imperfektionen bewirken eine Vorkrümmung der Scheibe. In Richtung dieser Verformung wurde mittels einer Auslenkungskraft eine bestimmte Vorauslenkung der Scheibe eingestellt.

Während der Durchführung der Beulversuche wurden die Verformungen aus der Ebene entlang einer vertikalen und horizontalen Linie gemessen. Außerdem wurden mittels Dehnmeßstreifen die vertikalen und horizontalen Dehnungen an ausgewählten Punkten der Scheibe bestimmt.

Schließlich enthält das Kapitel 4 noch die Auswertung der Laborergebnisse inklusive der Rissaufnahme und einer Interpretation des Dehnungsverhaltens. Zahlreiche numerische Berechnungen begleiteten die Versuche. Das Tragverhalten der Versuchskörper wurde mittels Last- Beulverformungs-Diagrammen veranschaulicht.

Tabelle 4-1 Zusammenfassung der experimentellen Untersuchung

1- Herstellung des Versuchskörpers	Montage der Rahmenschalung
	Einbringung des UHPC (Ductal)
2- Eigenschaften des UHPC	Bestimmung der Druckfestigkeit und der E- Modul. Festlegung der Arbeitslinie für die numerische Berechnung
3- Ermittlung der Wandstärke, des Fasergehaltes und der Vorkrümmung	
4- Versuchsaufbau und Messanordnung	Einstellender planmäßigen Imperfektion, Belastung, Messanordnung
5- Auswertung der Versuchsergebnisse	Interpretation der Rissbildung
	Interpretation den horizontale und vertikalen Dehnungen.
	Interpretation der Biegelinie

Tabelle 4-2 Zeitlicher Ablauf des Versuchsprogramms

Datum der Versuchsdurchführung	Versuchskörper
27.05.2009	75-03
17.04.2009	75-02
22.04.2009	75-04
27.04.2009	75-01
11.05.2009	100-02
20-05-2009	100-01
15.05.2009	100-03
04.06.2009	200-03
10-06.2009	200-03
17-06.2009	200-01
23-06.2009	150-01
29-06.2009	150-02
13.07.2009	50-02
16-07.2009	50-03
4.08.2009	50-01

4.1 Materialeigenschaften der Versuchskörper

4.1.1 Biegezugversuche



Bild 4-1 Versuchsaufbau des Biegezugversuches

Die Biegezugversuche wurden an der Technischen Universität Graz im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau LKI durchgeführt (Bild 4-1). Insgesamt wurden 18 Platten (Bild 4-2) untersucht. Für die Versuchsserien wurde ein selbstverdichtender, faserbewehrter, ultrahochfester Beton von Typ **Ductal G®** angewendet [26].

Die Versuchskörper wurden aus drei Platten (278cm x 78cm x 5cm) herausgeschnitten. Um den Einfluss der Faserorientierung auf dem Biegezugverhalten festzustellen, wurden die Versuchskörper mit drei unterschiedlichen Methoden der Betoneinbringung hergestellt. Zwei Platten wurden in stehenden Schalungen hergestellt, wobei eine mit einer Pumpe von unten und die andere von oben befüllt wurde. Die dritte Platte wurde in einer liegenden Schalung hergestellt und mit einem Krankübel in ihrer Mitte befüllt [26].

Da die Versuchskörper der Beulversuche stehend hergestellt werden, wurde für die Zugarbeitslinie die Laborergebnisse jener Platten herangezogen, die im Stehen von oben betoniert wurden.

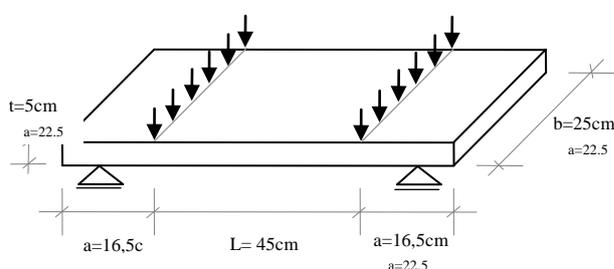


Bild 4-2 Abmessung des Versuchskörpers (Links) und Rissausbildung im Versuchskörper (Rechts)

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde für die numerische Simulation die Arbeitslinie aus der Dissertationsarbeit "Die Glasbeton-Verbundbauweise" [22] übernommen. Durch eine iterative Anpassung

Die numerische Simulation an die Ergebnisse der Biegezugversuche wurde die Spannungs-Dehnungsbeziehung für den Zugbereich festgelegt.

Das Bild 4-3 zeigt die Verteilung der horizontalen Spannungen in der Platte am Ende der FE-Berechnung. Der Vergleich zwischen den Laborergebnissen und den numerischen Ergebnissen wurde in einem Last-Verschiebungs-Diagramm dargestellt (Bild 4-4). Dieses Diagramm enthält die Ergebnisse aus zwei Laborversuchen (T2 und L3) und deren numerischer Nachrechnung (rosa Kurve). Die vertikale Verformung (u_y) wurden in den Stellen 1 und 2 der Platte gemessen (Bild 4-3). Für die Darstellung der Ergebnisse wurde ein Mittelwert von diesen genommen. Die auf diese Weise für den Zugbereich ermittelte Spannungs-Dehnungsbeziehung wird später bei der numerischen Berechnung der Beulversuche verwendet.

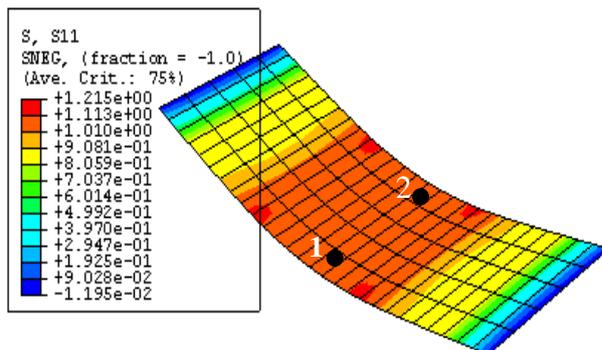


Bild 4-3 Horizontale(x) Spannungsverteilung in der Platte

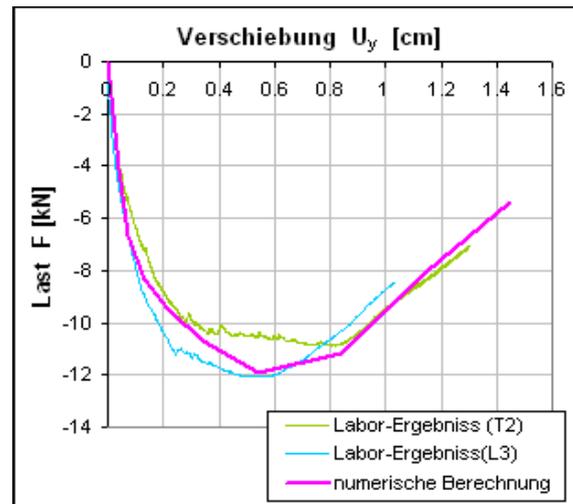


Bild 4-4 Last- Verschiebungsdiagramm der Labor Ergebnisse und numerische Berechnung

4.1.2 Ductal G®

Als Werkstoff für diese Arbeit wurde der von der Firma **Lafarge** zur Verfügung gestellte ultrahochfeste Feinkornbeton **Ductal G®** verwendet.

Der Hersteller produziert eine Trockenmischung aus Zuschlägen und Bindemitteln, die als Premix bezeichnet werden. Über die genaue Rezeptur dieses Premix gibt es keine Angaben

Dieses so genannte Premix wird vor Ort mit Wasser, Hochleistungsverflüssiger und Stahlfasern zu einem Frischbeton vermischt. Für den Mischprozess wurde ein Intensivmischer (RO9T) der Firma Gustav Eirich GmbH an eingesetzt.

Aufgrund eines Problems bei der Lieferung des Materials mussten acht Versuchskörper im Juni-Juli 2008 und die weitere sieben Versuchskörper im Oktober-November 2008 betoniert werden.

Die Versuchskörper wurden entsprechend Ihrer Geometrie in 5 Beulserien gruppiert. Die Beulserien wurden nach der Breite (b) des Versuchskörpers unterschieden.

Beulserie 50-00, $b = 50$ cm

Beulserie 75-00, $b = 75$ cm

Beulserie 100-00, $b = 100$ cm

Beulserie 150-00, $b = 150$ cm

Beulserie 200-00, $b = 200$ cm

Die folgende Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 enthält die Rezeptur der verwendeten Mischungen von einem Versuchskörper jeder Beulserie vorgelegt.

Tabelle 4-3 Rezeptur für die Beulserien 200-03 und 150-01

Ductal G®			
	Bezeichnung	Menge (Beulserie 200-03)	Menge (Beulserie 150-01)
Premix		225 (kg)	200 (kg)
Fasern	Stahl	16,2 (kg)	14,4 (kg)
Verflüssiger	Ductal F2	3,46 (kg)	3,08 (kg)
Verzögerer	Chryso Tard CE	1,14 (kg)	1,02 (kg)
Wasser		10,9 (l)	10,02 (l)

Tabelle 4-4 Rezeptur für Beulserie 100-03, 75-01 und 50-01

Ductal G®				
	Bezeichnung	Menge (Beulserie 100-02)	Menge (Beulserie 75-01)	Menge (Beulserie 50-01)
Premix		200 (kg)	225 (kg)	225 (kg)
Fasern	Stahl	14,4 (kg)	16,2 (kg)	16,2 (kg)
Verflüssiger	Ductal F2	3,08 (kg)	3,46 (kg)	3,46 (kg)
Verzögerer	Chryso Tard CE	1,02 (kg)	1,14 (kg)	1,14 (kg)
Wasser		10,36 (l)	10,06 (l)	10,06 (l)

4.1.3 E-Modul und Druckfestigkeit



Bild 4-5 Versuchsaufbau für die Ermittlung des E- Moduls

Nach dem Herstellungsprozess wurden der E-Modul von neun (16 /4 /4 cm) Prismen und die Druckfestigkeit von zwölf (10/10/10 cm) Würfeln im Baulabor der Fachhochschule Kärnten nach ONR 23303 [31] ermittelt. Die Prismen und Würfeln wurden beim Herstellen des Versuchskörpers aus der jeweiligen Mischung entnommen.

Der E-Modul und die Druckfestigkeit wurden für einige Versuchskörper nach etwa einem Jahr und für die weiteren Versuchskörper halbes Jahr später ermittelt. Im Bild 4-5 ist die Versuchsaufbau für die Bestimmung des E-Moduls dargestellt.

Für den E-Modul sind die Ergebnisse in der Tabelle 4-5 bis Tabelle 4-9 und für die Druckfestigkeit in der Tabelle 4-10 bis Tabelle 4-14 abgebildet.

Für die numerische Simulation des Versuches wurde für jede Beulserie ein Mittelwert des E-Moduls und einen Mittelwert der Druckfestigkeit festgelegt.

Laborergebnisse des E-Moduls

Tabelle 4-5 Ergebnisse der E-Modul - Beulserie 200-00

Nr	Form der Probe	Probe Bezeichnung	Herstellung Datum	Prüfung Datum	Beton	Abmessungen			Ergebnisse
						Länge (mm)	Breite (mm)	Hohe (mm)	E-Modul N/mm ²
1	M-Prisma	200-01	14.07.2008	03.06.2009	Ductal G2	160	40	40	60082
2	M-Prisma	200-03	03.11.2008	10.06.2009	Ductal G2	160	40	40	55439
Mittelwerte									57760

Tabelle 4-6 Ergebnisse der E-Modul - Beulserie 150-00

Nr	Form der Probe	Probe Bezeichnung	Herstellung Datum	Prüfung Datum	Beton	Abmessungen			Ergebnisse
						Länge (mm)	Breite (mm)	Hohe (mm)	E-Modul N/mm ²
3	M-Prisma	150-01	10.11.2008	10.06.2009	Ductal G2	160	40	40	54992
4	M-Prisma	150-02	13.11.2008	10.06.2009	Ductal G2	160	40	40	55823
									53999
Mittelwerte									55407

Tabelle 4-7 Ergebnisse der E-Modul - Beulserie 100-00

Nr	Form der Probe	Probe Bezeichnung	Herstellung Datum	Prüfung Datum	Beton	Abmessungen			Ergebnisse
						Länge (mm)	Breite (mm)	Hohe (mm)	E-Modul N/mm ²
5	M-Prisma	100-03	29.10.2008	16.06.2009	Ductal G2	160	40	40	52832
Mittelwerte									52832

Tabelle 4-8 Ergebnisse der E-Modul - Beulserie 75-00

Nr	Form der Probe	Probe Bezeichnung	Herstellung Datum	Prüfung Datum	Beton	Abmessungen			Ergebnisse
						Länge (mm)	Breite (mm)	Hohe (mm)	E-Modul N/mm ²
6	M-Prisma	75-01	24.06.2008	16.06.2009	Ductal G2	160	40	40	57295
7	M-Prisma	75-02	24.06.2008	16.06.2009	Ductal G2	160	40	40	58118
8	M-Prisma	75-03	03.11.2008	03.06.2009	Ductal G2	160	40	40	56699
9	M-Prisma	75-04	03.11.2008	03.06.2009	Ductal G2	160	40	40	56699
Mittelwerte									57203

Tabelle 4-9 Ergebnisse der E-Modul - Beulserie 50-00

Nr	Form der Probe	Probe Bezeichnung	Herstellung Datum	Prüfung Datum	Beton	Abmessungen			Ergebnisse
						Länge (mm)	Breite (mm)	Hohe (mm)	E-Modul N/mm ²
6	M-Prisma	50-01	24.06.2008	16.06.2009	Ductal G2	160	40	40	57295
7	M-Prisma	50-02	24.06.2008	16.06.2009	Ductal G2	160	40	40	58118
8	M-Prisma	50-03	03.11.2008	03.06.2009	Ductal G2	160	40	40	56699
9	M-Prisma	50-04	03.11.2008	03.06.2009	Ductal G2	160	40	40	56699
Mittelwerte									57203

Laborergebnisse der Druckfestigkeit

Tabelle 4-10 Ergebnisse der Druckfestigkeit Beulserie 200-00

Nr	Form der Probe	Probe Bezeichnung	Herstellung Datum	Prüfung Datum	Beton	Abmessungen			Ergebnisse
						Länge (mm)	Breite (mm)	Hohe (mm)	Druckfestigkeit N/mm ²
1	Würfel	200-01	14.07.2008	29.05.2009	Ductal G2	100	100	100	190,6
2	Würfel	200-02	21.07.2008	28.05.2009	Ductal G2	100	100	100	182,2
3	Würfel	200-03	03.11.2008	28.05.2009	Ductal G2	100	100	100	181,8
Mittelwerte									184

Tabelle 4-11 Ergebnisse der Druckfestigkeit Beulserie 150-00

Nr	Form der Probe	Probe Bezeichnung	Herstellung Datum	Prüfung Datum	Beton	Abmessungen			Ergebnisse
						Länge (mm)	Breite (mm)	Hohe (mm)	Druckfestigkeit N/mm ²
4	Würfel	150-01	10.11.2008	09.06.2009	Ductal G2	100	100	100	182,2
5	Würfel	150-02	13.11.2008	09.06.2009	Ductal G2	100	100	100	180,4
Mittelwerte									181

Tabelle 4-12 Ergebnisse der Druckfestigkeit Beulserie 100-00

Nr	Form der Probe	Probe Bezeichnung	Herstellung Datum	Prüfung Datum	Beton	Abmessungen			Ergebnisse
						Länge (mm)	Breite (mm)	Hohe (mm)	Druckfestigkeit N/mm ²
6	Würfel	100-01	14.07.2008	16.06.2009	Ductal G2	100	100	100	207,6
7	Würfel	100-02	21.07.2008	28.05.2009	Ductal G2	100	100	100	196,6
8	Würfel	100-03	29.10.2008	16.06.2009	Ductal G2	100	100	100	178,4
Mittelwerte									194

Tabelle 4-13 Ergebnisse der Druckfestigkeit Beulserie 75-00

Nr	Form der Probe	Probe Bezeichnung	Herstellung Datum	Prüfung Datum	Beton	Abmessungen			Ergebnisse
						Länge (mm)	Breite (mm)	Hohe (mm)	Druckfestigkeit N/mm ²
9	Würfel	75-01	24.06.2008	15.06.2009	Ductal G2	100	100	100	198,1
10	Würfel	75-02	24.06.2008	15.06.2009	Ductal G2	100	100	100	198,1
11	Würfel	75-03	03.11.2008	28.05.2009	Ductal G2	100	100	100	180,9
12	Würfel	75-04	03.11.2008	28.05.2009	Ductal G2	100	100	100	180,9
Mittelwerte									189

Tabelle 4-14 Ergebnisse der Druckfestigkeit Beulserie 50-00

Nr	Form der Probe	Probe Bezeichnung	Herstellung Datum	Prüfung Datum	Beton	Abmessungen			Ergebnisse
						Länge (mm)	Breite (mm)	Hohe (mm)	Druckfestigkeit N/mm ²
9	Würfel	50-01	24.06.2008	15.06.2009	Ductal G2	100	100	100	198,1
10	Würfel	50-02	24.06.2008	15.06.2009	Ductal G2	100	100	100	198,1
11	Würfel	50-03	03.11.2008	28.05.2009	Ductal G2	100	100	100	180,9
12	Würfel	50-04	03.11.2008	28.05.2009	Ductal G2	100	100	100	180,9
Mittelwerte									189

4.2 Herstellung der Versuchskörper

Die Versuchskörper wurden an der Technischen Universität Graz im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI) produziert. Insgesamt wurden 15 Versuchskörper hergestellt, die in Beulserien gruppiert wurden (50-00, 75-00, 100-00, 150-00, 200-00). Die genaueren Abmessungen der betonierten Versuchskörper sind in der Tabelle 4-15 dargestellt.

Tabelle 4-15 Abmessungen der Versuchskörper

Bezeichnung der Serie	Anzahl der Versuchskörper	Scheibe			Flansch	
		Breite b, [cm]	Höhe a, [cm]	Dicke t [cm]	Höhe h, [cm]	Dicke t [cm]
50-00	3	50	80	2,5	10	2,5
75-00	4	75	150	2,5	15	2,5
100-00	3	100	160	2,5	20	2,5
150-00	2	150	240	2,5	30	2,5
200-00	3	200	320	2,5	40	2,5

4.2.1 Schalung und Rahmenschalung



Bild 4-6 Ausrüstungen der Schalung für die Beulserie 75-00 und 50-00

Die Schalung für die Beulserien 50-00 und 75-00 wurden aus Epoxydharz beschichteten Sperrholzplatten und Holzprofilen von der Firma Doka hergestellt (Bild 4-6). Von jeder Beulserie wurden zwei nebeneinander stehende Schalungen angefertigt.

Für die Schalung der Versuchskörper der Beulserien 100-00, 150-00 und 200-00 wurden die hoch belastbaren Framax Xlife-Rahmenschalungselemente der Firma Doka verwendet.

Die Vorgangsweise bei der Montage der Rahmenschalung für die Beulserie 200-00 wird nachfolgend geschildert: Für die Dimensionierung der Scheibe wurden 1,35 m x 3,3 m Framax Xlife-Elemente und 3,30 m Ausschalecken verwendet. Um Abplatzungen an der Oberfläche der Scheibe zu vermeiden wurde auf das Framax Xlife-Element eine Polyesterol Platte geklebt (Bild 4-7 oben links, weiße Oberfläche).

Um die erwünschte Stegdicke des Versuchskörpers sicher herzustellen, wurde ein Brett aus Holz am unteren Rand des Framax Xlife-Elementes angeordnet, wie in Bild 4-7 (oben rechts) zu sehen ist. Die Wandstärke des Versuchskörpers entspricht dann der Dicke des Distanzbrettes.

Bei den größeren Versuchskörpern wird die Wandstärke im oberen Bereich mit Hilfe üblicher Schalungsanker fixiert. Nun wurde als Gegenschalung der zweite Teil der Framax Xlife-Elementn angebracht und mit einem Ankersystem befestigt.

An den beiden seitlichen Wänden der Versuchskörper sind aussteifende Flansche angeordnet. Dadurch stellt sich (in Krafrichtung betrachtet) der Querschnitt der Versuchskörper als I-Profil dar. An den Innenecken zwischen dem Steg und den beiden Flanschen wurden so genannte "Asuschalecken" angeordnet. Die Dicke und Höhe der Flansche wird durch die im Bild 4-7 links ersichtlichen vertikalen Holzleisten bestimmt. Das Bild 4-7 rechts zeigt die geschlossene Rahmenschalung. Die Kanten zwischen Scheibe und Flansch wurden stark ausgerundet um Störungen in der Faserverteilung und Kerbspannungen klein zu halten.



Bild 4-7 Rahmenschalung für die Beulserie 200-00

4.2.2 Betoniervorgang

Die Versuchskörper wurden am LKI betoniert. Wegen eines Problems bei der Lieferung des Materials mußten die Versuchkörper in zwei Zeitabschnitten hergestellt werden (Juni und Oktober 2008).

Zum Mischen des Ultra Hochleistungsbetons (Ductal®) wurde ein Intensivmischer (R09T) der der Firma Gustav Eirich GmbH verwendet (Bild 4-8), welcher über eine Füllmenge von 150 Litern verfügt.

Die Konsistenz des Betons wurde so weich gewählt, dass die Mischung einerseits gut fließfähig und selbstentlüftend ist, aber sich andererseits die Stahlfasern gerade noch nicht absetzen.

Für den Mischvorgang wurde zuerst das Premix trocken vermischt. Danach wurden Fließmittel und Wasser zugegeben und schließlich wurden die Stahlfasern beigemischt.



Bild 4-8 EIRICH 09T Mischer

Der gesamte Mischprozess dauerte etwa 20 Minuten. In den Tabelle 4-3 und 4-4 ist von einigen Versuchskörpern die Rezeptur der Mischung der Ductal® angegeben.

4.2.2.1 Betoniervorgang der Beulserien 75-00 und 50-00

Die Betoneinbringung der Serien 75-00 und 50-00 erfolgte mit Hilfe eines speziell hierfür angefertigten Trichters. Der Beton wurde in die stehende Schalung von oben mittig eingefüllt (Bild 4-9, links). Am Ende des Betonierungsvorgangs wurde der Beton mit Hilfe einer Spachtel abgezogen (Bild 4-9, rechts). Aus einer Mischung konnten sowohl zwei Versuchskörper der Beulserie 75-00 als auch der Beulserie 50-00 betoniert werden (Bild 4-10, links). Das Bild 4-10 rechts zeigt die fertig hergestellten Versuchskörper.



Bild 4-9 Betonierungsprozess des Versuchskörpers 50- 00



Bild 4-10 Die Versuchskörper vor und nach dem Ausschalen

4.2.2.2 Betoniervorgang der Beulserie 100-00, 150-00 und 200-00

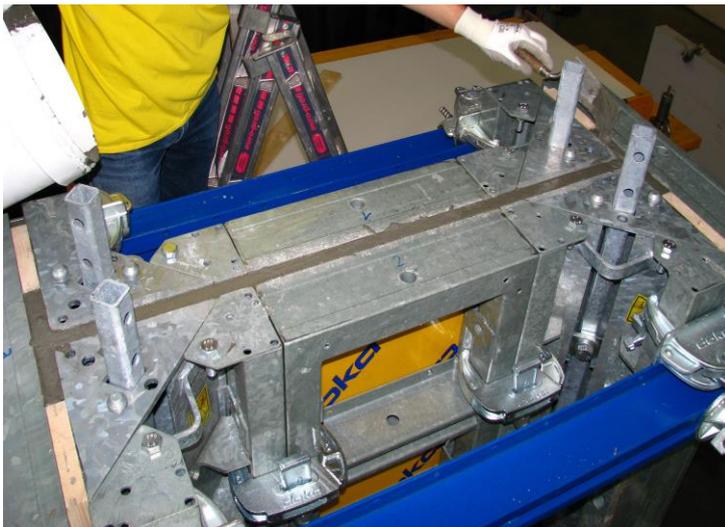


Bild 4-11 Betonierungsvorgang

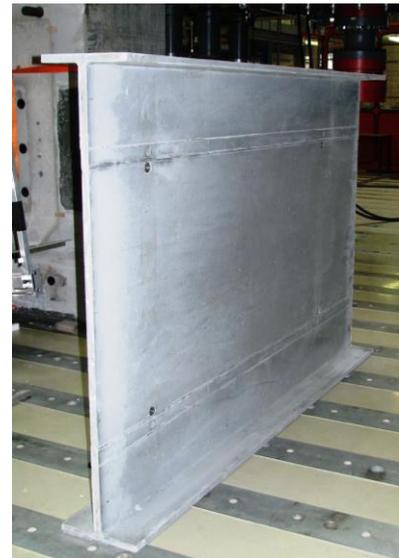


Bild 4-12 Fertighergestellte Versuchskörper

Die Schalungen der Beulserien 100-00, 150-00 und 200-00 wurden aus einem 1000 Liter Krankübel mit Hilfe eines Trichters (Bild 4-13- unten links) befüllt. Der Beton wurde in die stehende Schalung von oben mittig eingefüllt. Die Bilder 4-13 zeigen den Betoniervorgang: Oben links das Entleeren des Mixers in einem Kunststoffbehälter. Oben rechts das Umfüllen des Kunststoffbehälters in dem Krankübel. Unten links die Schalung mit dem Einfülltrichter vor der Betoneinbringung. Unten rechts das Befüllen der Schalung aus dem Krankübel.

Am Ende des Betoniertvorganges wurde der Beton mit Hilfe einer Spachtel abgezogen (Bild 4-11). Im Bild 4-12 ist der Querschnitt des fertig hergestellten Versuchskörpers 150-02 ersicht-lich.

Für die Herstellung der Versuchskörper mußten mehrere Mischungen angefertigt werden. Für die Versuchskörper 100-00 und 150-00 wurden jeweils zwei Mischungen benötigt und für den Versuchskörpern 200-00 wurden vier Mischungen erforderlich. Vor dem Einbringen des Frischbetons

in der Schalung wurden mehrere Mischungen im Krankübel gesammelt (Bild 4-13-oben Rechts). Erst danach wurde der Beton zügig und kontinuierlich in der Schalung eingebracht. Weil der Mischvorgang relativ lange dauert (ungefähr 20 Minuten pro Mischung), verging doch eine beträchtliche Zeit bis die benötigte Betonkubertur im Krankübel vorhanden war. Dies führte insbesondere bei den großen Versuchskörpern (Serie 200-00) zu einer inhomogenen Frischbetonsmischung.



Bild 4-13 Betonierungsvorgang des Versuchskörpers

4.2.3 Eigenschaften der Versuchskörpern

4.2.3.1 Wandstärke / Imperfektionen

Nach dem Ausschalen zeigten sich geometrischen Abweichungen zu den planmäßigen Dimensionen des Versuchskörpers. Durch Absetzen des Frischbetons stellten sich vor allem bei den größeren Beulserien beachtliche Unebenheiten im oberen Rand des Versuchskörpers ein. Um das auszugleichen wurde mit Hilfe einer Wandsäge von oberem Rand einige Zentimeter abgeschnitten (Bild 4-14). Dadurch verkürzt sich bei der Beulserie 200-00 die ursprüngliche Höhe des Versuchskörpers etwas. Die FE-Berechnungen zeigten aber, dass die veränderten Abmessungen keinen relevanten Einfluss auf das gesamte Tragverhalten haben (siehe Kapitel 4.3.1.3). Ein weiterer Grund für die Veränderung der Geometrie liegt an der Verformung der Schalung. Durch die flüssige Konsistenz der Mischung entsteht ein besonders hoher Druck auf die Schalung.



Bild 4-14 Wandsäge

Die tatsächliche Wandstärke über die ganze Scheibe wurde messtechnisch aufgenommen und bei der numerischen Simulation einzelnen Versuche berücksichtigt. Dafür wurden 35 Messstellen in ausgewählten Punkten der Scheibe mit Hilfe einem Induktiven Wegaufnehmer W5TK gemessen, wie das Bild 4-18 und das Bild 4-20 zeigt. Die Messungen wurden an der Inn- und der Außenseite der Scheibe vorgenommen und damit die Stärke bestimmt. Die Dicke der oberen und unteren Ränder des Versuchskörpers konnte direkt mit einer Schublehre gemessen werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Unterschied in der Wandstärke umso ausgeprägter waren, je größer die Versuchskörper sind. Besonders große Dickenunterschiede wurden bei den großen Beulserien im unteren und im oberen Bereich des Versuchskörpers festgestellt. (Bild 4-32). Bei den großen Versuchskörpern zeigte sich die Auswirkung dieser Dickenunterschiede dadurch, dass sich die Beulfigur etwas nach oben verschoben hat (siehe Kapitel 4.4.5).

Bei den Flanschen wurde auch direkt mit Hilfe einer Schublehre die Wandstärke nur an drei Stellen von jeder Seite (Ost und Westseite) gemessen, der obere, der untere und der mittlere Bereich der vertikalen Ränder.

Die Anordnung der Messstellen in der Scheibe jeder Beulserie ist in den Bildern Bild 4-15 bis Bild 4-17 dargestellt. Die Abstände der Messpunkte variieren entsprechend der Abmessungen des Versuchskörpers. (Für die Beulserie 100-00 wurden nur 30 Stellen gemessen).

Sowohl die Messergebnisse als auch die Rechenergebnisse zeigen, dass unterschiedliche Wandstärken sich mehr auf den Verlauf der Last-Beulverformungskurve als auf die Tragfähigkeit des

Versuchskörpers auswirkt. Eine detaillierte Analyse diesbezüglich wird bei der Beulserie 150-00 im Kapitel 5 gezeigt (Siehe Kapitel 5.4).

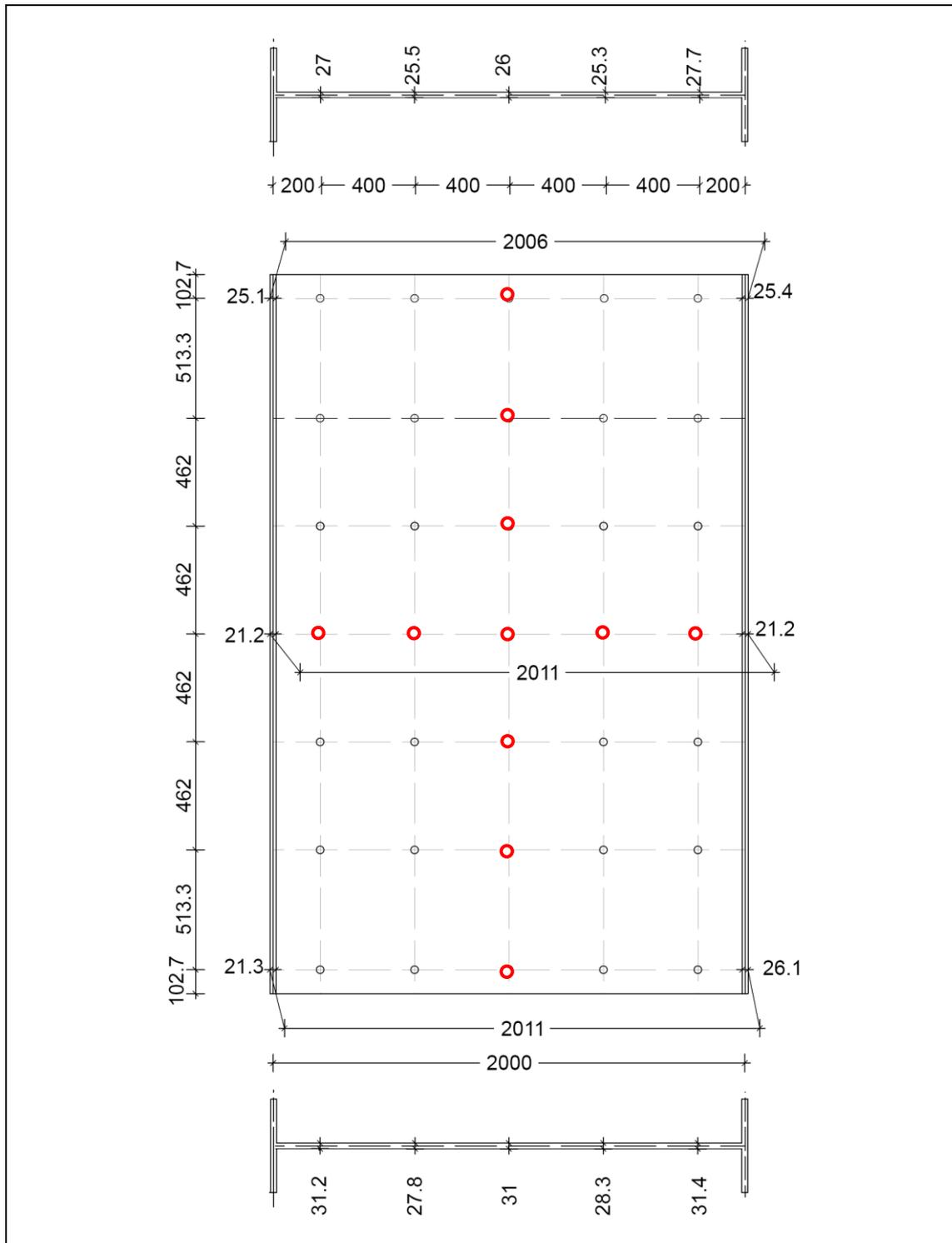


Bild 4-15 Anordnung der Messpunkte der Beulserie 200-02

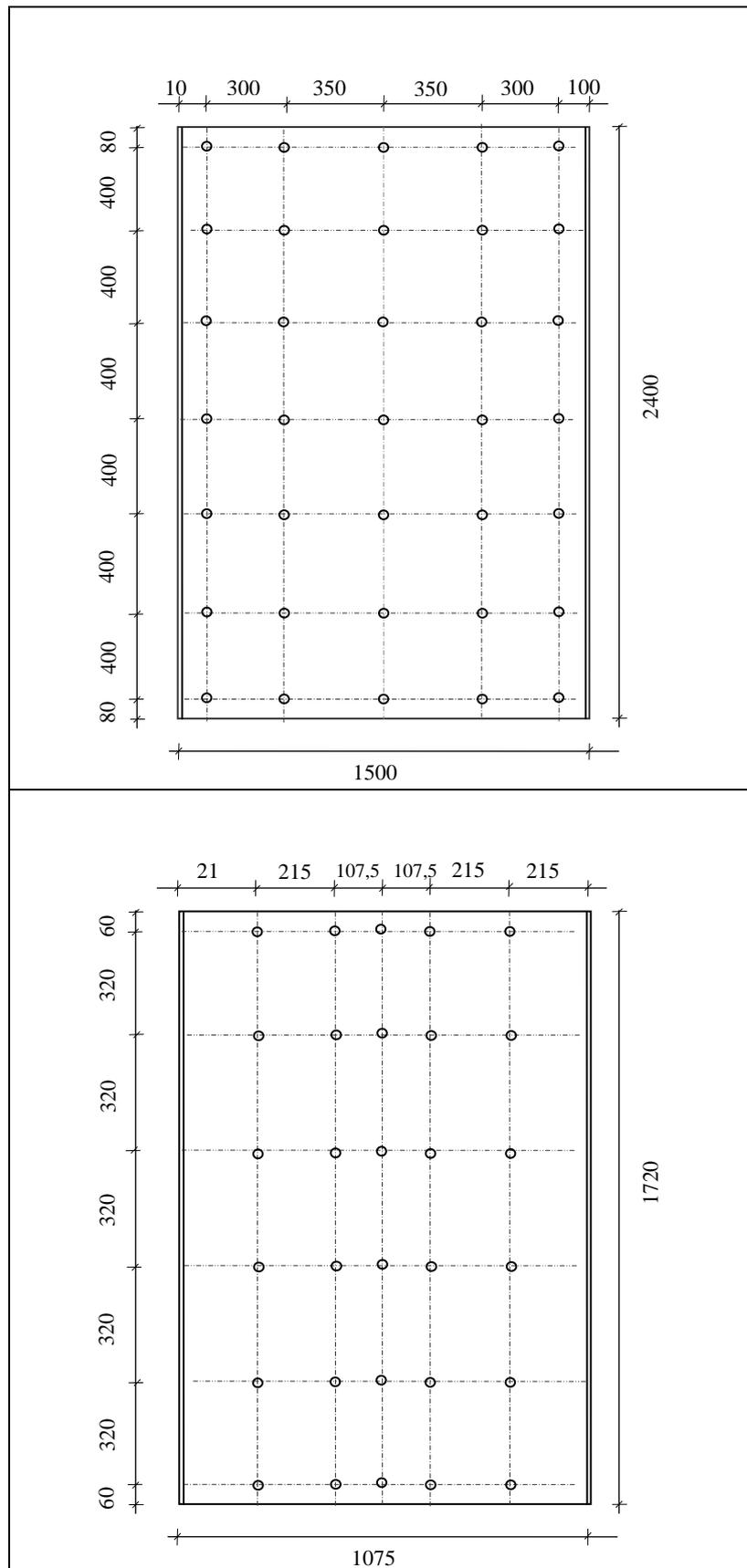


Bild 4-16 Anordnung der Messpunkte der Beulserien 150-00 (oben) und 100-00 (unten)

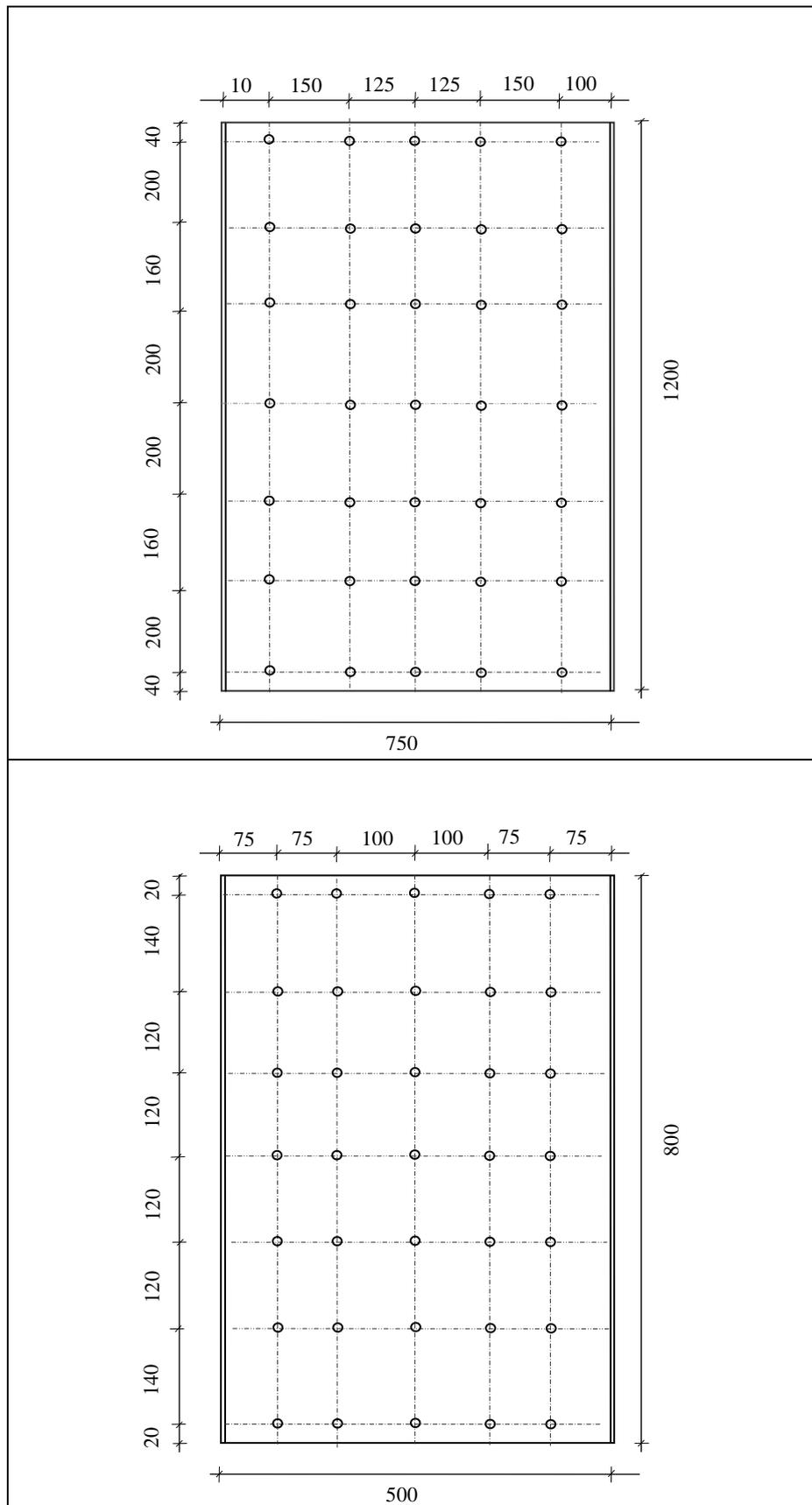


Bild 4-17 Anordnung der Messpunkte der Beulserien 50-00 (oben) und 75-00 (unten)

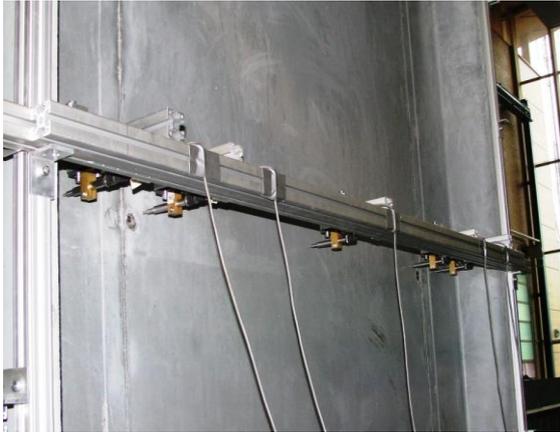


Bild 4-18W5TK Induktiver Wegaufnehmer

Wandstärke (mm)				
26,05	26,08	25,98	26,10	26,19
26,35	26,25	26,02	26,11	26,18
26,09	26,02	23,26	25,94	25,89
25,84	25,78	25,05	25,67	25,64
25,79	25,79	25,72	25,76	25,80
25,56	25,69	25,73	25,96	26,11
26,26	25,55	25,73	26,03	26,19

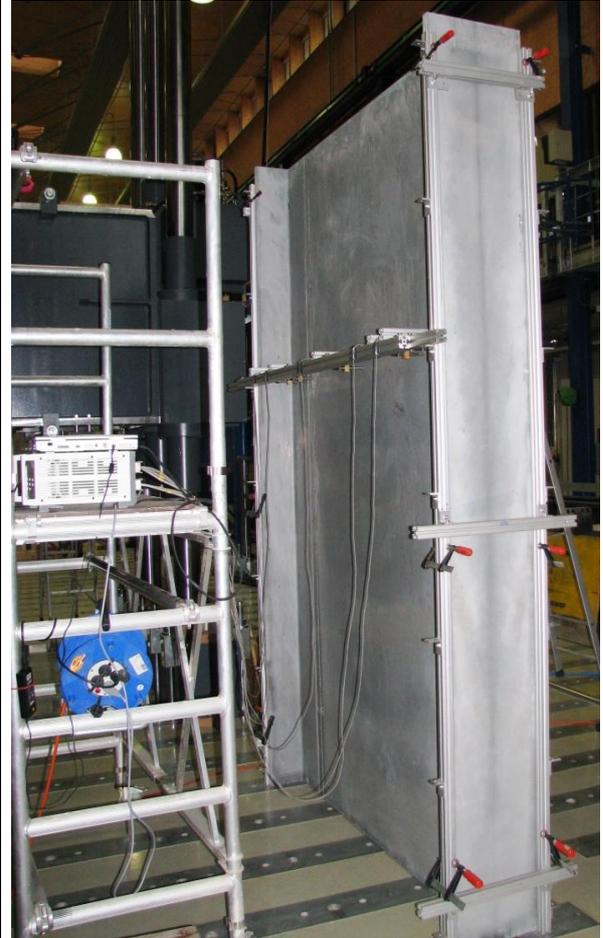


Bild 4-20 Abmessung der Wandstärke der Scheibe

Bild 4-19 Wandstärke des Versuchskörpers 50-01

Wandstärke (mm)				
26,02	26,02	26,02	26,02	26,02
25,96	25,96	25,96	25,96	25,96
25,85	25,85	25,85	25,85	25,85
25,58	25,58	25,58	25,58	25,58
25,71	25,71	25,71	25,71	25,71
25,80	25,80	25,80	25,80	25,80
25,80	25,80	25,80	25,80	25,80

Bild 4-21 Wandstärke des Versuchskörpers 50-02

Wandstärke (mm)				
26,03	25,78	25,77	25,80	25,79
25,82	25,54	25,28	25,50	25,63
25,40	25,10	24,87	24,04	25,23
25,18	24,92	25,01	24,91	25,06
25,36	25,17	25,04	25,14	25,17
25,81	25,61	25,39	25,44	25,37
26,21	26,13	25,87	25,88	25,72

Bild 4-22 Wandstärke des Versuchskörpers50-03

Wandstärke (mm)				
25,76	25,76	25,76	25,76	25,76
25,38	25,38	25,38	25,38	25,38
26,10	26,10	26,10	26,10	26,10
25,72	25,72	25,72	25,72	25,72
26,39	26,39	26,39	26,39	26,39
26,73	26,73	26,73	26,73	26,73
27,35	27,35	27,35	27,35	27,35

Bild 4-23 Wandstärke des Versuchskörpers 75-01

Wandstärke (mm)				
26,13	26,29	26,39	26,28	25,89
25,98	26,04	26,08	26,20	26,11
25,91	25,85	25,92	26,03	26,05
25,58	25,45	25,78	25,75	25,82
26,27	26,42	26,53	26,65	26,38
26,70	26,98	27,00	26,95	26,34
26,99	27,53	27,58	27,56	27,31

Bild 4-24 Wandstärke des Versuchskörpers 75-02

Wandstärke (mm)				
25,77	25,97	26,23	26,26	26,02
25,12	23,63	23,94	25,29	25,33
25,14	24,84	25,07	25,27	25,44
24,42	24,02	25,30	24,32	24,53
26,17	26,19	26,29	26,36	26,16
26,26	26,46	26,54	26,45	25,86
26,90	27,37	27,45	27,19	26,14

Bild 4-25 Wandstärke des Versuchskörpers 75-03

Wandstärke (mm)				
26,56	25,98	25,70	26,16	27,99
27,72	25,84	26,36	26,47	28,63
28,29	26,26	27,15	26,39	29,14
28,56	27,23	27,85	27,81	29,68
28,42	26,84	27,52	27,57	29,46
28,15	26,10	26,96	26,39	29,09

Bild 4-26 Wandstärke des Versuchskörper 100-01

Wandstärke (mm)				
26,20	26,20	26,20	26,20	26,20
27,15	27,15	27,15	27,15	27,15
27,83	27,83	27,83	27,83	27,83
28,14	28,14	28,14	28,14	28,14
28,05	28,05	28,05	28,05	28,05
27,46	27,46	27,46	27,46	27,46

Bild 4-27 Wandstärke des Versuchskörpers 100-02

Wandstärke (mm)				
23,98	24,44	24,02	23,58	23,31
25,19	24,63	24,89	24,13	24,21
25,92	25,17	25,67	25,88	24,91
26,26	26,08	26,30	25,926	25,59
26,50	25,78	26,19	25,92	25,95
26,48	25,27	25,91	25,76	26,33

Bild 4-28 Wandstärke des Versuchskörpers 100-03

Wandstärke (mm)				
23,89	22,10	20,71	21,15	23,54
25,08	22,95	22,14	22,53	24,85
27,20	26,68	27,07	25,91	26,96
27,87	29,17	28,98	28,35	27,87
28,93	28,52	29,32	28,09	29,26
29,95	26,57	27,89	26,27	29,89
29,54	25,39	25,85	25,52	30,04

Bild 4-29 Wandstärke des Versuchskörpers 150-01

Wandstärke (mm)				
21,55	21,37	20,38	21,27	24,00
22,83	22,38	21,74	22,47	24,94
24,83	25,79	26,35	25,21	26,27
25,67	28,47	28,43	27,91	27,13
26,17	27,26	28,16	26,96	27,53
27,71	25,11	26,58	25,24	27,97
26,73	24,90	25,11	25,11	28,04

Bild 4-30 Wandstärke des Versuchskörpers 150-02

Wandstärke (mm)				
26,92	24,61	25,48	25,55	28,82
28,53	24,74	25,48	24,29	30,14
30,50	26,10	28,04	26,60	32,02
31,94	30,06	32,50	30,35	33,50
32,70	30,57	34,28	31,73	33,77
33,36	27,20	31,17	28,62	33,83
33,39	27,43	30,30	28,31	33,36

Bild 4-31 Wandstärke des Versuchskörpers 200-01

Wandstärke (mm)				
26,83	25,34	25,51	24,93	27,40
28,20	24,9	25,47	23,77	28,74
29,00	25,48	27,41	25,48	30,23
30,67	28,43	31,99	29,63	31,86
31,25	30,04	33,9	31,09	32,03
31,53	26,88	31,42	28,37	32,08
30,99	27,51	30,55	28,10	31,24

Bild 4-32 Wandstärke des Versuchskörpers 200-02

Wandstärke (mm)				
25,97	25,97	25,97	25,97	25,97
25,94	25,94	25,94	25,94	25,94
26,09	26,09	26,09	26,09	26,09
26,74	26,74	26,74	26,74	26,74
26,97	26,97	26,97	26,97	26,97
27,10	27,10	27,10	27,10	27,10
27,41	27,41	27,41	27,41	27,41

Bild 4-33 Wandstärke des Versuchskörpers
200-03

4.2.3.2 Vorkrümmung

Nach den erhaltenen Werten der Wandstärke wurde die Vorkrümmung der Scheibe festgestellt. Die erzielten Ergebnisse weist die Richtung (Ost oder West, entsprechend der Orientierung des Versuchskörpers) auf, wo die geplante Vorauslenkung mittels einer Auslenkungskraft im Versuchskörper aufgetragen wird.

Die Vorkrümmung der Scheibe wurde entlang der mit Rot markierten Messpunkten im Bild 4-15 ermittelt. Von jeder Messstelle wurde die Abweichung der Mittelebene von der perfekten ebenen Lage bestimmt und dadurch die Richtung der Vorkrümmung festgestellt.

Im Bild 4-35 bis Bild 4-39 wurden die Ergebnisse der Vorkrümmung von jeden Versuchskörpern entlang einer vertikalen und horizontalen Linie, wobei der Referenzpunkt 0,0 der Scheibenmitte ist.

Zur Ermittlung der Vorkrümmung in **vertikaler Richtung** zeigt den blauen markierten Bereich im Bild 4-34, die Dicke der perfekten ebenen Scheibe. Der Wert 200 entspricht die Achse der perfekten ebenen Fläche. Der Wert 0 bis 200 ist zum Ost und von 400 zu 200 zum West orientiert. Die rote Linie repräsentiert der Messaufnehmer.

Zur Ermittlung der Vorkrümmung der **horizontalen Richtung** (Bild 4-34, links) ist der Wert von 185 bis 200 zur Ostseite und von 200 bis 215 zur Westseite orientiert. Die rote Linie repräsentiert der Messaufnehmer. Der blaue gefärbte Bereich symbolisiert die Dicke der perfekten ebenen Scheibe.

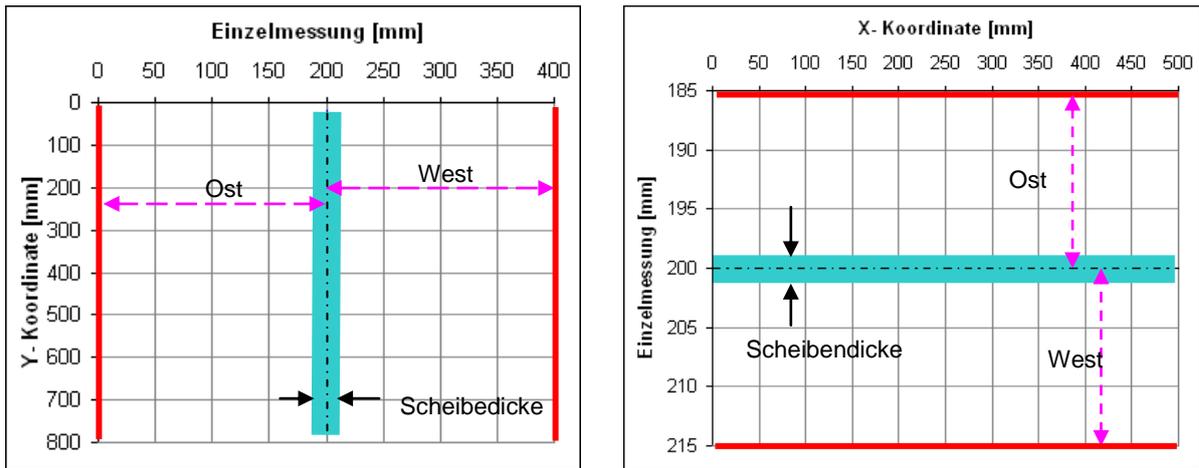


Bild 4-34 Abmessung der Vorkrümmung der Scheibe

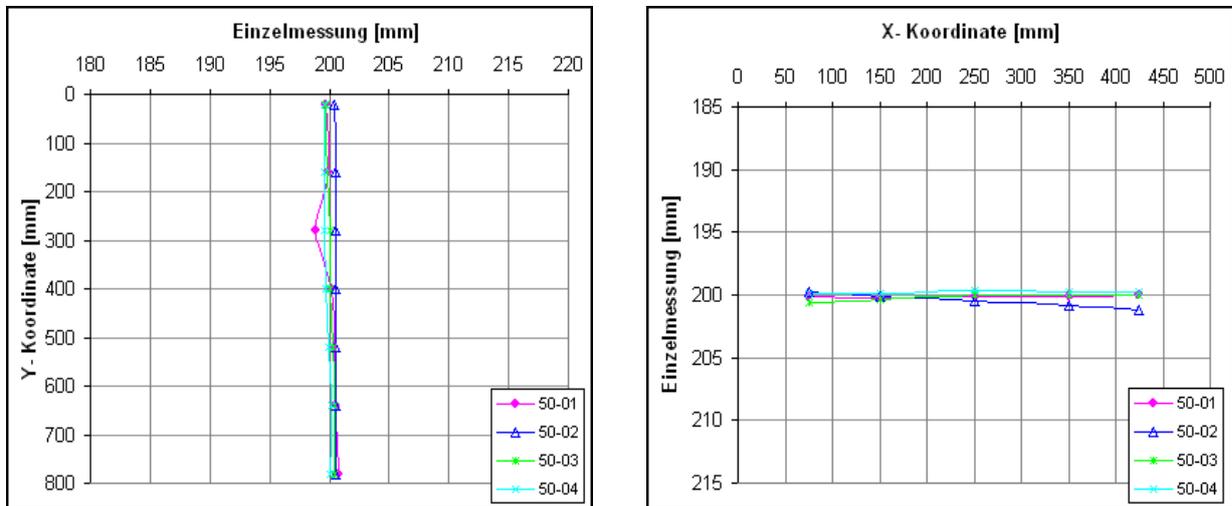


Bild 4-35 Vorkrümmung entlang der vertikalen (links) und horizontalen (rechts) Achse - Beulserie 50-00

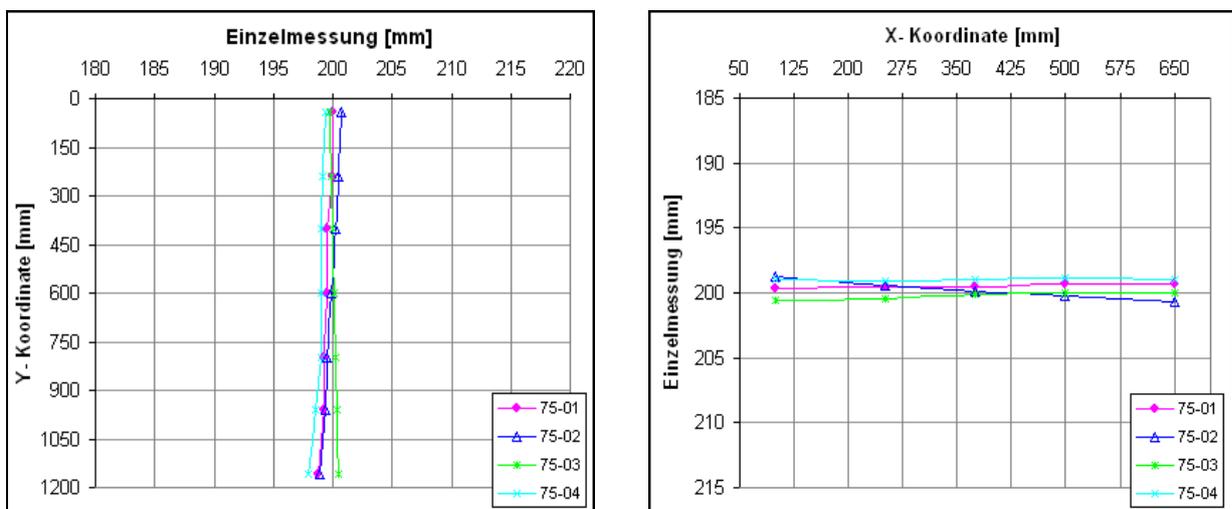


Bild 4-36 Vorkrümmung entlang der vertikalen (links) und horizontalen (rechts) Achse - Beulserie 75-00

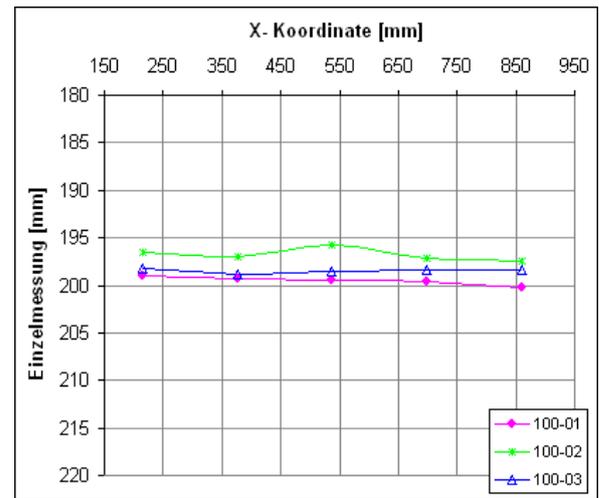
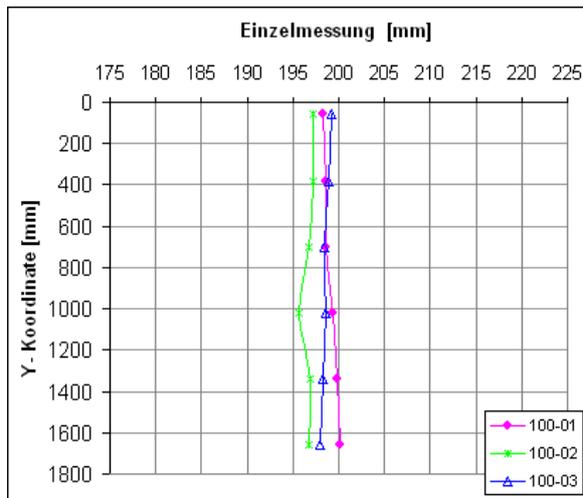


Bild 4-37 Vorkrümmung entlang der vertikalen (links) und horizontalen (rechts) Achse – Beulserie 100-00

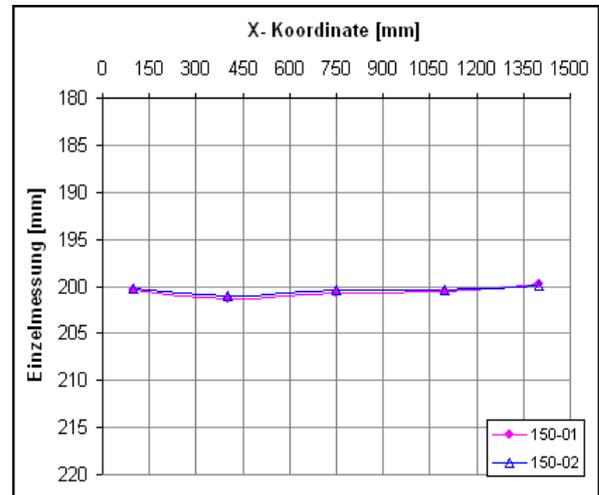
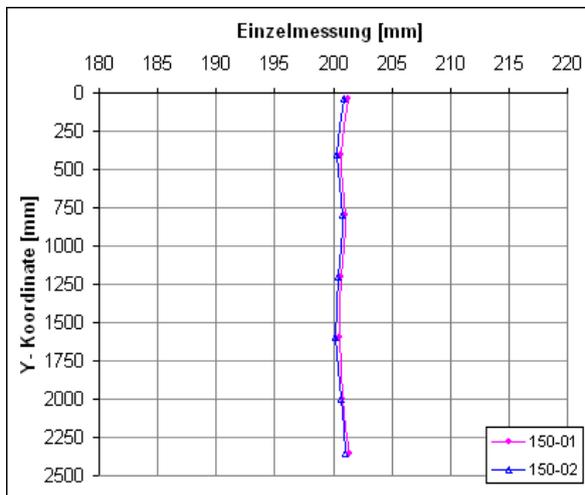


Bild 4-38 Vorkrümmung entlang der vertikalen (links) und horizontalen (rechts) Achse – Beulserie 150-00

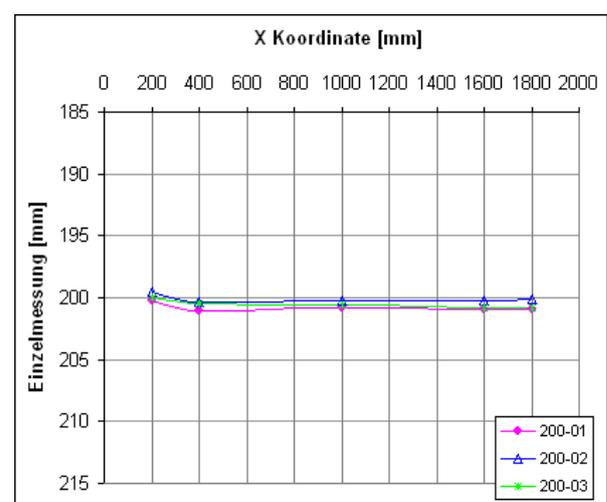
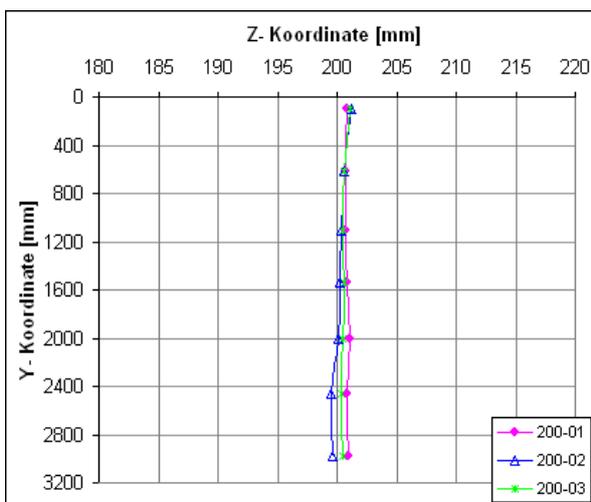


Bild 4-39 Vorkrümmung entlang der vertikalen (links) und horizontalen (rechts) Achse - Beulserie 200-00

4.2.3.3 Fasergehalt und Faserverteilung

Für die Ermittlung des Fasergehalts wurde mittels Messung der magnetischen Induktivität eine zerstörungsfreie Methode angewendet (Bild 4-40). Nach [28] wird dabei der Ferritkern über eine mehr oder weniger eisenhaltige Oberfläche geschlossen. Dadurch entsteht ein elektromagnetische Fluss, der die Induktivität der Spule verzerrt. Je eisenhaltiger das Material unter dem Ferritkern ist, desto höher ist die Induktivität die gemessen wird. Die Einheit der Induktivität ist Henry

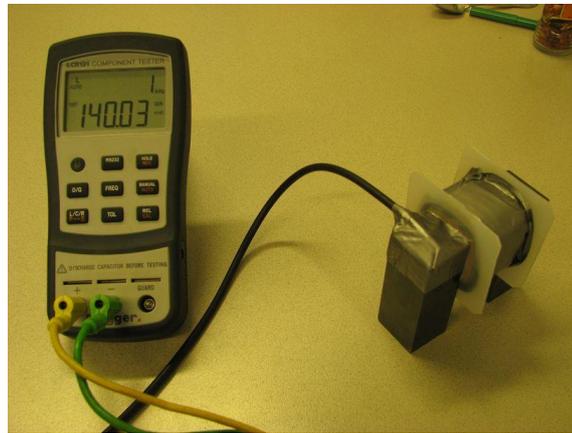


Bild 4-40 Induktivitätsmessgerät [28]

Die Anzahl der Messstellen variieren entsprechend der Größe des Versuchskörpers. Die Abmessungen in der Scheibe wurden sowohl von der Innen als auch von der Außenseite entnommen und davon ein Mittelwert ermittelt (W_i).

Um ein klares Bild der Faserverteilung zu kriegen lassen sich die Ergebnisse der gemessenen Werte in einem 3D Diagramm darstellen. (Bild 4-42, oben). Die x Richtung ist horizontal (in Richtung der Breite) orientiert und die y -Richtung ist vertikal (also in Lastrichtung oder in der Richtung der Höhe des Versuchskörpers) orientiert. Auf der z Koordinate wurde der gemessene Eisengehalt (W_i) aufgetragen.

Der Koordinatenursprung ($x = 0, y = 0$) wurde an der linken oberen Ecke der Scheibe angenommen. Der jeweilige Fasergehalt der gemessenen Stellen wurde mit Hilfe der Gleichung 1 ermitteln [29].

$$\rho_i = W_i \frac{\rho_{2\%}}{W_\phi} \quad (1)$$

W_i gemessene Induktivität in der Messstelle

W_ϕ Mittelwert der gemessenen Induktivität alle Messstellen (Scheibe)

$\rho_{2\%}$ Soll-Fasergehalt (2Vol.-%)

Durch die bereits erwänte Zunahme der Wandstärke im unteren Bereich der Scheibe liefert die Induktivitätsmenge dort hohe Ferermenge. Dies bedeutet aber nicht, dass dort die Fasergehalt bzw. die Faserkonzentration wesentlich höher ist.

Anderes als bei den anderen Versuchskörpern (außer der Beulserie 50-00) variierte wegen dem geringeren Unterscheid der Wandstärke der Fasergehalt im Versuchskörper 100-03 nicht so stark. Das erklärt die gute Übereinstimmung zwischen dem Labor und dem numerischen Ergebnis.

Der Fasergehalt wurde auch in den Flanschen gemessen, die Ergebnisse weisen besonderes bei den größeren Beulserien eine gleichmäßige Verteilung auf.

Um die Ost-Westseite der Scheibe zu definieren wurde der Versuchskörper gemäß der Himmelsrichtung, wie Bild 4-41 (oben) zu sehen ist orientiert. So wird die Ostseite zur Außenseite und die Westseite zur Innenseite. Als Folge ist ein Flansch nach Süd und der andere nach Nord orientiert.

Die Ergebnisse der Faserverteilung für jeden Versuchskörper wurden in den Bild 4-42 bis Bild 4-69 dargestellt.

Die Faserorientierung wurde bei dieser Arbeit nicht bestimmt.

Anmerkung: In diesem Teil der Arbeit wurde der Einfluss der unterschiedlichen Wandstärke bei der Bestimmung des Fassergehaltes nicht berücksichtigt. Weitere Informationen zu diesem Thema finden sich in der Arbeit: “Bestimmung der Faserorientierung mittels Magnetfeldern” [30]. Diese Arbeit befasst sich ausführlich mit dem Einfluss dieser Parameter in der Bestimmung des Fassergehaltes.

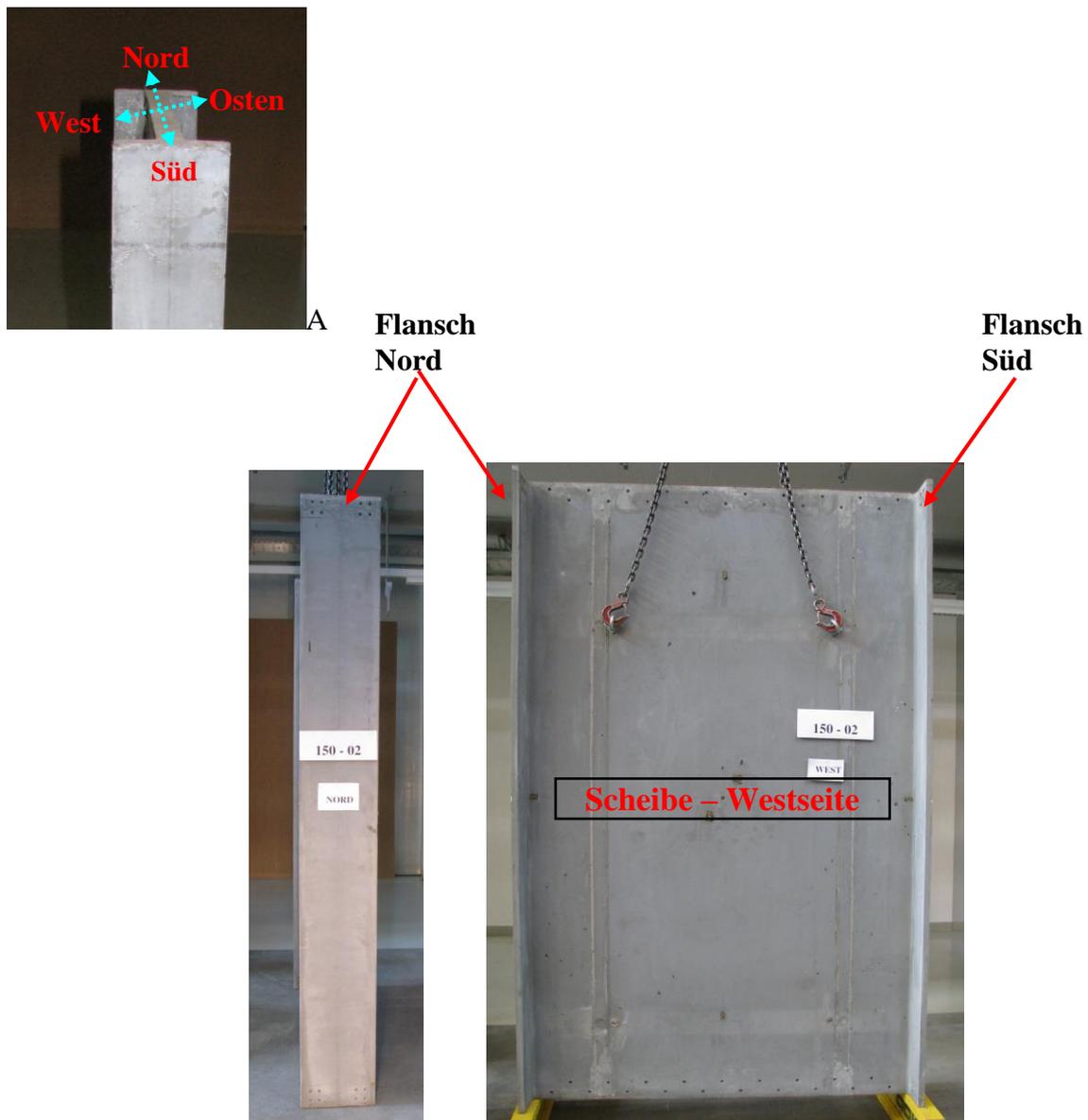


Bild 4-41 Versuchskörper nach Himmelsrichtung angeordnet

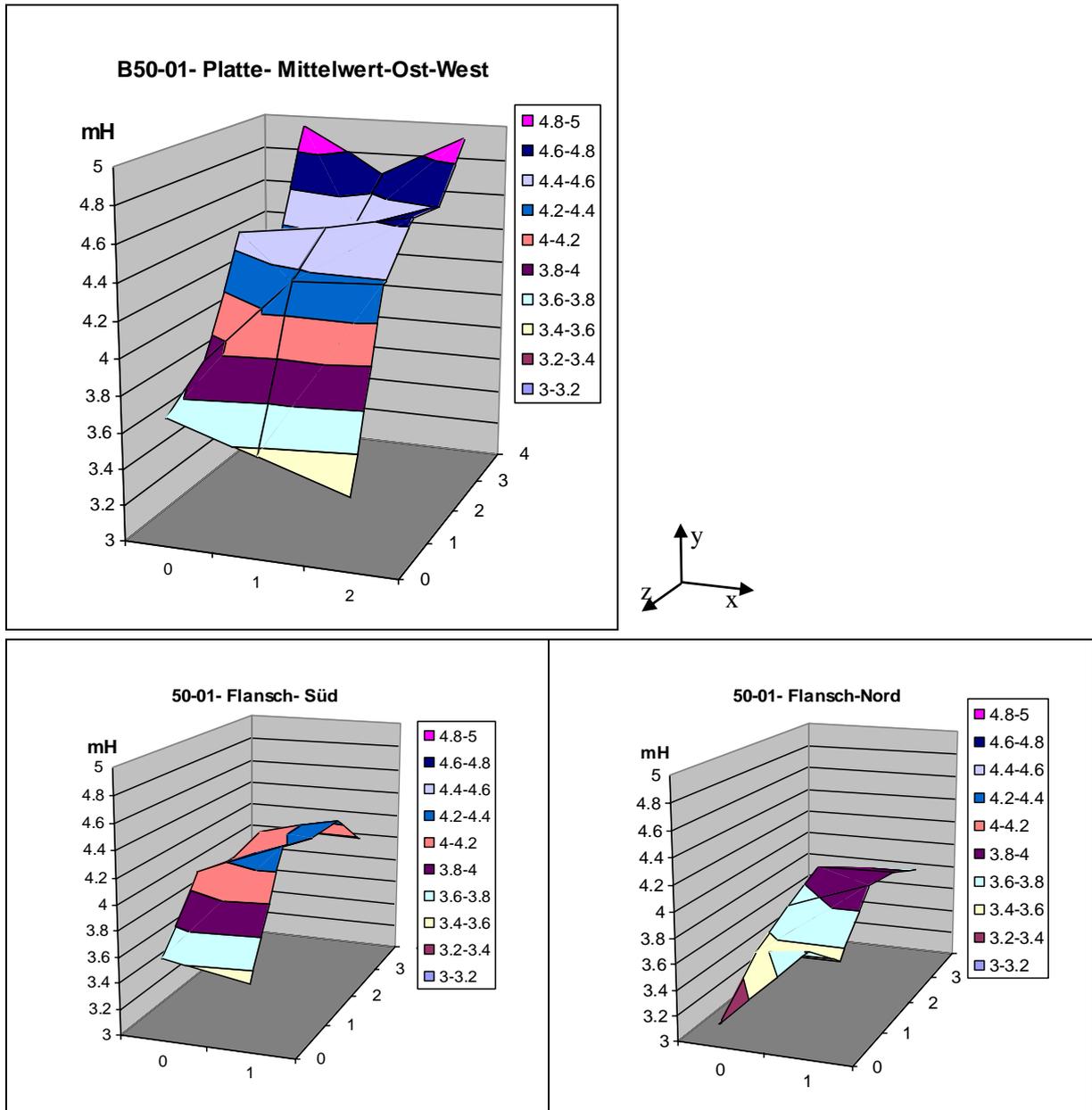


Bild 4-42 Gemessene Werte der Induktivität dargestellt in 3D Diagramm - Versuchskörper 50-01

50-01							
	Flansch-Süd		Flansch-Nord		Scheibe		
	0	1	0	1	0	1	2
0	1,88	1,83	1,65	1,98	1,72	1,65	1,58
1	2,13	2,26	1,83	1,83	1,80	2,02	2,03
2	2,09	2,21	1,93	2,04	2,08	2,11	2,15
3	2,14	2,21	2,01	2,02	1,92	2,07	2,15
4	2,06	2,05	1,92	1,94	2,29	2,17	2,28

Bild 4-43 Fasergehalt (Links) und Anordnung den Messpunkten - Versuchskörper 50-01

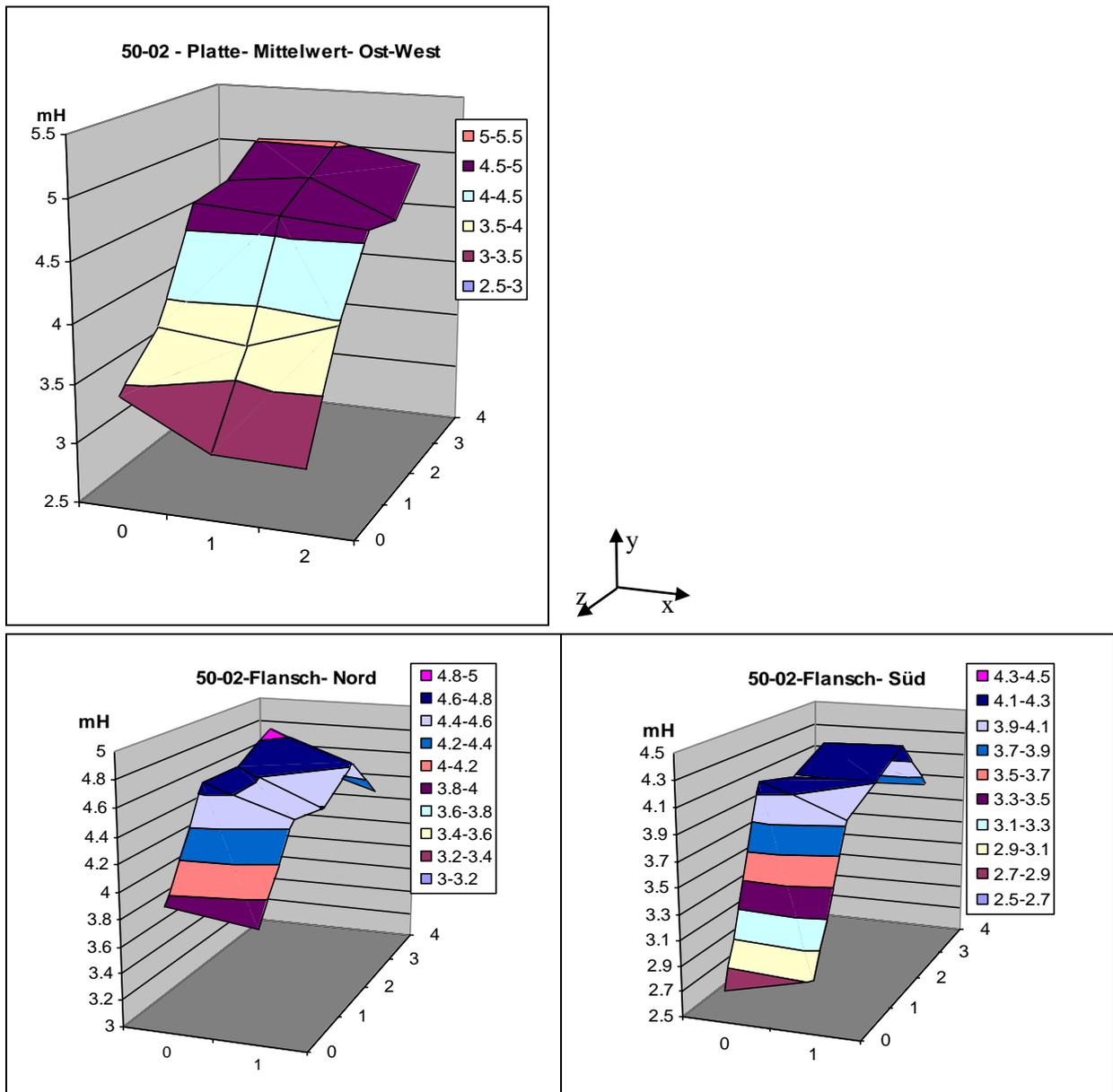


Bild 4-44 Gemessene Werte der Induktivität dargestellt in 3D Diagramm - Versuchskörpers 50-02

50-02							
	Flansch-Süd		Flansch-Nord		Scheibe		
	0	1	0	1	0	1	2
0	1,34	1,41	1,91	1,87	1,61	1,43	1,42
1	2,04	1,92	2,27	2,17	1,78	1,74	1,86
2	1,99	2,00	2,27	2,13	2,20	2,18	2,15
3	2,07	2,08	2,36	2,25	2,23	2,27	2,12
4	1,84	1,86	2,16	2,05	2,35	2,36	2,28

Bild 4-45 Fasergehalt (Links) und Anordnung den Messpunkten - Versuchskörpers 50-02

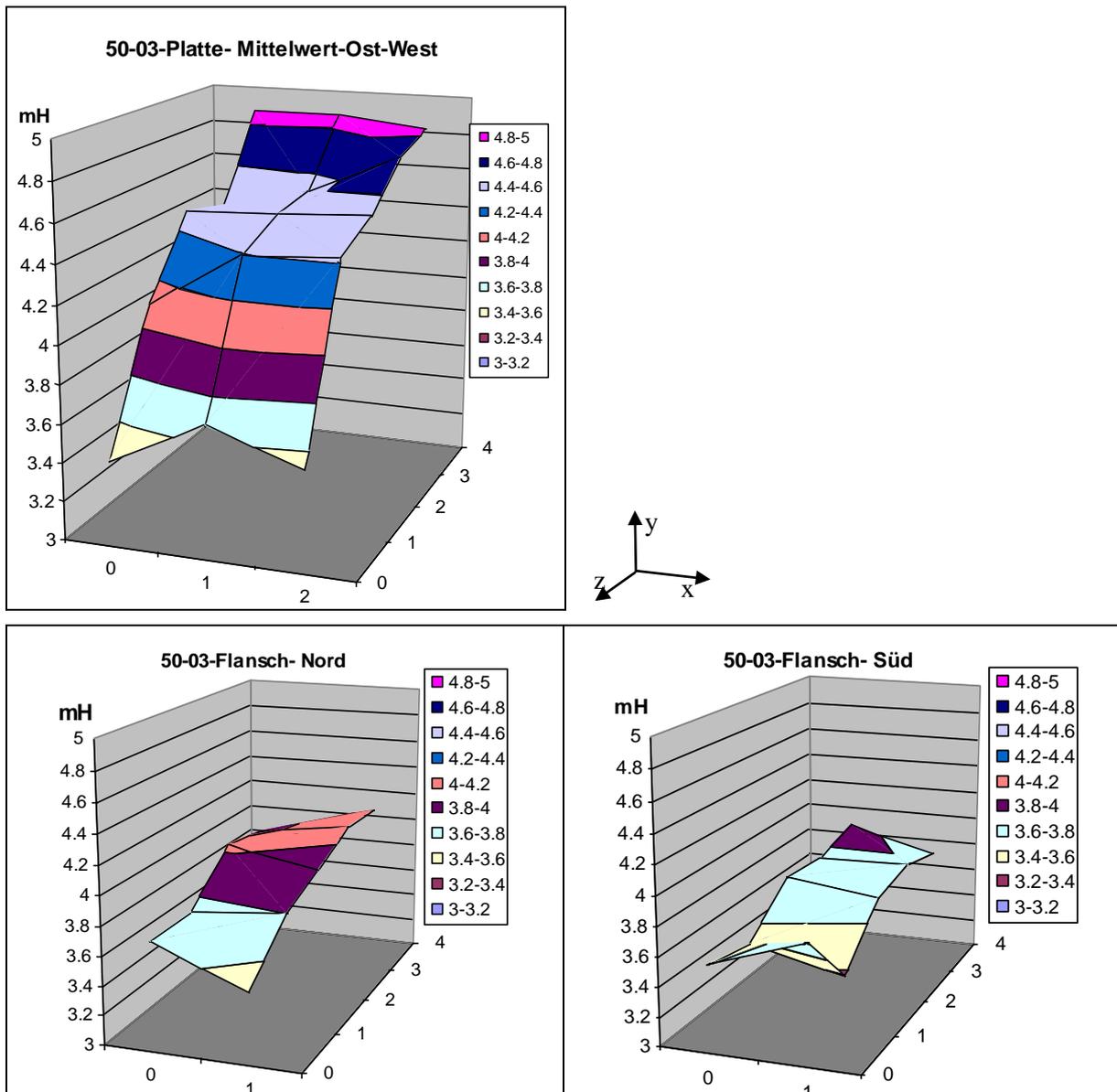


Bild 4-46 Gemessene Werte der Induktivität dargestellt in 3D Diagramm - Versuchskörpers 50-03

50-03									
Flansch-Süd			Flansch-Nord		Scheibe			Messpunkte	
	0	1	0	1	0	1	2	1	2
0	1,90	2,02	1,98	1,84	1,58	1,69	1,62	●	●
1	1,86	1,78	1,98	2,01	1,89	2,02	1,03	●	●
2	2,01	1,97	2,13	2,07	2,06	2,07	2,08	●	●
3	2,00	2,00	2,11	2,15	2,04	2,08	2,18	●	●
4	2,04	1,95	2,04	2,14	2,24	2,24	2,22	●	●

Bild 4-47 Fasergehalt (Links) und Anordnung den Messpunkten - Versuchskörpers 50-03

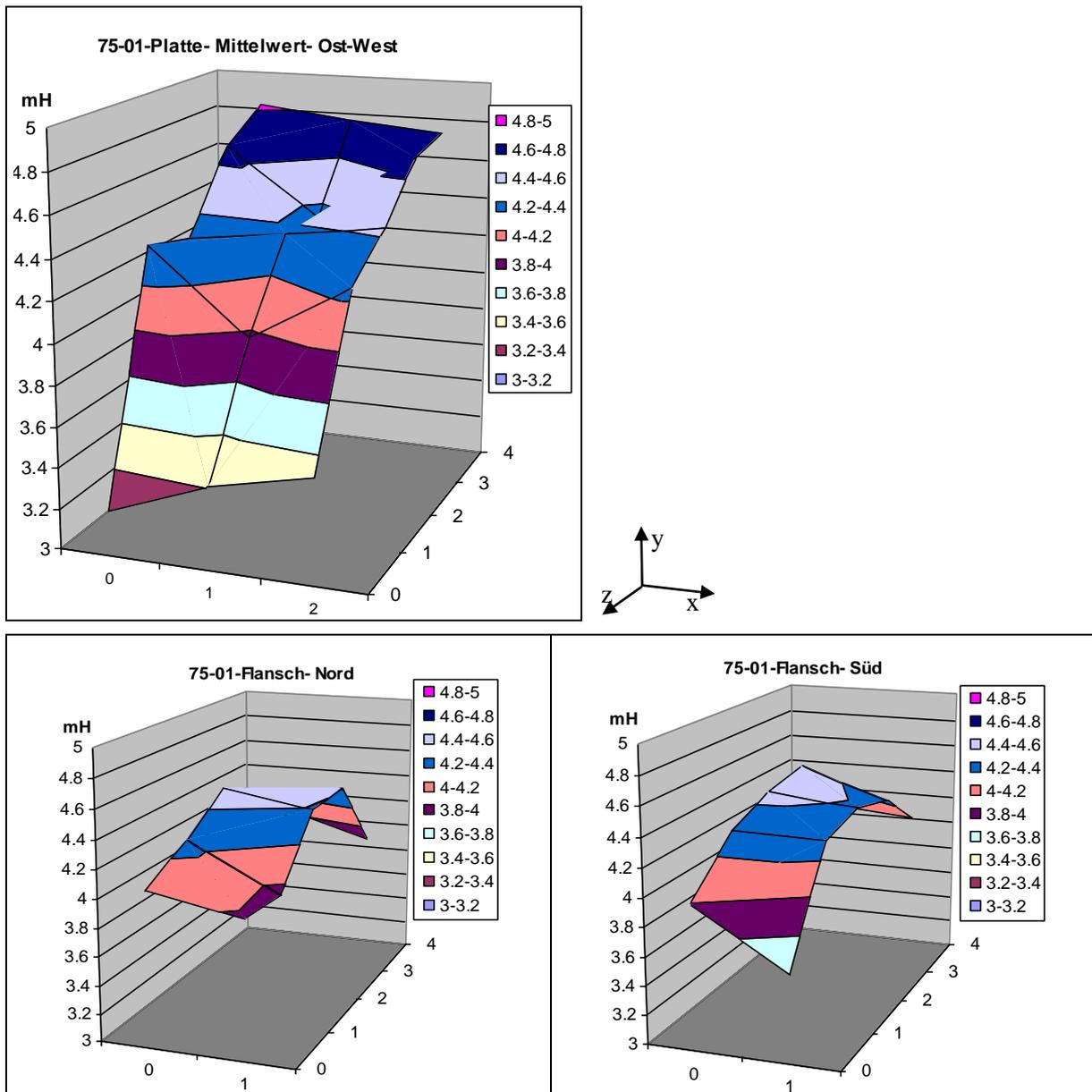


Bild 4-48 Gemessene Werte der Induktivität dargestellt in 3D Diagramm - Versuchskörpers 75-01

75-01									
	Flansch-Süd		Flansch-Nord		Scheibe				
	0	1	0	1	0	1	2		
0	1,90	2,02	1,98	1,84	1,58	1,69	1,62		
1	1,86	1,78	1,98	2,01	1,89	2,02	1,03		
2	2,01	1,97	2,13	2,07	2,06	2,07	2,08		
3	2,00	2,00	2,11	2,15	2,04	2,08	2,18		
4	2,04	1,95	2,04	2,14	2,24	2,24	2,22		

Bild 4-49 Fasergehalt (Links) und Anordnung den Messpunkten - Versuchskörpers 75-01

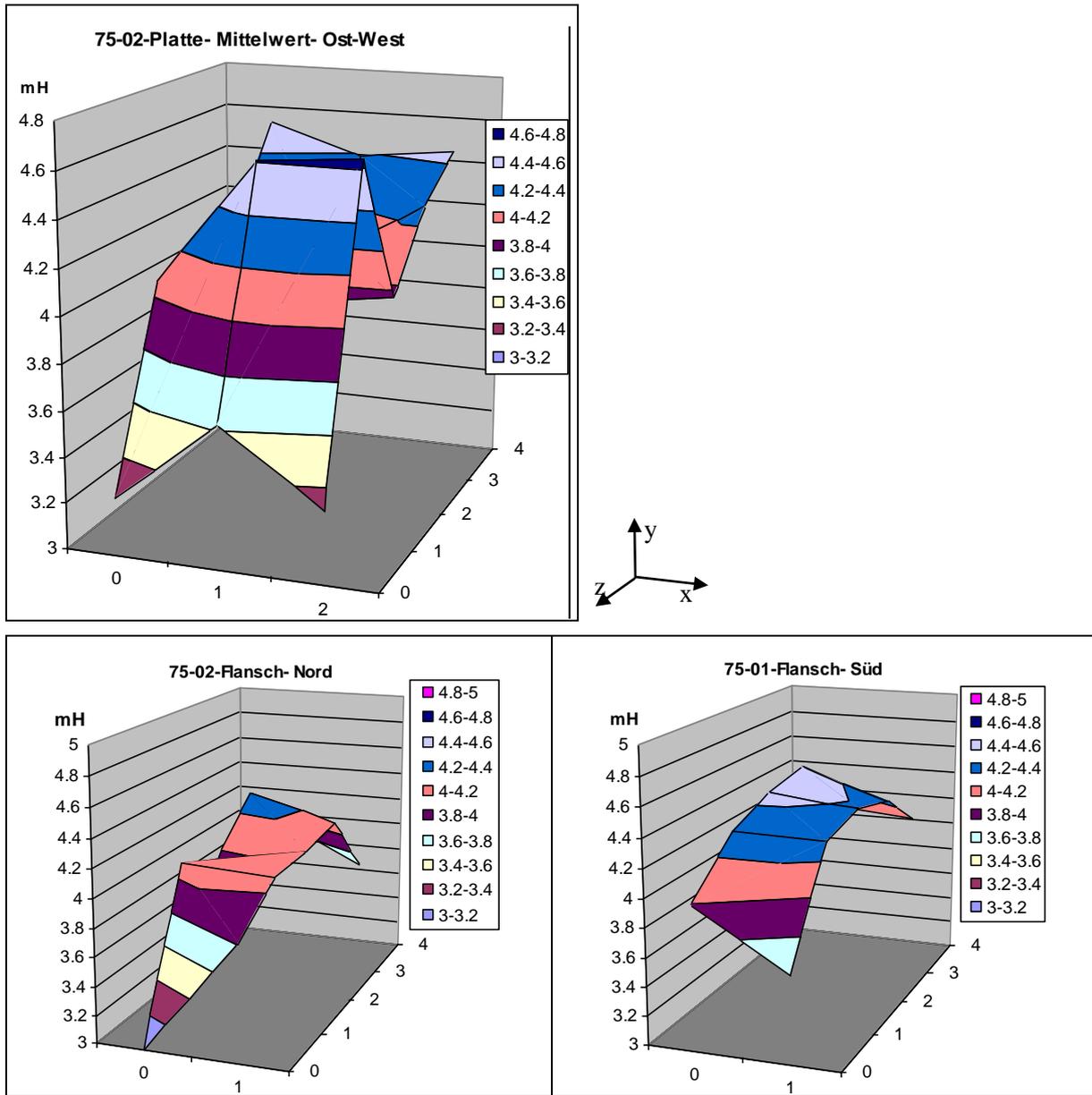


Bild 4-50 Gemessene Werte der Induktivität dargestellt in 3D Diagramm - Versuchskörpers 75-02

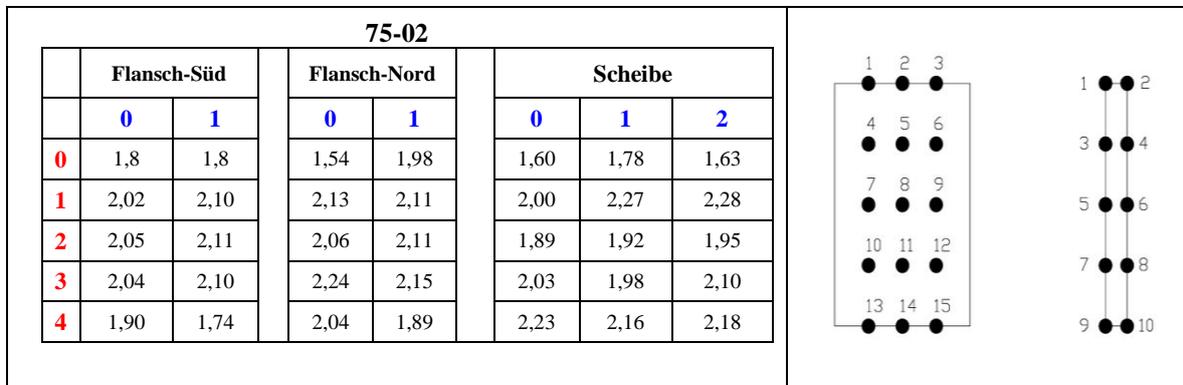


Bild 4-51 Fasergehalt (Links) und Anordnung den Messpunkten - Versuchskörpers 75-02

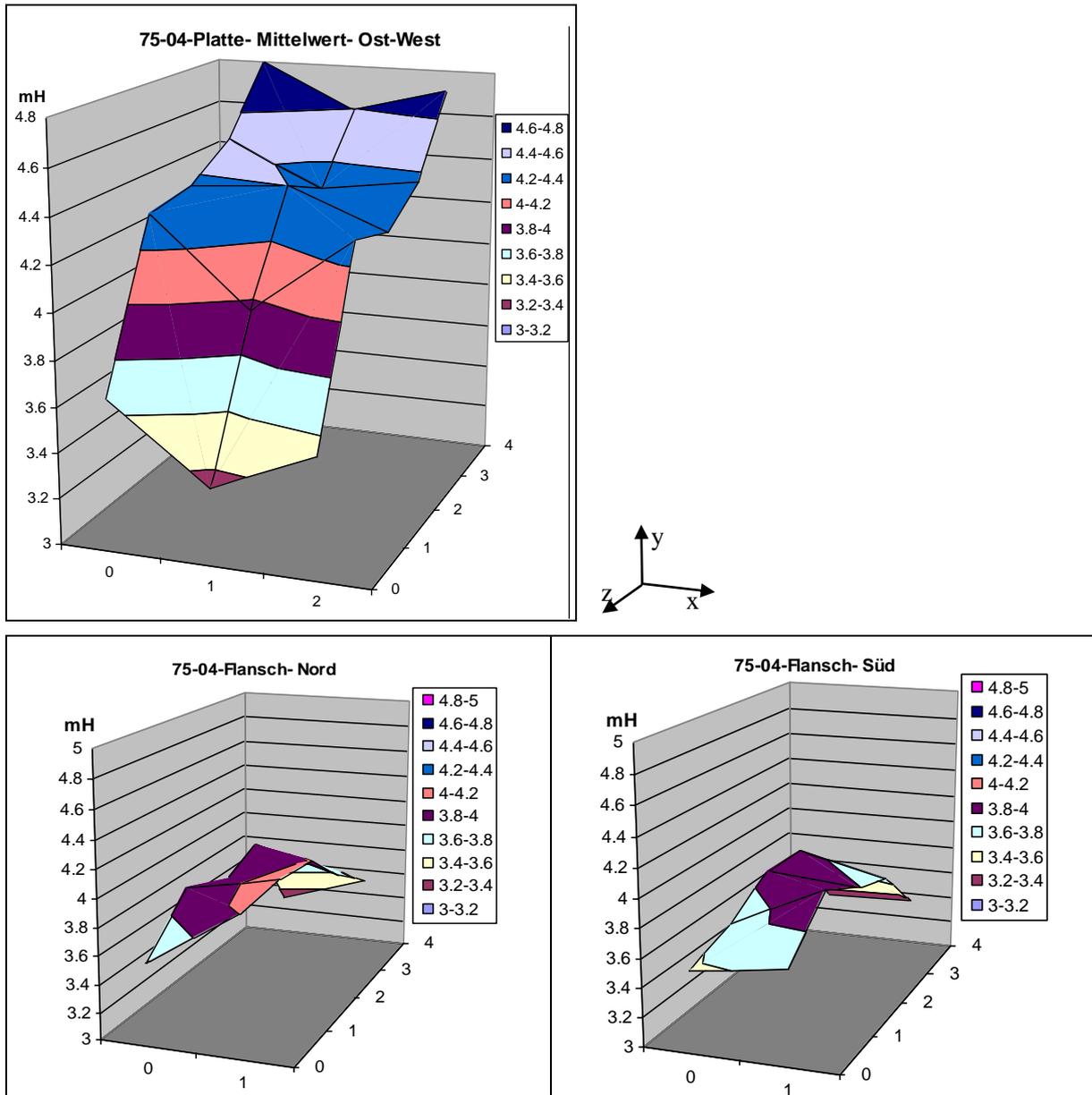


Bild 4-52 Gemessene Werte der Induktivität dargestellt in 3D Diagramm - Versuchskörpers 75-04

75-04									
Flansch-Süd			Flansch-Nord		Scheibe			Messpunkte	
	0	1	0	1	0	1	2	1	2
0	1,91	1,96	1,93	2,16	1,74	1,59	1,68	●	●
1	1,97	2,17	2,11	2,17	2,07	1,89	2,05	●	●
2	2,07	2,15	2,02	2,15	2,08	2,10	2,02	●	●
3	2,07	2,00	2,10	2,00	2,14	2,05	2,08	●	●
4	1,78	1,88	1,77	1,88	2,28	2,19	2,24	●	●

Bild 4-53 Fasergehalt (Links) und Anordnung den Messpunkten - Versuchskörpers 75-04

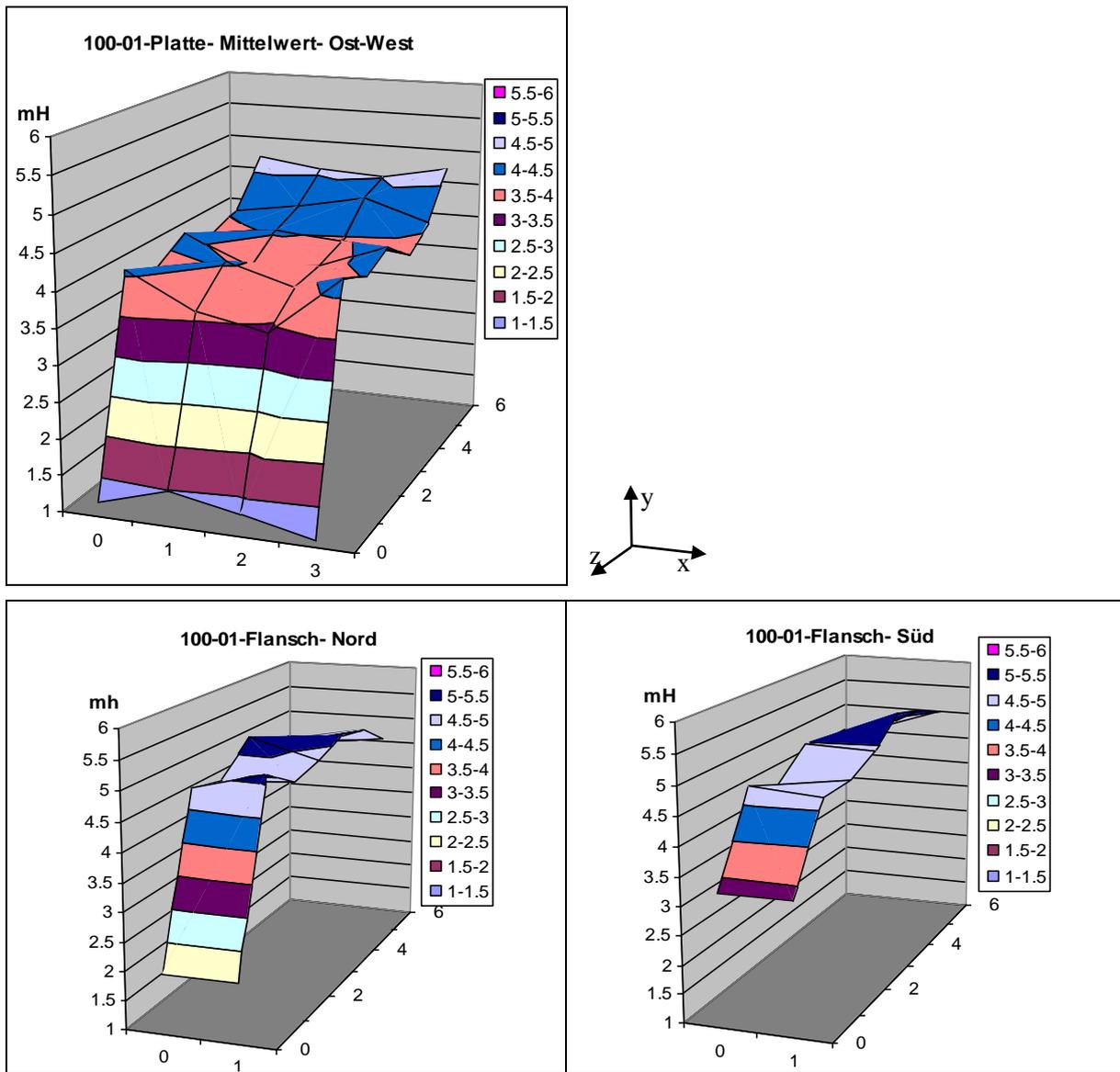


Bild 4-54 Gemessene Werte der Induktivität dargestellt in 3D Diagramm - Versuchskörpers 100-01

100-01										
Flansch-Süd			Flansch-Nord		Scheibe				Messpunkte	
	0	1	0	1	0	1	2	3	1	2
0	1,45	1,45	0,89	0,89	0,64	0,84	0,70	0,60	●	●
1	2,09	2,06	2,13	2,27	2,21	1,97	1,86	2,31	●	●
2	1,98	2,07	2,07	2,10	2,11	2,20	2,05	2,19	●	●
3	2,20	2,17	2,30	2,15	2,25	2,04	2,09	2,27	●	●
4	2,15	2,38	2,16	2,24	2,13	2,20	2,15	2,09	●	●
5	2,04	2,30	2,09	2,19	2,20	2,28	2,39	2,22	●	●
6	2,02	2,20	1,94	2,01	2,56	2,49	2,45	2,56	●	●

Bild 4-55 Fasergehalt (Links) und Anordnung den Messpunkten - Versuchskörpers 100-01

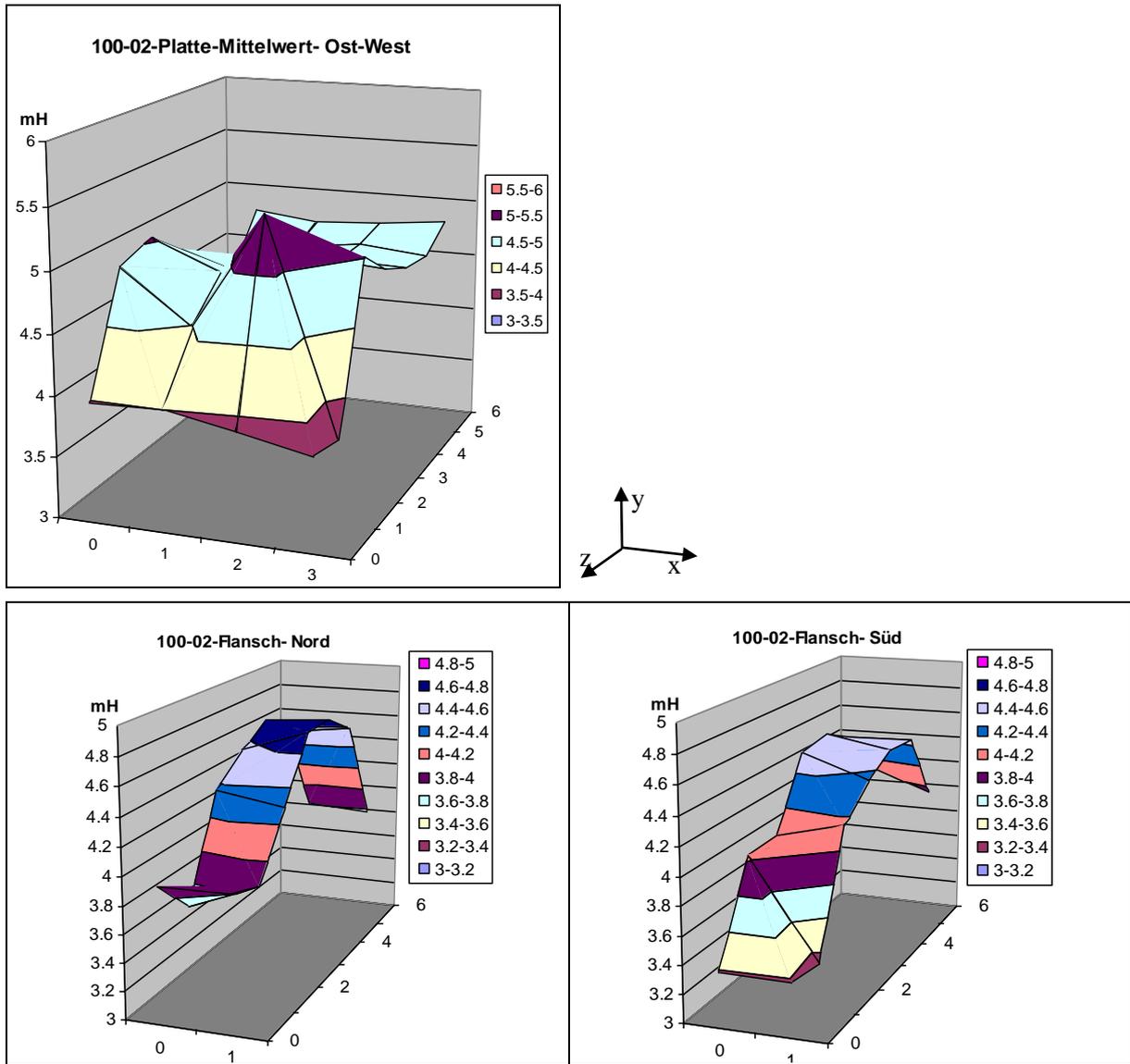


Bild 4-56 Gemessene Werte der Induktivität dargestellt in 3D Diagramm - Versuchskörpers 100-02

100-02											
Flansch-Süd			Flansch-Nord			Scheibe					
	0	1	0	1	0	1	2	3			
0	1,62	1,62	1,90	1,90	1,74	1,75	1,70	1,65			
1	1,93	1,60	1,76	1,85	2,15	1,96	2,38	1,62			
2	1,94	2,00	2,10	2,06	2,20	2,09	2,08	2,19			
3	2,17	2,09	2,19	2,27	2,09	2,02	2,11	2,09			
4	2,19	2,15	2,25	2,27	1,89	2,02	2,04	2,03			
5	2,14	2,14	2,16	2,19	1,89	2,01	2,04	2,01			
6	1,97	1,89	1,83	1,81	2,08	2,05	2,07	2,09			

Bild 4-57 Fasergehalt (Links) und Anordnung den Messpunkten - Versuchskörpers 100-02

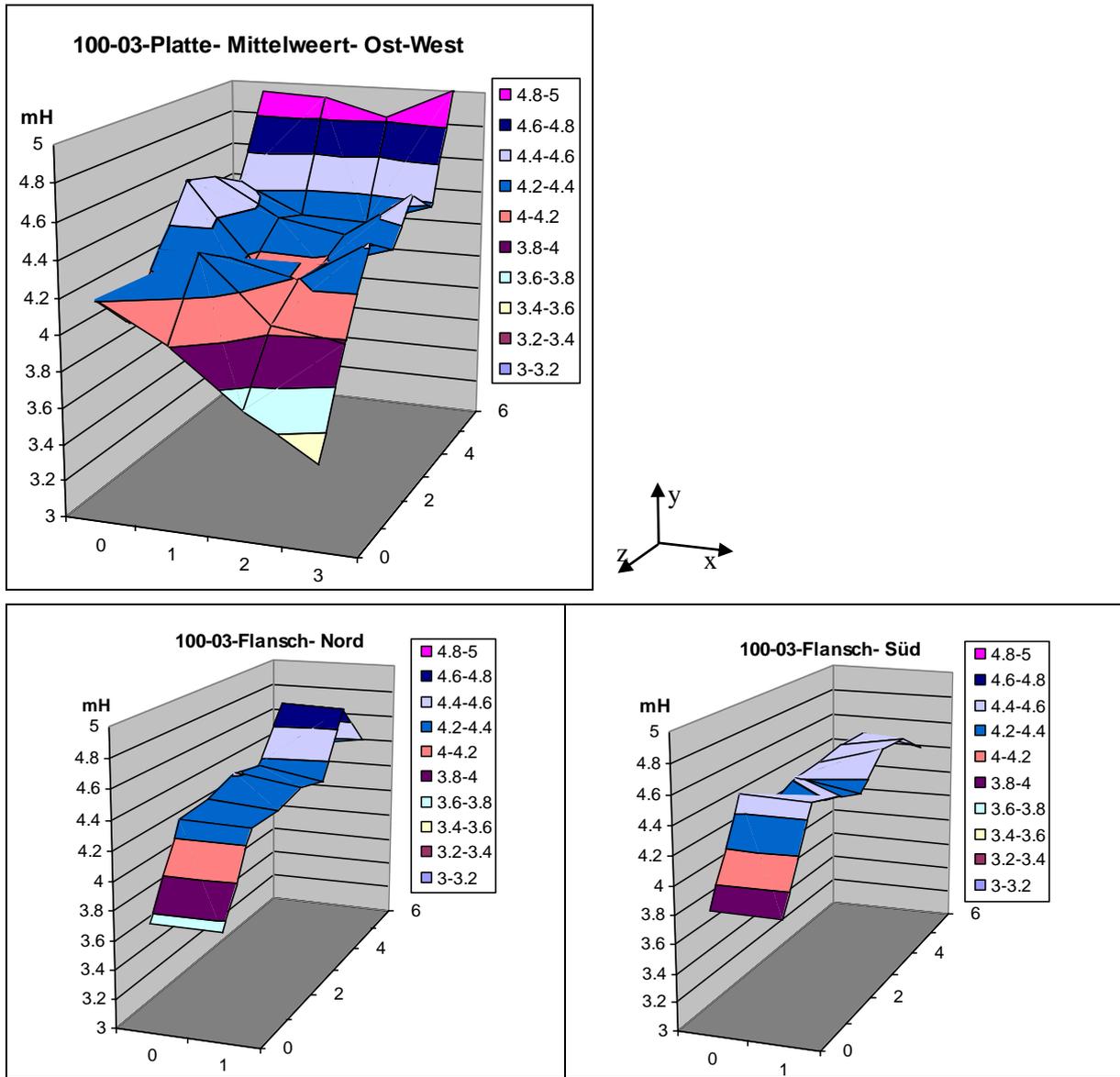


Bild 4-58 Gemessene Werte der Induktivität dargestellt in 3D Diagramm - Versuchskörpers 100-03

100-03																							
	Flansch-Süd		Flansch-Nord		Scheibe				Messpunkte														
	0	1	0	1	0	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
0	1,78	1,78	1,73	1,73	1,95	1,86	1,72	1,61	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
1	2,08	2,08	1,99	1,98	1,84	2,04	1,87	1,85	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2	1,99	2,04	2,00	1,98	1,99	1,98	1,94	2,05	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3	2,04	2,00	2,04	2,00	2,13	1,92	1,93	1,99	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
4	2,05	2,11	2,01	1,97	2,11	2,01	1,98	2,10	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
5	2,06	2,10	2,19	2,18	2,06	1,98	1,97	2,02	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
6	2,06	2,02	2,00	2,03	2,29	2,28	2,23	2,33	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Bild 4-59 Fasergehalt (Links) und Anordnung den Messpunkten - Versuchskörpers 100-03

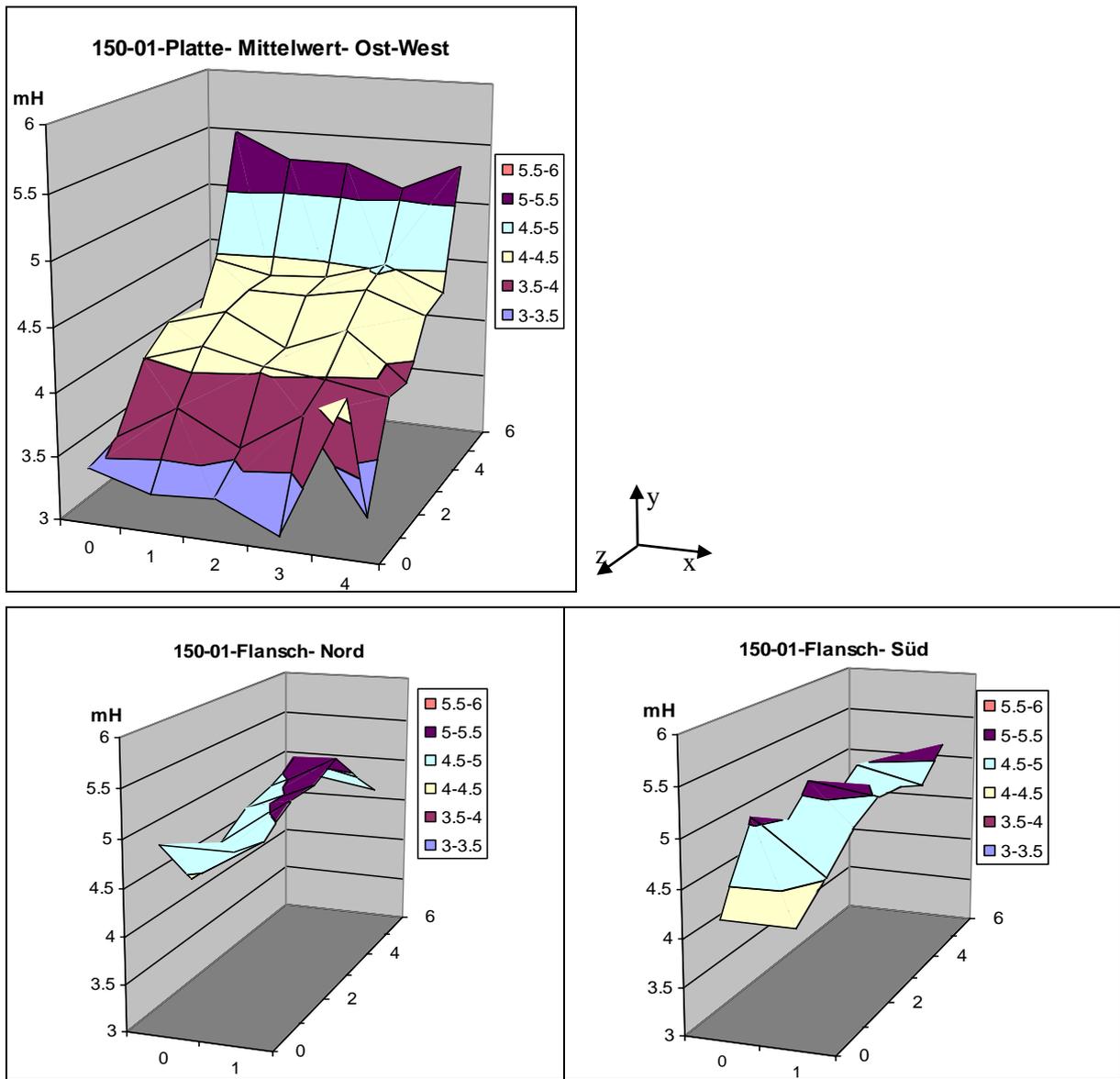


Bild 4-60 Gemessene Werte der Induktivität dargestellt in 3D Diagramm - Versuchskörpers 150-01

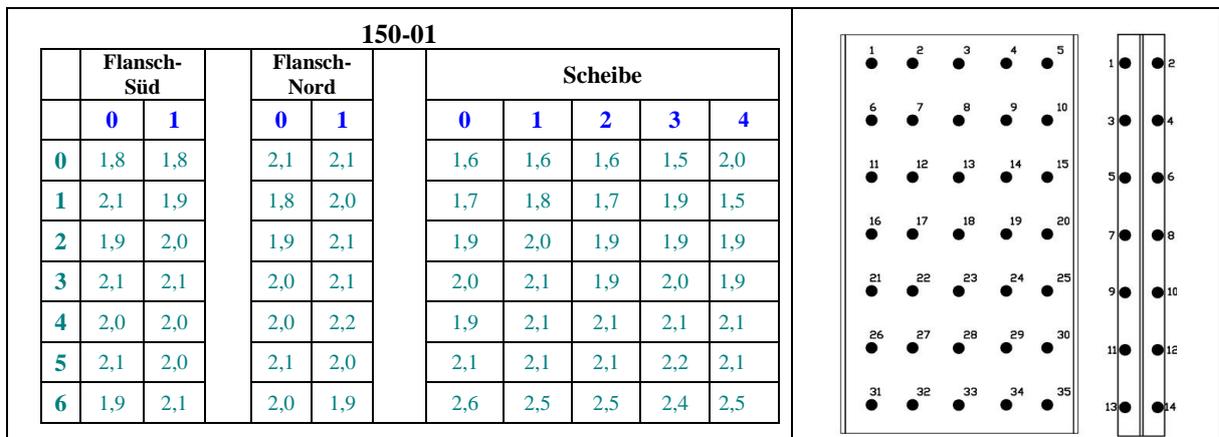


Bild 4-61 Fasergehalt (Links) und Anordnung den Messpunkten - Versuchskörpers 150-01

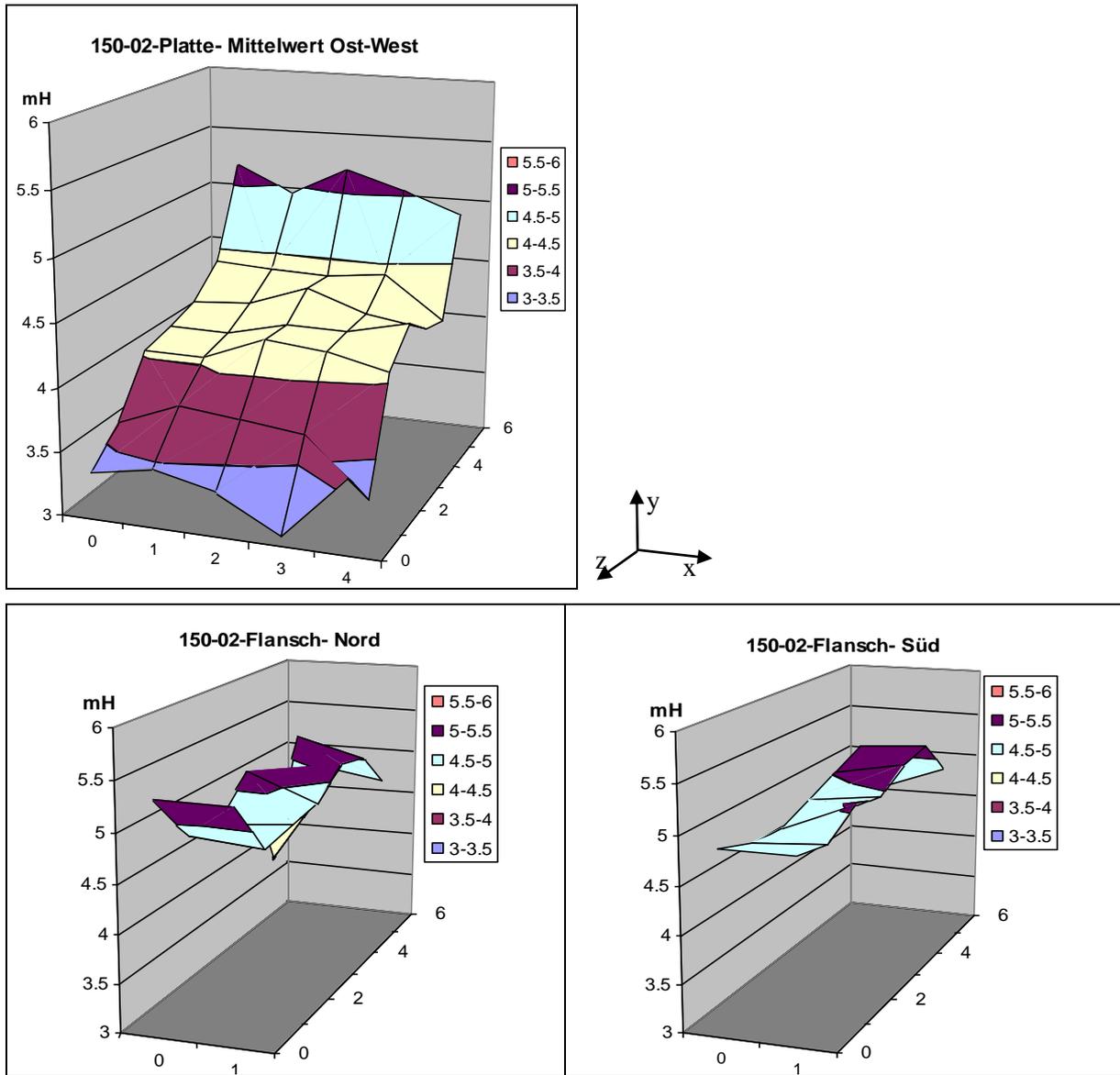


Bild 4-62 Gemessene Werte der Induktivität dargestellt in 3D Diagramm - Versuchskörpers 150-02

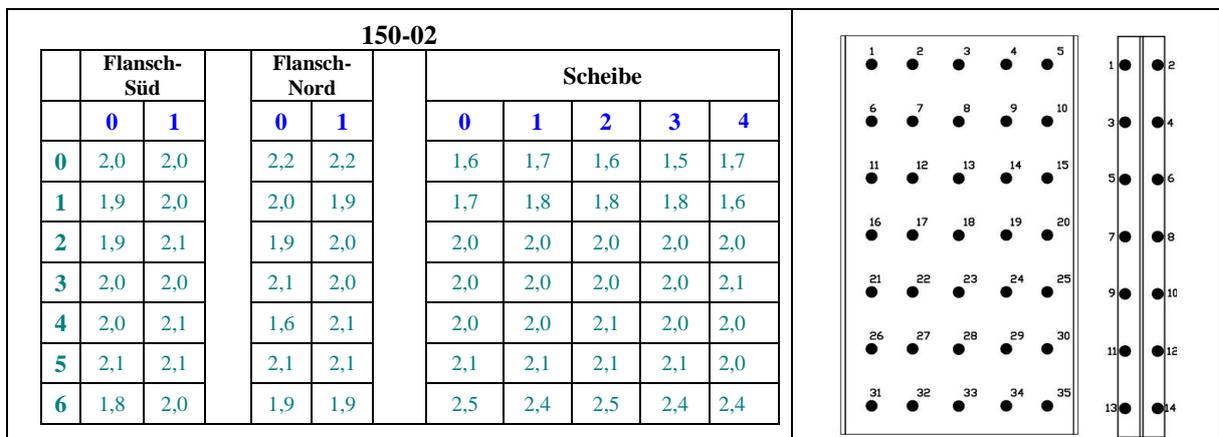


Bild 4-63 Fasergehalt (Links) und Anordnung den Messpunkten - Versuchskörpers 150-02

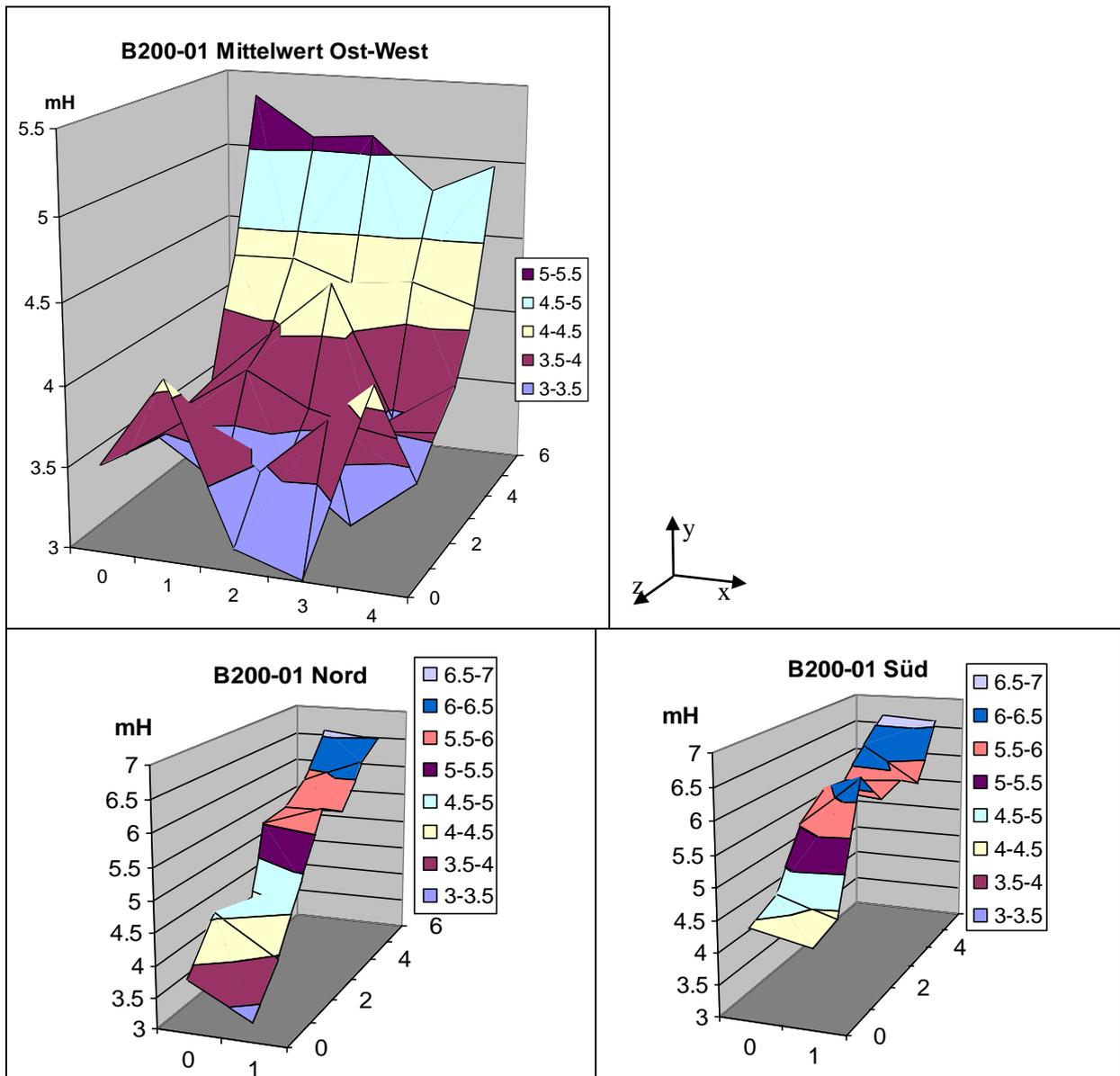


Bild 4-64 Gemessene Werte der Induktivität dargestellt in 3D Diagramm - Versuchskörpers 200-01

200-01												
Flansch-Süd			Flansch-Nord			Scheibe					Anordnung Messpunkte	
	0	1	0	1	0	1	2	3	4			
0	1,7	1,6	1,4	1,2	1,8	2,1	1,6	1,5	2,2	1	2	
1	1,7	1,6	1,7	1,5	1,8	1,9	1,8	2,0	1,9	3	4	
2	2,1	2,4	1,2	1,8	1,8	1,6	1,7	1,6	1,7	5	6	
3	2,2	2,2	2,1	2,2	1,8	2,0	1,8	1,8	1,8	7	8	
4	2,2	2,2	2,1	2,1	1,8	2,0	2,2	1,8	1,9	9	10	
5	2,3	2,1	2,2	2,3	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1	11	12	
6	2,5	2,5	2,5	2,4	2,7	2,6	2,6	2,5	2,6	13	14	

Bild 4-65 Fasergehalt (Links) und Anordnung den Messpunkten - Versuchskörpers 200-01

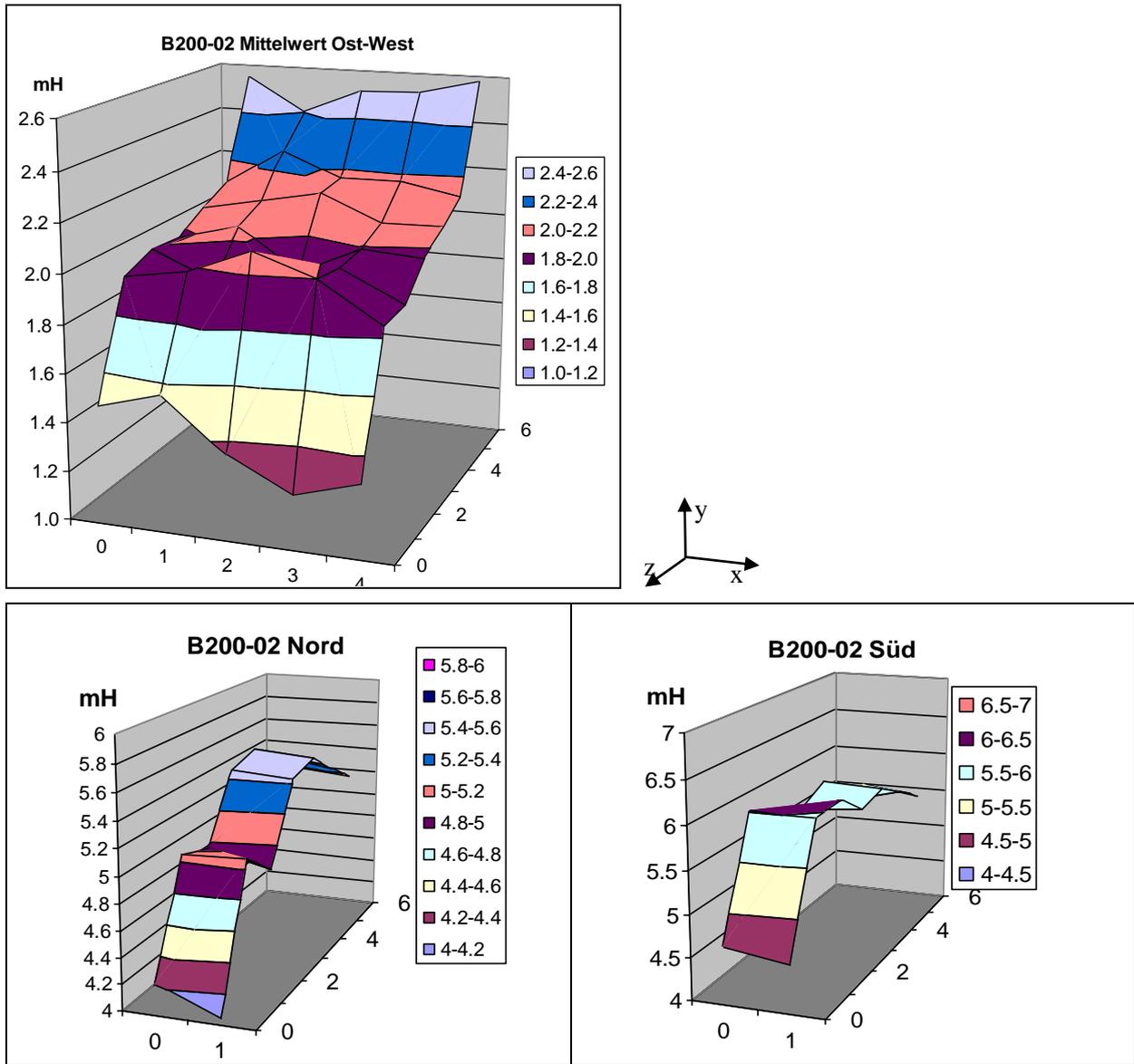


Bild 4-66 Gemessene Werte der Induktivität dargestellt in 3D Diagramm - Versuchskörper 200-02

200-02														
Flansch-Süd			Flansch-Nord			Scheibe					Messpunkte			
	0	1	0	1	0	1	2	3	4					
0	1,8	1,7	1,6	1,5	1,5	1,6	1,4	1,2	1,3	1	2	3	4	
1	2,3	2,3	1,9	1,9	1,9	2,0	2,1	2,0	1,8	6	7	8	9	
2	2,1	2,3	1,9	1,8	2,0	1,9	1,8	2,0	1,9	11	12	13	14	
3	2,1	2,2	2,1	2,0	2,0	2,0	1,9	2,0	2,0	16	17	18	19	
4	2,2	2,2	2,1	2,1	2,0	2,1	2,2	2,0	2,1	21	22	23	24	
5	2,0	2,1	2,0	2,0	2,1	2,3	2,2	2,2	2,1	26	27	28	29	
6	2,1	2,0	1,9	1,9	2,5	2,4	2,5	2,5	2,6	31	32	33	34	
										35	13	14	15	

Bild 4-67 Fasergehalt (Links) und Anordnung den Messpunkten - Versuchskörper 200-02

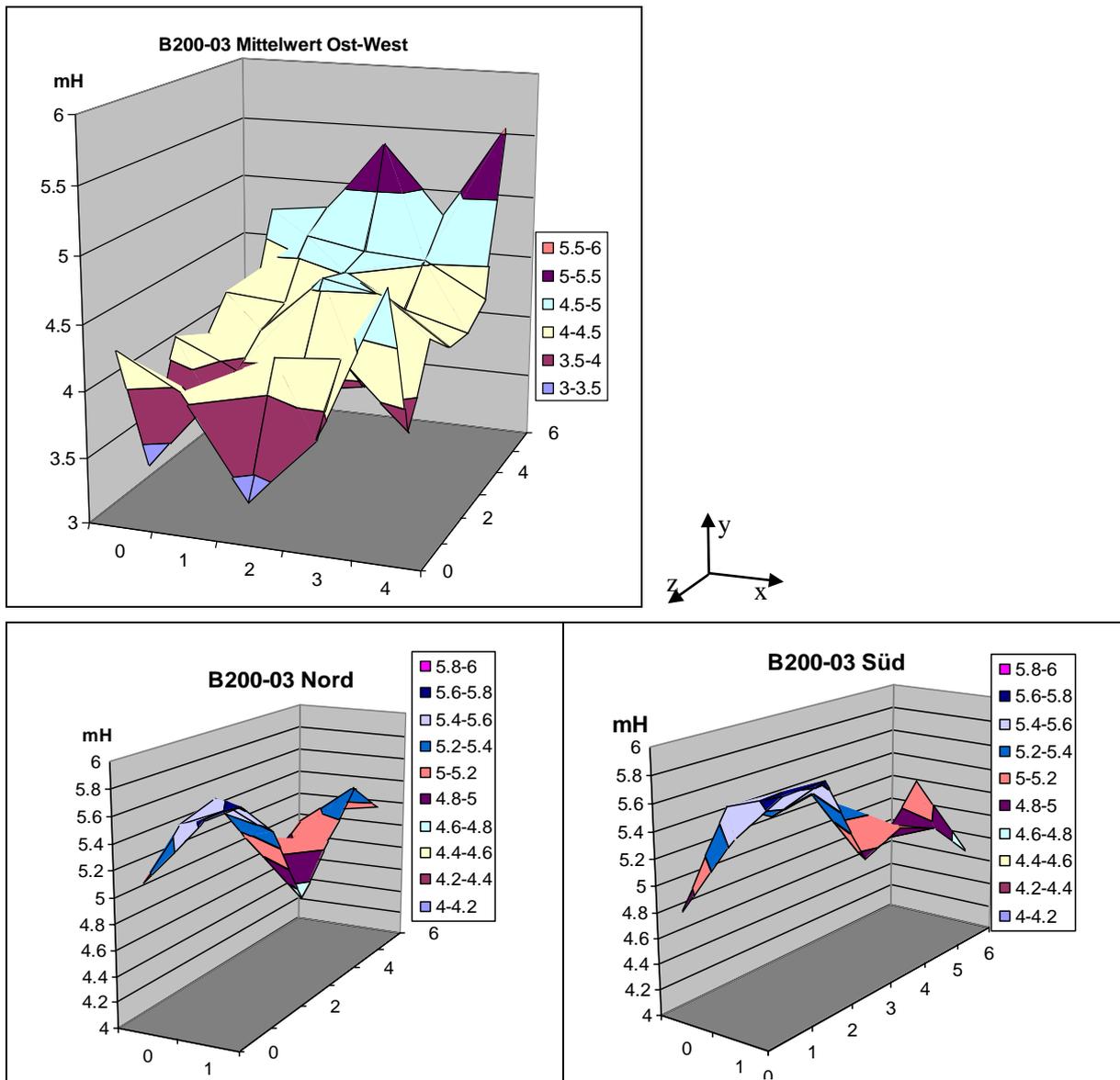


Bild 4-68 Gemessene Werte der Induktivität dargestellt in 3D Diagramm - Versuchskörpers 200-03

200-03											
Flansch-Süd		Flansch-Nord		Scheibe					Anordnung Messpunkte		
	0	1	0	1	0	1	2	3	4	Anordnung Messpunkte	
0	1,9	2,1	2,0	2,2	2,0	1,6	1,6	1,8	2,3	[Diagram showing 35 measurement points arranged in a grid]	
1	2,1	2,2	2,1	2,2	1,5	1,8	2,0	2,0	1,8	[Diagram showing 35 measurement points arranged in a grid]	
2	2,0	2,2	2,1	2,1	1,9	1,8	1,8	1,8	2,0	[Diagram showing 35 measurement points arranged in a grid]	
3	2,1	1,9	2,0	1,8	1,8	1,9	2,1	2,1	1,9	[Diagram showing 35 measurement points arranged in a grid]	
4	1,9	2,0	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,0	1,9	[Diagram showing 35 measurement points arranged in a grid]	
5	1,8	1,9	1,9	2,1	1,8	2,2	2,1	2,1	2,0	[Diagram showing 35 measurement points arranged in a grid]	
6	2,0	1,8	1,9	2,0	2,2	2,2	2,5	2,2	2,6	[Diagram showing 35 measurement points arranged in a grid]	

Bild 4-69 Fasergehalt (Links) und Anordnung den Messpunkten - Versuchskörpers 200-03

4.2.3.4 Mechanische Eigenschaften des Versuchskörpers

Die angegebenen Werte in Tabelle 4-16 wurde gemäß der ONR 23303 [31] im Baulabor von der Fachhochschule Kärnten ermittelt. Die Angenommenen Werte werden für die numerische Nachrechnung des Beulverhaltens verwendet.

Tabelle 4-16 Mechanische Eigenschaften des Versuchskörpers

Herstellungs-Datum	Versuchskörper	Prüfungs-Datum Druckfestigkeit	Druckfestigkeit (10 cm Würfel) [kN/cm ²]	Prüfungs-Datum E- Modul	E- Modul [4/4/16 Prisma] [kN/cm ²]
14.07.2008	200-01	29.05.2009	19,0	03.06.2009	6008.2
21.07.2008	200-02	28.05.2009	18,2		
03.11.2008	200-03	28.05.2009	18,1	10.06.2009	5543.9
	Angenommen		18		5700
10.11.2008	150-01	09.06.2009	18,2	10.06.2009	5499.2
13.11.2008	150-02	09.06.2009	18,0	10.06.2009	5582.3
	Angenommen		18		5600
14.07.2008	100-01	16.06.2009	20,7		
21.07.2008	100-02	28.05.2009	19,6		
29.11.2008	100-03	16.06.2009	17,8	16.06.2009	5283.2
	Angenommen		19		5300
24.06.2008	75-01	15.06.2009	19,8	16.06.2009	5729.5
24.06.2008	75-02	15.06.2009	19,8	16.06.2009	5811.8
03.11.2008	75-03	28.05.2009	18,0	03.06.2009	5669.9
03.11.2008	75-04	28.05.2009	18,0	03.06.2009	5669.9
	Angenommen		19.0		5700
24.06.2008	50-01	15.06.2009	19,8	16.06.2009	5729.5
24.06.2008	50-02	15.06.2009	19,8	16.06.2009	5811.8
03.11.2008	50-03	28.05.2009	18,0	03.06.2009	5669.9
03.11.2008	50-04	28.05.2009	18,0	03.06.2009	5669.9
	Angenommen		18.0		5700

4.3 Versuchsaufbau und Messanordnung

4.3.1 Versuchsaufbau

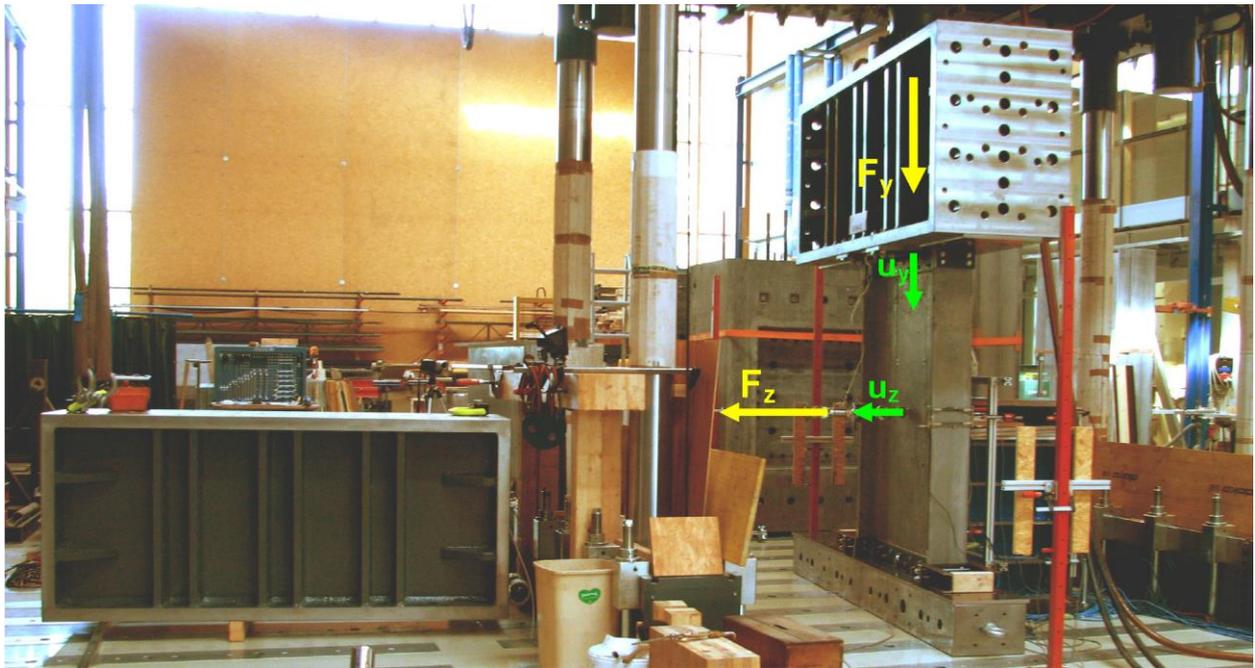


Bild 4-70 Versuchsaufbau

4.3.1.1 Auslenkungskraft F_z (Planmäßige Imperfektion)

Für die Voranalyse des Beulverhaltens wurde die numerische Simulation des Versuchs mit einer Imperfektion entsprechend der ersten Eigenform von 1mm durchgeführt. Da bereits die geometrische Analyse besonders bei den großen Versuchskörpern beträchtlichen Dickenunterschied zeigte, ist unrealistisch für den Versuch die Dimension von 1 mm anzunehmen. Die Imperfektion wurde im Labor mittels einer Auslenkungskraft erhalten und bei der numerischen Berechnung auch als solche modelliert. Da die erreichte Vorverformung der Scheibe im Gegenteil zu einer echten Imperfektion ein elastisch verformter Zustand ist, muss die Auslenkungskraft über die gesamte Dauer des Versuches erhalten bleiben.

Die richtige Einleitung der Auslenkungskraft wurde eine von den Schwierigkeiten, die im Laufe des Versuchs eingetreten sind. Die Zielsetzung ist eine planmäßige Vorverformung (Imperfektion) einerseits so gering auszubilden, dass sich das Lastniveau der Verzweigungslast in einer Last-Verformungskurve deutlich abbildet aber andererseits so groß zu wählen, dass die Richtung der Beulverformung vorweg bekannt ist. Die Größe der Auslenkungskraft F_z wird so festgelegt, dass sich die gewünschte Vorverformung der Scheibe einstellt.

Es wurde mehreren Methoden ausprobiert bis die endgültige Auslenkungskraft F_z ein zufriedenstellendes Ergebnis zeigte. Zuerst wurde ein System, das aus einem Hohlkolbenzylinder und einem Kettenzug bestand eingeleitet, dieses System wurde an einem Holzbalken zwischen den Säulen des Prüfgerüsts befestigt (Bild 4-71). Während des Versuches wurde eine Verformung an dem Holzbalken beobachtet, das führte zu einem Rückgang der Auslenkungskraft F_z .

Für eine zweite Methode wurde ein UNP-Profil, ein Hohlkolbenzylinder und eine Zugstange verwendet (Bild 4-72). In diesem Fall erreichte die Verschiebung aus der Ebene (u_z) am Ende des Versuches einen zu geringeren Wert.

Nach mehreren Überlegungen wurde zuletzt ein System bestehend aus einem Gewicht, einem Seil mit einer Kraftmässdoce und und einer Umlenkungsrolle angebracht, bei diesem System blieb die

Auslenkungskraft F_z konstant und der Versuchskörper zeigte während des gesamten Versuchs eine stetige zunehmende Verschiebung (u_z) aus der Ebene (Bild 4-73).



Bild 4-71 Holzbalcken- Kettensystem



Bild 4-72 UNP Profile- Hollkolbenzylinder- Zugstange



Bild 4-73 Seil mit Spannschloss und Kraftmässdoce

4.3.1.2 Belastung

Die verwendete Prüfmaschine bestand aus vier Säulen Prüfgerüst, einem 4 MN Prüfzylinder, einer 4 MN Kraftmessdose, einem 1 m hohen Lastverteilträger und einer Schüttschiene. Die Steuerung der Belastung wurde weggeregelt aufgebracht in dem der "Regelweg" sich auf dem vertikalen Zylinderweg und aus der horizontalen Beulverformung der Prüfkörper zusammensetzt.

Ein Stabilitätsversuch mit einer, (wie in Bild 4-70 dargestellt), annähernd bilinearen Last-Verformungscharakteristik kann weder über die Kraft noch über den Maschinenweg geregelt werden. Es käme immer im Bereich der Verzweigungslast zu einem schlagartigen Versagen. Der

anfänglich nahezu senkrechte Anstieg der Belastungs-Beulverformungskurve lässt auch eine Regelung über die Beulverformung nicht zu. Die Lösung wird in der Kombination der senkrechten und waagrechten Weggrößen gefunden. Als Regelgröße für die Ansteuerung des servohydraulischen Prüfzylinders wird die Summe aus dem Maschinenweg u_z und der horizontalen Verformung u_y gewählt und mit einer Belastungsrate von $d(u_z+u_y)/dt = 5 \mu\text{m/s}$ angewendet. Mit dieser Methode kann auf die totale Zerstörung der Versuchskörper verzichtet werden und die Messaufnehmer können gefahrlos über das Erreichen der Höchstlast hinaus in Betrieb bleiben.

Die Belastung erfolgte in drei Etappen, bei dem ersten Teil des Versuches wurde nur eine geringe Normalkraft F_y (300 kN) auf die Versuchskörper aufgetragen, um in den Lasteinleitungsfugen ausreichend Reibung zu aktivieren, so dass die Auslenkungskraft F_z aufgenommen werden kann. In der zweite Etappe wurde eine Vorauslenkung im Versuchskörper mittels der Auslenkungskraft (F_z) erzeugt, welche aus der Scheibenmitte des Versuchkörpers ausgezogen wurde, während dieses Vorgang blieb die Normalkraft F_y festgehalten.

Nach Erreichen der gewünschten Vorverformung wurde die Auslenkungskraft (F_z) als konstant festgehalten und wiederum die Normalkraft F_y aktiviert. In dieser Etappe wird die endgültige Belastung F_y aufgebracht.

Trotz des sorgfältigen Einbaus unter Rücksichtnahme auf die gemessenen geringen Vorkrümmungen der Probekörper ergibt sich fallweise eine Umkehrung der Beulrichtung (siehe Kapitel 4.4.1 und 4.1.2). In diesen Fällen wird das Prozedere in Etappe abgebrochen, entlastet und nach Erhöhung der Auslenkung wiederholt.

4.3.1.3 Stahl Platte Befestigung (Einleitungsmanschetten)

Ein weiteres Problem während der Durchführung des Versuches wurde die Einleitung der Vertikalelast (F_y) am Versuchskörper. Um eine gleichmäßige Lastverteilung und kompakte Flächenverbindung zwischen der Last-Verteilungskonstruktion und der oberen Rande des Versuchskörpers zu erlangen, wurde ein Ausgleichmörtel einen Tag vor dem Versuch an dem Versuchskörper aufgetragen. Der Mörtel wurde aus Ciment Fondu Zuschlag (Quarzsand) und Wasser hergestellt, ihre gemessene Druckfestigkeit beträgt 180 N/mm^2 . Das Ergebnis zeigte, dass der angewendete Ausgleichmörtel nicht für die Querdehnungsbehinderung sorgte und führte zu dem vorzeitigen Versagen in Lasteinleitungsbereich. Der Versuchskörper zeigte nach der Einleitung der Normalkraft F_y eine Art von Abplatzungen in seinem oberen Rand (Bild 4-74).



Bild 4-74 Abplatzungen in der oberen Kante des Versuchskörpers

Bild 4-75 Befestigten Manschetten im Versuchskörper

Um dieses Problem zu verbessern wurden Einleitungsmanschetten entlang der oberen und unteren Ränder (Innen- und Außenseite) des Versuchskörpers angepasst, diese Stahlkonstruktion bestand aus einer 10 cm hohen und 2cm dicken Stahlplatte (S235). Die Manschetten wurden mit Stahlschrauben entlang des Randes befestigt (Bild 4-75, Bild 4-77).

Um den Einfluss der Einleitungsmanschetten in dem Tragverhalten zu überprüfen ist in einem Last-Verschiebungsdiagramm (Bild 4-76) die Ergebnisse der numerischen Berechnung des Versuchskörpers 150-240 mit und ohne Manschetten an den Rändern dargestellt. Die Kurvenverläufe (Bild 4-76) zeigen einen geringeren Unterschied in der Beulverformung, die Tragfähigkeit wird damit minimal beeinflusst.

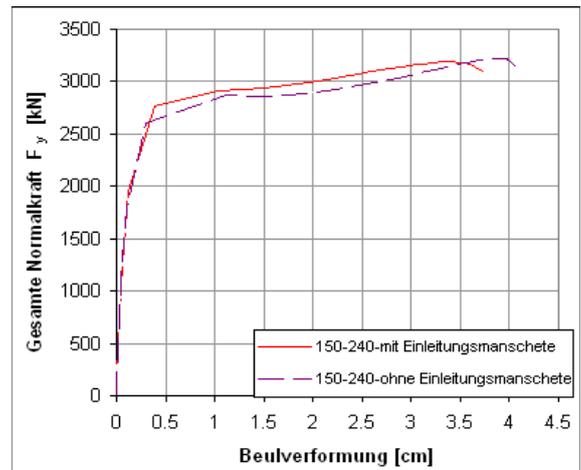


Bild 4-76 FE- Berechnung des Versuchskörpers 150-00 mit und ohne Einleitungsmanschetten

4.3.2 Messanordnung und Montage der Messinstrumente



Bild 4-77 Messanordnung der Beulserie 200-00

Um die Messstellen im Versuchskörper festlegen zu können, wurde zuerst die Wandstärke des Versuchskörpers analysiert und die Vorkrümmung der Scheibenmitte bestimmt. Entsprechend der Orientierung dieser Verformung wurde die Scheibe in einer Außenseite und einer Innenseite definiert (Siehe Kap.3.4).

In der Außenseite wurde mittels einer Auslenkungskraft einer Vorauslenkung im Versuchskörper aufgebracht. In der Innenseite der Scheibe wurden vertikale und horizontale Dehnungen und Verschiebungen aus der Ebene in ausgewählten Punkten, wie in Bild 4-77 dargestellt, aufgenommen. In den Flanschen sind Messaufnehmer nur im mittleren Bereich der vertikalen Ränder angeordnet. Die genaue Anordnung der Messstellen jeder Beulserie sind im Bild 4-83 bis Bild 4-96 dargestellt. Der Aufnehmertyp und die Messgrößen sind in der Tabelle 4-17 zusammengefasst.

Die Messungen in den Flanschen wurden mit einer **DD1 Dehnwegaufnehmer** aufgenommen und direkt an dem messenden Objekt aufgesetzt. Die Betonoberfläche wurde zuerst geschliffen. Die Messbasis beträgt dabei 100 mm. Der Sensor enthält eine Messzunge die direkt an deren Tastspitze eine maximale Auslenkung von $\pm 2,5$ mm zulässt. Die Ausbildung der Tastspitze ist entweder als Schneide oder Spitze ausgeführt. Die Messstellen wurden in der Innen- und Außenseite jeder Flansche gestellt. Die genauere Montierung wurde im Bild 4-78 abgebildet.

Es wurden außerdem horizontale Verschiebungen von den gleichen Stellen aufgenommen, dafür wurde ein induktiv **Wegaufnehmer WA50** verwendet, der Messweg beträgt 50 mm, die Messknoten wurde an der Kante der Flansche geklebt (Bild 4-79)

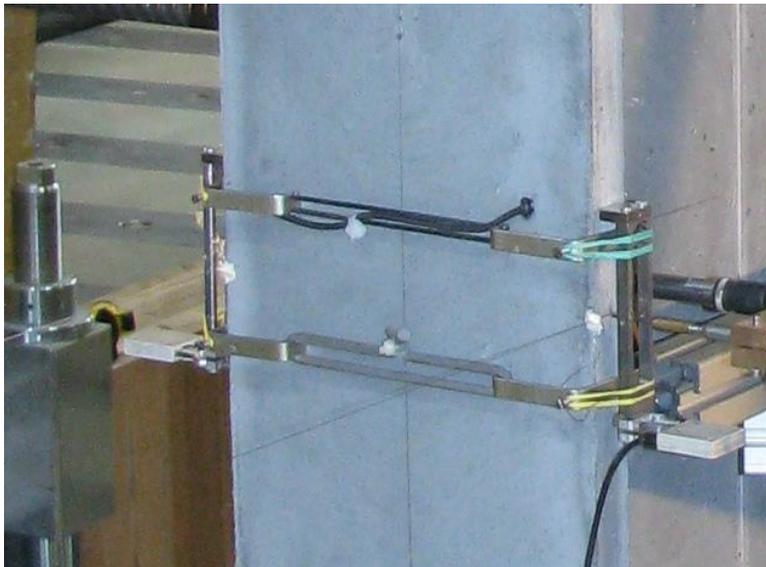


Bild 4-78 Montage der Dehnwegaufnehmer DD1 am Flansch



Bild 4-79 Wegaufnehmer WA50

In der Scheibe wurden Verschiebungen aus der Ebene mit Hilfe **induktiver Wegaufnehmer W5TK und WA20** gemessen, die Wegaufnehmer wurden an einer Stahlrahmen-Hilfskonstruktion aus Aluminiumprofilen montiert. Die Messstellen wurden so angeordnet, dass sich mit den Ergebnissen eine Biegelinie in horizontaler und vertikaler Richtung der Scheibe ausbilden lässt (Bild 4-85), wobei als Referenzpunkt 0,0 die Scheibenmitte genommen wird.

Die Sensoren der Messaufnehmer bestehen aus einem gleitlagergeführten Tastbolzen dessen Spitzen mittels Federn gegen das Objekt gedrückt wird. Der Messweg für den Wegaufnehmer W5TK beträgt + 5 mm. und +20 mm für den Wegaufnehmer WA20K. Im Bild 4-80 ist die genauere Montage des Wegaufnehmers dargestellt.

Die Dehnungen in der Scheibe wurden mit einer **DMS Dehnungsmessstreife** aufgenommen. Die Messaufnehmer wurden direkt an der Oberfläche des Betons mit einem Kleber befestigt. Die Anordnung dieser Messaufnehmer wurde besonders im Bereich der Scheibenmitte platziert. Es wurden entsprechend der Orientierung des Versuchskörpers horizontale und vertikale Dehnungen

gemessen. (siehe in Bild 4-85) In Bild 4-81 ist die Montage des Messaufnehmers **DMS** dargestellt.

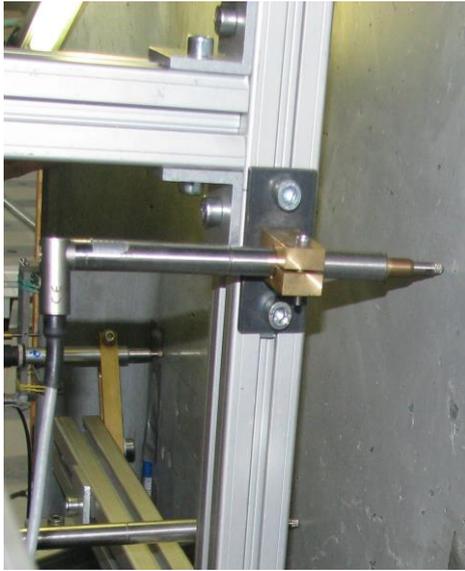


Bild 4-80 Wegaufnehmer WT5K



Bild 4-81 DMS Messgiteranlage

Die Auslenkung der Scheibenmitte wurde mit einer **MTS Temposonic** Wegaufnehmer gemessen, dessen Messweg beträgt 250 mm. Der Wegaufnehmer wurde auf einer Holzplatte befestigt und die Holzplatte an einer Stahlrahmen Konstruktion montiert. Die Betonoberfläche, wo der Messaufnehmer aufgetragen ist, wurde zuerst geschliffen. (Bild 4-82).

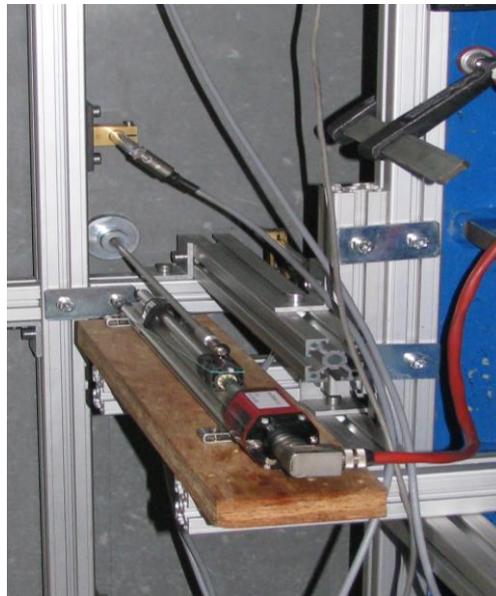


Bild 4-82 MTS Temposonic.R

Tabelle 4-17 Aufnehmertyp und Messgrößen

Messstelle Bezeichnung	Beschreibung	Messaufnehmer	Einheit
1	Belastung F_y	KMD RF4000 (GTM)	KN
26	Auslenkungskraft F_z	U2M; HBM; Kraftaufnehmer	KN
2	Maschinenweg	MTS; Temposinics R, Wegauf- nehmer	mm
25	Auslenkung u_z	MTS; Temposonics R, Wegauf- nehmer	mm
27	Moment	M_x , GTM; KDM Moment in X- Richtung	KNm
28	Moment	M_y , GTM; KDM Moment in Y- Richtung	KNm
3, 8, 9, 10, 13, 14	Verschiebung der Scheibenmitte aus der Ebene	W5TK: HBM, induktiver Wegauf- nehmer	mm
4, 5, 6, 7, 11, 12	Verschiebung der Scheibenmitte aus der Ebene	WA20: HBM, induktiver Wegauf- nehmer	mm
23, 29, 33, 34	horizontale Dehnungen der Scheibe	DMS; LY41; Messgitteranlage, 120 Ohm	‰
24, 30, 31, 32	vertikale Dehnungen der Scheibe	DMS; LY41; Messgitteranlage, 120 Ohm	‰
15, 16, 17, 18	Vertikale Dehnung der Flansche	DD1; HBM, Dehnwegaufnehmer auf Messbasis 100 mm	‰
19, 20, 21, 22	Verschiebung der Flansche	WA50; HBM; induktiver Wegauf- nehmer	mm

Kanalbelegungsplan der Beulserie 50-00

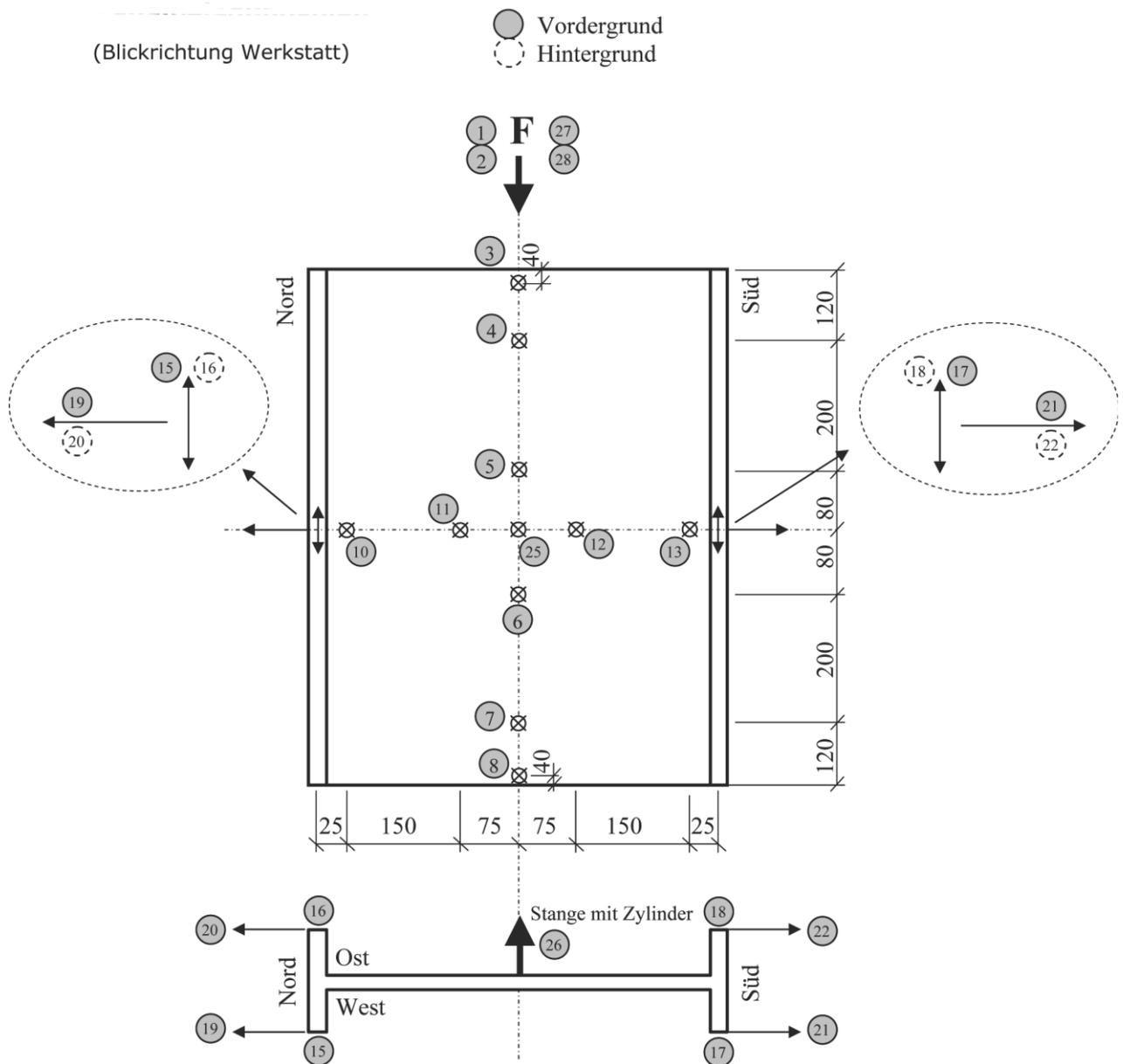


Bild 4-83 Kanalbelegungsplan der Beulserie - 50-00

Kanalbelegungsplan der Beulserie 75-00

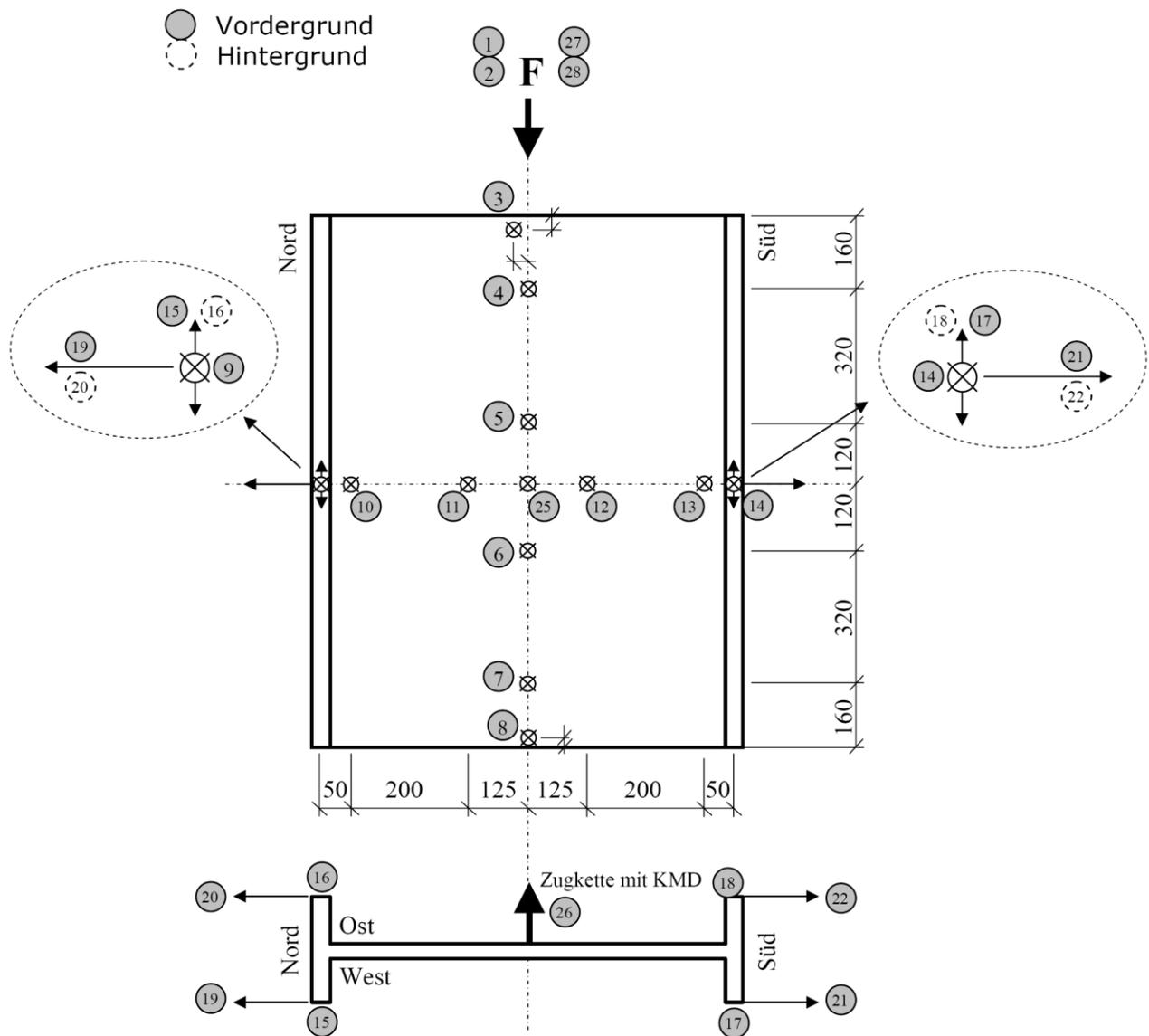


Bild 4-84 Kanalbelegungsplan der Beulserie - 75-00

Kanalbelegungsplan der Beulserie 100-00

(Blickrichtung Werkstatt) Vordergrund
 Hintergrund

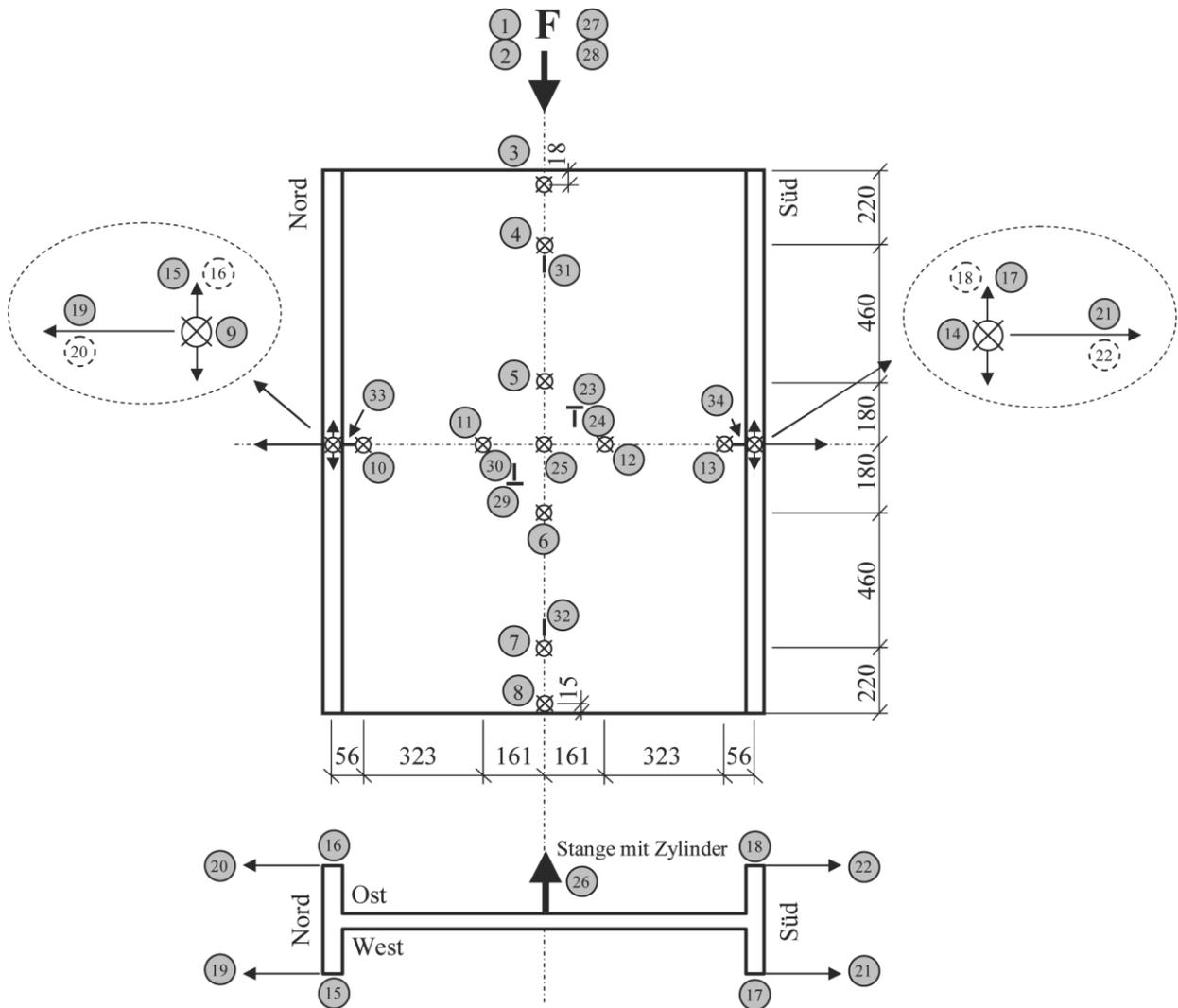


Bild 4-85 Kanalbelegungsplan der Beulserie – 100-00

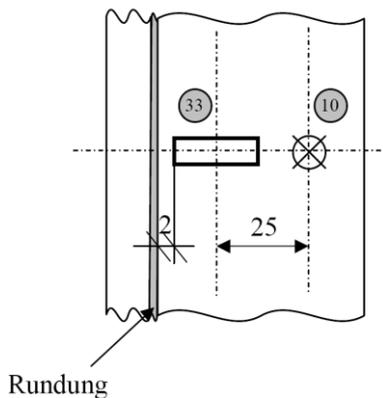


Bild 4-86 Detail im Bereich der Flansche

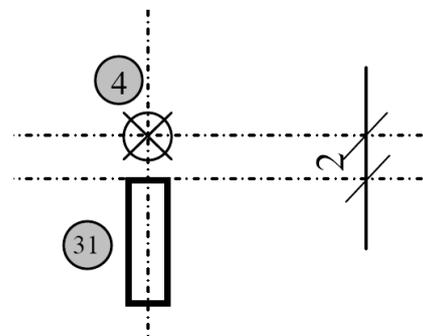


Bild 4-87 Detail in der Nähe der Aufnehmer

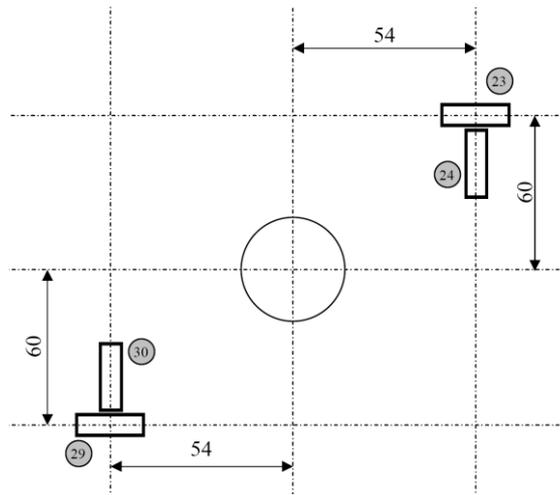


Bild 4-88 Detail in der Scheibenmitte-100-00

Kanalbelegungsplan der Beulserie 150-00

(Blickrichtung Werkstatt) Vordergrund
 Hintergrund

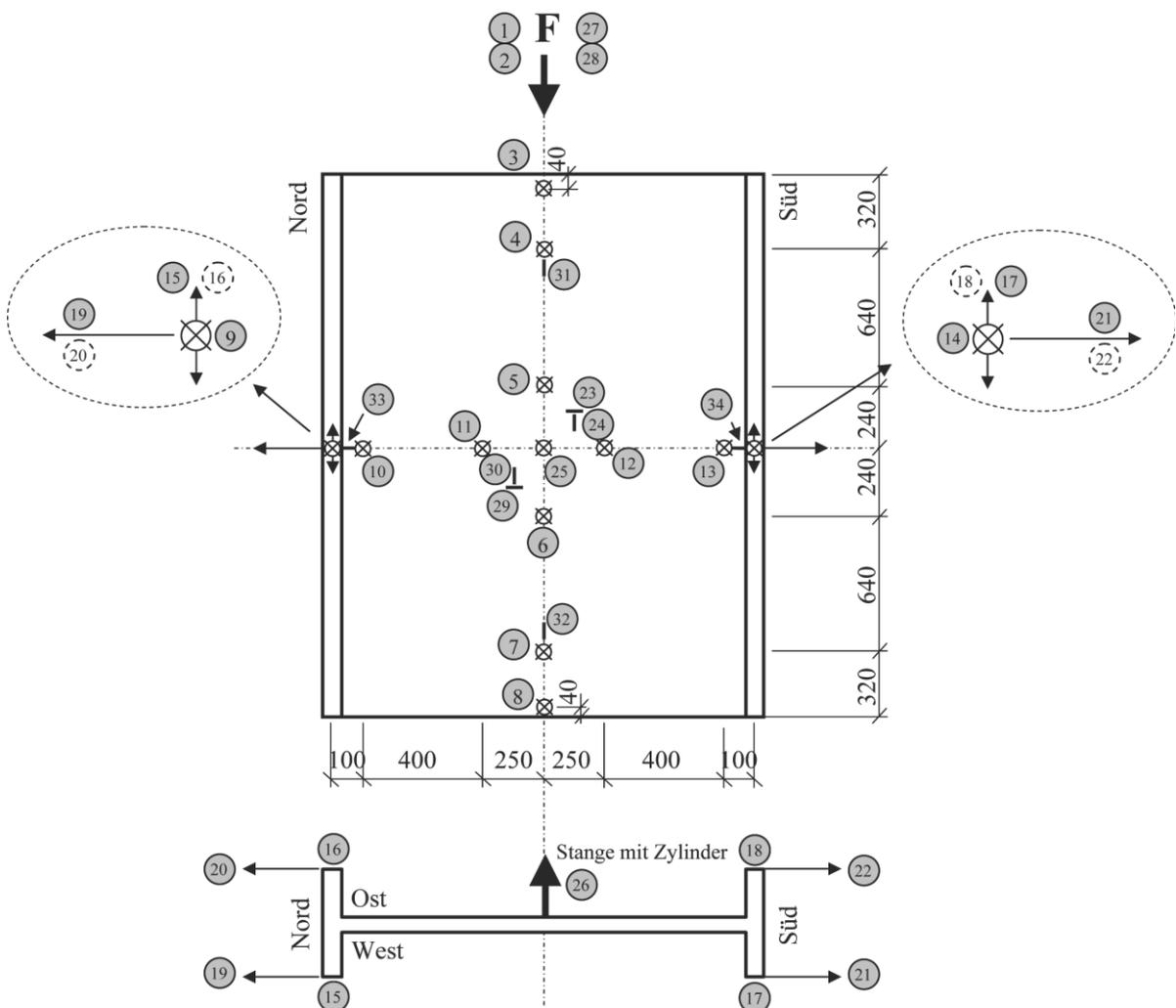


Bild 4-89 Kanalbelegungsplan der Beulserie – 150-00

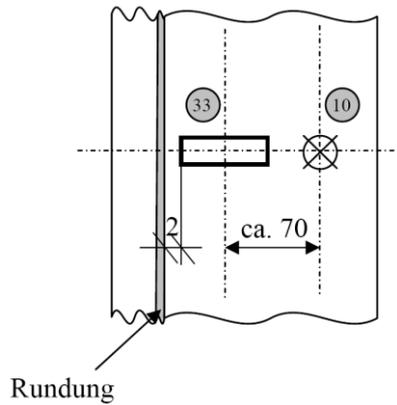


Bild 4-90 Detail im Bereich der Flansche

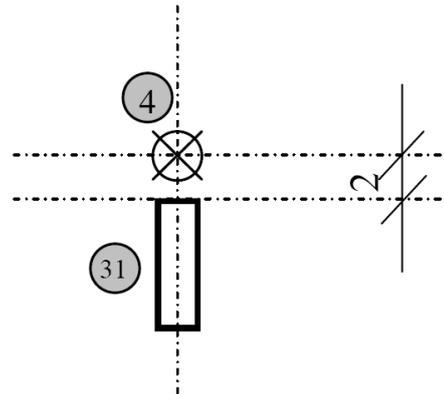


Bild 4-91 Detail in der Nähe der Aufnehmer

Detail DMS:

in der Mitte:

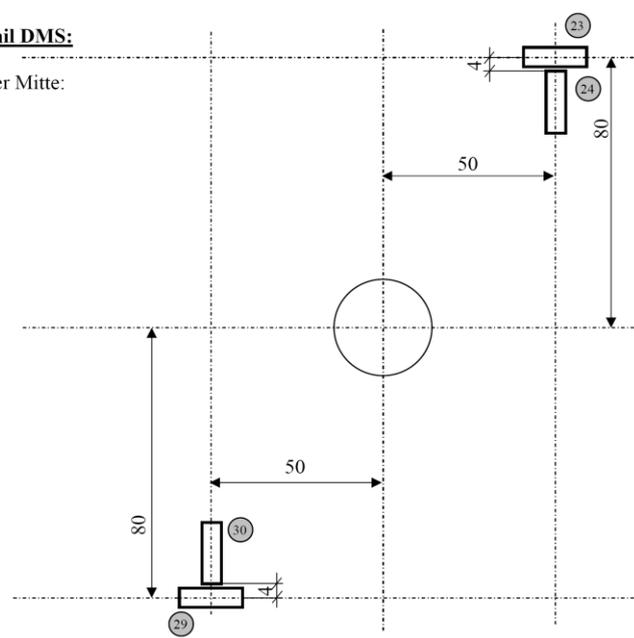


Bild 4-92 Detail in der Scheibenmitte-150-00

Kanalbelegungsplan der Beulserie 200-00

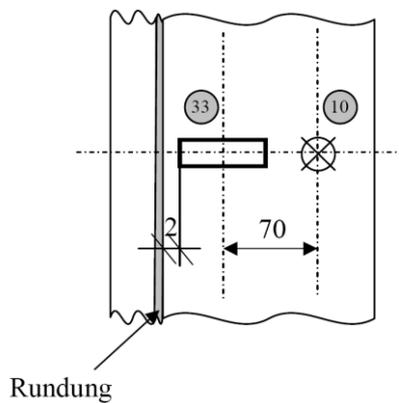


Bild 4-93 Detail im Bereich der Flansche

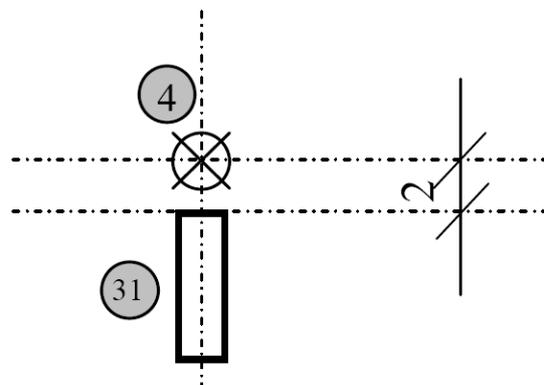


Bild 4-94 Detail in der Nähe der Aufnehmer

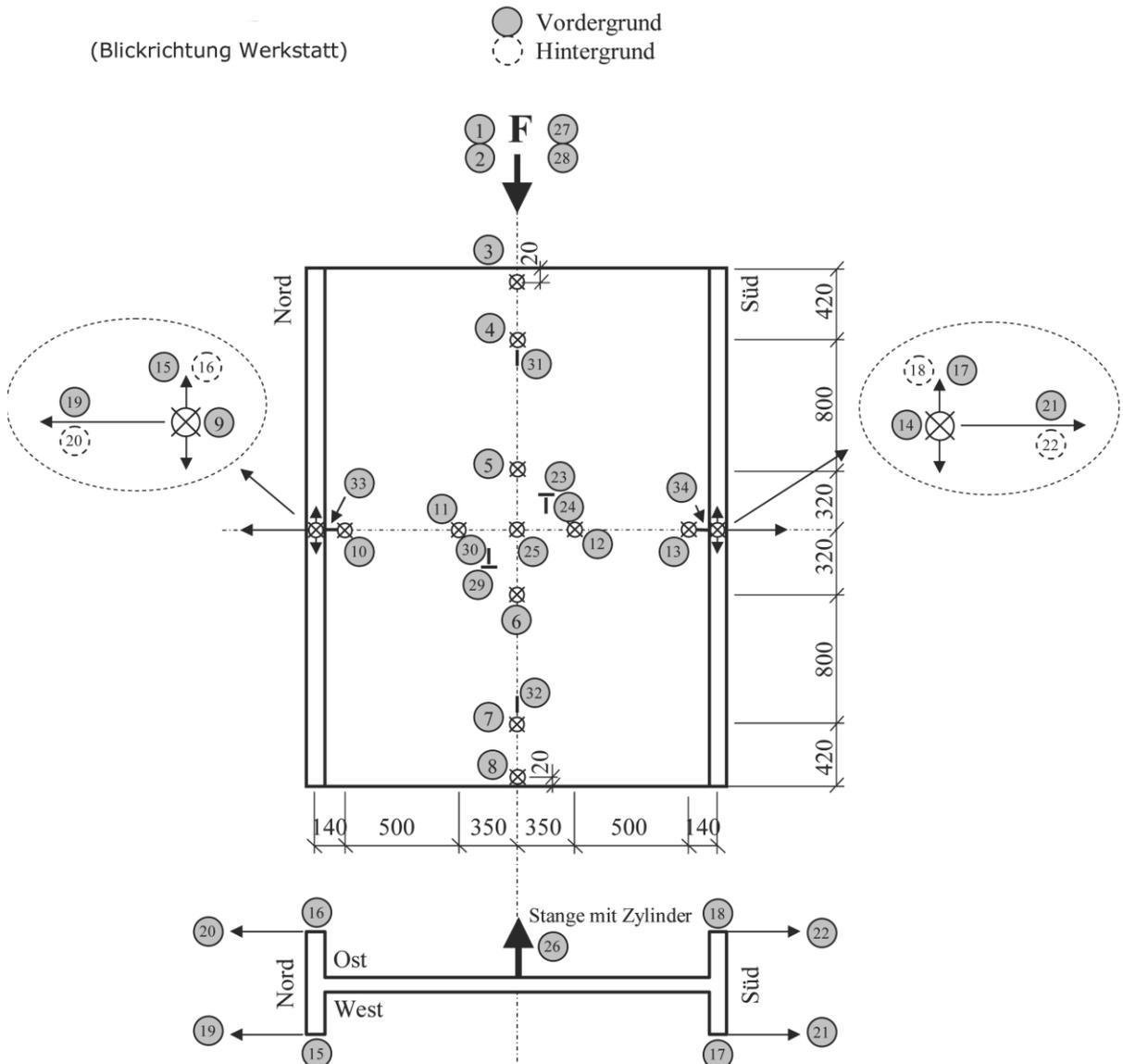


Bild 4-95 Kanalbelegungsplan der Beulserie – 200-00

Detail DMS:

in der Mitte:

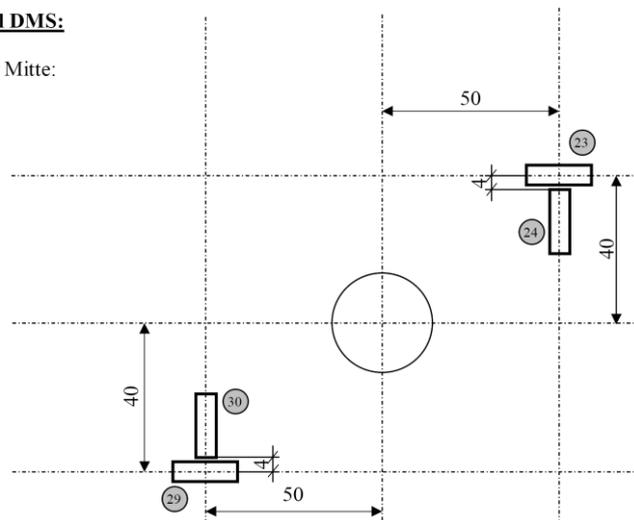


Bild 4-96 Detail in der Scheibenmitte-200-00

4.4 Versuchsaufbau und Auswertung der Versuche gestützt durch numerische Ergebnisse

Dieser Teil der Arbeit befasst sich mit der Auswertung der Versuchsergebnisse. Diese werden entsprechend der Beulanalyse in Kapitel 3.4 durchgeführt. Die im Kapitel 3.4 festgelegten Parameter im Versuchskörper werden auch für die Auswertung der Laborwerte verwendet.

Die Ergebnisse werden gemäß der Orientierung der Beulverformung in zwei Gruppen geteilt, nämlich die Ergebnisse der Außenseite der Platte, wo hauptsächlich die Rissbildungen untersucht werden, und die Analyse der Innenseite der Platte, wo die gemessenen Dehnungen und die Biegelinien interpretiert werden. Diese Untersuchungen werden mit FE-Berechnungen ergänzt.

Die Anordnung der Dehnungsmessaufnehmer wurde entsprechen der Beulanalyse im Kapitel 3.4 an dem am meisten beanspruchten Bereich der Platte vorgenommen (A, B, C). Die Biegelinie wurde entlang einer horizontalen und vertikalen Linie gemessen. Wobei als Referenzpunkt 0,0 die Plattenmitte genommen wurde. Die detaillierte Anordnung der Messaufnehmer wurde in Bild 4-83 bis Bild 4-96 dargestellt.

Um die Interpretation der Ergebnisse zu vereinfachen und das Tragverhalten des Versuchskörpers besser besser zu verstehen, wurden die Ergebnisse auch in der Form eines Normalkraft-Beulverformungs-Diagramms dargestellt. Die Verformung aus der Ebene (u_z) wird hier als Beulverformung bezeichnet und wurde von der Stelle B herangezogen.

Für die numerische Nachrechnung des Beulverhaltens wurde für jede Beulserie eine repräsentative Arbeitslinie festgelegt. Dafür wurden für die Druckfestigkeit und das E-Modul die ermittelten Werte aus Kapitel 4.13 verwendet (Tabelle 4-16). Für die Spannungs-Dehnungsbeziehung des Zugbereichs wurden die Messergebnisse aus dem Biegezugversuch einer 5 cm Dickenscheibe herangezogen (Kapitel 4.1.1). Die Materialeigenschaften des verwendeten Betons sind in Tabelle 4-18 dargestellt.

Tabelle 4-18 Materialeigenschaften des UHPC

Druckfestigkeit (10 cm Würfel) [kN/cm ²]	Matrixfestigkeit (5 cm Bohrkern) [kN/cm ²]	Nachrisszugfestigkeit (5 cm Bohrkern) [kN/cm ²]	E- Modul (4/4/16 Prisma) [kN/cm ²]	Querdehnzahl [-]	Fasergehalt [Vol.%]
17,8 bis 20,7	0,91	1,1 bis 1,23	5.300 bis 6.000	0,15	2,0

4.4.1 Durchführung und Auswertung der Versuchsserie 50-00

Im Unterschied zu den größeren Versuchskörpern zeigte die geometrische Analyse dieser Beulserie eine nahezu perfekte, ebene Oberfläche. Die Wandstärke variiert zwischen 25 mm und 26 mm. Wegen der kleinen Abmessungen des Versuchskörpers wurden die Dehnungen in der Platte nicht gemessen. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass der erste und der letzte Messaufnehmer der horizontalen Biegelinie nicht genau am Rand der Platte angeordnet wurden. Die genauere Anordnung der Messaufnehmer ist Bild 4-83 abgebildet. Die für die numerische Nachrechnung verwendete Arbeitslinie ist in Bild 4-97 dargestellt.

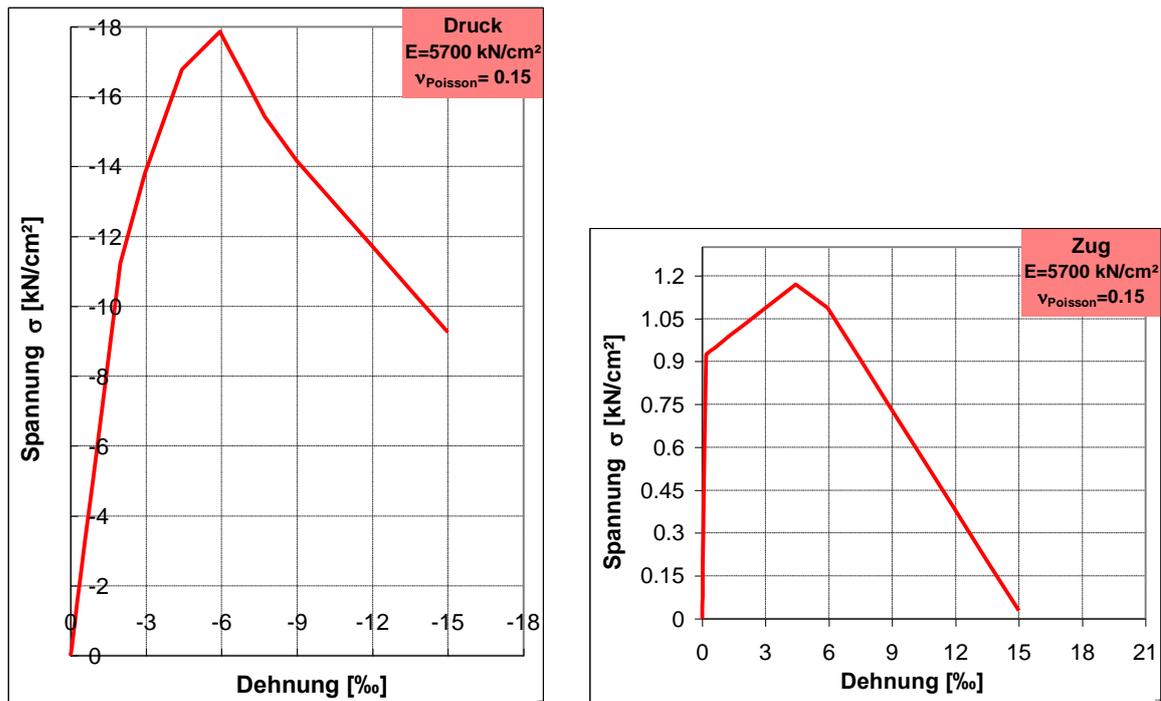


Bild 4-97 Arbeitslinie für die Beulserie 50-00

4.4.1.1 Versuch 50-01

Im Vergleich zur numerischen Simulation wurde im Labor eine viel größere Auslenkungskraft gebraucht (Bild 4-99, rosa Kurve).

Der Versuch wurde zwei Mal gestartet bis die Auslenkungskraft (F_z) von 14,7 kN eine Verformung des mittleren Bereiches der Platte zur Außenseite hervorbrachte. Die maximale Normalkraft betrug 2540 kN. Der Versuchskörper versagte auf Druck im oberen Bereich der Platte. Im Bild 4-100 ist der Versuchskörper nach dem Versuch dargestellt. Nach der numerischen Berechnung wurde die Druckfestigkeit (18 kN/cm²) im mittleren Bereich der Platte (Innenseite) erreicht (Bild 4-98).

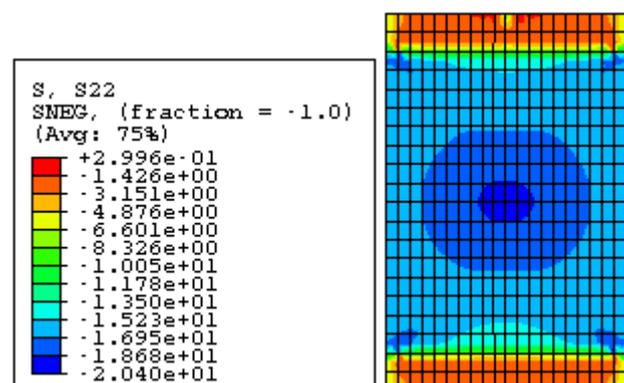


Bild 4-98 Vertikale Spannungenn am Ende der FE-Berechnung – Innenseite

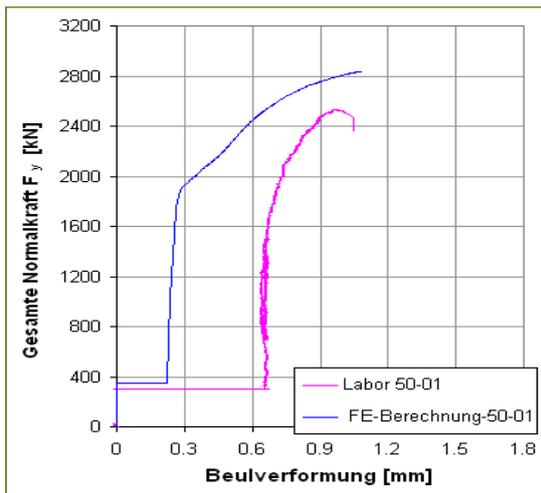


Bild 4-99 Last- Verschiebungsdiagramm des Versuchskörper 50-01



Bild 4-100 Bruchbild im Versuchskörper 50-01

Eine detaillierte Bildaufnahme von dem mittleren Bereich der Platte zeigt die Bildung von zahlreichen Rissen, die hauptsächlich infolge der großen verwendeten Auslenkungskraft aufgetreten sind (Bild 4-100 -untere Ecke).

Das ausführliche Ergebnis der vertikalen Biegelinie zeigt bereits mit der Einleitung der Vorauslenkung (Bild 4-105, rote Kurve) eine Verschiebung (0,3 mm) des oberen Randes der Platte zur Außenseite und eine minimale Verschiebung des unteren Randes zur Innenseite. Mit steigender Belastung nehmen diese Verformungen allmählich zu. Am Ende des Versuches ist eine größere Beulverformung im oberen Teil als im unteren Bereich der Platte zu sehen (Bild 4-105, rote Kurve).

Die horizontale Biegelinie zeigt von Beginn des Versuches an eine größere Verschiebung der linken Seite der Platte (Bild 4-105, rote Kurve, 0,28 mm). Obwohl am Ende des Versuches die Verformungen von beiden Seiten annähernd symmetrisch sind (Bild 4-105, blaue Kurve), ist die Beulverformung etwas mehr nach links gerichtet.

4.4.1.2 Versuch 50-02

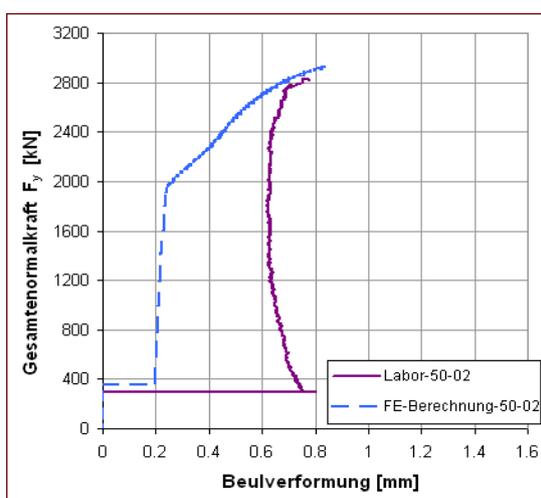


Bild 4-101 Last- Verschiebungsdiagramm des Versuchskörper 50-02



Bild 4-102 Bruchbild im Versuchskörper 50-02

Der Versuch wurde drei Mal gestartet bis eine Auslenkungskraft von 15 kN die gewünschte Vorauslenkung in der Plattenmitte erzeugte. Die maximale Normalkraft erreichte am Ende des Versuches 2850 kN (Bild 4-101). Der Versuchskörper versagte auf Druck im unteren Teil der Platte (Bild 4-102). Im Bild 4-100 ist der Versuchskörper nach dem Versuch dargestellt. Risse im mittleren Bereich der Platte wurden nicht gefunden.

Die Ergebnisse der vertikalen Biegelinie (Bild 4-106) zeigen ein ähnliches Verhalten wie im Versuchskörper 50-01. Es wurde bereits mit der Einleitung der Vorauslenkung eine Verschiebung des oberen Randes zur Außenseite und eine minimale Verschiebung des unteren Randes zur Innenseite der Platte beobachtet.

Die horizontalen Biegelinien (Bild 4-106) zeigten von Anfang an und bis zum Ende des Versuches keine symmetrischen Verläufe. Der linke Rand weist eine größere Verschiebung (0,3 mm) zur Außenseite als die rechte Seite (0,15 mm) auf.

4.4.1.3 Versuch 50-03

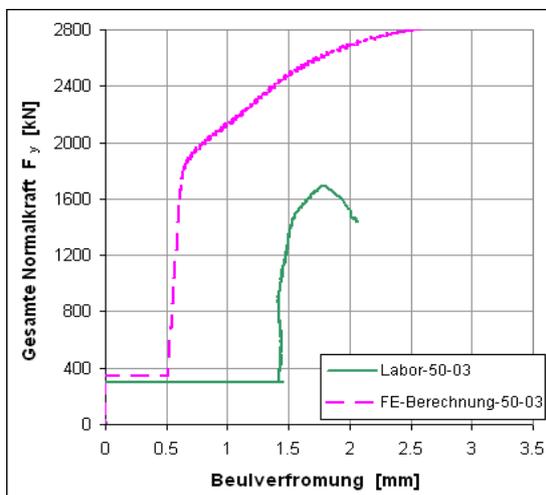


Bild 4-103 Last- Verschiebungsverläufe -Versuchskörper 50-02



Bild 4-104 Bruchbild im Versuchskörper 50-02

Der Versuch brauchte nur ein Mal gestartet zu werden. Es wurde eine größere Vorauslenkung (1,4 mm, $F_z = 14,8$ kN) als bei der FE- Berechnung gebraucht um eine Verformung des mittleren Bereiches der Platte zur Außenseite zu erreichen. Die maximale Normalkraft erreichte einen viel niedrigen Wert ($F = 1692$ kN) als in den anderen zwei Versuchen der gleichen Beulserie (Bild 4-103). Die Ursache dafür liegt möglicherweise an einer schiefen Oberfläche des horizontalen Randes des Versuchskörpers, die trotz des sorgfältigen Herstellungsprozesses entstanden sein könnte. Der Versuchskörper versagte auf Druck. Der Bruch entstand im unteren Teil der Platte. Die zahlreichen Rissbildungen im Bereich der Plattenmitte bildeten sich hauptsächlich wegen der großen angewendeten Vorauslenkung (Bild 4-104).

Im Unterschied zu den anderen zwei Versuchen zeigt die vertikale Biegelinie vor der Einleitung der Auslenkungskraft und trotz der gründlichen Analyse der Vorkrümmung des Versuchskörpers, eine Verformung der Platte zur Innenseite (Bild 4-107, gelbe Kurve).

Nach der Einleitung der Auslenkungskraft und aufgrund der großen verwendeten Vorauslenkung wurde eine Verschiebung des oberen und unteren Randes der Platte zur Außenseite beobachtet. Am Ende des Versuches erreichten diese Werte 0,4 mm (oben) und 0,2 mm (unten).

Bei der horizontalen Biegelinie entsteht erst am Ende des Versuches eine große Verformung (1 mm) von der linken Seite zur Außenseite der Platte auf. Am linken Rand bleibt die Verformung unter 0,7 mm.

Biegelinie der Beulserie 50-00

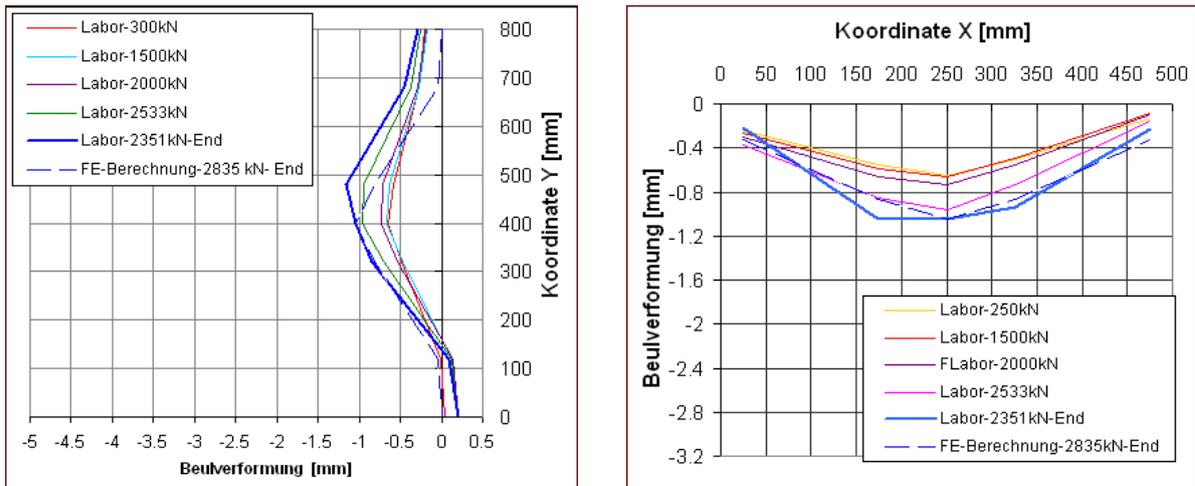


Bild 4-105 Vertikale und horizontale Biegelinie des Versuchskörpers - 50-01

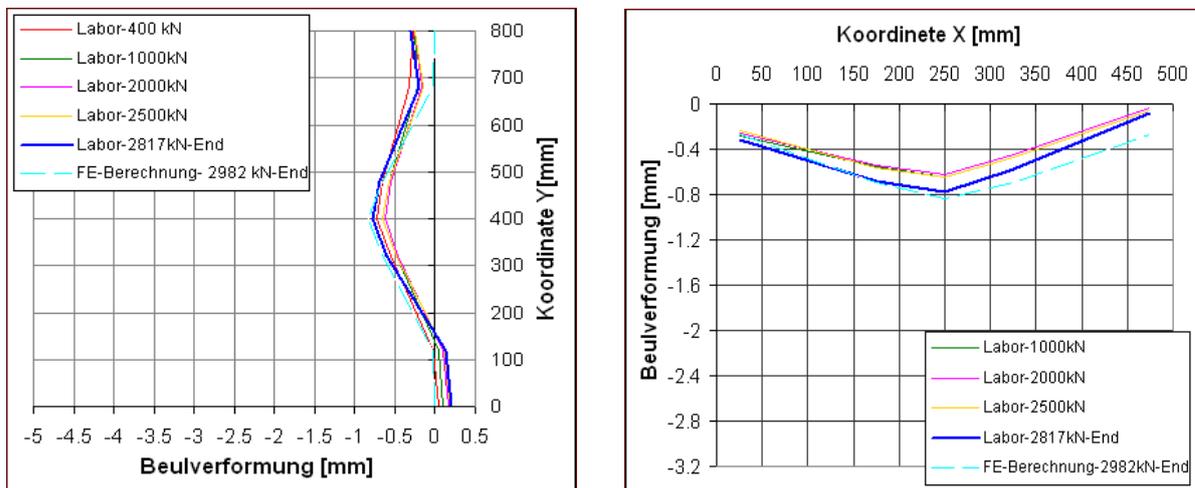


Bild 4-106 Vertikale und horizontale Biegelinie des Versuchskörpers - 50-02

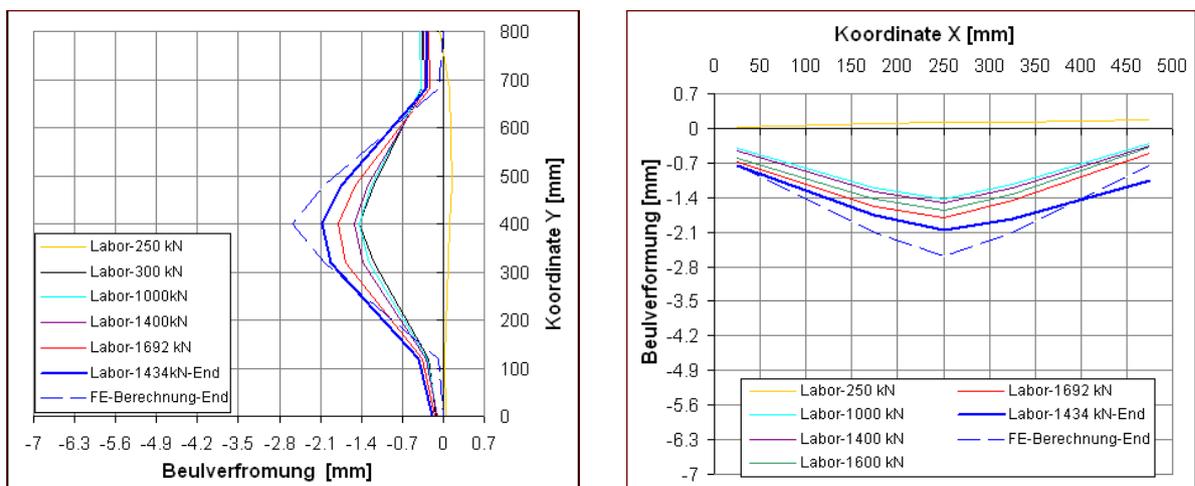


Bild 4-107 Vertikale und horizontale Biegelinie des Versuchskörpers - 50-03

4.4.2 Durchführung und Auswertung der Versuchsserie 75-00

Die geometrische Analyse zeigte bereits ab dieser Beulserie einen beachtlichen Unterschied in der gemessenen Wandstärke der Platten. Die Werte variieren zwischen 25mm und 28 mm. Es wurde wegen der Nachgiebigkeit der Schalung und des Betondruckes eine größere Wandstärke besonders im unteren Bereich des Versuchskörpers festgestellt.

Im Labor wurden für diese Serie keine Dehnungen in der Platte gemessen. Die Versuchskörper der Beulserie 75-00 waren die ersten, die im Labor untersucht wurden. Während dieser Versuche wurde die passende Einleitung der Auslenkungskraft gesucht. Die genaue Anordnung der Messaufnehmer wurde in Bild 4-84 dargestellt. Die für die numerische Nachrechnung verwendete Arbeitslinie ist im Bild 4-108 dargestellt.

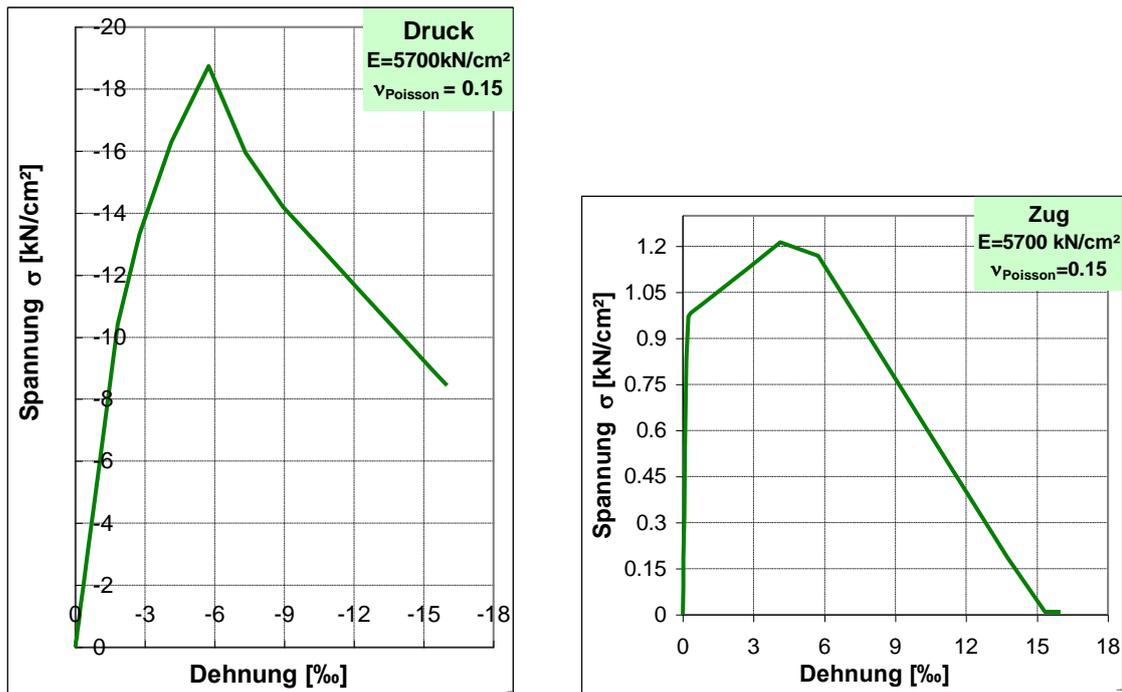


Bild 4-108 Arbeitslinie der Beulserie 75-00

Im ersten Versuch (Versuchskörper 75-03) wurde ein vorzeitiges Versagen im Lasteinleitungsbereich (oberer Rand) eingetreten. Der Grund dafür liegt am Ausgleichmörtel, der nicht für die Querdehnungsbehinderung sorgte. Um dieses Problem zu verbessern, wurden die horizontalen Ränder mit Stahlplattenmanschetten verstärkt (Siehe Bild 4-75). Im Bild 4-109 ist das Bruchbild im Versuchskörper 75-03 am Ende des Versuches dargestellt.



Bild 4-109 Bruchbild im Versuchskörper 75-03

4.4.2.1 Versuch 75-02

Im nächsten Versuch wurde von der Plattenmitte (B) die Auslenkungskraft (F_z) von 10 kN mit Hilfe eines Hohlkolbenzylinders und eines Kettenzuges eingeleitet. Dieses System wurde an einem Holzbalken zwischen den Säulen des Prüfgerüsts befestigt (siehe Bild 4-71). Die maximale Normalkraft erreichte 2865 kN (Bild 4-112, rote Kurve). Verglichen mit der FE-Berechnung wurde nur eine geringe Beulverformung in der Plattenmitte erreicht, weil die Auslenkungskraft ($F_z = 19,5$ kN) während des Versuches einen Rückgang von ihrem Wert zeigte.

Der Versuchskörper versagte auf Druck. Der Bruch bildete sich in der Mitte des Versuchskörpers, entlang der gesamten Breite. Rissbildungen wurden auch an den vertikalen Rändern beobachtet (Bild 4-113). Gemäß der numerischen Berechnung wurde die Druckfestigkeit (19 kN/cm^2) in der Plattenmitte (Innenseite) erreicht (Bild 4-110), die entsprechende Druckdehnung beträgt in dem Bereich $6,6 \%$ (Bild 4-111).

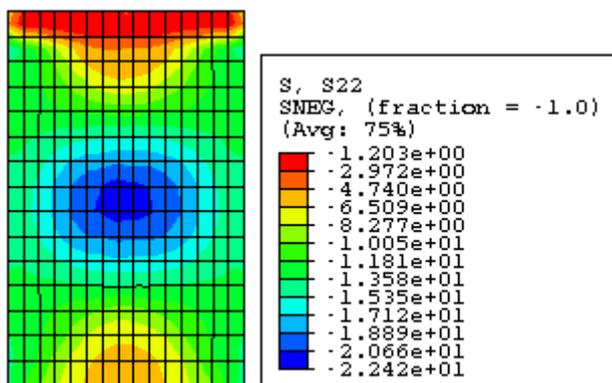


Bild 4-110 Vertikale Spannungenn am Ende der FE-Berechnung– Innenseite

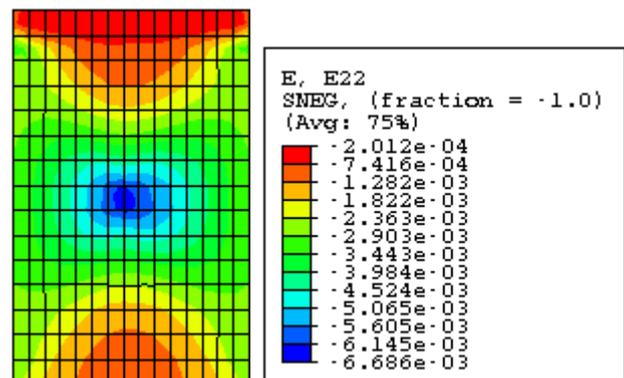


Bild 4-111 Vertikale Dehnungen am Ende der FE-Berechnung- Innenseite

Die vertikalen Biegelinien weist nach der Einleitung der Auslenkungskraft eine Verschiebung ($0,3$ mm) des oberen Randes der Platte zur Außenseite auf, die aber mit zunehmender Belastung ein Rückgang zeigt. Bei der horizontalen Biegelinie wurde eine größere Verformung ($0,3$ mm zur Außenseite) des linken Randes beobachtet (Bild 4-118).

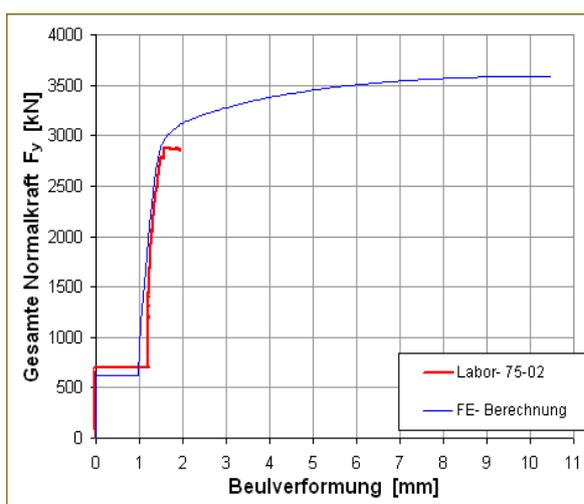


Bild 4-112 Last- Verschiebungsdiagramm – Versuchskörper 75-02



Bild 4-113 Bruchbild im Versuchskörper 75-02

4.4.2.2 Versuch 75-04

Bei diesem Versuch wurde die Auslenkungskraft mit einem System bestehend aus einem Hohlkolbenzylinder und einer Zugstange aufgebracht (Siehe Bild 4-72). Der Versuch wurde mit einer Auslenkungskraft von 8,5 kN gestartet.

Es ist zu vermuten, dass während des Betonierungsprozesses eine schiefe Oberfläche im unteren Teil des Versuchskörpers entstand (Bild 4-6- auf dem Boden montiertes Gerüst). Das würde das schnellere Versagen des Versuchskörpers im Vergleich zum vorigen Versuch erklären (Bild 4-114). Generell zeigen die Versuchsergebnisse ein weiches Verhalten der vertikalen Ränder der Platte. Das führte zu einem schnelleren Versagen im Bereich der Flansche. Der Bruch entstand entlang der Einspannstellen und im oberen Teil des Versuchskörpers (Bild 4-115). Im mittleren Bereich der Platte wurden auch zahlreiche feine Risse gefunden (Bild 4-115- untere linke Ecke)

Die vertikalen Biegelinien (Bild 4-119) zeigen, dass die Beulverformung im Vergleich zum vorigen Versuch mehr nach oben gerichtet wurde. Die Verschiebung des oberen Randes zu der Außenseite erreichten 0,4 mm. Bei der horizontalen Biegelinie sind auch eindeutig große Verschiebungen an beiden Seiten zu beobachten (Bild 4-119). Der linke Rand zur Innenseite (0,7 mm) und der rechte Rand zur Außenseite (1,3 mm).

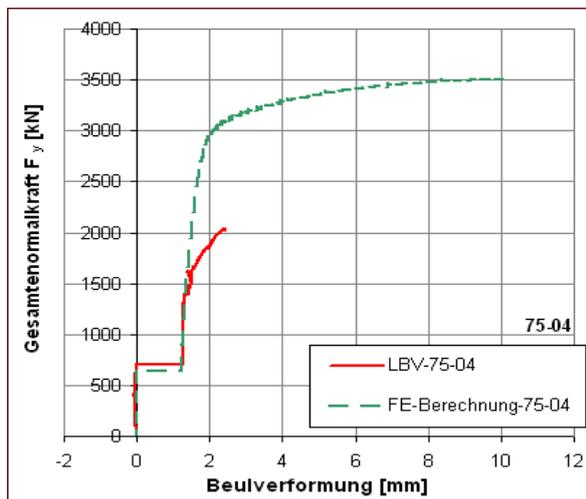


Bild 4-114 Last- Verschiebungsdiagramm – Versuchskörper 75-04

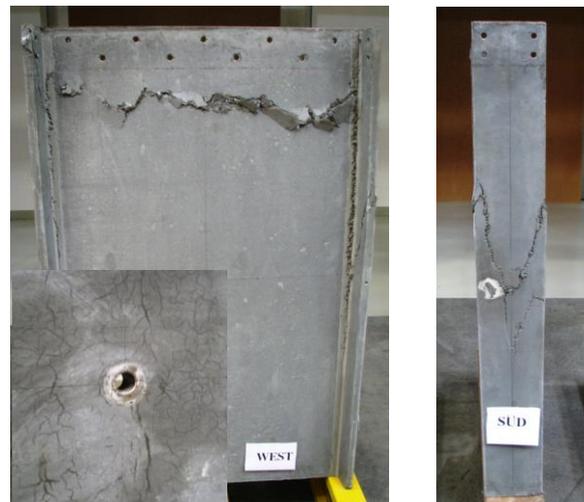


Bild 4-115 Bruchbild im Versuchskörper 75-04

4.4.2.3 Versuch 75-01

Der Versuchskörper 75-01 zeigte während der experimentellen Untersuchung ein zu steifes Verhalten. Der Versuch wurde mehrmals durchgeführt (Bild 4-116). Trotz der hohen verwendeten Auslenkungskräfte orientierte sich die anfängliche Beulverformung zur Innenseite (West). Deswegen wurde der Versuch umgebaut (der Versuchskörper um 180° verdreht) und die Auslenkungskraft auf der anderen Seite (West) eingeleitet. Die erzielten Ergebnisse zeigte erneut ein zu steifes Verhalten des Versuchskörpers. Die Beulverformung erreichte am Ende des Versuches keinen großen Wert, weil die Auslenkungskraft ($F_z = 19,5$ kN) während des Versuches einen Rückgang von ihrem Wert zeigte.

Wie im vorigen Versuch wurde in diesem Fall auch ein weiches Verhalten an den Anschlüssen zu den Flanschen beobachtet. Der Bruch entstand entlang der linken Einspannstelle (Bild 4-117). Im Bereich der Plattenmitte wurden nur wenige Risse gefunden.

Bei der Messung der Beulverformung ist ein Fehler bei einem Messaufnehmer aufgetreten (im Bild 4-84 ist die Stelle mit 3 bezeichnet), deswegen ist bei der vertikalen Biegelinien das Verhalten des oberen Randes der Platte nicht genau zu verfolgen (Bild 4-120). Die Kurvenverläufe deuten aber auf eine nach oben gerichtete Beulverformung hin.

Die horizontale Biegelinie weist gleich wie bei den anderen Fällen keine symmetrischen Verläufe auf. Die rechte Seite der Platte zeigte am Ende des Versuchs eine viel größere Verschiebung (2 mm) zur Außenseite als die linke Seite (Bild 4-120)

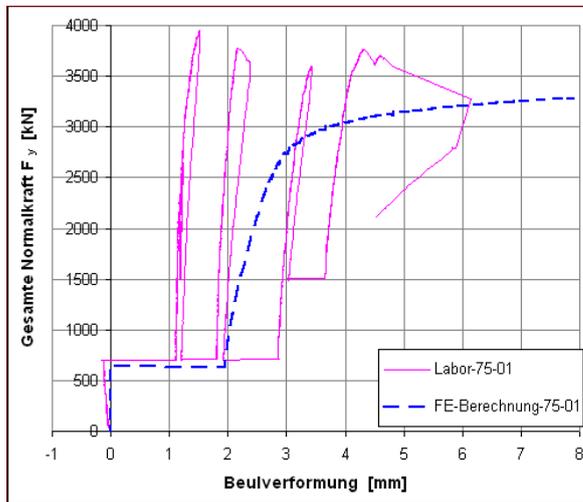


Bild 4-116 Last- Verschiebungsdiagramm – Versuchskörper 75-01

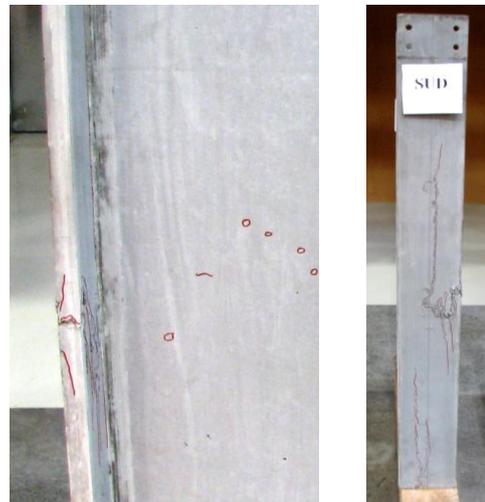


Bild 4-117 Bruchbild im Versuchskörper 75-01

Biegelinie der Beulserie 75-00

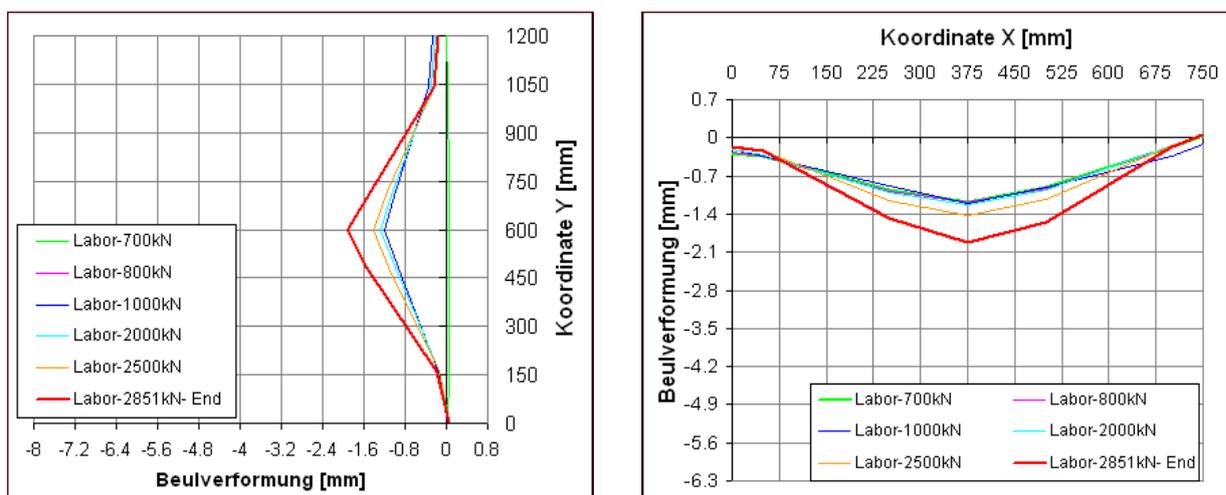


Bild 4-118 Vertikale und horizontale Biegelinie des Versuchskörpers – 75-02

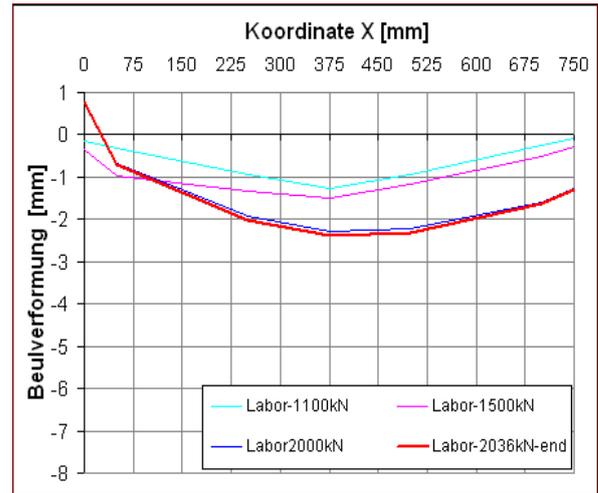
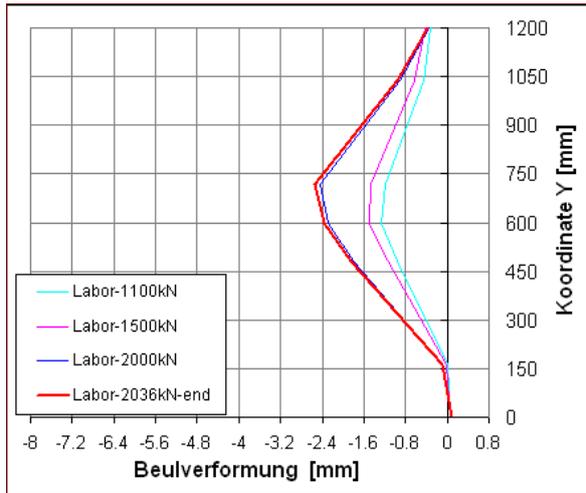


Bild 4-119 Vertikale und horizontale Biegelinie des Versuchskörpers – 75-04

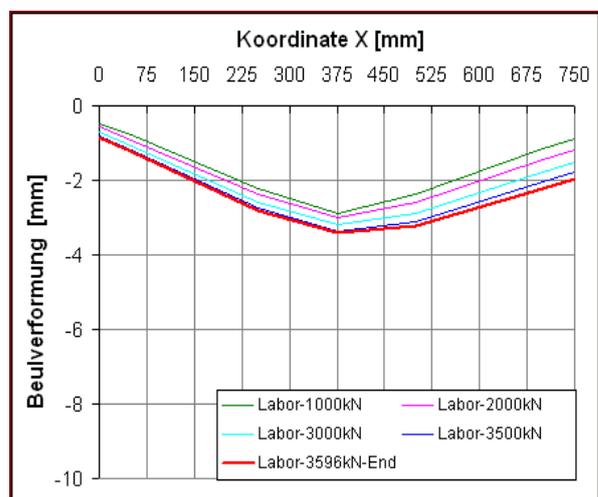
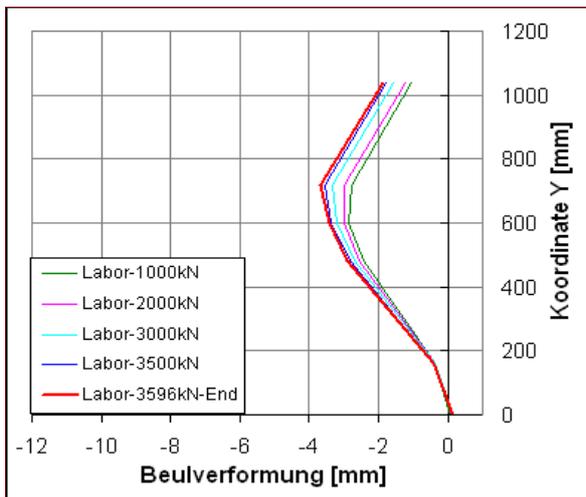


Bild 4-120 Vertikale und horizontale Biegelinie des Versuchskörpers - 75-01

4.4.3 Durchführung und Auswertung der Versuchsserie 100-00

Die Ergebnisse der geometrischen Analyse weisen besonders im unteren Bereich der Platte größere Werte als die planmäßigen 25 mm auf. Als Folge wurde eine erhebliche Steigerung in der Tragfähigkeit des Versuchskörpers beobachtet. Von der Beulserie 100-00 wurden drei Versuchskörper untersucht. Es sei darauf hingewiesen, dass die Einleitung der Auslenkungskraft erst im Versuch 100-02 zufriedenstellend gelöst wurde. Die genaue Anordnung der Messaufnehmer wurde im Bild 4-85 bis Bild 4-88 dargestellt. Die verwendete Arbeitslinie für die Berechnung der numerischen Simulation ist für diese Beulserie im Bild 4-121 dargestellt.

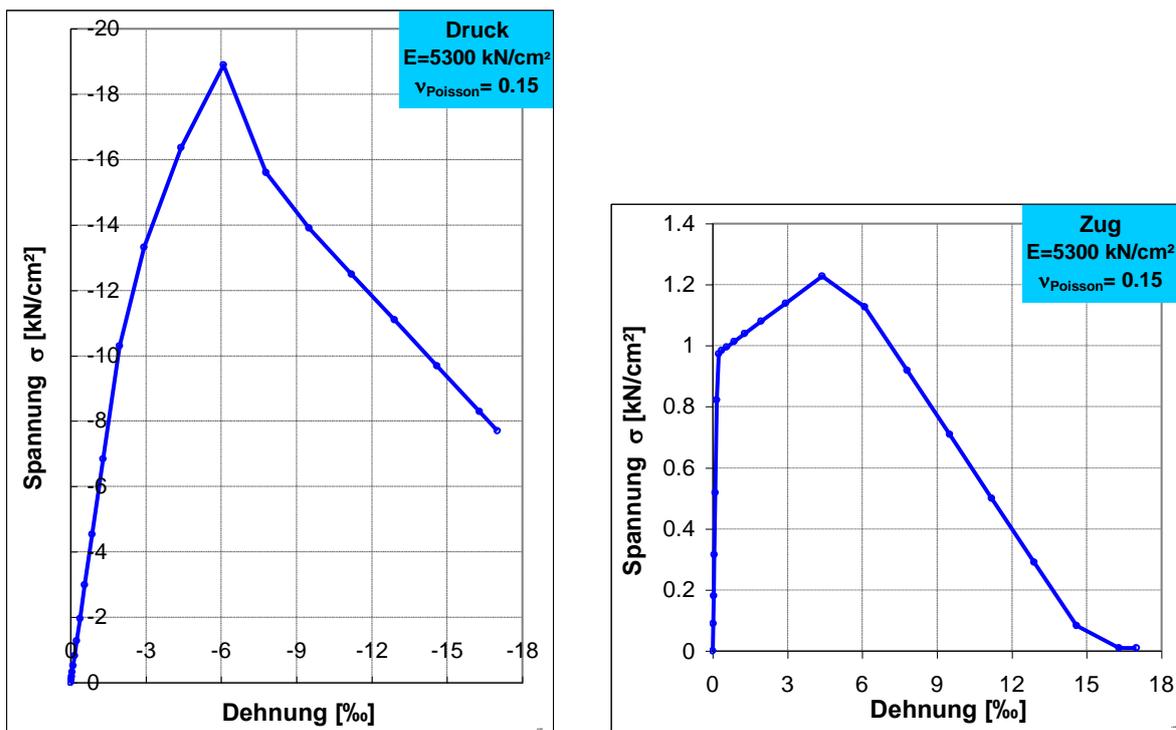


Bild 4-121 Arbeitslinie für die Beulserie 100-00

4.4.3.1 Versuch 100-02

Erst nach mehreren Versuchen wurde im Versuch 100-02 die endgültige Einleitung der Auslenkungskraft gefunden. Als erstes wurde für die Aktivierung der Auslenkungskraft ein System verwendet, welches aus einem Stahl UNP Profil, einem Holzkolbenzylinder und einer Zugstange bestand (siehe Bild 4-72). Die Ergebnisse zeigten ein zu steifes System. Die Auslenkungskraft geht während des Versuches verloren. Am Ende des Versuches wurden keine sichtbaren Rissbildungen gefunden.

Am gleichen Versuchskörper wurde ein zweites System getestet, welches als eine Feder funktionieren sollte. Dafür wurde ein Holzbalken an Stelle des Stahlprofils verwendet. Diese Methode brachte bessere Ergebnisse, aber die Beulverformung (u_z) erreichte immer noch sehr kleine Werte ($F_z = 13,5 \text{ kN}$). Am Ende dieses Versuches wurden kleine Risse im oberen Bereich des rechten Flansches beobachtet.

Zuletzt wurde am gleichen Versuchskörper das endgültige System, bestehend aus einem Gewicht, einem Seil mit einer Kraftmessdoce und einer Umlenkungsrolle (siehe Bild 4-73), realisiert. Bei diesem System blieb die Auslenkungskraft ($F_z = 12,5 \text{ kN}$) während des Versuches konstant und die Platte zeigte die gewünschte Verschiebung aus der Ebene (Beulverformung).

Die Ergebnisse des Versuches 100-02 sind in einem Kraft-Verschiebungsdiagramm zusammen mit dem Ergebnis der numerischen Simulation im Bild 4-122 dargestellt. Die geometrische Analyse

zeigte besonders im unteren Teil der Platte eine viel größere Wandstärke als im restlichen Teil des Versuchskörpers (größer als 25 mm).

Anders als im Versuch wurde für die Vorversuchsanalyse die FE-Berechnung mit einer konstanten Wandstärke von 25 mm und einer geometrischen Imperfektion von 1 mm gemäß ihrer ersten Eigenform durchgeführt. Trotz der sorgfältigen Modellierungsarbeit wurde die tatsächliche Dicken-Unterschiede im Versuchskörper nicht zu genau realisiert, deswegen wurde im Labor eine größere Auslenkungskraft und eine größere geometrische Imperfektion gebraucht, um die gewünschte Beulverformung des Versuchskörpers zu erreichen.

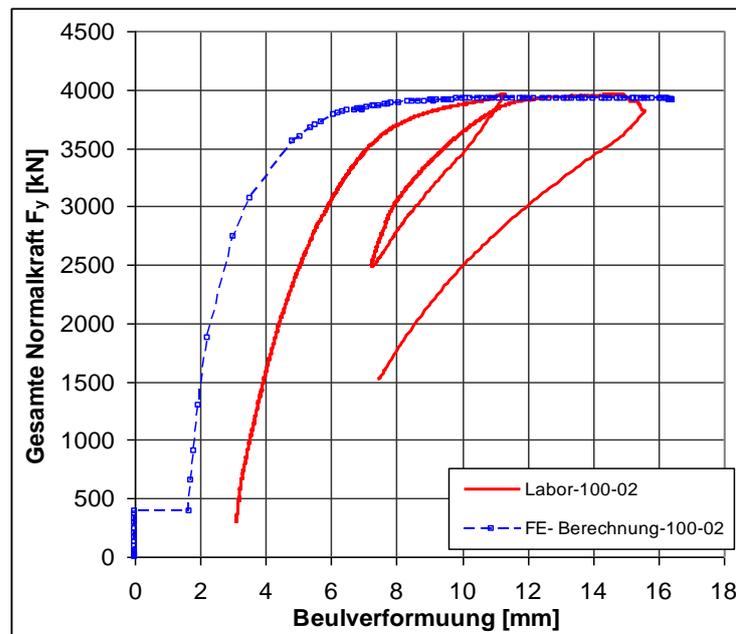


Bild 4-122 Last- Verschiebungsdiagramm - 100-02

Innenseite

Die Laborergebnisse zeigen einen hoch beanspruchten mittleren Bereich der Platte, das führte zu dem Bruch des Versuchskörpers. Der Rissbruch (Bild 4-123) entstand in der Plattenmitte (Innenseite).

Nach der numerischen Simulation bilden sich hohe Druckspannungen im mittleren Teil des Versuchskörpers, die Druckfestigkeit des verwendeten Materials (19 kN/cm^2) wurde in dem Bereich erreicht. Die vertikalen Dehnungen beträgt in der Plattenmitte etwa 5 ‰ (Bild 4-129). Das Auftreten des Druckbruches in der Plattenmitte bekräftigt dieses Verhalten (Bild 4-123)

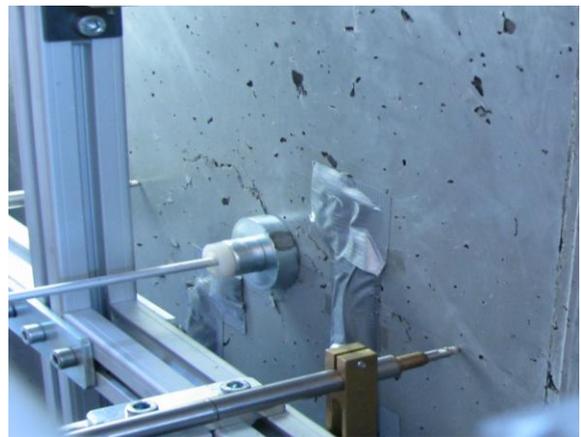


Bild 4-123 Bruch in der Innenseit

Die Laborergebnisse zeigen einen hoch beanspruchten mittleren Bereich der Platte, das führte zu dem Bruch des Versuchskörpers. Der Rissbruch (Bild 4-123) entstand in der Plattenmitte (Innenseite).

Nach der numerischen Simulation bilden sich hohe Druckspannungen im mittleren Teil des Versuchskörpers, die Druckfestigkeit des verwendeten Materials (19 kN/cm^2) wurde in dem Bereich erreicht. Die vertikalen Dehnungen beträgt in der Plattenmitte etwa 5 ‰ (Bild 4-129). Das Auftreten des Druckbruches in der Plattenmitte bekräftigt dieses Verhalten (Bild 4-123)

Die Laborergebnisse zeigen einen hoch beanspruchten mittleren Bereich der Platte, das führte zu dem Bruch des Versuchskörpers. Der Rissbruch (Bild 4-123) entstand in der Plattenmitte (Innen-seite).

Nach der numerischen Simulation bilden sich hohe Druckspannungen im mittleren Teil des Versuchskörpers, die Druckfestigkeit des verwendeten Materials (19 kN/cm^2) wurde in dem Bereich erreicht. Die vertikalen Dehnungen beträgt in der Plattenmitte etwa 5 ‰ (Bild 4-129). Das Auftreten des Druckbruches in der Plattenmitte bekräftigt dieses Verhalten (Bild 4-123)

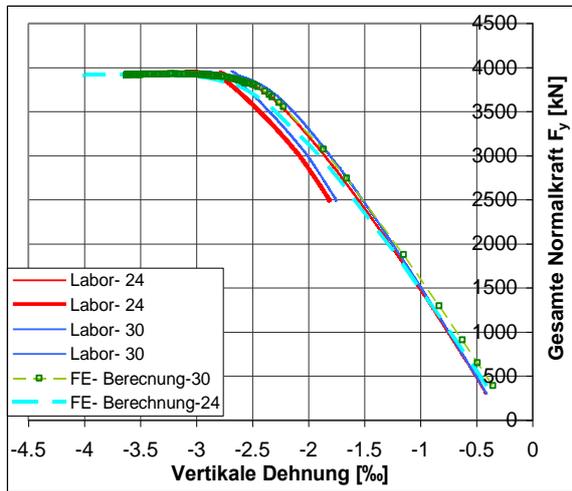


Bild 4-124 Last vs. vertikale Dehnung - Stellen 24 und 30

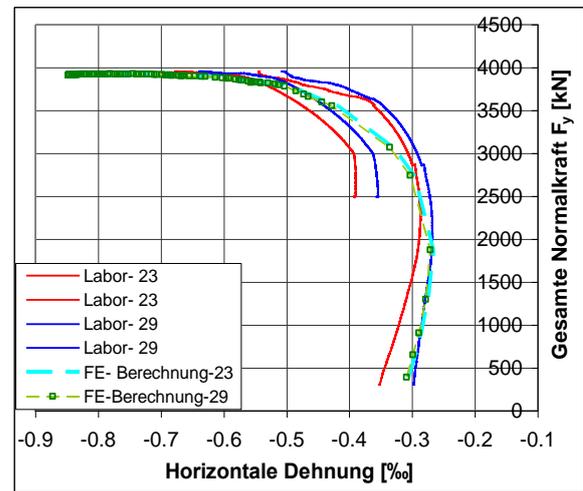


Bild 4-125 Last vs. horizontale Dehnung - Stellen 23 und 29

Die Laborergebnisse zeigen einen hoch beanspruchten mittleren Bereich der Platte, das führte zu dem Bruch des Versuchskörpers. Der Rissbruch (Bild 4-123) entstand in der Plattenmitte (Innen-seite).

Nach der numerischen Simulation bilden sich hohe Druckspannungen im mittleren Teil des Versuchskörpers, die Druckfestigkeit des verwendeten Materials (19 kN/cm^2) wurde in dem Bereich erreicht. Die vertikalen Dehnungen beträgt in der Plattenmitte etwa 5 ‰ (Bild 4-129). Das Auftreten des Druckbruches in der Plattenmitte bekräftigt dieses Verhalten (Bild 4-123)

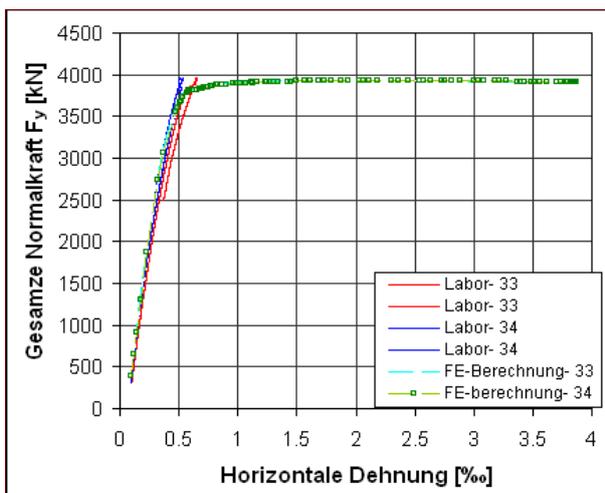


Bild 4-126 Last vs. horizontale Dehnung - Stellen 33 und 34

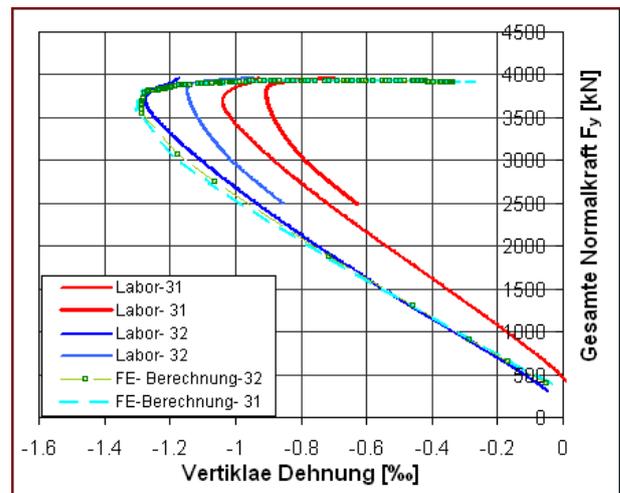


Bild 4-127 Last vs. vertikale Dehnung - Stellen 31 und 32

Die Laborergebnisse zeigen einen hoch beanspruchten mittleren Bereich der Platte, das führte zu dem Bruch des Versuchskörpers. Der Rissbruch (Bild 4-123) entstand in der Plattenmitte (Innenseite).

Nach der numerischen Simulation bilden sich hohe Druckspannungen im mittleren Teil des Versuchskörpers, die Druckfestigkeit des verwendeten Materials (19 kN/cm^2) wurde in dem Bereich erreicht. Die vertikalen Dehnungen betragt in der Plattenmitte etwa 5 % (Bild 4-129). Das Auftreten des Druckbruches in der Plattenmitte bekräftigt dieses Verhalten (Bild 4-123)

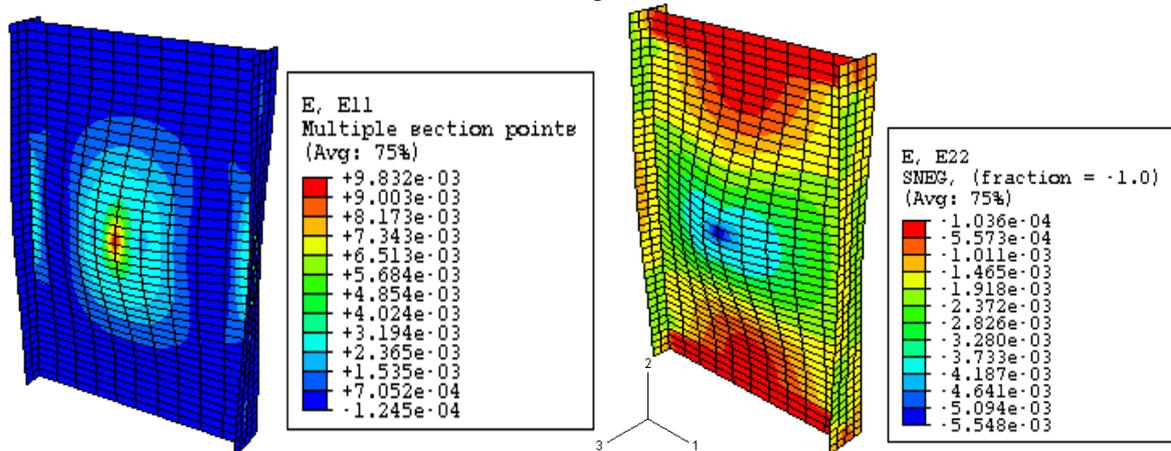


Bild 4-128 Horizontale Dehnungen am Ende der FE- Berechnung– Außenseite

Bild 4-129 Vertikale Dehnungen am Ende der FE- Berechnung- Innenseite

Außenseite

Auf der Außenseite der Platte wurde nur die Instrumentierung für die Messung der Auslenkungskraft angeordnet, deswegen sind für die Beulanalyse und Auswertung der Ergebnisse dieser Seite die Ausbildung und Platzierung der Risse von Bedeutung.



Bild 4-130 Vertikale Rissbildungen in der Scheibemitte- Außenseite



Bild 4-131 Horizontale Rissbildungen in der Scheibemitte -Außenseite

Nach der numerischen Simulation wurde die Außenseite besonders in der Mitte hoch beansprucht, hohe horizontale Zugspannungen bildeten sich in dem Bereich. Die Nachrisszugfestigkeit (horizontale Richtung) wurde in der Plattenmitte bei einer Last von 1876 kN erreicht. Am Ende der Berechnung beträgt die Zugdehnung in dem Bereich ca. 9 % (Bild 4-128). Das Auftreten von zahlreichen vertikalen Rissen in der Plattenmitte bestätigt dieses Verhalten (Bild 4-130). Horizontale Rissbildungen, die hauptsächlich wegen der großen verwendeten Auslenkungskraft auftreten, wurden nur in geringer Anzahl im Bereich der Plattenmitte beobachtet (Bild 4-131).

Im Unterschied zu den anderen Versuchen ist für diesen Fall laut der FE-Berechnung das Bilden von horizontale Zugspannungen (Bild 4-128) an den Rändern der Platte (Außenseite) zu berücksichtigen, im Labor selbst sind keine Rissbildungen an den Stellen gefunden worden.

Biegelinie

Mit den Ergebnissen der gemessenen Verschiebungen (\mathbf{u}_z) aus der Ebene in der Platte wurde die Biegelinie entlang der vertikalen und horizontalen Hauptrichtung der Platten dargestellt, wobei der Referenzpunkt 0,0 die Plattenmitte ist. Für die Biegelinie sind die Werte entnommen, die relevant für die Analyse des Beulverhaltens sind (Bild 4-132 und Bild 4-133).

Die **vertikale Biegelinie** zeigt, dass bereits bei einer Last von 500 kN der obere Rand des Versuchskörpers eine große Verschiebung zu der Außenseite aufweist. Ein Grund dafür liegt an der größeren verwendeten Auslenkungskraft. Mit dem Anstieg der Belastung nehmen diese Verformungen zu. Generell zeigen der obere und untere Bereich der Platte eine viel größere Beulverformung als bei der FE- Simulation.

Der Verlauf der **horizontalen Biegelinie** verhält sich sehr ähnlich zur numerischen Berechnung. Beide vertikalen Ränder weisen ab einer Normalkraft von ca. 3070 kN eine leichte Verschiebung zu der Außenseite auf.

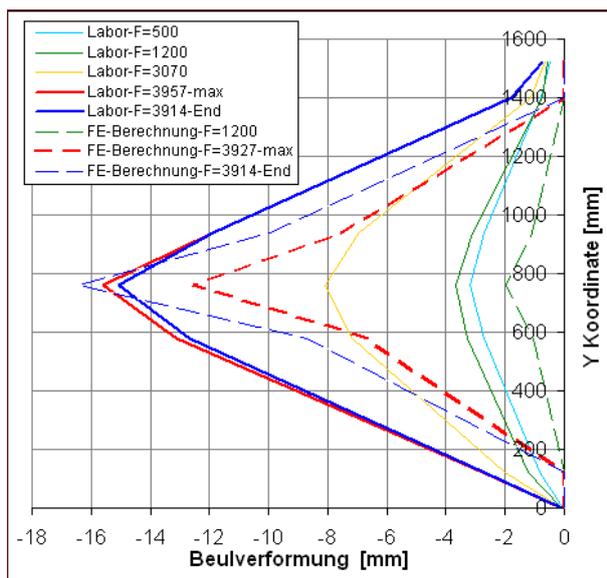


Bild 4-132 Vertikale Biegelinie -100-02

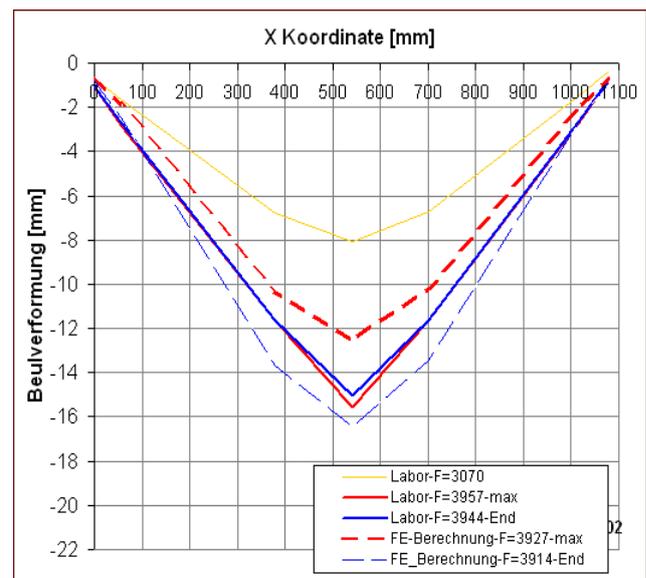


Bild 4-133 Horizontale Biegelinie -100-02

4.4.3.2 Versuch 100-01

Nach der geometrischen Analyse weist den Versuchskörpers 100-01 große Unterschiede in der gemessenen Wandstärke der Platte. Diese wurde vor alle im Bereich den vertikalen Ränder beobachtet. Die neue Dickentoleranz verursachte eine Erhöhung der Tragfähigkeit.

Der Versuch wurde drei Mal mit unterschiedlichen Auslenkungskräften durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten in den ersten zwei Versuchen, trotz der großen verwendeten Auslenkungskraft, ein äußerst steifes Verhalten des Versuchskörpers, deswegen wurden für einen dritten Versuch die Stahlplattenmanschetten des oberen Randes entfernt. Die neuen erzielten Ergebnisse zeigen ein eindeutiges weiches Verhalten des Bereiches. Der Versuchskörper versagte in seinem oberen Rand bei einer Last von 2888 kN.

Für die Analyse und den Vergleich des Tragverhaltens mit der numerischen Berechnung wurden die Ergebnisse des zweiten Versuches herangezogen. Der Versuch wurde in diesem Fall mit einer Auslenkungskraft von 12,4 kN durchgeführt und bei einer Normalkraft von 3986 kN beendet. Im Bild 5.42 sind die Ergebnisse in einem Last-Verschiebungsdiagramm dargestellt (Bild 4-134). Es soll beachtet werden, dass ein Großteil der Rissbildungen erst nach dem dritten Versuch sichtbar wurden.

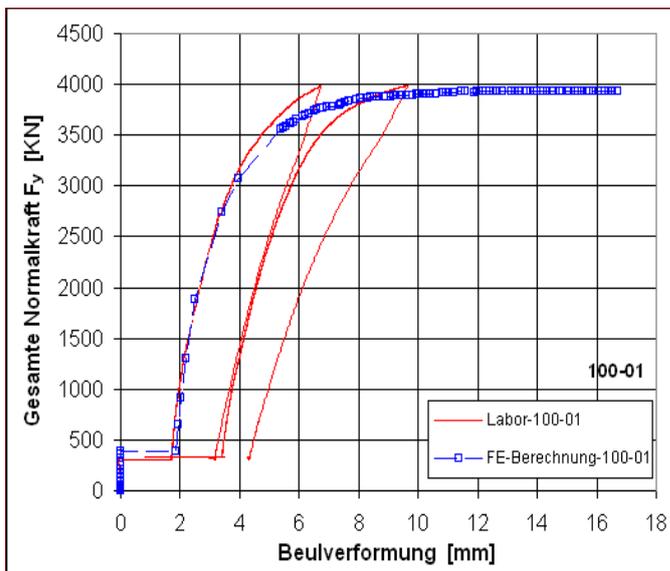


Bild 4-134 Last-Verschiebungsdiagramm –100-01

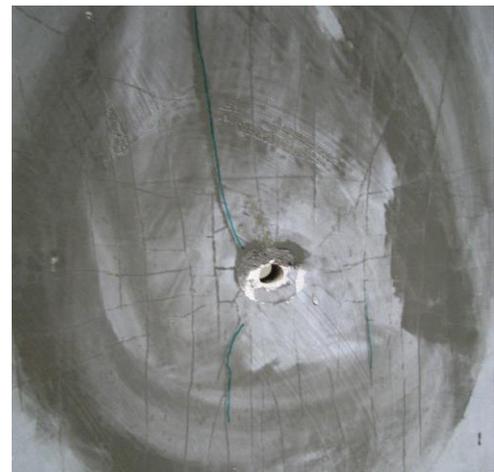


Bild 4-135 Rissbildung in der Scheibenmitte

Außenseite

Im letzten Versuch wurde, trotz der niedrigen erzielten Beulverformung (u_z), eine große Anzahl von vertikalen Rissen im mittleren Bereich der Platte gefunden (Bild 4-136). Diese verteilten sich bis in den oberen und unteren Bereich der Platte. Die Laborergebnisse stimmen im großen Teil mit der FE-Simulation überein, denn entsprechend der numerischen Berechnung wurde die Nachrisszugfestigkeit ($f_{ct} = 1.1 \text{ kN/cm}^2$, horizontale Richtung) in einem großen Teil der Plattenmitte erreicht (Bild 4-139), dieses Verhalten verursacht den Stiefigkeitsverlust der Plattenmitte und somit eine starke Erhöhung der Beulverformung in B. Aufgrund der dünneren Wandstärke wurden ausgeprägte Risse besonders im oberen Teil der Platte beobachtet. (Bild 4-136).

Horizontale Risse, die hauptsächlich wegen der großen verwendeten Vorauslenkung aufgetreten sind, wurden nur im Bereich der Plattenmitte (Bild 4-135) gesehen.

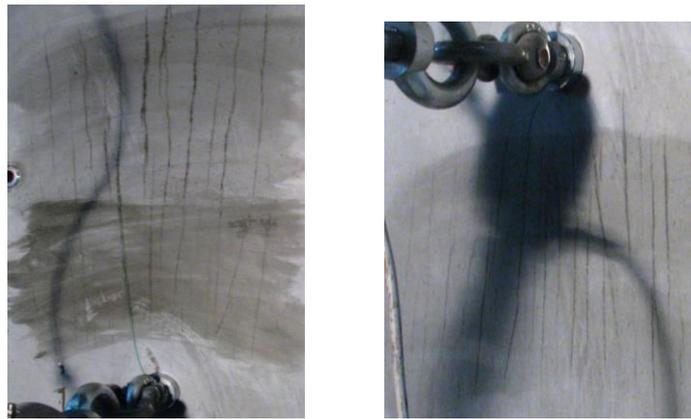


Bild 4-136 Vertikale und horizontale Risse im oberen und unteren Bereich der Scheibe

Innenseite

Sowohl im Versuch als auch bei der numerischen Simulation stimmen die Ergebnisse der vertikalen Dehnungen in der Plattenmitte (Bild 4-137, Messstellen 24, 30) bis zu einer Last von 4000 kN gut überein. Bei der numerischen Berechnung nehmen die Dehnungen bis zu ca. 3,8 ‰ weiter zu, das ergibt sich, im Vergleich des Laborwertes, aufgrund der größten erzielten Beulverformung. Die Kurvenverläufe verhalten sich ab diesem Zeitpunkt analog zum Last-Verschiebungsverlauf. Nach der FE- Berechnung wurde die Druckfestigkeit (19 kN/cm²) in der Plattenmitte erreicht (Bild 4-140). Im Versuch beträgt die maximale Dehnung 2,6 ‰ in der Stelle 24.

Die horizontale Dehnungen in den Stellen 23 und 29 (Bild 4-138) weisen bis 2000 kN einen leichten Rückgang auf, zu diesem Zeitpunkt wurde die Nachrisszugfestigkeit in einem großen Teil der Plattenmitte erreicht. Mit zunehmender Beulverformung steigen die Druckdehnungswerte vor allem bei der FE-Berechnung progressiv zu. Ab ca. 3500 kN flächen die Kurvenverlauf ab, dieses Verhalten fällt mit dem Erreichen der Matrixzugfestigkeit in den Einspannstellen zusammen. Rissausbildungen wurden im mittleren Bereich der Platte allerdings nicht gefunden.

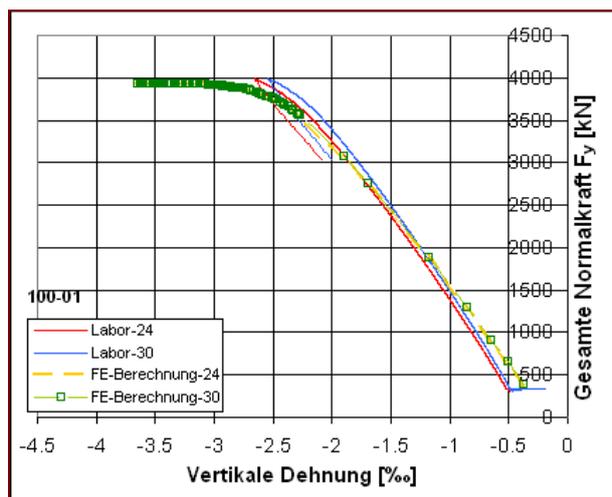


Bild 4-137 Last vs. vertikale Dehnung - Stellen 24 und 30

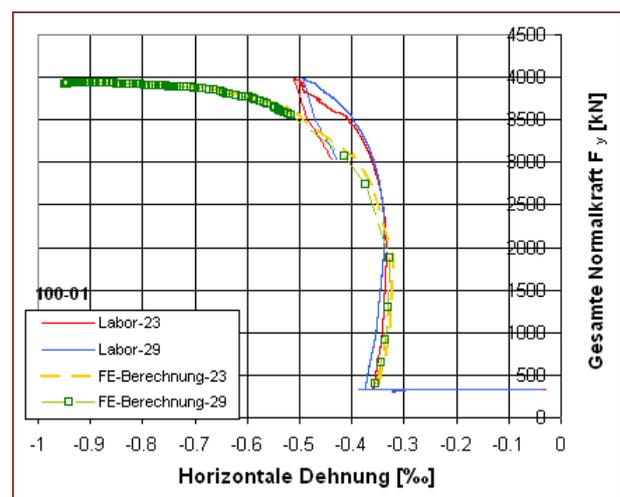


Bild 4-138 Last vs. horizontale Dehnung - Stellen 23 und 29

Nach der FE- Berechnung verlagern sich mit dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte (Außenseite) die horizontalen Beanspruchungen mehr an den vertikalen Rändern. In der Innenseite der Platte bilden sich Hohe horizontale Zugspannungen an den Einspannstellen (A). Die Versuchs-

Ergebnisse der horizontalen Dehnungen der Stelle 33 und 34 wurde zusammen mit der FE- Simulation im Bild 4-141 dargestellt.

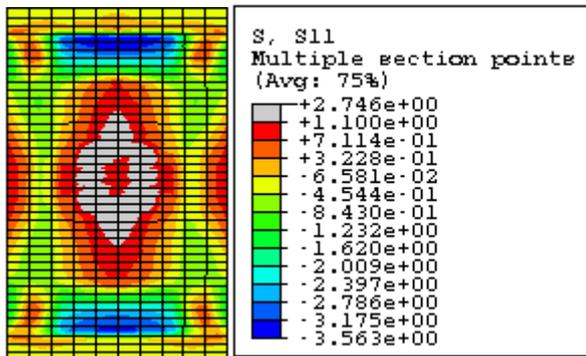


Bild 4-139 Horizontale Dehnungen am Ende der FE- Berechnung–Außenseite

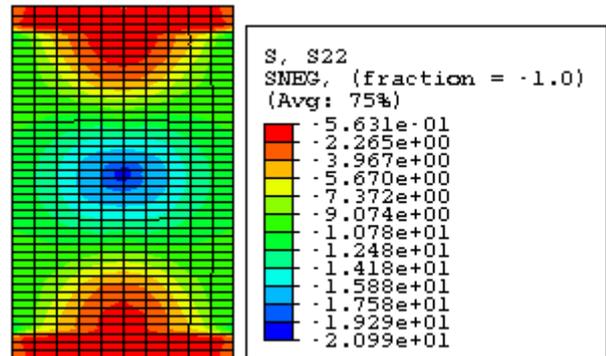


Bild 4-140 Vertikale Spannungen bei einer Last von 3400 kN - Außenseite

Bis zu einer Belastung von 3858 kN weisen die horizontalen Dehnungen (Bild 4-141) ein gleiches Verhalten wie die FE-Berechnung auf. Der Einfluss der unterschiedlichen Wandstärken manifestiert sich in der Stelle 34 in Form von einem größeren Dehnungswert im Vergleich zu der Stelle 33 (Bild 4-141, blaue Kurve). Rissbildungen wurden an den vertikalen Rändern der Platte nicht gefunden. Bei der FE- Berechnung flächen die Dehnungsverläufe nach ca. 3600 kN allmählich ab (Bild 4-141, grüne Kurve). Zu diesem Zeitpunkt wurde die Matrixfestigkeit in den Einspannstellen erreicht.

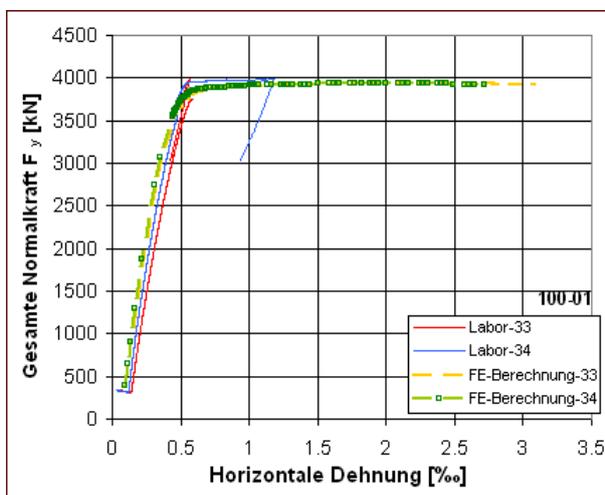


Bild 4-141 Last vs. horizontale Dehnung - Stellen 33 und 34

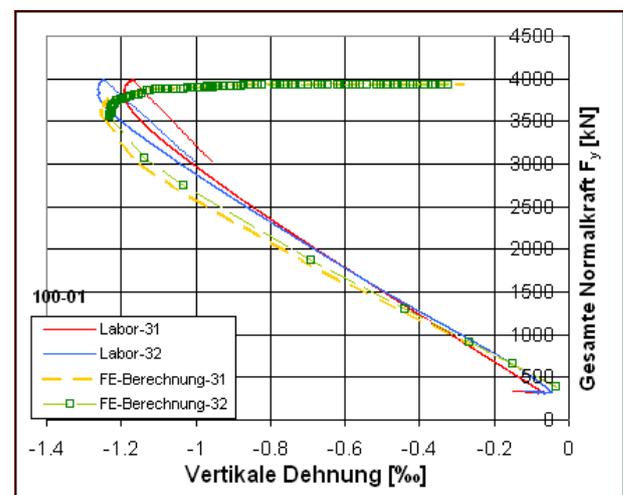


Bild 4-142 Last vs. vertikale Dehnung – Stellen 31 und 32

Bei dem oberen und unteren Teil des Versuchskörpers zeigen die vertikalen Dehnungen (Bild 4-142, Stellen 31 und 32) bis ca. 3554 kN ein annähernd gleiches Verhalten. Zu diesem Zeitpunkt wurde die Matrixfestigkeit an den Rändern (A) erreicht. Gleich danach tritt ein Rückgang des Dehnungswertes auf. Dieses Verhalten ergibt sich wegen des zunehmenden Biegemoments am oberen und unteren Rand des Versuchskörpers, welcher sich nach dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte progressiv erhöht. Das bewirkt eine große Beulverformung im oberen und unteren Bereich der Platte. Die vertikalen Dehnungen nehmen nach diesem Zeitpunkt und bis zum Ende der FE-Berechnung ab. Im Versuch wurden keine Risse an diesen Stellen gefunden.

Biegelinie

Im Labor weist die **vertikale Biegelinie** (Bild 4-143) eine größere Beulverformung im oberen Bereich als im unteren Teil der Platte, dieses Verhalten lässt sich mit der großen verwendeten Auslenkungskraft und der ausgeprägten Dickenunterschied, erklären. Es wurde auch am oberen Rand beobachtet, dass bereits mit der Einleitung der Auslenkungskraft (650 kN) Verschiebungen zu der Außenseite entstehen. Am Ende des Versuches beträgt dieser Verschiebung ca. 1,2 mm (Bild 4-143, blaue Kurve). Ein ähnliches Verhalten wurde bei der **horizontalen Biegelinie** festgestellt. Wegen der großen verwendeten Vorauslenkung weist die linke Seite bereits ab 650 kN eine Verschiebung zu der Außenseite auf. (Bild 4-144).

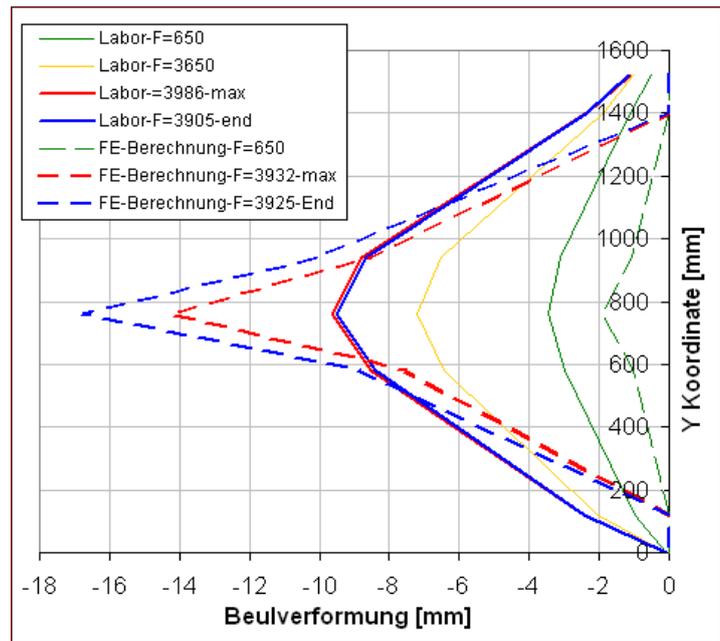


Bild 4-143 Vertikale Biegelinie – 100-01

Nach der vertikalen und horizontalen Biegelinie ist die Beulverformung am Ende des Versuches etwas nach unten und links gerichtet. Der Unterschied mit der numerischen Berechnung ergibt sich hauptsächlich aufgrund der unterschiedlichen erzielten Beulverformung.

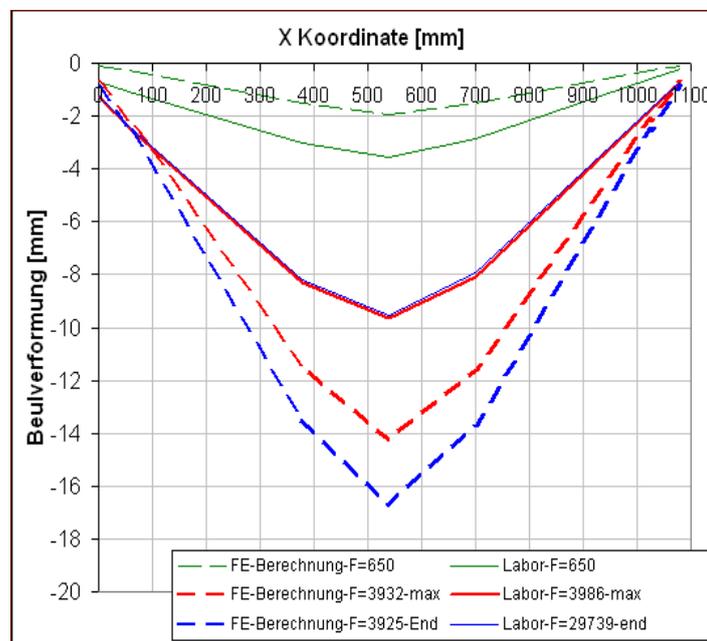


Bild 4-144 Horizontale Biegelinie – 100-01

4.4.3.3 Versuch 100-03

Nach der geometrischen Analyse des Versuchskörpers 100-03 wurde festgestellt, dass die gemessene Dicke der Platte, im Vergleich zu den anderen Versuchskörpern der gleichen Beulserie, keinen großen Unterschied zur geplanten Wandstärke zeigte. Daher wurde für die numerische Simulation eine Plattendicke von 25 mm angenommen.

Im Bild 4-145 wurden die Ergebnisse in einem Last-Verschiebungsdiagramm abgebildet. Aufgrund der fast perfekt ebenen Oberfläche der Platte stimmen die Verläufe ziemlich gut überein. Die verwendete Auslenkungskraft im Labor betrug 5,7 kN. Der Versuch wurde nur einmal durchgeführt. Im Unterschied zu den ersten zwei Versuchskörpern zeigen die Labor Ergebnisse eine größere Beulverformung (u_z) als die Ergebnisse der numerischen Simulation. Außerdem weist das Last-Verschiebungsdiagramm der Laborwerte (Bild 4-145, rosa Kurve) nach Erreichen einer maximalen Normalkraft einen klar fallenden Kurvenverlauf auf.

Die Druckfestigkeit wurde im Labor für die drei Versuchskörper ermittelt, für die numerische Simulation der Beulserie 100-00 wurde ein Mittelwert von 19 kN/cm² angenommen, der Laborwert für den Versuchskörper 100-03 zeigte eine Druckfestigkeit von 17.8 kN/cm², dadurch erklärt sich das etwas niedrigere Tragverhalten im Versuch als bei der FE- Simulation.

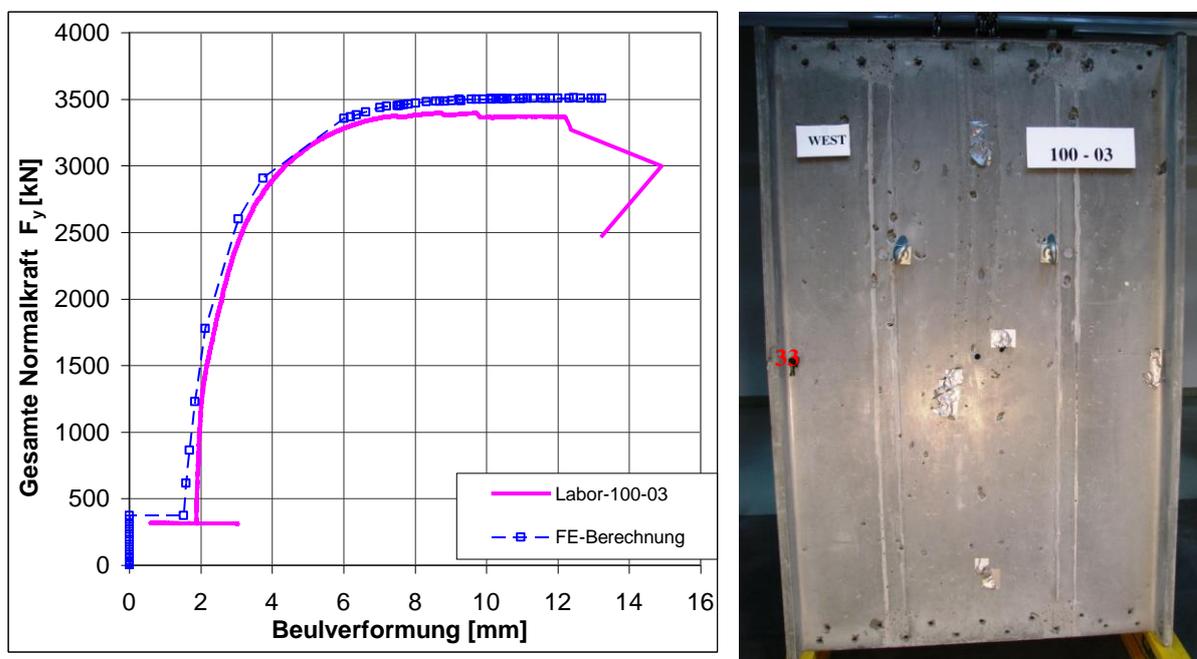


Bild 4-145 Last-Verschiebungsdiagramm und Versuchskörper 100-03 – Innenseite

Innenseite

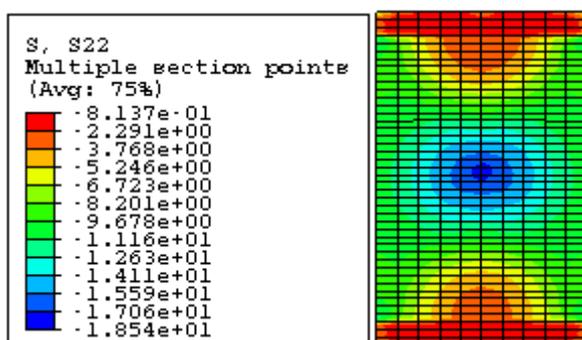


Bild 4-146 Vertikale Spannungen am Ende der FE- Berechnung- Innenseite

Die Laborwerte und die FE- Ergebnisse der vertikalen Dehnungen in den Stellen 24 und 30 (Bild 4-147) zeigen bis zum Erreichen der Nachrisszugfestigkeit ($F = 3353$ kN) in der Plattenmitte (Außenseite) eine gute Übereinstimmung. Nach diesem Zeitpunkt flächen die Kurvenverläufe ab und nehmen die Dehnungswerte allmählich zu. Am Ende der numerischen Berechnung beträgt die Druckspannung in der Plattenmitte 18 kN/cm² (Bild 4-146). Im Versuch erreichte die maximale vertikale Dehnung ca. 3‰ (Stelle 24).

Die Ergebnisse der horizontalen Dehnungen an den Stellen 23 und 29 (Bild 4-148) weisen bis zu einer Last von 2600 kN einen Rückgang in den Druckdehnungswerten auf. Ab einer Normalkraft von 2909 kN nehmen die Dehnungen bis zum Ende des Versuches zu. Dieses Verhalten fällt mit den ersten Rissbildungen an den Einspannstellen zusammen. Ab diesem Zeitpunkt verhalten sich die Kurvenverläufe analog zu der Last-Verschiebungskurve. Die Ergebnisse zeigen auch, dass der Versuchskörper im Bereich der Messstelle 29 etwas mehr gestaucht (0,6‰) wird, als bei der Messstelle 23. Im Versuch wurden Risse im Bereich der Plattenmitte (Innenseite) nicht gefunden.

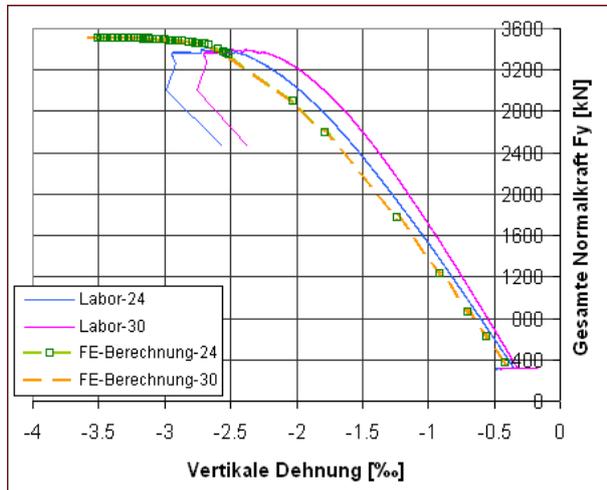


Bild 4-147 Last vs. vertikale Dehnung – Stellen 24 und 30

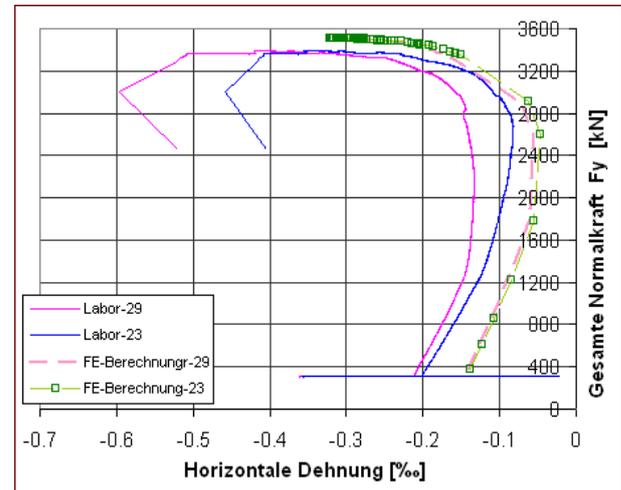


Bild 4-148 Last vs. horizontale Dehnung - Stellen 23 und 29

Nach der hohen Beanspruchung der Plattenmitte (Außenseite) wurden mit dem Steifigkeitsverlust des Bereiches die vertikalen Ränder (Innenseite) sehr stark gedehnt (horizontal, Bild 4-150). Gemäß der numerischen Analyse wurde bei einer Last von 2905 kN die Matrixfestigkeit (horizontale Richtung) an den Einspannstellen erreicht. Die Ergebnisse der horizontalen Dehnung in den Stellen 33 und 34 zeigen bis zu diesem Zeitpunkt, sowohl im Versuch als auch bei der FE-Berechnung, ein gleiches Verhalten. Die Dehnungswerte nehmen nach diesem Zeitpunkt abrupt zu.

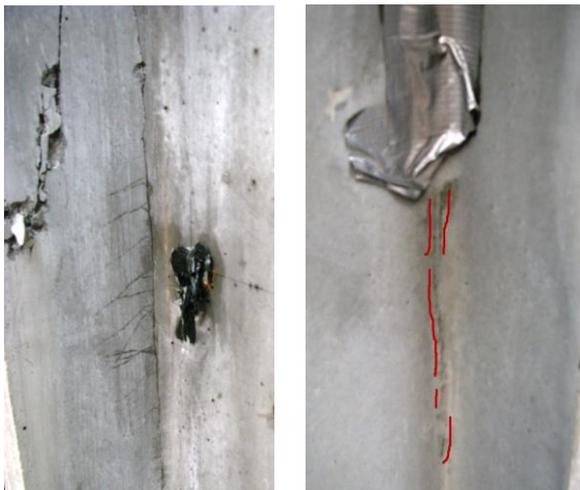


Bild 4-149 Risse in der linken und rechten Flansch-Innenseite

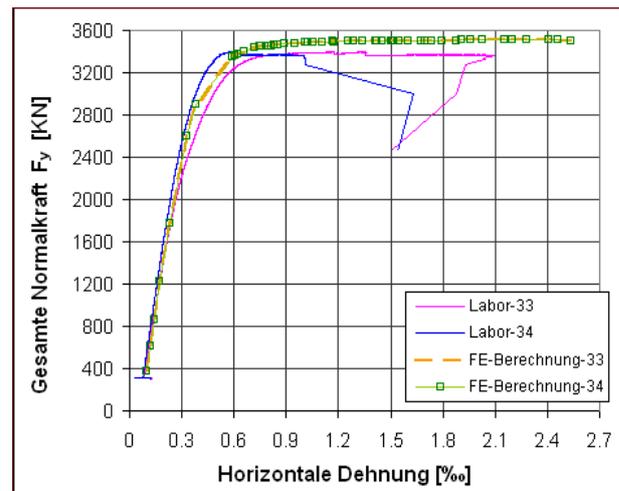


Bild 4-150 Last vs. horizontale Dehnung - Stellen 33 und 34

Bei einer Last von 3353 kN wurde die Nachrisszugfestigkeit in der Plattenmitte (Außenseite) erreicht, das bewirkt die progressive Erhöhung der Beulverformung in B. Mit diesem Verhalten und der zunehmenden Umlagerung der Last an den Einspannstellen (A) nehmen die horizontalen

Dehnungen (Stell 33, 34) bis zum Ende des Versuches stetig zu. Der Unterschied zwischen den Dehnungswerten in der experimentellen Untersuchung und der FE-Berechnung liegt an der Anordnung der Messaufnehmer. Bei der numerischen Berechnung wurden die Dehnungswerte genau an den Rändern herangezogen. Die Laborergebnisse weisen ausgeprägte Rissbildung an dem linken Rand (33) der Platte auf, welche die Ursache für den endgültigen Bruch im Flansch ist. Rissbildungen wurden an beiden vertikalen Rändern der Platte gefunden (Bild 4-149).

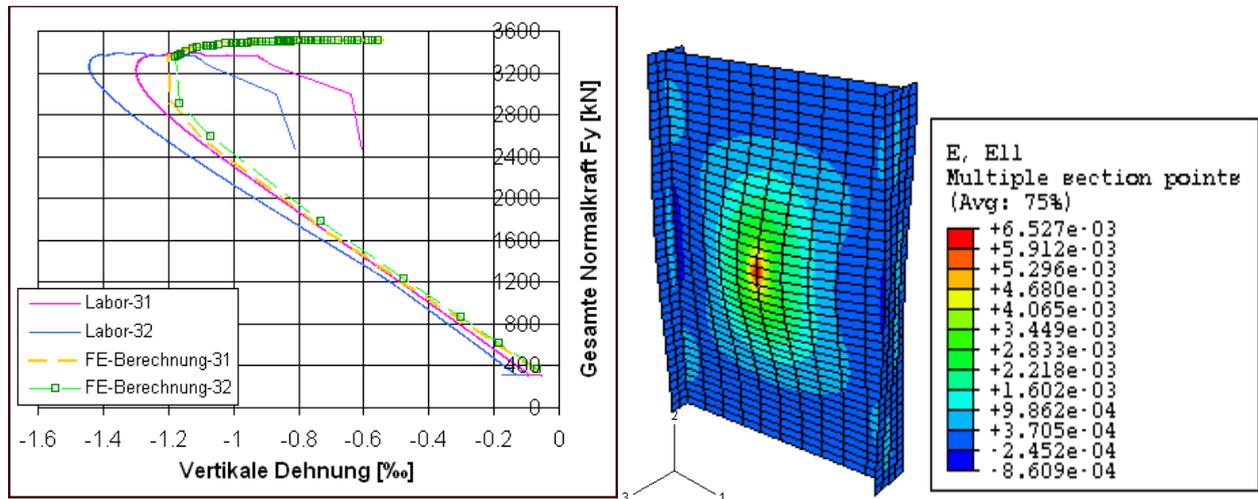


Bild 4-151 Last vs. vertikale Dehnung - Stellen 31 und 32

Bild 4-152 Horizontale Dehnungen am Ende der FE- Berechnung- Außenseite

Die vertikale Dehnung (Bild 4-152) in den Stellen 31 und 32 nimmt bis zum Erreichen der Nachrisszugfestigkeit in der Plattenmitte (3353 kN) allmählich zu. Die Kurvenverläufe zeigen bis zu diesem Zeitpunkt ein annähernd gleiches Verhalten. Gleich danach tritt sowohl im Versuch als auch bei der numerischen Simulation ein Rückgang der Dehnungswerte auf. Dieses Verhalten tritt wegen der zunehmenden Biegemomente des oberen und unteren Randes auf, welche sich nach dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte progressiv erhöhen und dadurch eine stärkere Beulverformung im oberen und im unteren Bereich der Platte verursachen. Mit zunehmender Last nehmen die Dehnungen bis zum Ende des Versuches stetig ab. Der untere Bereich der Platte wurde etwas mehr gestaucht als der untere Teil.

Außenseite



Bild 4-153 Rissbildung in der Scheibenmitte

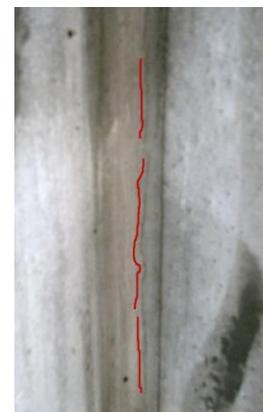


Bild 4-154 Rissbildung in den Flanschen –Außenseite

Die Analyse der FE- Berechnung zeigt, dass bereits beim Auslenken vertikale Risse in der Plattenmitte (B) auftreten. Diese bewirkten eine schnellere Entwicklung der Beulverformung. Nach der FE-Ergebnisse bilden sich zuerst hohe Zugspannungen (horizontale Richtung) im

mittleren Bereich der Platte. Die Nachrisszugfestigkeit in der Plattenmitte (B) wurde bei einer Last von 3353 kN erreicht (Bild 4-155), nach diesem Zeitpunkt verlagern sich die horizontalen Beanspruchungen mehr zu den vertikalen Rändern. Dadurch stabilisiert sich das System und es folgt eine kontinuierliche Erhöhung der Beulverformung. In der Last-Verschiebungsdiagramm flächen die Kurvenverläufe nach diesem Zeitpunkt ab. Am Ende der Berechnung erreicht die horizontale Dehnung in B 6,5 ‰ (Bild 4-152). Die Laborergebnisse weisen eine große Anzahl von feinen vertikalen Rissen in der Außenseite auf, diese wurde besonders im Bereich der Plattenmitte beobachtet (Bild 4-153). Auf dieser Seite wurden auch feine Risse an beiden vertikalen Rändern (Bild 4-154) gefunden.

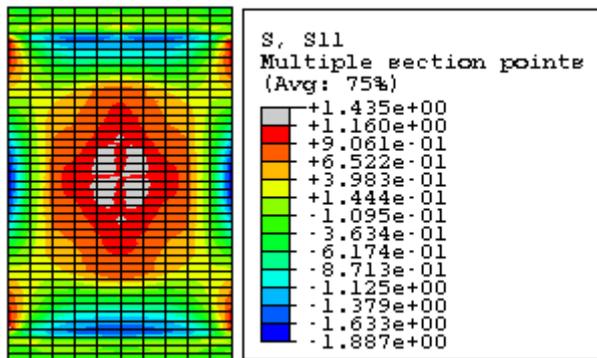


Bild 4-155 Horizontale Spannungen bei einer Last von 3353 kN – Außenseite

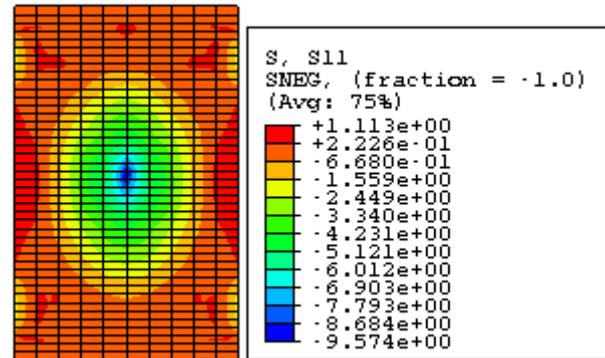


Bild 4-156 Horizontale Spannungen am Ende der FE- Berechnung - Innenseite

Die Beanspruchung der Flansche ist aus den aufgenommenen Dehnungswerten der Stellen 15, 16 und 18 zu folgen, die Ergebnisse sind in Bild 4-157 und Bild 4-158 dargestellt. Die genauere Anordnung der Messstelle ist im Bild 4-85 zu erhalten.

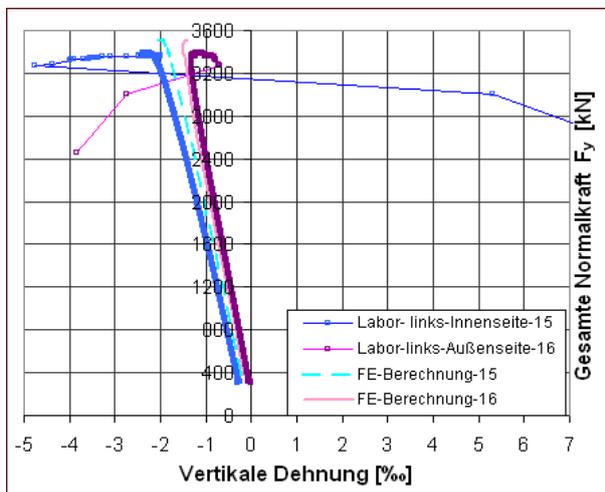


Bild 4-157 Last vs. vertikale Dehnung -linke Flansch

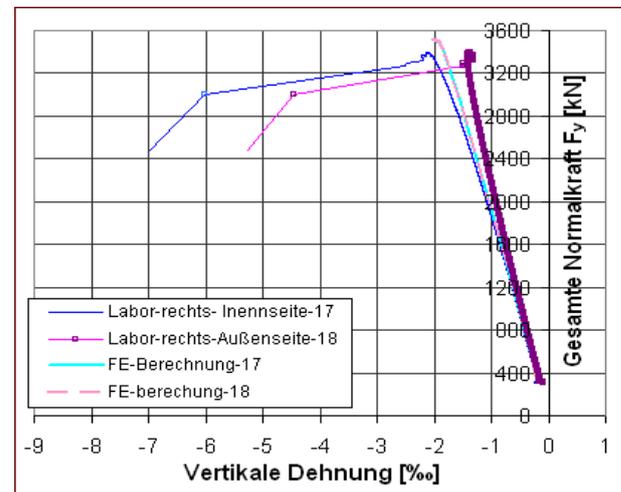


Bild 4-158 Last vs. vertikale Dehnung -rechte Flansch

Gemäß des Kurvenverlaufs wurde der **rechte Flansch** (Bild 4-158) nicht zu hoch belastet. Die Dehnungen in den Innen- (Stelle 17, blaue Kurve) und der Außenseite (Stelle 18, dunkelrosa Kurve) nehmen bis zu einer Last von 3390 kN (Bild 4-145, $u_z = 12,3$ mm) stetig zu. Die Stelle 17 wurde etwas mehr als der Stelle 18 gestaucht. Vor dem Versagen des Versuchskörpers beträgt die vertikale Dehnung in dem Bereich -2,2 ‰ (Bild 4-158, blaue Kurve). Bei der Stelle 18 wurde ab einer Normalkraft von 3378 kN einen Rückgang in dem Kurvenverlauf beobachtet, der Dehnungswert nimmt nach diesem Zeitpunkt nur unwesentlich (Bild 4-158, dunkelrosa Kurve).

Linken Flansch-Außenseite (Bild 4-157-Stelle 16, dunkelrosa Kurve) - Bis zu einer Last von 3373 kN (Bild 4-145, $u_z = 7,48$ mm) nehmen die vertikale Dehnungen in der Stelle 16 progressiv zu. Mit dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte tritt ein Rückgang in der Dehnungsverlauf auf. Vor dem endgültigen Versagen des Versuchskörpers beträgt die maximale Dehnung $-0,69$ %.

Linken Flansch-Innenseite (Bild 4-157-Stelle 15, dunkelblaue Kurve)- Die Stelle 15 wurde mehr als der Stelle 16 gestaucht. Die vertikale Dehnung nehmen bis zu einer Normalkraft von 3387 kN (Bild 4-145, $u_z = 8,8$ mm) stetig zu, der Dehnungswert beträgt zu diesem Zeitpunkt $-2,3$ %. In Vergleich zu den bis jetzt analysierten Stellen weist den Kurvenverlauf der Stelle 15 ab einer Last von 3361 kN (Bild 4-145, $u_z = 12,1$ mm) eine starke Erhöhung des Druckdehnungswertes auf. Dieses Verhalten kündigt die Umlagerung der Normalkraft im Bereich der Einspannstelle (A). Zu einer Normalkraft von 3270 kN (Bild 4-145, $u_z = 12,3$ mm) versagt diese Stelle 15, die Druckdehnung beträgt zu diesem Zeitpunkt $-4,8$ %. Im Versuch die Lokalisierung von ausgeprägten Rissen am linken Rand (Innenseite) zeigt die hohe Beanspruchung dieses Bereiches, die am Schluss zum Bruch des Flansches führte (Bild 4-159).

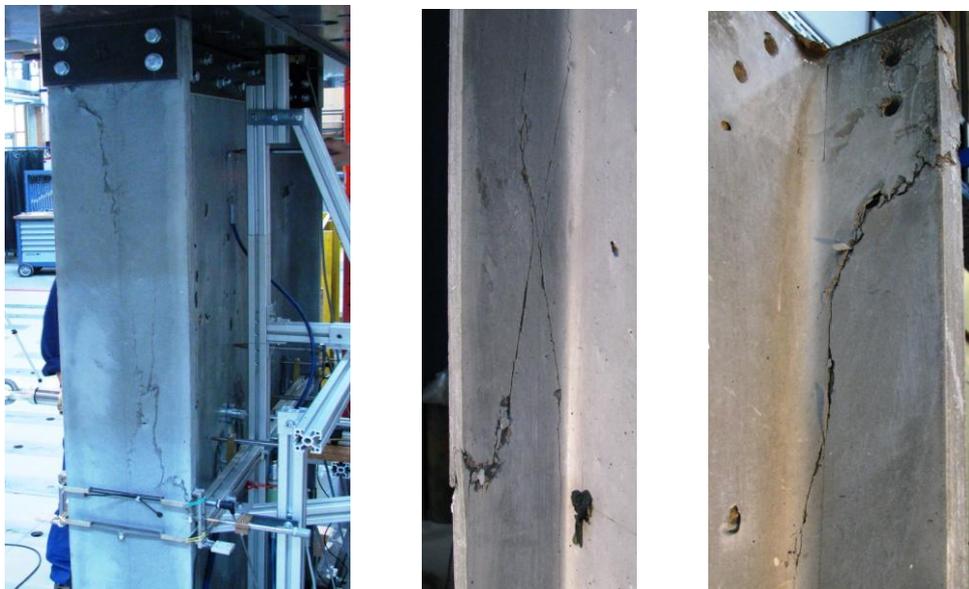


Bild 4-159 Rissausbildungen am Flansch

Biegelinie

Im Unterschied zu den anderen Versuchskörpern wurde in Versuch 100-03 während des Aufbringens der Druckbelastung eine Verschiebung des oberen Randes zur Innenseite der Platte festgestellt (Bild 4-160, grüne Kurve). Dieses Verhalten fällt mit dem Erreichen der Matrixzugfestigkeit an den Einspannstellen zusammen und erreicht ein Maximum von $0,5$ mm. Es wurde auch beobachtet, dass bereits ab 1000 kN der untere Bereich der Platte eine viel größere Beulverformung (u_z) als der obere aufweist (Bild 4-160, gelbe Kurve). Bei zunehmende Belastung nahm dieses Verhalten zu.

Der horizontalen Biegelinie zeigt, dass sich bereits mit der Einleitung der Auslenkungskraft der linke Rand ein wenig zur Außenseite verschoben hat (Bild 4-161, orange Kurve). Bei zunehmender Belastung nehmen diese Verschiebung allmählich zu.

Am Ende des Versuches weist die Verschiebung des linken Randes eindeutig einen großen Wert ($2,5$ mm) als der Rechtenseite ($0,3$ mm) auf. Dieses Verhalten deutet das Versagen des Bereiches (Bild 4-149, linke Seite) an. Gemäß der vertikalen und horizontalen Biegelinie ist die Beulverformung im Labor etwas nach unten und links gerichtet.

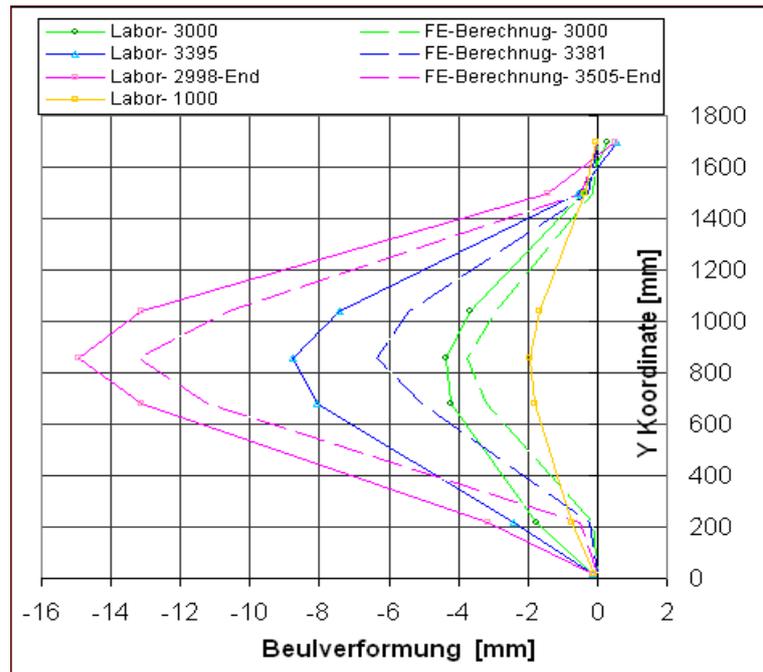


Bild 4-160 Vertikale Biegelinie - 100-03

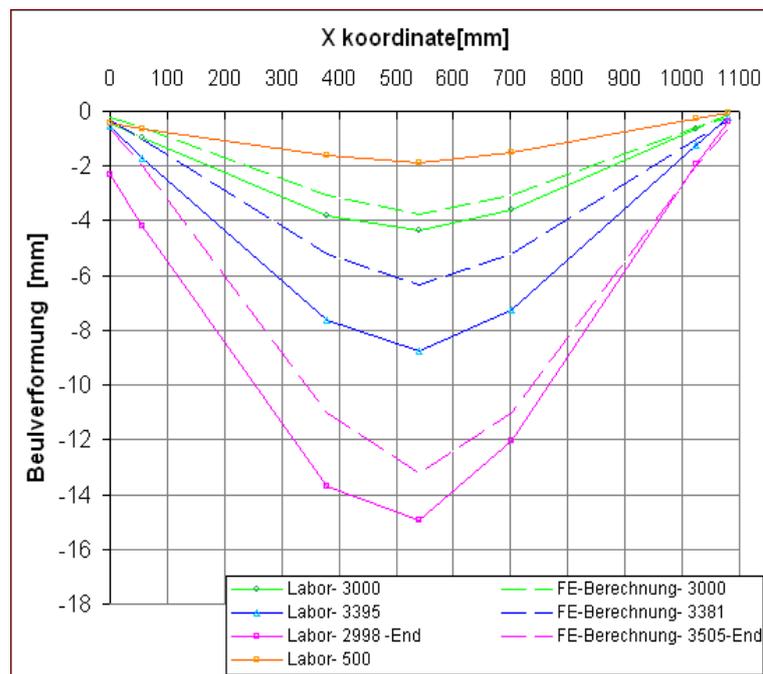


Bild 4-161 Horizontale Biegelinie - 100-03

4.4.4 Durchführung und Auswertung der Versuchsserie 150-00

Die geometrische Analyse der Beulserie 150-00 zeigt besonders im unteren und oberen Bereich des Versuchskörpers beträchtlich große Unterschiede in der Wandstärke der Platte. In der Serie 150-00 wurden zwei Versuchskörper getestet. Der Versuchskörper 150-02 zeigte eine dünnere Wandstärke als der Versuchskörper 150-01. Die genaue Anordnung der Messaufnehmer ist im Bild 4-87 bis Bild 4-92 dargestellt. Die für die numerische Nachrechnung verwendete Arbeitslinie ist für diese Beulserie im Bild 4-162 dargestellt.

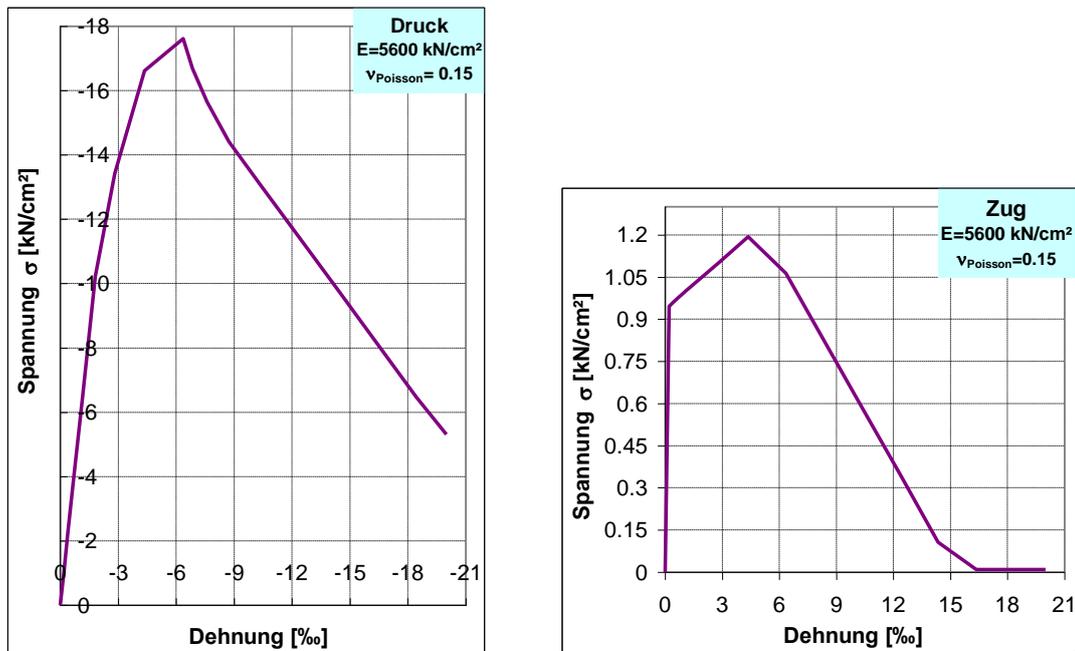


Bild 4-162 Arbeitslinie der Beulserie 150-00

4.4.4.1 Versuch 150-01

In diesem Versuch wurde eine berührungslose Messmethode (Hersteller Firma Dantec) getestet. Zu diesem Zweck musste die Außenseite des Versuchskörpers zum Teil mit Farbe markiert werden (Bild 4-164). Um den Versuch nicht mehrmals wiederholen zu müssen, wurde mit einer großen Auslenkungskraft gestartet (4,8 kN). Die damit erzeugte "Imperfektion" in der Plattenmitte erreichte 1,54 mm. Während des Versuches wurde der Versuchskörper zwei Mal entlastet und wieder belastet. Erstens weil ein Fehler bei der Installation des berührungslosen Messsystems aufgetreten ist, zweitens um möglichen Schaden in der Instrumentierung der berührungslosen Messmethode zu vermeiden. Zu diesem Zweck wurde auch diese Installation vor dem Ende des Versuches abmontiert. Die Laborergebnisse der berührungslosen Messmethode wurde für die Auswertung nicht verwendet.

Die numerische Simulation wurde mit unterschiedlichen Auslenkungskräften ausgeführt, um einen ähnlichen Kurvenverlauf zu erhalten, die den Laborergebnissen möglichst genau entspricht. Die Ergebnissen, die den Laborwerten am meisten ähneln, wurden in einem Last-Verschiebungsdiagramm dargestellt (Bild 4-163). Die Berechnung mit 4 kN Auslenkungskraft (grüne gestrichelte Linie) zeigt gute Übereinstimmung in der Form der Kurve. Der Kurvenverlauf zeigt jedoch eine viel höhere Normalkraft (3700 kN) als die Versuchswerte. Deswegen wurden für die weitere Beulanalyse die Ergebnisse der numerischen Simulation des Versuchskörpers mit 6 kN Auslenkungskraft herangezogen (blaue gestrichelte Linie).

Die Labor- und die numerischen Ergebnisse zeigen bis 3200 kN ein gleiches Verhalten. Im Versuch nehmen nach diesem Zeitpunkt die Beulverformung und die Normalkraft kontinuierlich zu. Die Verschiebung aus der Ebene erreicht am Ende des Versuches 46 mm. Nach einer

Beulverformung von 7 mm tendiert die Kurven zu einem horizontalen Verlauf (rote Kurve). Um einen schlagartigen Bruch im Versuchskörper auszuschließen wurde der Versuch vor einem endgültigen Bruch beendet. Am Ende der numerischen Simulation wurde eine gleiche maximale Normalkraft wie im Labor erreicht, die maximale Beulverformung beträgt nur 27 mm.

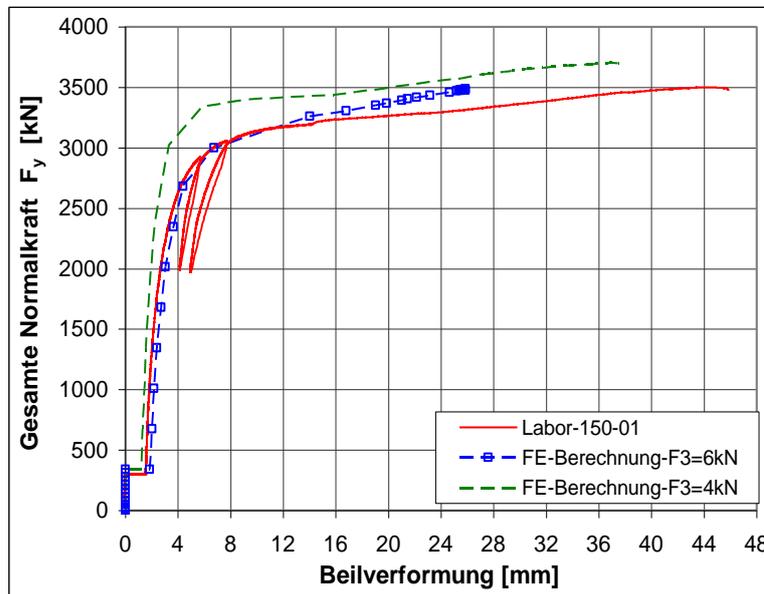


Bild 4-163 Last- Verschiebungsdiagramm - 150-01

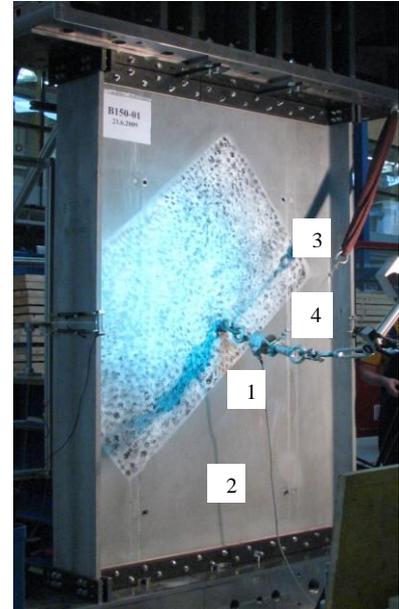


Bild 4-164 Versuchskörper - 150-01

Außenseite

Wegen der großen angemalten Fläche für die berührungslose Methode konnten die Rissbildungen dieser Seite nicht vollständig analysiert werden. Die wenigen Vergleiche zeigen ein passendes Labor und FE-Ergebnis. Im Bild 4-164 ist der Versuchskörper mit markierten Stellen, die für die Analyse der Risse verwendet wurden, dargestellt.



Bild 4-165 Rissausbildung- Stelle 1



Bild 4-166 Rissausbildung- Stelle 2

Gemäß der numerischen Analyse wird zuerst der mittlere Bereich des Versuchskörpers stark beansprucht. Bei einer Last von 3000 kN wurde die Nachrisszugfestigkeit (horizontale Richtung) in der Plattenmitte (B) erreicht. Der Steifigkeitsverlust der Plattenmitte bewirkt nach diesem Zeitpunkt eine progressive Erhöhung der Beulverformung in B.

Bei einer Normalkraft von 3400 kN bilden sich im mittleren Bereich des Versuchskörpers nicht nur hohe Zugdehnungen in horizontaler Richtung (5,5 ‰), sondern auch beträchtlich hohe Zugspannungen in vertikaler Richtung (Bild 4-168). Wegen des zum Teil mit Farbe markierten

Bereiches (Bild 4-164) wurden die Rissbildungen in diesem Bereich nicht ausführlich analysiert.

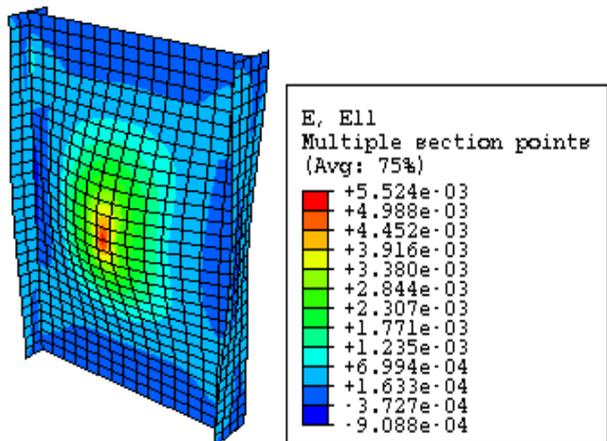


Bild 4-167 Horizontale Dehnungen am Ende der FE- Berechnung–Außenseite

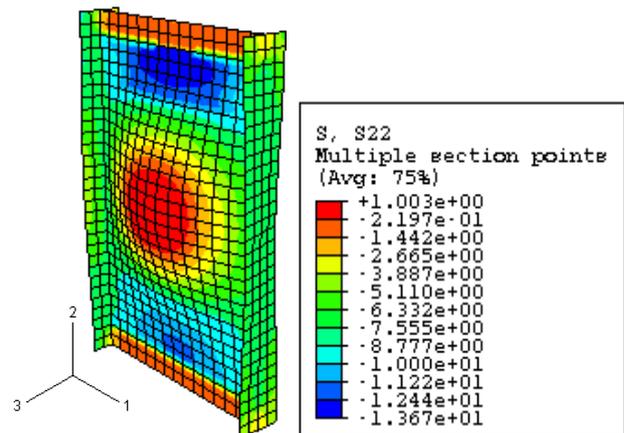


Bild 4-168 Vertikale Spannungen bei einer Last von 3400 kN - Außenseite

Im Versuch wurden zahlreiche Risse insbesondere im unteren Bereich des Versuchskörpers beobachtet. An den Stellen 1 und 2 wurden hauptsächlich feine vertikale Risse gefunden (Bild 4-165 und Bild 4-166). Wegen der Wandstärkeunterschiede und besonders wegen der geringeren erzielten Beulverformung des Bereiches bildeten sich die Risse an der Stelle 2 (Bild 4-166) in geringerer Anzahl als in 1 aus. Am Ende der numerischen Simulation beträgt die Zugdehnung (horizontale Richtung) an der Stelle 1 zwei Promille (Bild 4-167). Horizontale Risse wurden nicht gefunden. An den Stellen 3 und 4 wurden auch vertikale Risse gefunden, aber in deutlich geringerer Anzahl als im unteren Bereich der Platte.

Nach dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte entstanden große horizontale Zugbeanspruchungen an den vertikalen Rändern (A) der Platte (Innenseite). Bei einer Normalkraft von 3411 kN wurde die Nachrisszugfestigkeit (horizontale Richtung) an diesen Stellen erreicht.

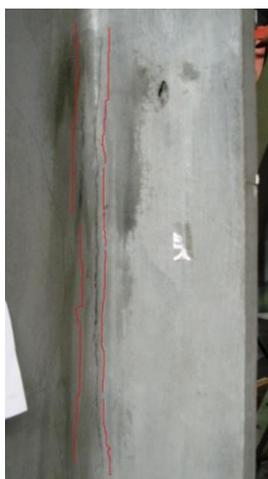


Bild 4-169 Rissausbildung an den vertikalen Ränder – Außenseite

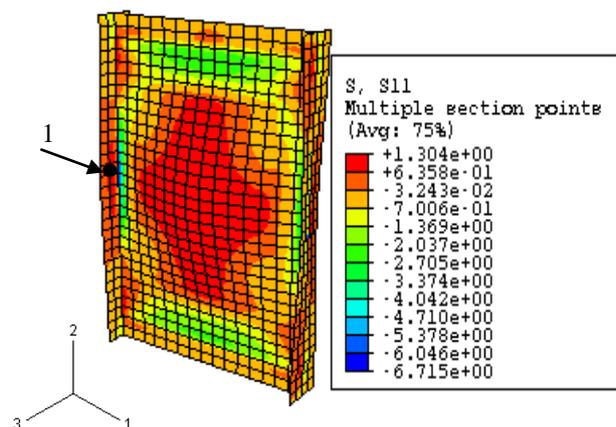


Bild 4-170 Horizontale Spannungen am Ende der FE- Berechnung - Außenseite

Im Versuch wurde an beiden vertikalen Rändern (Anschluss zum Flansch, Außenseite) Risse gefunden (Bild 4-169). Die größere Anzahl von Risse an der rechten Seite erklärt sich durch die unterschiedliche Wandstärke der Platte. Die hohe horizontale Zugbeanspruchung an den Einspannstellen (Innenseite, Bild 4-174) verursachte das Durchreißen des Bereiches. Diese Aussagen bekräftigt sich mit der Bildung von Risse an der Außen-und Innenseite der vertikalen

Ränder. Nach der numerischen Berechnung erreichte die horizontale Zugspannungen (Außenseite) im Bereich der Risse $0,9 \text{ kN/cm}^2$ (Bild 4-170, Stelle 1).

Innenseite

Die Laborwerte der vertikalen Dehnungen in der Plattenmitte (Bild 4-171, Messstelle 24, 30) stimmen, trotz des Unterschieds der erreichten Beulverformung, mit der numerischen Berechnung sehr gut überein. Im Versuch wurde eine maximale Druckdehnung von $-2,3 \text{ ‰}$ erreicht. Am Ende der FE-Berechnung wurde die Druckfestigkeit (18 kN/cm^2) in der Plattenmitte (B) nicht erreicht. Die maximale Druckspannung beträgt 16 kN/cm^2 (Innenseite). Ab einer Beulverformung von 40 mm wurde ein Rückgang des Dehnungswertes des Messaufnehmers 30 beobachtet, was die numerische Simulation noch nicht zeigt.

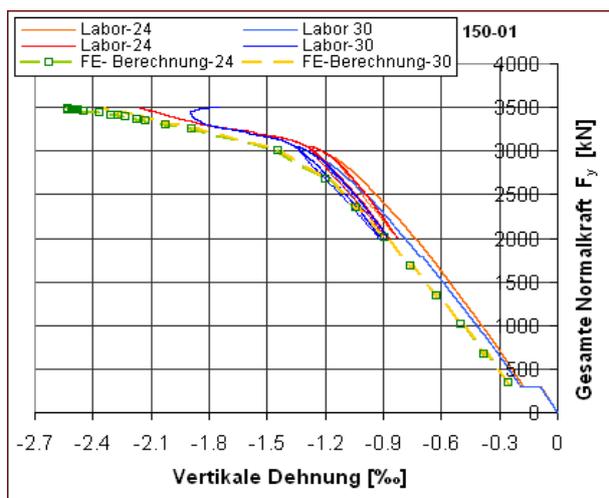


Bild 4-171 Last vs. vertikale Dehnung - Stellen 24 und 30

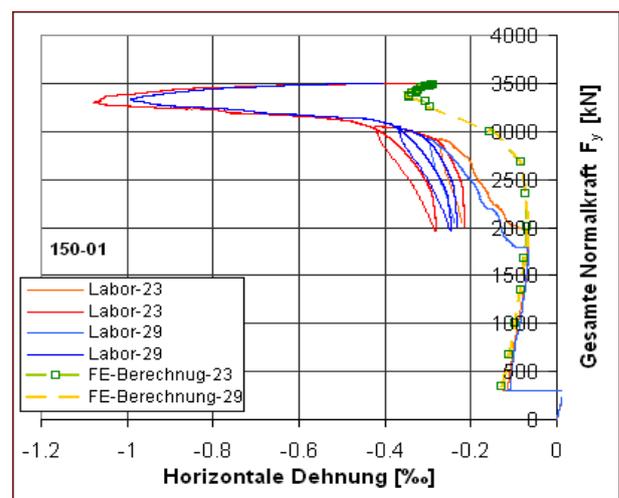


Bild 4-172 Last vs. horizontale Dehnung - Stellen 23 und 29

Die Ergebnisse der horizontalen Dehnungen in der Plattenmitte (Bild 4-172, Messstelle 23, 29) zeigen bis 1800 kN keine Unterschiede zwischen theoretischen und experimentellen Ergebnissen. Ab einer Last von 2000 kN zeigen die Laborergebnisse ein wesentlich weiches Verhalten als die numerische Berechnung. Nach der FE-Simulation wurde bereits zu diesem Zeitpunkt die Matrixfestigkeit in der Plattenmitte (Außenseite) erreicht. Bei einer Normalkraft von 3400 kN wurde sowohl im Versuch als auch bei der numerischen Berechnung ein Rückgang der Druckdehnungswerte beobachtet. Dieses Verhalten fällt mit dem Erreichen der Nachrisszugfestigkeit (horizontale Richtung) an den Einspannstellen zusammen. Zum gleichen Zeitpunkt bilden sich auch die ersten horizontalen Risse in der Plattenmitte (Außenseite). Dieses Verhalten zeigt den zunehmenden Einfluss den Membranzugspannungen. Rissbildungen im mittleren Bereich der Platte (Innenseite) wurden nicht gefunden.

Nach dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitteln (Außenseite) wurden die Anschlüsse zu den Flanschen (Messstellen 33, 34) die am stärksten beanspruchten Bereiche des Versuchskörpers. Laut der numerischen Simulation bilden sich große Zugspannungen (horizontale Richtung) an den Einspannstellen (A). Die Nachrisszugfestigkeit wurde bei einer Last von 3411 kN an diesen Stellen erreicht. Am Ende der FE-Berechnung betragen die Dehnungswerte an den vertikalen Ränder $3,6 \text{ ‰}$ (Bild 4-176). Im Versuch wurden an beiden Einspannstellen beträchtlich große Risse gefunden (Bild 4-174).

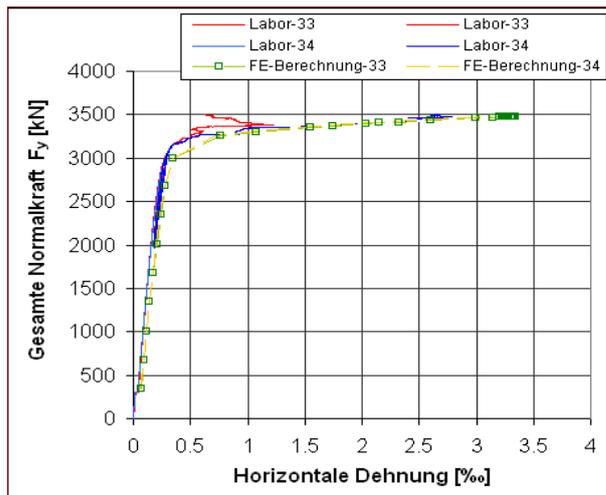


Bild 4-173 Last vs. horizontale Dehnung – Stellen 33 und 34



Bild 4-174 Rissausbildung - Stelle 33 und 34

Der Vergleich der Ergebnisse, dargestellt in einem Last-Dehnungsdiagramm (Bild 4-173, Messstelle 33, 34), zeigt bis zu einer Normalkraft von 3000 kN eine ziemlich gute Übereinstimmung. Zu diesem Zeitpunkt wurden die Nachrisszugfestigkeit (horizontale Richtung) in der Plattenmitte (Außenseite) und zugleich die Matrixfestigkeit an den Einspannstellen erreicht. Die Dehnungen weisen in dieser ersten Phase nur geringe Werte auf. Mit dem stetigen Anstieg der Beulverformung und der zunehmenden Umlagerung der Belastung in A nehmen die Dehnungen, besonderes im Bereich der Messstelle 34, bis zum Ende des Versuches allmählich zu. Im Versuch wurde eine maximale Zugdehnung 2,8 % gemessen. Die Kurvenverläufe verhalten sich analog zum Beulverformungs- Diagramm.

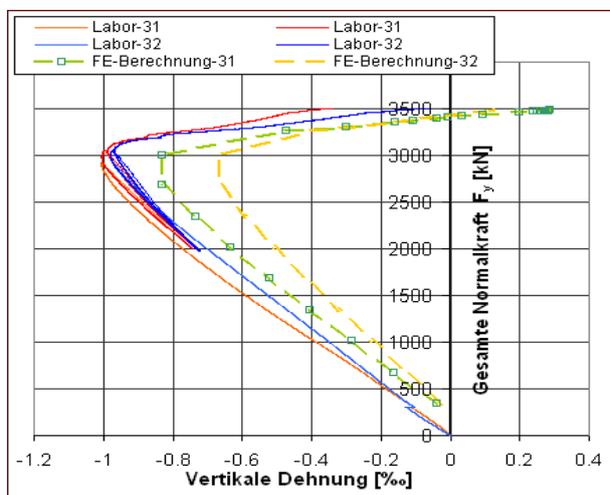


Bild 4-175 Last vs. vertikale Dehnung – Stellen 31 und 32

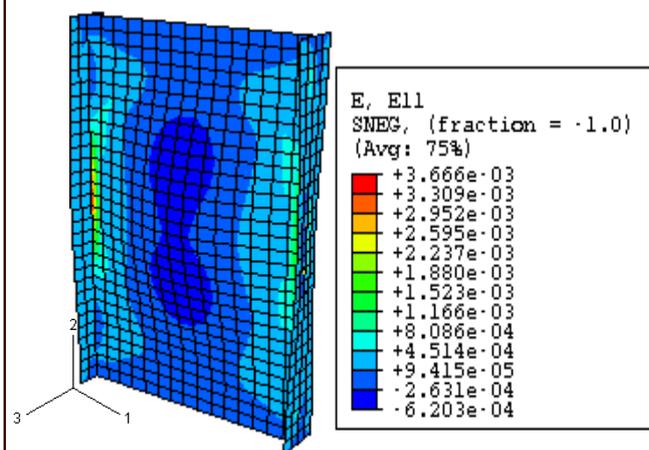


Bild 4-176 Horizontale Dehnungen am Ende der FE- Berechnung - Innenseite

Die Laborergebnisse der vertikalen Dehnungen im oberen und unteren Bereich des Versuchskörpers sind im Bild 4-175 (Messstelle 31 und 32) dargestellt. Diese Ergebnisse zeigen an beiden Stellen ein annähernd gleiches Verhalten. Die Dehnungen nehmen sowohl im Labor als auch bei der FE-Berechnung stetig zu, bis die Nachrisszugfestigkeit in der Plattenmitte (Außenseite) bei einer Last von ca. 3000 kN erreicht wird. Nach diesem Zeitpunkt tritt ein Rückgang der vertikalen Dehnungen ein und erklärt sich durch die starke Erhöhung der Beulverformung. Dieses Verhalten fällt mit dem Erreichen der Matrixfestigkeit an den Einspannstellen zusammen. Die Dehnungswerte nehmen nach diesem Zeitpunkt bis zum Ende der Berechnung stetig ab. Wegen der unter-

schiedlichen erzielten Beulverformung weisen die vertikalen Dehnungen am Ende der FE-Berechnung sogar einen Zugdehnungswert auf (grüne Linie).

Biegelinie

Im Versuch zeigt die **vertikale Biegelinie** in der ersten Phase bis zu einer Last von 3200 kN eine deutlich größere Beulverformung im unteren Bereich der Platte (Bild 4-177, hellblaue Kurve). Dieses Verhalten bewirkt ab einer Last von 1000 kN eine Verschiebung (geringe) des oberen Randes des Versuchskörpers zur Innenseite, die aber mit zunehmender Belastung abnimmt (Bild 4-177, grüne Kurve). Mit dem Erreichen der Zugfestigkeit in der Plattenmitte (vertikaler Richtung) bei einer Last von 3400 kN (im Labor 3300 kN) richtet sich die Beulverformung nach oben und nimmt mit steigender Belastung allmählich zu. Am Ende des Versuchs ist die Beulverformung deutlich nach oben gerichtet.

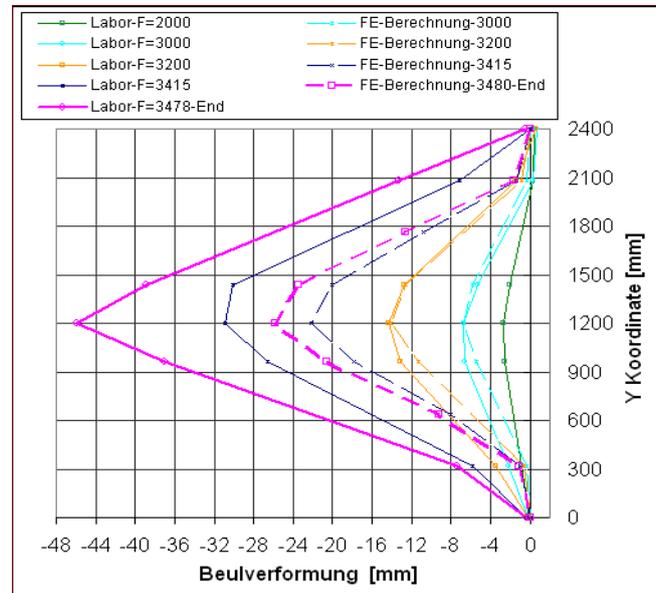


Bild 4-177 Vertikale Biegelinie – 150-01

Bei der **horizontalen Biegelinie** zeigen die Ergebnisse einen symmetrischen Verlauf. Erst am Ende der Berechnung wurde eine etwas größere Verschiebung des rechten Randes der Platte zur Außenseite beobachtet (Bild 4-178, rosa Kurve).

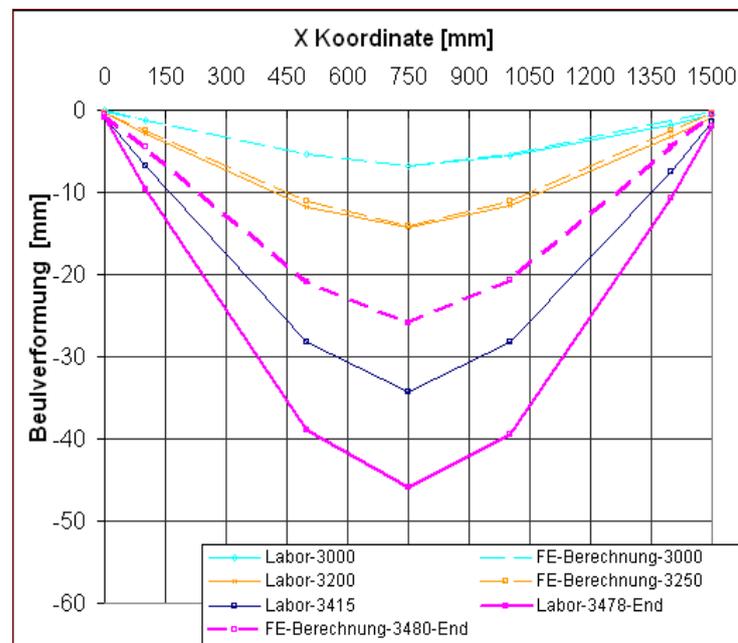


Bild 4-178 Horizontale Biegelinie – 150-01

4.4.4.2 Versuch 150-02

Der Versuch wurde mit einer kleineren Auslenkungskraft (4,17 kN) als der Versuchskörper 150-01 durchgeführt. Die damit erzeugte "Imperfektion" in der Plattenmitte erreichte 1,22 mm. Wegen des zufriedenstellenden Verhaltens der Verschiebung aus der Ebene (u_z), wurde der Versuch nur ein Mal gestartet. Das Ergebnis der experimentellen Untersuchung, dargestellt in einem Last-Verschiebungsdiagramm, zeigt ein ähnliches Verhalten wie die numerische Simulation.

Die Laborwerte weisen nach Erreichen der maximalen Last von 3600 kN ($u_z = 4$ mm) einen fallenden Kurvenverlauf auf. Die Verschiebung aus der Ebene nimmt ab diesem Zeitpunkt progressiv zu. Die Normalkraft fällt nach Erreichen der maximalen Normalkraft auf 3396 kN ab. Anschließend verhält sich die Last ziemlich konstant. Kurz vor dem Ende des Versuches wurde erneut eine kleine Erhöhung der Normalkraft festgestellt (bis 3400 kN). Um Schaden in der Instrumentierung auszuschließen und um die Rissausbildung analysieren zu können, wurde der Versuch vor dem Bruch beendet.

Ein ähnliches Verhalten wurde bei der numerischen Simulation festgestellt, allerdings weisen die Ergebnisse am Ende der Berechnung eine eindeutig höhere Last als im Versuch auf. Die maximale Normalkraft erreichte 3612 kN, die Beulverformung betrug zu diesem Zeitpunkt 31,5 mm.

Der Vergleich der Ergebnisse wurde in Bild 4-179 dargestellt. In Bild 4-180 wurde der Versuchskörper 150-02 mit markierten Stellen, die für die Analyse der Rissausbildungen verwendet wurden, dargestellt.

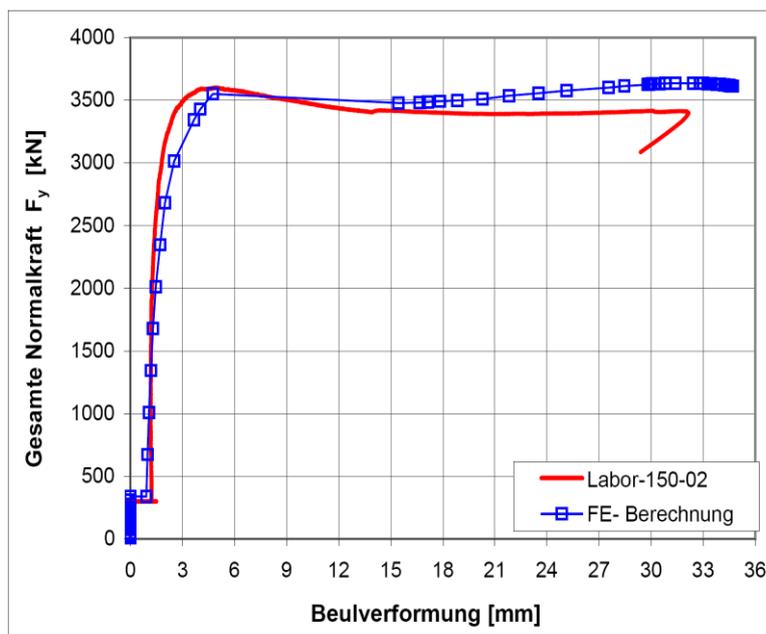


Bild 4-179 Last- Verschiebungsdiagramm

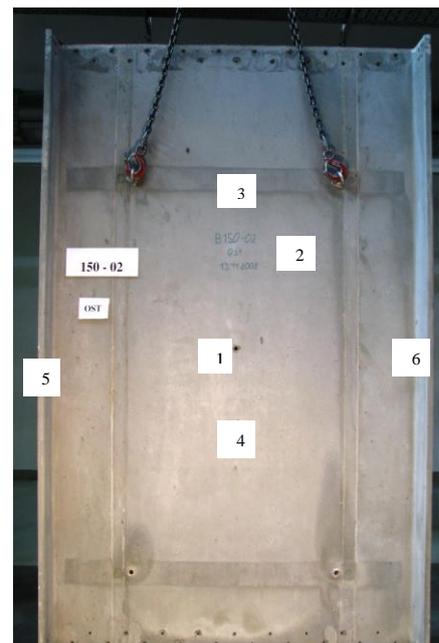


Bild 4-180 Versuchskörper 150-02

Außenseite

Die Laborergebnisse, dargestellt in dem Last-Verschiebungsdiagramm, zeigen bis zum Erreichen der maximalen Last von 3597 kN einen kontinuierlichen Anstieg der Normalkraft (blaue Kurve). In dieser ersten Phase erreicht die Platte nur eine kleine Beulverformung. Wegen der zunehmenden Rissbildung in B und dem daraus resultierenden Steifigkeitsverlust der Plattenmitte tritt nach diesem Zeitpunkt ein Ausfall der Normalkraft auf, das bewirkt eine schnellere Erhöhung der Beulverformung in B (von 5 mm zu 15 mm). Dieses Verhalten fällt mit dem Erreichen der Matrixfestigkeit an der vertikalen Rändern (Innenseite) zusammen. Nach der numerischen Simulation findet ab diesem Zeitpunkt wieder eine Erhöhung der Last statt. Im Labor nehmen die Normalkraftwerte nur wenig zu.

Bereits bei einer Last von 3555 kN ($u_z=24$ mm) weisen die numerischen Ergebnisse im mittleren Bereich der Platte nicht nur hohe Zugspannungswerte in horizontaler (Bild 4-182), sondern auch in vertikaler Richtung auf. Im Versuch wurden im Bereich der Plattenmitte zahlreiche vertikale Risse beobachtet (Bild 4-181, Stelle 1). Der horizontale Zugdehnungswert in diesem Bereich beträgt am Ende der Berechnung ca. 5‰. Feine horizontale Risse wurden nur in geringer Anzahl in der Plattenmitte gefunden. Die vertikale Dehnungen in diesem Bereich beträgt am Ende der FE-Berechnung 3‰ (Bild 4-184).



Bild 4-181 Rissbildung in der Stelle 1

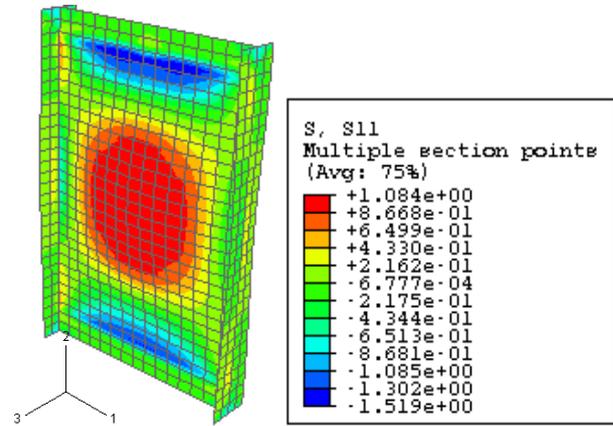


Bild 4-182 Horizontale Spannungen bei einer Last von 3550 kN- Außenseite

Nach dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte wurde als nächstes eine hohe Konzentration von horizontalen Zugbeanspruchungen an den Einspannstellen festgestellt (Bild 4-180, Stelle 5 und 6). Bei einer Last von 3498 kN ($u_z=19$ mm) wurde die Nachrisszugfestigkeit an den vertikalen Rändern erreicht (Innenseite). Entsprechend der FE-Berechnung beträgt bereits bei einer Last von 3613 kN ($u_z=28$ mm) die horizontale Dehnung in diesem Bereich 7‰ (Bild 4-192, Innenseite).



Bild 4-183 Rissbildung an den Stellen 5 und 6

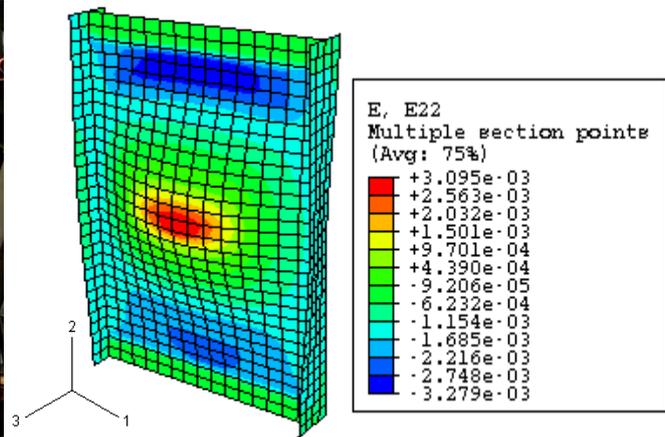


Bild 4-184 Vertikale Dehnungen am Ende der FE- Berechnung - Außenseite

Wegen der hohen Konzentration von Zugspannungen an den vertikalen Rändern (Innenseite) wurden im Versuch Risse an beiden Seiten der Einspannstellen beobachtet (Innenseite und Außenseite), dieses Verhalten signalisiert das Durchreißen des Bereiches. Im Vergleich zur linken Seite wurden an der rechten Seite (Außenseite) stärker ausgeprägte Risse beobachtet (Bild 4-183). Das ergibt sich wegen der unterschiedlichen Wandstärke der Platte.

Nach Erreichen der Nachrisszugfestigkeit ($F=3550$ kN) in der Plattenmitte (horizontale Richtung) orientierte sich die Beulverformung der Platte nach oben. Am Ende des Versuches wurde in dem

Bereich eine beträchtlich größere Beulverformung festgestellt. Das erklärt zusammen mit der dünneren Wandstärke (oberer Bereich) die größere Anzahl an Rissen verglichen mit dem unteren Teil der Platte. Es wurden insbesondere an der Stelle 2 (Bild 4-180, Stelle 2) zahlreiche vertikale Risse beobachtet (Bild 4-185). Horizontale Risse wurden nicht gefunden. Gemäß der numerischen Berechnung erreichte die Zugspannung (horizontale Richtung) an der Stelle zwei 1 kN/cm^2 . Weiter ausgeprägte vertikale Risse wurden auch an der Stelle 3 (Bild 4-180, Stelle 3) gesehen, diese sind im Bild 4-185 dargestellt.

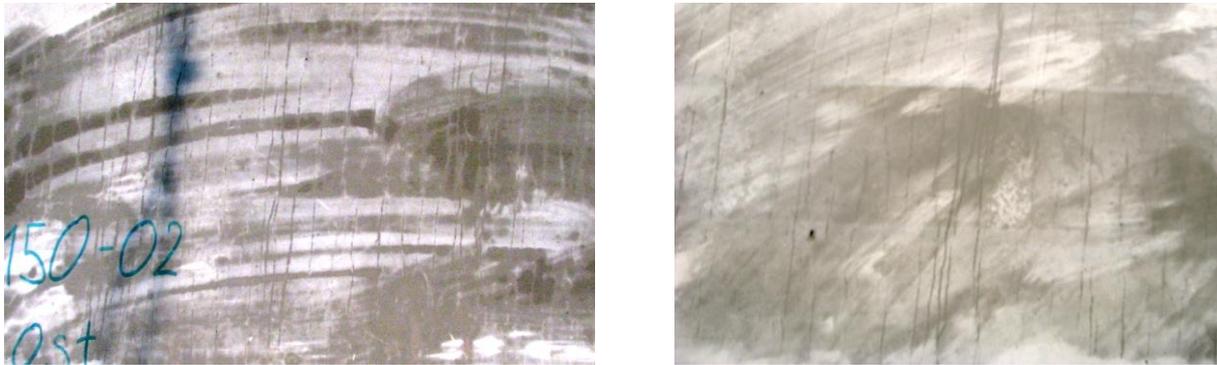


Bild 4-185 Rissbildung an der Stelle 2 (Links) und an der Stelle 3 (Rechts)

Im unteren Bereich der Platte (Bild 4-180, Stelle 4) wurden hauptsächlich vertikale Risse beobachtet. (Bild 4-186). Nach den numerischen Ergebnissen beträgt die Zugdehnung (horizontale Richtung) in diesem Bereich $2,5 \%$. Horizontale Risse wurden nicht gefunden. Unter der Stelle 4 wurden keine Rissbildungen beobachtet. Die FE-Simulation weist im unteren Bereich der Platte eine maximale Druckspannung (vertikale Richtung) von 13 kN/cm^2 auf.



Bild 4-186 Rissbildung im Bereich 4

Innenseite

Die Labor und FE-Ergebnisse der vertikalen Dehnungen in der Plattenmitte (Bild 4-187, Messstelle 24, 30) stimmen bis circa 3594 kN ziemlich gut überein. Nach diesem Zeitpunkt mit dem Erreichen der Nachrisszugfestigkeit (horizontale Richtung- Außenseite) in der Plattenmitte nehmen die Dehnungswerte im Versuch verglichen zu der numerischen Berechnung weniger stark zu. Ab einer Beulverformung von $29\text{-}30 \text{ mm}$ tritt ein Rückgang des Dehnungswertes auf, obwohl zu diesem Zeitpunkt eine kleine Erhöhung der Normalkraft stattfindet.

Am Ende des Versuches zeigten die Ergebnisse, trotz der großen erzielten Beulverformung, viel niedrigere Dehnungswerte als bei der numerischen Berechnung. Ein Grund dafür ist die große Steigerung der Normalkraft am Ende der numerischen Simulation. Die Druckspannung in der Plattenmitte erreicht am Ende der FE-Berechnung $15,9 \text{ kN/cm}^2$. Risse wurden im Bereich der Plattenmitte nicht gefunden.

Nach der numerischen Simulation weisen die horizontalen Dehnungen in der Plattenmitte (Messstelle 23 und 29) in ihrer ersten Phase ein leichtes Zugverhalten auf. Kurz vor 3500 kN geht der Verlauf auf Druck über. Nach diesem Zeitpunkt mit dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte (Außenseite) nehmen die Dehnungen sehr schnell zu (von $-0,05\%$ bis $-0,45 \%$). Dieses Verhalten fällt mit der Bildung der erste Risse an den Einspannstellen zusammen. Bei einer Normalkraft von 3535 kN fand gleich wie bei dem Versuch 150-01 ein Rückgang in den Dehnungswerten statt. Die

Beulverformung beträgt zu diesem Zeitpunkt 22 mm. Ein ähnliches Verhalten weisen die Laborergebnisse auf, trotz der unterschiedlichen Dehnungswerte stellt sich bei beiden Messstellen bei einer Last von 3390 kN ein Rückgang der Druckdehnung ein ($u_z=21,2$ mm). Dieses Verhalten fällt mit dem Erreichen der Matrixfestigkeit in der Plattenmitte (in vertikaler Richtung) zusammen und zeigt den zunehmenden Einfluss der Membranzugspannungen. Da die erneute Erhöhung der Normalkraft gegen Ende des Versuches niedriger als bei der FE- Simulation ausfiel, erreichten die horizontalen Dehnungen am Ende des Versuches nur -0,65%. Es wurden keine Risse im mittleren Bereich des Versuchskörpers beobachtet.

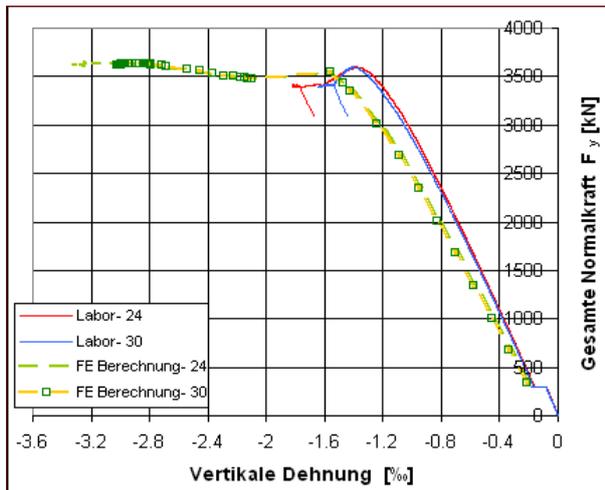


Bild 4-187 Last vs. vertikale Dehnung - Stellen 24 und 30

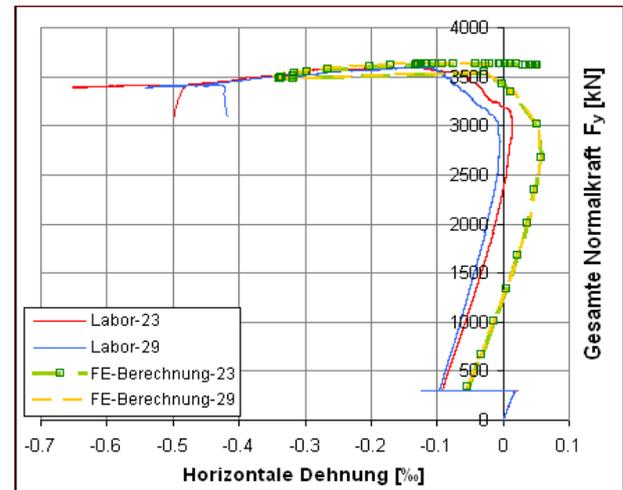


Bild 4-188 Last vs. horizontale Dehnung - Stellen 23 und 29

Nach dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte (Außenseite) nimmt die Zugbeanspruchung an den Rändern der Platte (Innenseite) zu. Im Vergleich zu den bis jetzt analysierten Versuchen bildeten sich wegen der hohen Zugspannungskonzentration an den Einspannstellen ausgeprägte Risse an beiden vertikalen Rändern der Platte (Bild 4-190).

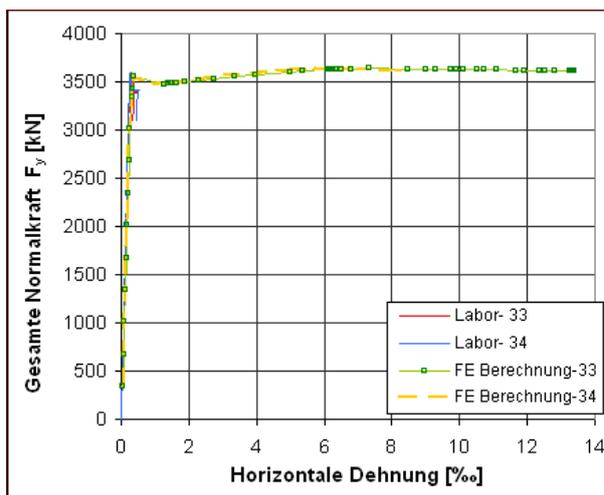


Bild 4-189 Last vs. horizontale Dehnung - Stellen 33 und 34



Bild 4-190 Rissbildungen an den linken und rechten Rand

Aufgrund der unterschiedlichen Wandstärke weisen die FE- Ergebnisse vor allem an der Stelle 33 (Bild 4-189, grüne Linie, Innenseite) sehr große Zugdehnungswerte auf.

Nach dem Last-Dehnungsverlauf (Bild 4-189, Stelle 33, 34) nimmt die Normalkraft sowohl im Versuch als auch bei der FE-Simulation kontinuierlich zu, bis die Zugfestigkeit (horizontale Rich-

tung, 3550 kN) an den Rändern erreicht wird, bis dahin weisen die Kurvenverläufe ein gleiches Verhalten auf. Nach diesem Zeitpunkt ist nur bei der FE-Simulation eine Dehnungszuwachs zu erkennen. Bei dem Versuchsergebnis nehmen die Dehnungen nach einer Last von 3577 kN nicht mehr zu, weil die Rissbildungen etwas entfernt von den Messaufnehmern auftraten und deshalb von diesem nicht erfasst wurden. Im Bild 4-190 wurden die Rissbildung (blau Linie) und die Messstelle an der linken und rechten Seite der Platte abgebildet.

Die vertikalen Dehnungsverläufe im oberen und unteren Bereich des Versuchskörpers (Messstelle 31 und 32) wurden in Bild 4-191 dargestellt. Bis die Normalkraft im Labor den maximalen Wert von 3600 kN erreicht, stimmen die theoretischen und die experimentellen Ergebnisse vor allem an der Stelle 31 sehr gut (blaue Linie) überein. Der obere Bereich weist wegen des Unterschieds in der Wandstärke größere Stauchung auf (Bild 4-191, rote Linie) als der untere Bereich der Platte. Mit dem Erreichen der Nachrisszugfestigkeit (horizontale Richtung) in der Plattenmitte (Außenseite) zeigt sich sowohl im Labor als auch bei der FE-Berechnung ein Rückgang der Dehnungswerte. Zum gleichen Zeitpunkt wurde die Zugfestigkeit (horizontale Richtung) an den Einspannstellen erreicht. Wegen der beträchtlichen Erhöhung der Last am Ende der numerischen Berechnung erreichen die Zugdehnungen einen höheren Wert als im Versuch. Der obere Bereich der Platte wurde mehr auf Zug beansprucht (1.1%). Ein Übergang von Druck auf Zug tritt bei einer Last von 3504 kN ($u_z=20$ mm) ein und fällt mit dem Erreichen der Nachrisszugfestigkeit an den Einspannstellen zusammen.

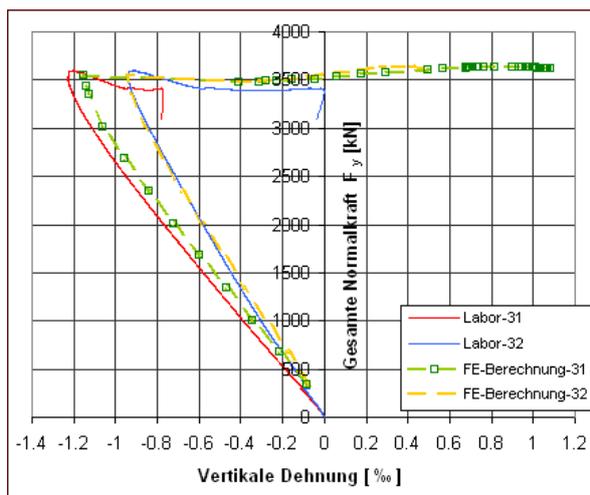


Bild 4-191 Last vs. vertikale Dehnung - Stellen 31 und 32

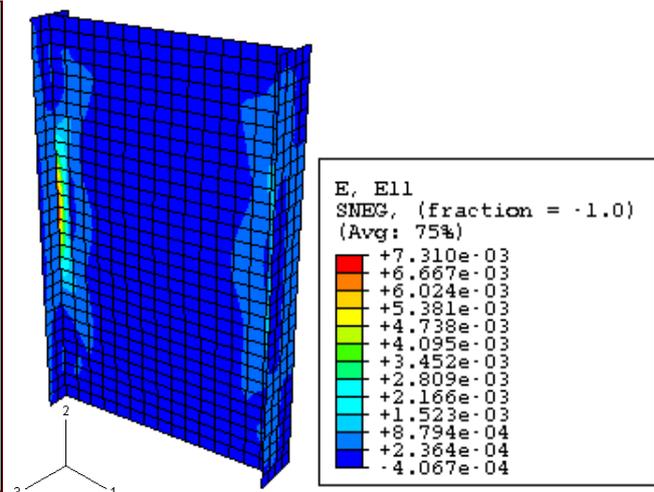


Bild 4-192 Horizontale Dehnungen bei einer Last von 3613 kN- Innenseite

Biegelinie

Bis die Normalkraft im Labor ein Maximum von 3590 kN und in der FE-Berechnung 3550 kN erreicht, zeigen die vertikalen Biegelinien (Bild 4-193) im oberen und unteren Bereich der Platte ein beinahe gleiches Verhalten. Mit dem Erreichen der Nachrisszugfestigkeit (horizontale Richtung) in der Plattenmitte richtet sich besonders im Versuch die Beulverformung eindeutig nach oben.

Diese Beulverformung nimmt bis zum Ende des Versuches stetig zu und bewirkt ab einer Beulverformung von 29 mm eine kleine Verschiebung des oberen Randes des Versuchskörpers zur Außenseite (Bild 4-193, blaue Linie).

Das Besondere an diesem Versuch war, dass die größte Beulverformung nicht in der Mitte des Versuchskörpers auftrat, wie es bei den anderen Versuchsserien der Fall war, sondern bei der Messstelle 5, welche circa 20 cm über der Mitte liegt (Beulfigur nach oben gerichtet).

Bei der horizontalen Biegelinie verhalten sich beide vertikalen Ränder in der ersten Phase des Versuches ziemlich symmetrisch, erst am Ende des Versuches zeigt sich an der rechten Seite der Platte eine eindeutig größere Verschiebung zur Außenseite. (Bild 4-194).

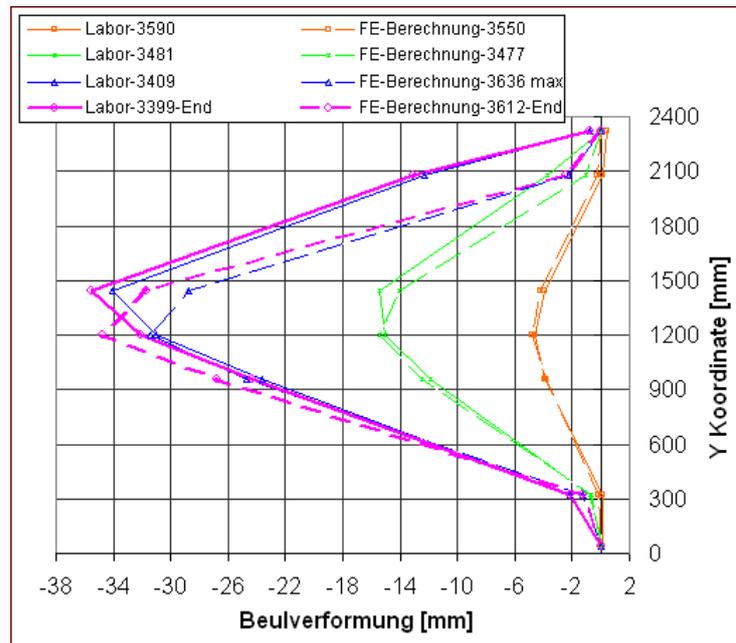


Bild 4-193 Vertikale Biegelinie – 150-02

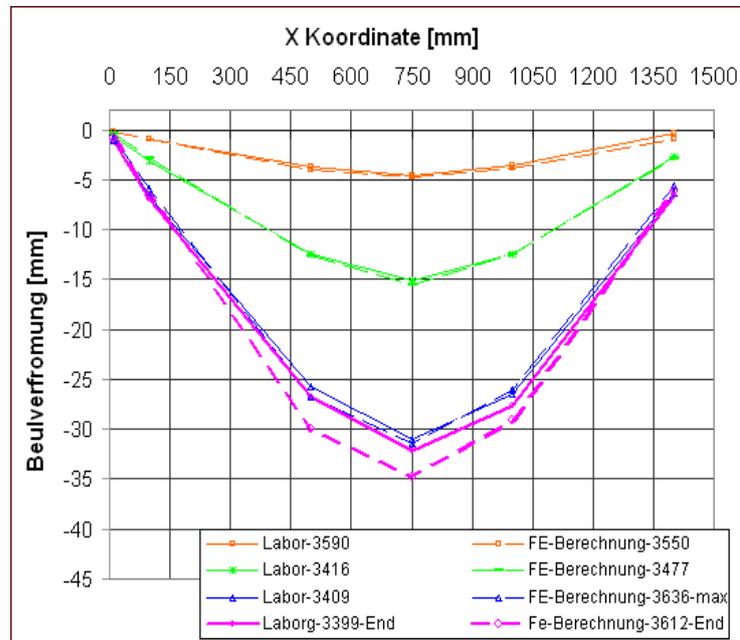


Bild 4-194 Horizontale Biegelinie – 150-02

4.4.5 Durchführung und Auswertung der Versuchsserie 200-00

Aufgrund der größeren Abmessungen und des schwierigen Herstellungsprozesses wurde bei der geometrischen Analyse der Beulserie 200-00 große Dickentoleranz festgestellt. Als Folge des Betonierdrucks und der Nachgiebigkeit der Schalung variierten die gemessenen Wandstärken der Platte sehr stark. Es wurde besonderes im unteren Bereich des Versuchskörpers eine größere Plattendicke als im restlichen Teil festgestellt. In Vergleich zu den Versuchskörpern 200-01 und 200-02 wurde bei dem Versuchskörper 200-03 generell eine dünnere Wandstärke der Platte festgestellt. In der Serie 200-00 wurden drei Versuchskörper getestet. Die genaue Anordnung der Messaufnehmer ist für diese Serie im Bild 4-93 bis Bild 4-96 gezeigt. Die verwendete Arbeitslinie für die numerische Nachrechnung dieser Beulserie ist in Bild 4-195 dargestellt.

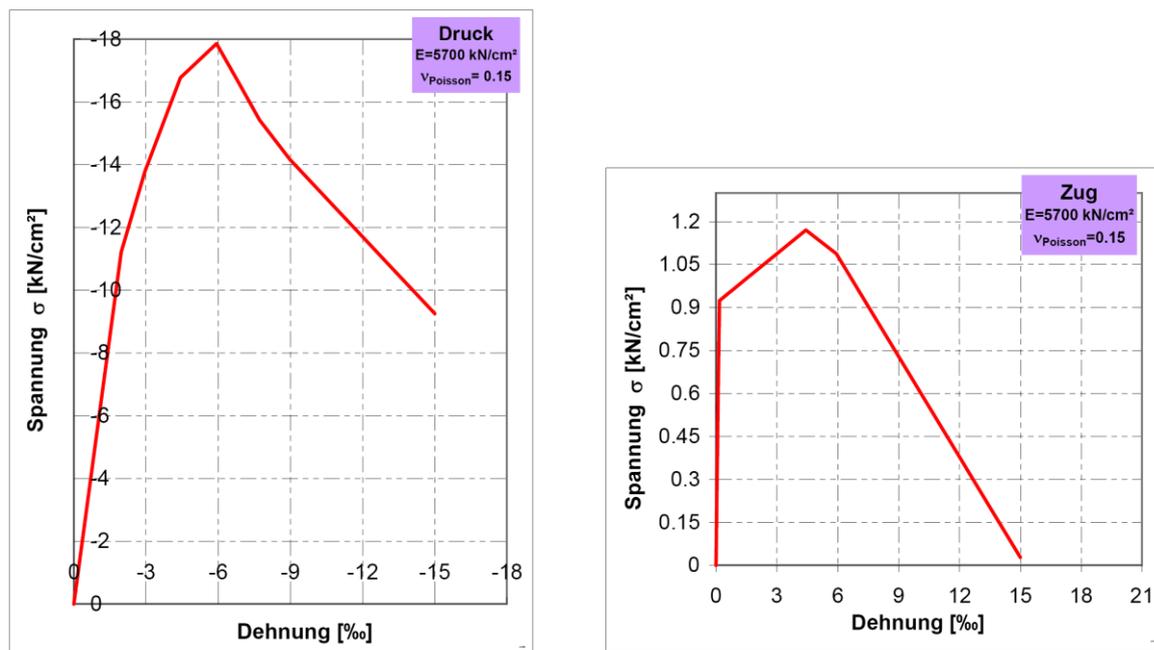


Bild 4-195 Arbeitslinie für Beulserie 200-00

4.4.5.1 Versuch 200-01

Der Versuch wurde mehrmals gestartet bis eine Auslenkungskraft von 5,8 kN die gewünschte Vorauslenkung des Versuchskörpers verursachte. Die damit erzeugte "Imperfektion" in der Mitte des Versuchskörpers erreichte 2,09 mm. Der Vergleich der theoretischen und experimentellen Ergebnisse wurde in einem Last-Verschiebungsdiagramm im Bild 4-196 dargestellt.

Bei einer Beulverformung von 20 mm wurde im Versuch die maximale Normalkraft erreicht (3600 kN). Nach diesem Zeitpunkt und bis zum Ende des Versuches verhält sich die Last ziemlich konstant. Aus Sicherheitsgründen und um einen schlagartigen Bruch auszuschließen, wurde der Versuch vor dem endgültigen Bruch beendet. Die Verschiebung aus der Ebene beim Abbruch des Versuches beträgt 30 mm.

Die Labor- und die numerischen Ergebnisse weisen bis zu einer Beulverformung von 21 mm ein gleiches Verhalten auf. Bei der numerischen Simulation tritt nach diesem Zeitpunkt eine signifikante Erhöhung der Last auf. Die Verschiebung aus der Ebene (u_z) erreicht am Ende der numerischen Berechnung 50 mm und die maximale Normalkraft 4475 kN.

Im Bild 4-197 wurde der Versuchskörper mit markierten Stellen, die während der Analyse des Tragverhalten berücksichtigt werden, dargestellt.

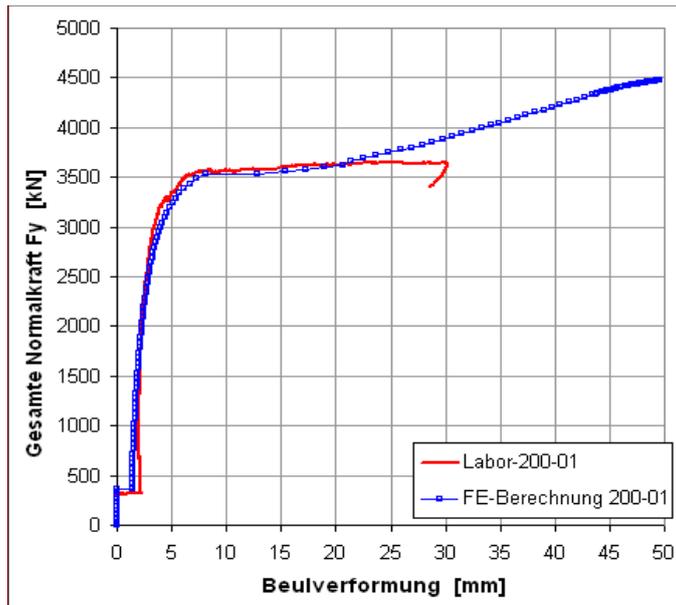


Bild 4-196 Last- Verschiebungsdiagramm

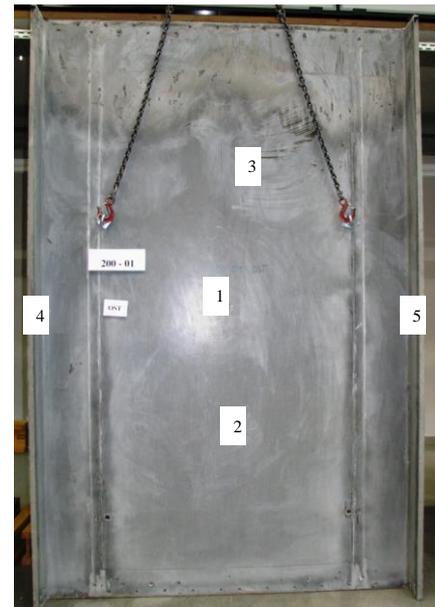


Bild 4-197 Versuchskörper 200-01

Außenseite

Nach dem Last-Verschiebungsdiagramm (Bild 4-196) nimmt bis zum Erreichen der Nachrisszugfestigkeit (horizontale Richtung) in der Plattenmitte (3529 kN) die Normalkraft stark zu, die Beulverformung dagegen erreicht nur 8 mm. Der Steifigkeitsverlust der Plattenmitte führte eindeutig zu einer starken Erhöhung der Beulverformung (von 8 bis 13 mm). Anders als Versuch 150-02 fällt die Normalkraft nach diesem Zeitpunkt nicht ab. Zu einer Last von 3555 kN wurde die Matrixfestigkeit an den Einspannstellen erreicht, ab diesem Zeitpunkt nimmt die Normalkraft erneut zu. Im Versuchskörper wurden an der Stelle 1 hauptsächlich vertikale Risse gefunden (Bild 4-198).

Die numerische Berechnung weist ab einer Last von 3626 kN ($u_z = 22$ mm) (Bild 4-196, blaue Linie) eine große Erhöhung der Normalkraft auf. Zum gleichen Zeitpunkt wurde im mittleren Bereich der Platte die Zugfestigkeit in vertikaler Richtung erreicht. Am Ende der FE-Berechnung beträgt die Dehnung in der Plattenmitte 4,5 % in vertikaler Richtung und 4,8 % in horizontaler Richtung (Bild 4-203).



Bild 4-198 Rissbildung in der Scheibemitte (links, Mitte)



Bild 4-199 Rissbildung- Stelle 4



Gemäß der numerischen Analyse und im Unterschied zu den kleinen Beulserien bilden sich im oberen und unteren Bereich der vertikalen Ränder der Platte (Bild 4-202-Stelle **m**, **n**) hohe Zug-

spannungen (horizontale Richtung). Bei einer Last von 3580 kN wurde die Matrixfestigkeit in “m” erreicht. Die Beulverformung betrug zu diesem Zeitpunkt 17 mm. Im Versuch wurden keine Risse in dem Bereich gefunden.

Nach dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte wurden die Einspannstellen stärker belastet und gleich wie bei der Serie 150-00 verursachte die hohe Zugspannungskonzentration (horizontale Richtung) an den vertikalen Rändern (Innenseite) das Durchreißen des Bereiches. Im Versuch bestätigt die Entstehung von Rissen an beiden Seiten der linken Rand (Außenseite und Innenseite) dies. (Bild 4-199- Stelle 4). Im Bereich der Stelle 5 wurden keine Risse gefunden. Das erklärt sich mit der unterschiedlichen Wandstärke der Platte.

Wegen der viel geringeren Dicke des oberen Teils des Versuchskörpers orientierte sich generell die Beulverformung der Platte bereits bei einer Last von 3600 kN ($u_z=17$ mm) nach oben (Bild 4-210). Das verursachte große Rissöffnungen im Bereich der Stelle 3 (Bild 4-200).

Gleich wie in der Plattenmitte fanden sich auch zahlreiche feine Risse an der Stelle 2 (Bild 4-201). Die horizontale Dehnung beträgt an der Stelle 1‰.



Bild 4-200 Rissbildung- Stelle 3

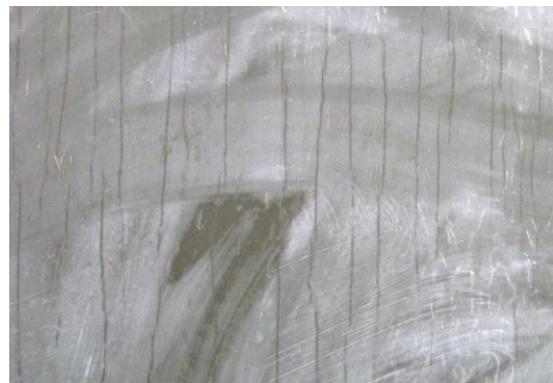


Bild 4-201 Rissbildung- Stelle 2

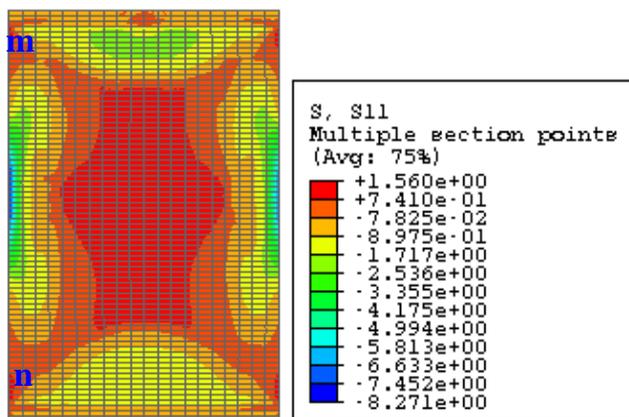


Bild 4-202 Horizontale Spannungen am Ende der FE-Berechnung - Außenseite

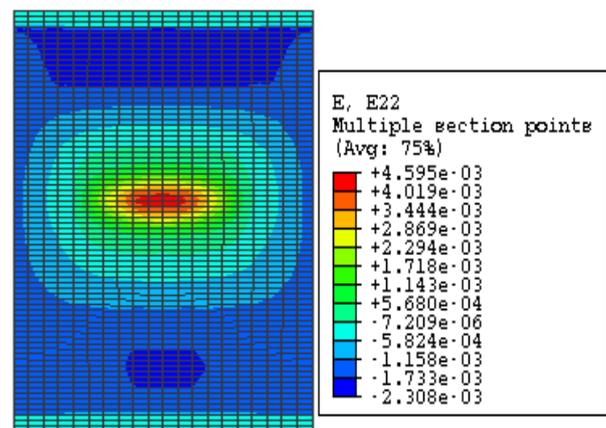


Bild 4-203 Vertikale Dehnungen am Ende der FE-Berechnung - Außenseite

Innenseite

Die Ergebnisse der vertikalen Dehnungen in den Stellen 24 und 30 (Bild 4-204) stimmen bis zu einer Dehnung von 1,4 ‰ ziemlich gut überein. Ab diesem Zeitpunkt sind bei der numerischen Simulation die zusätzliche Erhöhung der Normalkraft und die daraus resultierenden größeren Druckdehnungswerte ersichtlich. Kurz vor Ende der Berechnung (4343 kN) kann ein Rückgang der Druckdehnung an der Messstelle 30 (Bild 4-204, orange kurve) beobachtet werden. Dieses Verhalten zeigt den zunehmenden Einfluss der Membranzugspannungen bei den schlanken Versuchskörpern. Zu berücksichtigen im Versuch 200-01 sind die ausgeprägten Dickenunterschiede der

Platte. Die Druckspannung (vertikale Richtung) in der Plattenmitte erreicht am Ende der Berechnung 12 kN/cm². Rissbildungen wurden im Bereich der Plattenmitte (Innenseite) nicht gesehen.

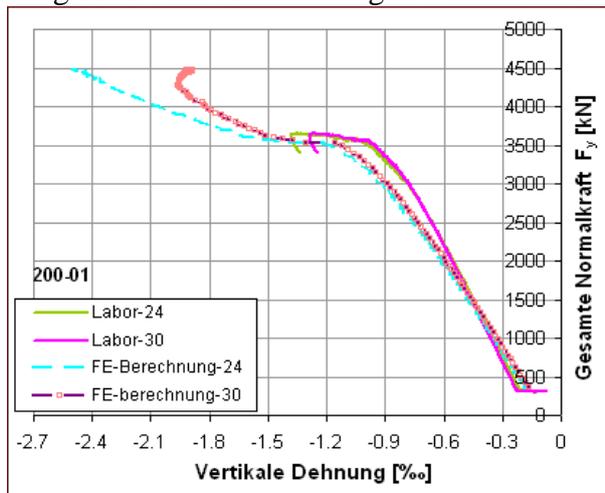


Bild 4-204 Last vs. vertikale Dehnung - Stellen 24 und 30

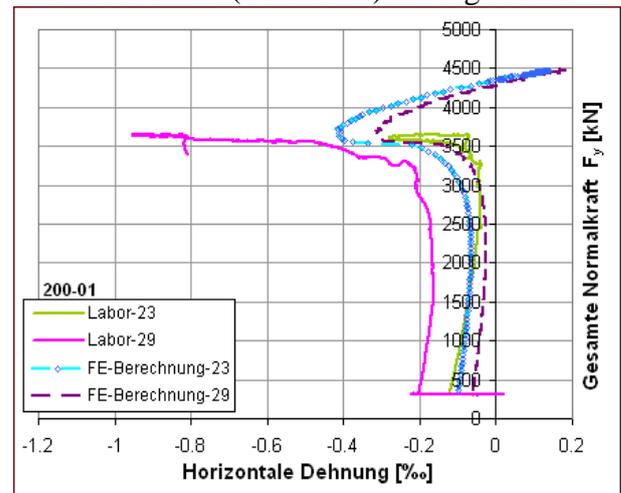


Bild 4-205 Last vs. horizontale Dehnung - Stellen 23 und 29

Die Ergebnisse der horizontalen Dehnungen in der Plattenmitte (Bild 4-205, Messaufnehmer 23, 29) zeigen, dass im Versuchskörper die Messstelle 29 mehr als die Messstelle 23 gestaucht wurde. Ein Grund dafür liegt an der größeren Wandstärke der Platte.

Bis die Nachrisszugfestigkeit (vertikale Richtung) in der Plattenmitte (Außenseite) erreicht wird, zeigen die theoretischen und experimentellen Dehnungsverläufe ein ähnliches Verhalten. Nach diesem Zeitpunkt trennt sich der Dehnungswert des Messaufnehmers 29 von der numerischen Berechnung und nimmt stark zu. Bei einer Beulverformung von 25 mm (Bild 4-196) ist ein Rückgang in dem Kurvenverlauf zu sehen. Im Bereich der Messstelle 23 zeigt sich das etwas früher (ab $u_z = 16$ mm). Bei der numerischen Simulation stellt sich dieses Verhalten gleich nach Erreichen der Matrixfestigkeit in B (Außenseite) in vertikale Richtung ein. Am Ende der numerischen Berechnung werden in diesem Bereich sogar Zugdehnungswerte erreicht.

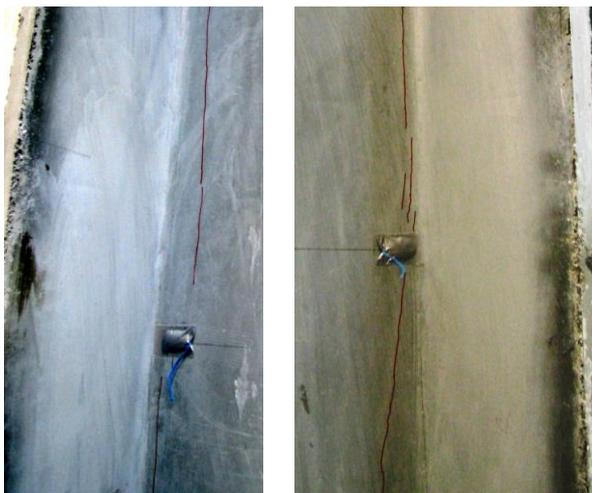


Bild 4-206 Rissbildung – Stellen 33 und 34

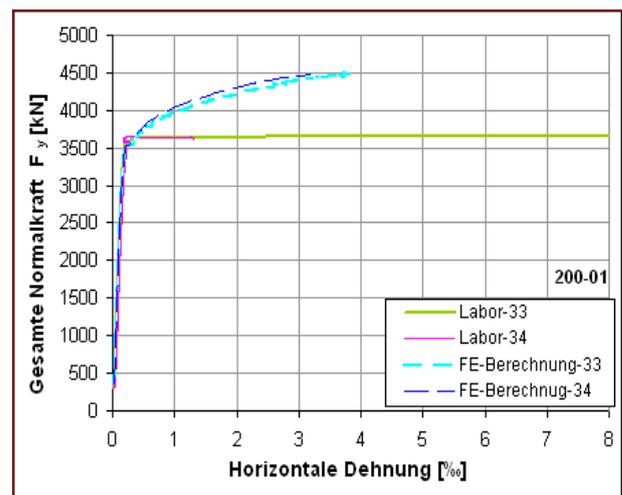


Bild 4-207 Last vs. horizontale Dehnung - Stellen 33 und 34

Nach dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte (Außenseite) wandern die Zugbeanspruchungen mehr zu den Einspannstellen (A) (Innenseite). Infolgedessen entstehen hohe Zugspannungen in A, diese verursachen ausgeprägte Risse entlang der vertikalen Ränder (Bild 4-206).

Bis zu einer Normalkraft von 3534 kN zeigen die Last-Dehnungsdiagramme an den Stellen 33 und 34 ein analoges Verhalten (Bild 4-207). Im Versuch nehmen die Dehnungen nach diesem Zeitpunkt besonders an der Messstelle 33 progressiv zu. Dieses Verhalten fällt mit dem Erreichen der Matrixfestigkeit (horizontale Richtung) an den Einspannstellen zusammen.

Stark ausgeprägte Risse wurden an beiden vertikalen Rändern gefunden (Bild 4-206). An der linken Seite bildete sich der Riss genau entlang der Messlänge des Aufnehmers. Das erklärt den hohen gemessenen Dehnungswert an der Stelle 33 (Bild 4-206, grüne Kurve).

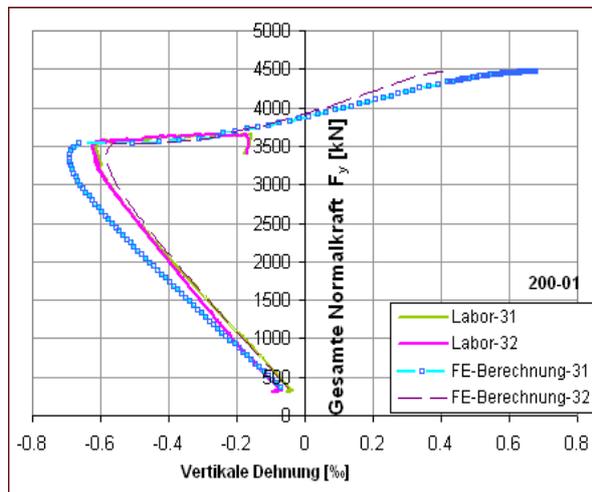


Bild 4-208 Last vs. vertikale Dehnung - Stellen 31 und 32

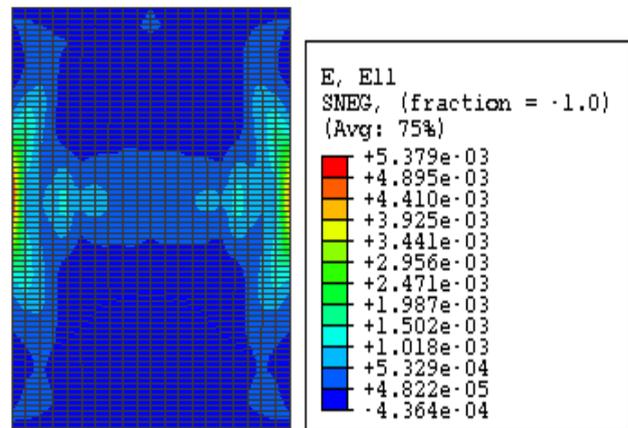


Bild 4-209 Horizontale Dehnungen am Ende der FE-Berechnung - Innenseite

Die Laborergebnisse der vertikalen Dehnungen an den Stellen 31 und 32 (Bild 4-208) stimmen von Anfang bis zum Ende des Versuches gut überein. Mit dem Erreichen der Nachrisszugfestigkeit (horizontale Richtung) im mittleren Teil der Platte (Außenseite) tritt ein Rückgang der Druckdehnungswerte auf. Dieses Verhalten entsteht wegen der zunehmenden Biegemomente des oberen und unteren Randes, welche sich nach dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte progressiv erhöhen und dadurch eine massivere Steigerung der Beulverformung im oberen und unteren Bereich der Platte bewirken. Die Dehnungswerte nehmen nach diesem Zeitpunkt bis zum Ende des Versuches ab.

Hauptsächlich wegen der großen erzielten Beulverformung zeigen die Dehnungsverläufe bei den numerischen Ergebnissen ab 3900 kN Zugdehnungswerte auf. Gleich wie bei der Beulserie 150-00 wurde der obere Bereich des Versuchskörpers (Stelle 31) etwas mehr gestaucht als der untere Teil. Der Grund dafür liegt an der unterschiedlichen Wandstärke der Platte, welche trotz sorgfältiger Arbeit nicht so exakt realisiert wurde.

Biegelinie

Bis zu einer Normalkraft von 3290 kN weisen die Kurvenverläufe der **vertikalen** Biegelinie (Bild 4-210) ein symmetrisches Verhalten auf. Nach diesem Zeitpunkt mit dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte richtet sich sowohl im Labor als auch bei der numerischen Berechnung die Beulverformung eindeutig nach oben. Der Grund dafür liegt, wie bereits mehrmals genannt wurde, an der unterschiedlichen Wandstärke. Der obere Teil der Platte weist eine geringere Dicke als der untere Bereich auf.

Die **horizontale Biegelinie** (Bild 4-211) zeigt ein symmetrisches Verhalten.

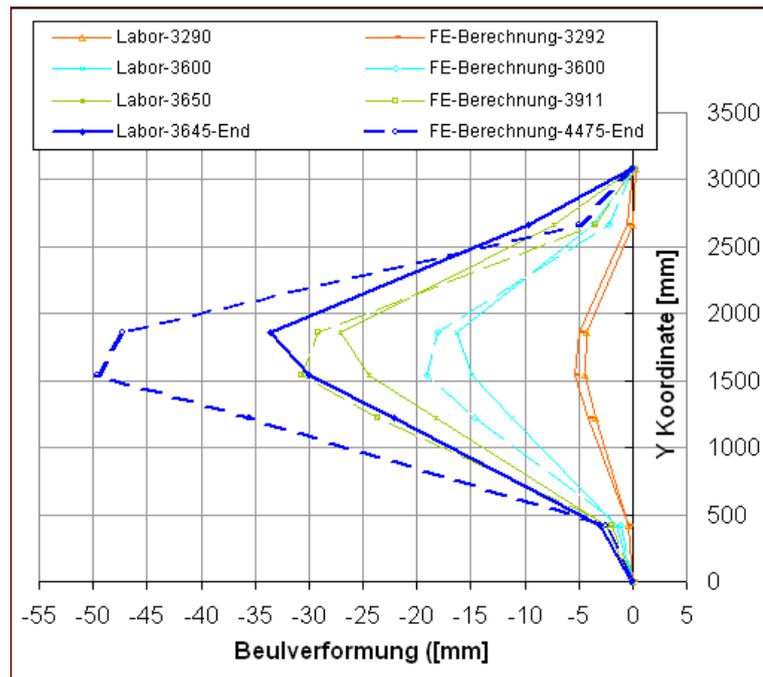


Bild 4-210 Vertikale Biegelinie-200-01

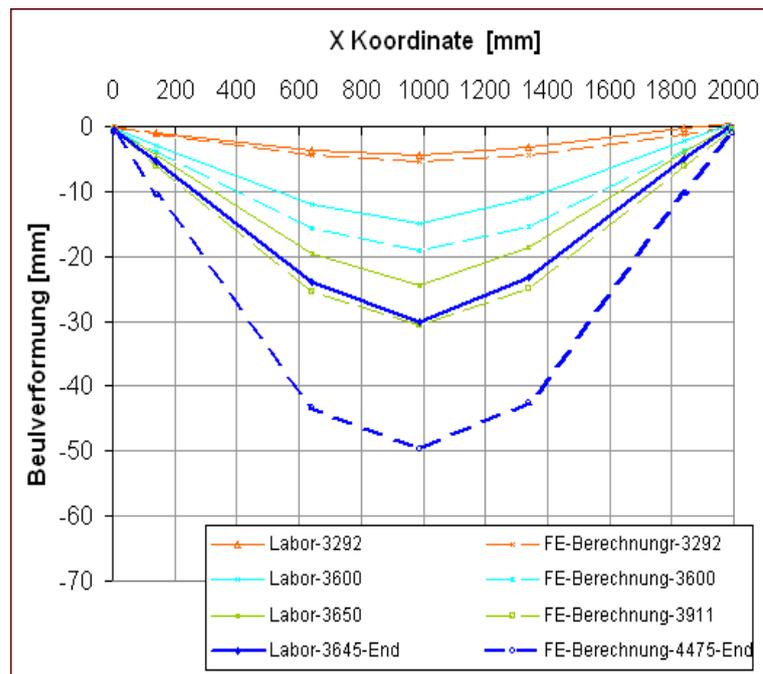


Bild 4-211 Horizontale Biegelinie-200-01

4.4.5.2 Versuch 200-02

Der Versuch wurde drei Mal gestartet bis eine Auslenkungskraft von 5,7 kN die gewünschte Vorauslenkung des Versuchskörpers bewirkte. Der Versuch wurde mit einer "Imperfektion" von 2,39 mm gestartet. Der Vergleich der Laborergebnisse und der numerischen Simulation wurde in einem Last-Verschiebungsdiagramm in Bild 4-212 dargestellt. Die Kurvenverläufe stimmen bis zu einer Last von 3526 kN ($u_z = 21$ mm) gut überein. Ab diesem Zeitpunkt zeigt die FE-Berechnung einen stärkeren Normkraftzuwachs als die Versuchswerte. Dieses Verhalten fällt mit dem Erreichen der Matrixfestigkeit (vertikale Richtung) in der Plattenmitte (Außenseite) zusammen. Die maximale Normkraft beträgt am Ende der numerischen Berechnung 4295 kN. Die Verschiebung (u_z) aus der Ebene (in B) erreichte sowohl im Labor als auch bei der FE-Berechnung ein Maximum von 48 mm. Ab einer Beulverformung von 36 mm wurde im Versuch ein fallender Kurvenverlauf beobachtet, die Normkraft beträgt zu dem Zeitpunkt 3636 kN.

Im Unterschied zu den anderen Versuchskörpern der gleichen Beulserie wurde dieser Versuch bis zum kompletten Bruch des Versuchskörpers durchgeführt. Infolgedessen wurde eine große Anzahl von Rissbildungen sowohl an der Außen- als auch der Innenseite des Versuchskörpers beobachtet. Besonders zu berücksichtigen ist, dass der obere Bereich der Platte aufgrund der dünneren Wandstärke viel mehr als bei den anderen Beulserien beansprucht wurde.

In Bild 4-213 ist der Versuchskörper (Außenseite) nach dem Versuch mit den Stellen, die für die Analyse der Rissbildungen verwendet werden, dargestellt.

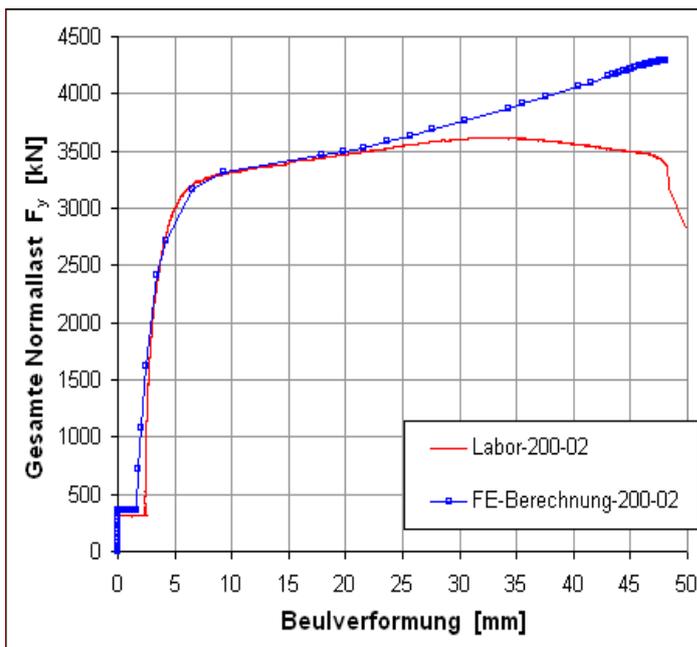


Bild 4-212 Last- Verschiebungs- Verläufe



Bild 4-213 Versuchskörper 200-02

Außenseite

Die Nachrisszugfestigkeit (horizontale Richtung) wurde in der Plattenmitte bei einer Last von 3312 kN erreicht (Bild 5.154 Stelle 1). Das führte zu dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte (B) und damit zu einer schnelleren Erhöhung der Beulverformung in B (Bild 4-212, von 9 bis 18 mm). Nach einer Stabilisierung des Systems ($F = 3496$ kN) nimmt die Normkraft wieder etwas stärker zu. Die FE-Analysen zeigen, dass bei einer Last von 3496 kN die Zugfestigkeit in vertikaler Richtung in der Plattenmitte erreicht wird (Bild 4-215). Die Beulverformung in (B) beträgt zu diesem Zeitpunkt 19 mm. Dieses Verhalten wird mit den zahlreichen horizontalen und vertikalen Rissen im Bereich der Plattenmitte bestätigt (Bild 4-216).

Hohe Zugspannungen verlagern sich als nächstes in den oberen und unteren Teil der vertikalen Ränder der Platte (Bild 4-214- Stelle **m**, **n**). Bei einer Last von 3636 kN wurde die Zugfestigkeit (horizontale Richtung) an diesen Stellen erreicht. Im Versuch entspricht diese Last die maximale Normalkraft. Das Last-Verschiebungsdiagramm weist nach diesem Zeitpunkt einen fallenden Kurvenverlauf auf. Dieses Verhalten fällt mit dem Erreichen der Nachrisszugfestigkeit (vertikaler Richtung) in der Plattenmitte zusammen. Die horizontale Dehnung in B betrug zu diesem Zeitpunkt bereits 3,7 ‰.

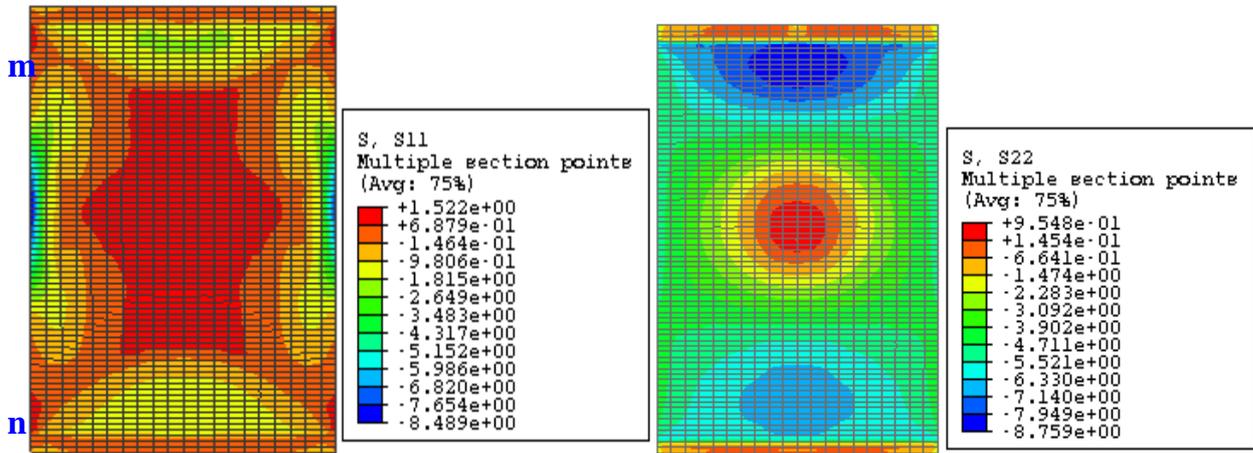


Bild 4-214 Zugspannungen am Ende der FE- Berechnung- Außenseite

Bild 4-215 Zugspannungen bei einer Last von 3496 kN- Außenseite

Die Risse im mittleren Bereich der Platte sind im Bild 4-216 dargestellt. Zu berücksichtigen ist, dass die Erscheinung von vertikalen und horizontalen Rissen am Ende des Versuches, nicht nur im mittleren Bereich der Platte aufgetreten sind, sondern feine Risse auch fast in der gesamten Oberfläche der Plattenaußenseite gefunden wurden.



Bild 4-216 Rissausbildung - Stelle 1



Bild 4-217 Rissausbildung - Stelle 2

Wegen der dünneren Wandstärke zeigt sich die Stelle 2 (Bild 4-218) als der am höchsten beanspruchte Bereich des Versuchskörpers. Entsprechend der FE-Simulation bilden sich hohe Zugspannungen an den Einspannstellen (Innenseite). Die Nachrisszugfestigkeit (horizontale Richtung) wurde an diesen Stellen erreicht. Aufgrund dieser hohen Beanspruchung löste sich im Versuch ein Teil des Flansches von der Platte ab (oberer Teil, Bild 4-226). Das bewirkte eine stärkere Biegung des oberen Bereiches des Versuchskörpers und es bildete sich ein horizontaler Bruch entlang der Breite der Platte (Bild 4-217). Die große Anzahl von feinen Rissen entstand vermutlich erst nach dem Wegbrechen des oberen Flanschteils (Bild 4-217). Nach den numerischen Ergebnissen erreicht die Druckspannung an Stelle 2 einen Wert von 13 kN/cm².

Trotz der größeren Wandstärke und der daraus resultierenden geringeren Beulverformung wurden im unteren Teil des Versuchskörpers (Bild 4-219, Stelle 3) nicht nur ausgeprägte vertikale Risse sondern auch feine schräge Risse gefunden (Bild 4-220). Dieses Verhalten deutet auf einen zunehmenden Einfluss der Membranzugspannungen bei schlankeren Versuchskörpern hin. Nach der FE-Simulation erreichen an der Stelle 3 die Dehnungen in horizontaler Richtung 1 ‰ und in vertikaler Richtung -0,4 ‰ (Bild 4-224 und Bild 4-225). Weiter unten an Stelle 4 wurden hauptsächlich vertikale Risse gefunden (Bild 4-221).



Bild 4-220 Rissbildung- Stelle 3



Bild 4-221 Rissbildung- Stelle 4

Der Steifigkeitsverlust der Plattenmitte (B) verursacht eine progressive Erhöhung der Beulverformung. Mit der Entstehung von Membranzugspannungen stabilisiert sich das System und führt zu einem weiteren Anstieg der Normalkraft. Diese verursacht eine stärkere Erhöhung der horizontalen Zugbeanspruchung an den Einspannstellen. Das Auftreten von ausgeprägten Rissen im Bereich der Einspannstellen (Innenseite) und die Ablösung eines Teiles des linken Flansches von der Platte bekräftigten diese Aussage (Stelle 5 und 8). Trotz der zahlreichen Risse in der Platte wurden genau am rechten Rand (Stelle 5) der Außenseite keine Risse gefunden (Bild 4-222). Dieses Verhalten ist mit der unterschiedlichen Wandstärke zu erklären. Die rechte Seite des Versuchskörpers zeigte eine größere Dicke als die linke Seite.



Bild 4-222 Rissausbildung- Stelle 5



Bild 4-223 Rissausbildung- Stelle 7

Entsprechend der numerischen Simulation wurde im Versuchskörper (Außenseite) nicht nur der mittlere Teil der vertikalen Ränder hoch belastet, sondern auch der Stelle **m** und **n** (Bild 4-214). Nach dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte wurde die Matrixfestigkeit (horizontale Richtung) zuerst im Bereich der Stelle **m** erreicht ($F = 3636 \text{ kN}$). Da der Versuch bis zum Bruch durchgeführt wurde, wurden diese Stellen (**m**, **n**), im Vergleich zu den anderen Versuchskörpern der gleichen Beulserie, viel stärker beansprucht. Die große Anzahl von Rissen an Stelle 7 (Bild 4-213) bestätigt diese Aussage (Bild 4-223).

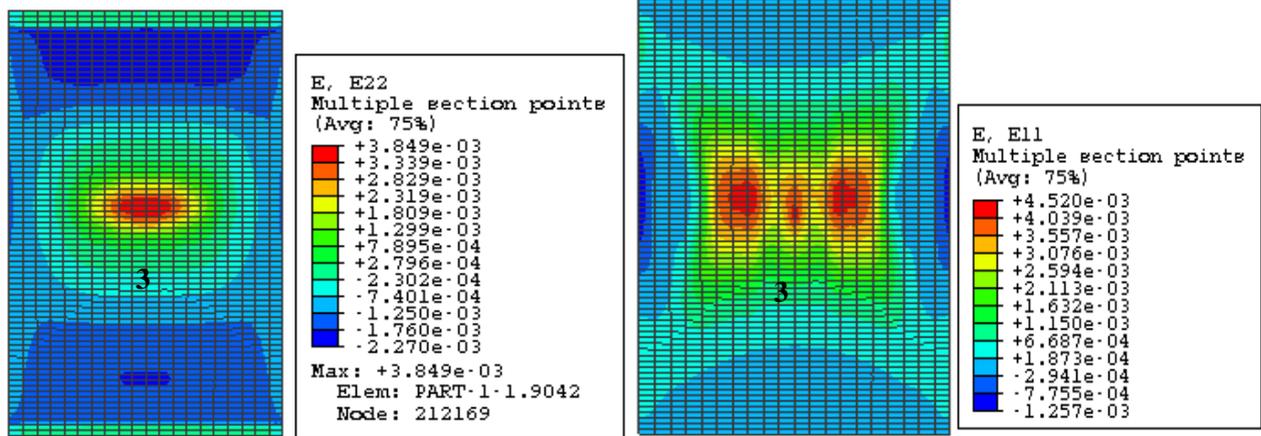


Bild 4-224 Vertikale Dehnungen am Ende der FE- Berechnung - Außenseite

Bild 4-225 Horizontale Dehnungen am Ende der FE- Berechnung - Außenseite

Innenseite

Im Vergleich zu den anderen Versuchen wurde die Innenseite des Versuchskörpers 200-02 viel stärker geschädigt. Eine große Anzahl, sowohl von vertikalen, als auch von horizontalen Rissen wurde in der gesamten Oberfläche gefunden. In Bild 4-226 ist die Versuchskörper-Innenseite (nach dem Versuch) mit markierten Stellen, die weiter unten analysiert werden und die nördliche Ansicht des Versuchskörpers dargestellt.

Entsprechend der Ergebnisse der vertikalen Dehnungen in der Plattenmitte (Bild 4-227, Messstellen 24 und 30) wurde bei der FE-Berechnung der mittlere Bereich der Platte viel mehr gestaucht als im Versuch, das ergibt sich aufgrund der höheren erzielten Normalkraft

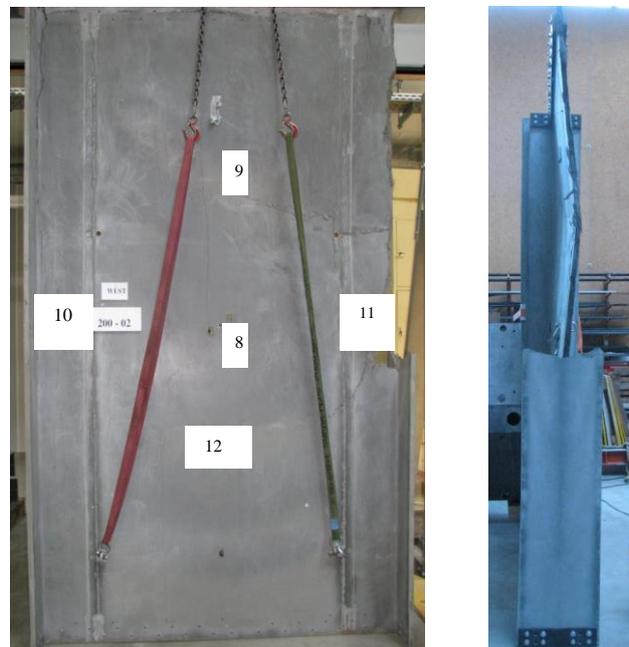


Bild 4-226 Versuchskörper 200-02- Innenseite und Seitliche Aufnahme

Bis zum Erreichen der Zugfestigkeit (horizontale Richtung, 3461 kN) an den Einspannstellen (Innenseite) weisen die Lastdehnungsverläufe im Versuch und bei der numerischen Simulation ein annähernd gleiches Verhalten auf. Ab einer Last von ca. 3600 kN zeigt die experimentelle Untersuchung einen Rückgang der Druckdehnungswerte auf. Wegen der größeren erzielten Beulverformung des oberen Bereiches im Vergleich zu dem unteren Teil der Platte nehmen die Dehnungen an der Stelle 24 (Bild 4-227, grüne Linie) stärker als im Bereich der Stelle 30 ab. Dieses Verhalten erklärt sich auch mit den ausgeprägten Rissen, die sich im Bereich der Messstelle 24 bilden. Im Labor wurden zahlreiche Risse im mittleren Bereich der Platte gefunden (Bild 4-228). Bei dem FE-Ergebnis ist erst am Ende der Berechnung ein leichter Rückgang des Dehnungswertes in der Stelle 24 zu erkennen (blaue Linie).

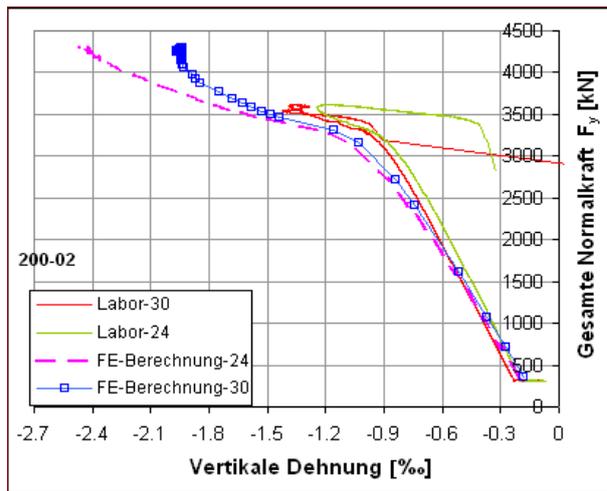


Bild 4-227 Last vs. vertikale Dehnung - Stellen 24 und 30

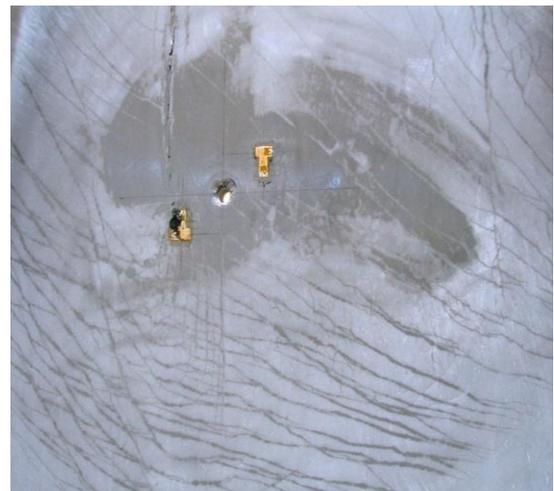


Bild 4-228 Rissausbildung - Stelle 8 -Innenseite

Die Versuchsergebnisse der horizontalen Dehnungen an den Stellen 23 und 29 weisen bis zum Erreichen der Nachrisszugfestigkeit in der Plattenmitte (Außenseite) ein sehr ähnliches Verhalten auf (Bild 4-230, 3312 kN). Wegen der zahlreichen Risse (Bild 4-228) trennt sich nach diesem Zeitpunkt der Dehnungsverlauf des Messaufnehmers 29 (Bild 4-229, orange Kurve) von dem Dehnungsverlauf des Messaufnehmers 23 (Bild 4-229, grüne Kurve) und zeigt bis zu einer Normalkraft von 3610 kN (Labor) eine starke Dehnungszunahme.

Die Dehnungswerte weisen nach diesem Zeitpunkt einen Rückgang auf. Diese Änderung fällt mit der Bildung der ersten horizontalen Risse in der Plattenmitte zusammen. Ab diesem Zeitpunkt nimmt der Druckdehnungswert kontinuierlich ab (Bild 4-230, orange Verläufe). Am Ende des Versuches weist die horizontale Dehnung Zugdehnungswerte auf. Da Risse sich nicht direkt entlang der Messlänge des Aufnehmers 23 (Bild 4-229, grüne Kurve) bilden, nehmen die Stauchung in dem Bereich nach einer Last von 3616 kN nicht weiter ab.

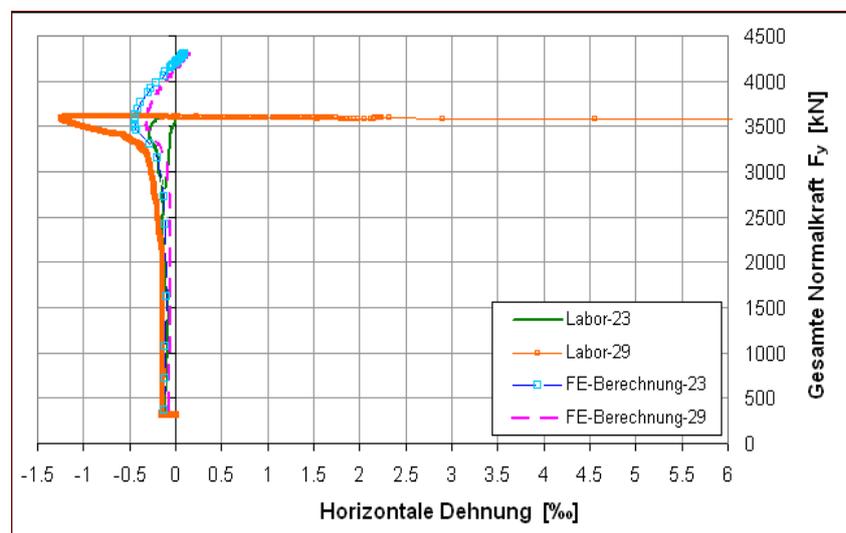


Bild 4-229 Last vs. horizontale Dehnung – Stellen 23 und 29

Gleich wie bei der Beulserie 150-00 waren die vertikalen Ränder der Platte, sowohl im Versuch als auch bei der numerischen Simulation, die am meisten beanspruchten Bereiche des Versuchskörpers. Gemäß der numerischen Analyse konzentrieren sich nach dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte (Außenseite) als nächstes hohe Zugbeanspruchungen an den Einspannstellen (Innenseite). In dem Last-Dehnungsdiagramm der Stellen 33 und 34 (Bild 4-230) stimmen die Kurvenverläufe bis zum Erreichen der Matrixfestigkeit ($F = 3461$ kN) an der Einspannstellen (Außenseite)

te, horizontale Richtung) überein. Wegen der lokal individuellen Rissausbildung zeigt das Laborergebnis nach diesem Zeitpunkt nur an einem Rand (34) große Dehnungswerte. Dieses Verhalten erklärt sich mit der Bildung großer Rissöffnungen entlang der Messlänge des Messaufnehmers 34. Die hohe Konzentration von Zugspannungen (horizontale Richtung) an den Rändern verursachte am Schluss des Versuches einen explosionsartigen Bruch dieses Bereiches (Bild 4-226, Stelle 11). Im Bereich der Messstelle 33 wurden zahlreiche Risse etwas entfernt von dem Messaufnehmer (Bild 4-231) gefunden, damit lässt sich der niedrig erreichte Zugdehnungswert (0,2 ‰) in diesem Bereich erklären. Es ist dort auch die größere Wandstärke als an der Stelle 34 zu berücksichtigen.

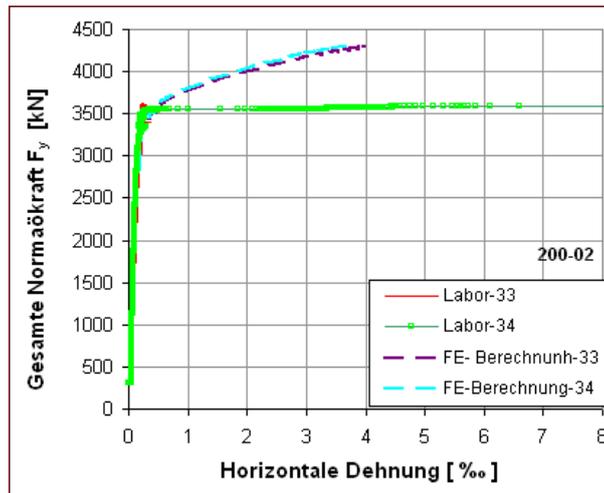


Bild 4-230 Last vs. horizontale Dehnung - Stellen 33 und 34

Bild 4-231 Rissbildung - Stelle 10

Die hohe Beanspruchung des Versuchskörpers lässt sich auch mit den Messwerten der Stelle 31 und 32 verfolgen (Bild 4-232). In der ersten Phase der Verläufe nehmen die vertikalen Dehnungswerte bis zu einer Last von 3161 kN kontinuierlich zu. Nach diesem Zeitpunkt tritt mit dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte ein Rückgang der Druckdehnungswerte auf.

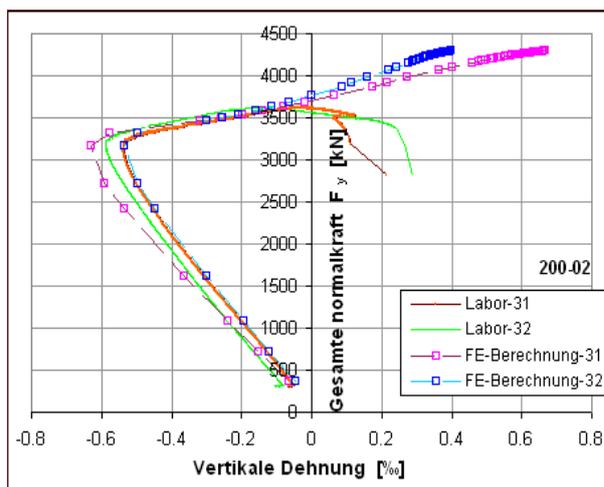


Bild 4-232 Last vs. vertikale Dehnung - Stellen 31 und 32

Bild 4-233 Rissausbildung- Stelle 9

Dieses Verhalten entsteht wie bereits mehrmals erklärt wurde wegen der zunehmenden Biegemomente des oberen und unteren Randes, welche sich nach dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte progressiv erhöhen und dadurch eine massivere Steigerung der Beulverformung im oberen und unteren Bereich der Platte bewirken.

Mit der weiteren Erhöhung der Last nehmen die Druckdehnungswerte immer weiter ab. Bei einer Normalkraft von 3761 kN ($u_z = 32$ mm) ist ein Übergang von Druckdehnungswerten zu Zugdeh-

nungswerten zu erkennen. Dieser Last entspricht die maximale Normalkraft, die im Labor erreicht wurde.

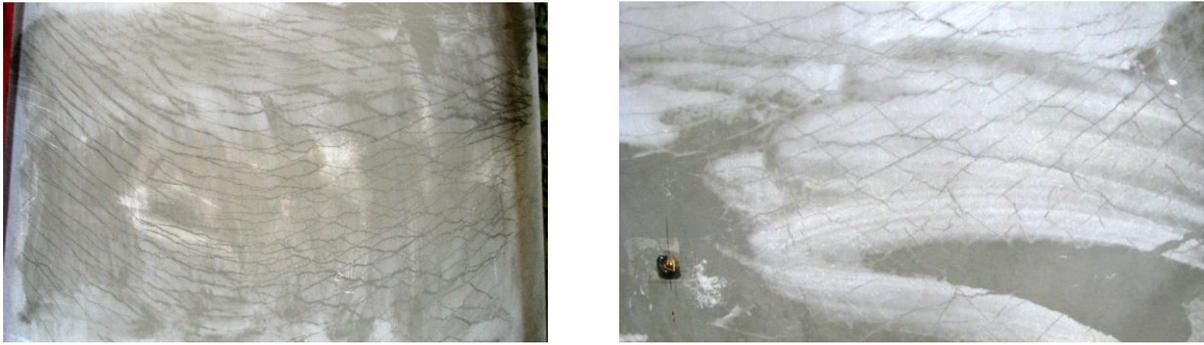


Bild 4-234 Rissbildung an der Stelle 12 und weiter unteren Bereich

Wegen der großen erreichten Beulverformung und da der Versuch bis zum Bruch durchgeführt wurde, wurden im Unterschied zu den anderen Versuchskörpern der gleichen Beulserie an der Stelle 12 und dem weiter unten liegenden Bereich zahlreiche Rissausbildungen gefunden (Bild 4-234)

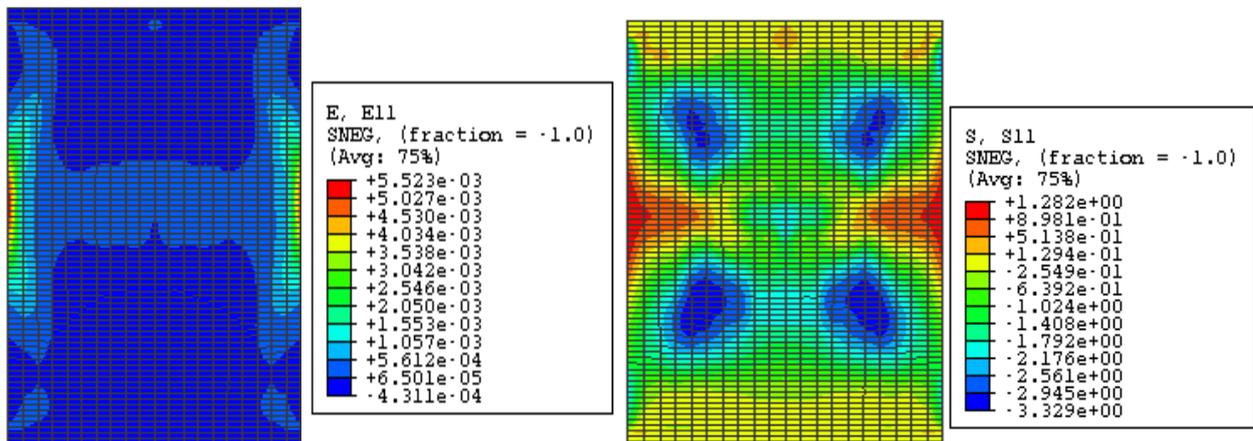


Bild 4-235 Horizontale Dehnungen am Ende der FE-Berechnung - Innenseite

Bild 4-236 Horizontale Zugspannungen am Ende der FE-Berechnung - Innenseite

Biegelinie

Die Ergebnisse der **vertikalen Biegelinie** (Bild 4-237) zeigen im Versuch und bei der FE-Berechnung bis zu einer Last von 3312 kN ein sehr ähnliches Verhalten. Nach diesem Zeitpunkt mit dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte und wegen der unterschiedlichen Wandstärke wandert die Beulverformung eindeutig nach oben.

Der Verlauf der **horizontalen Biegelinie** ist sowohl im Labor als auch bei der FE-Berechnung von Beginn bis zum Ende des Versuches ziemlich symmetrisch (Bild 4-238).

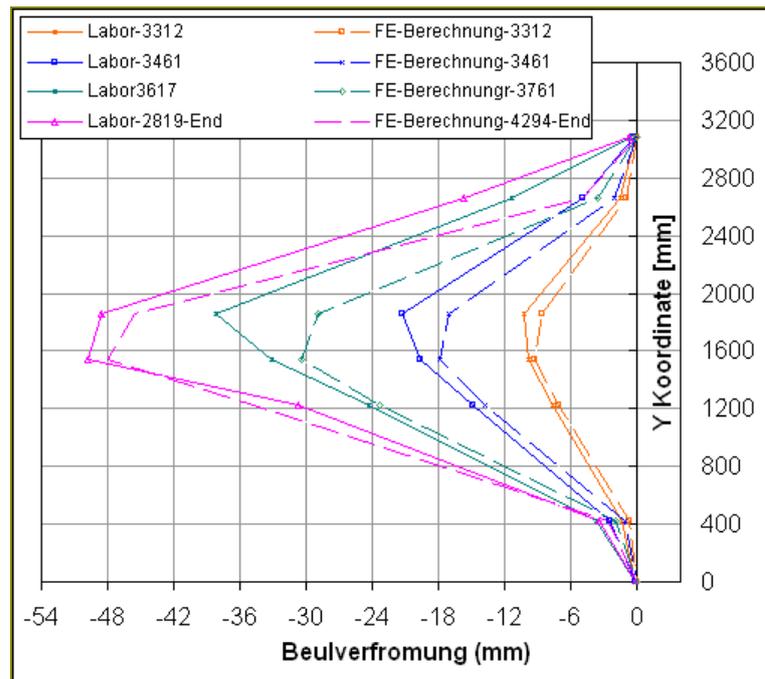


Bild 4-237 Vertikale Biegelinie-200-02

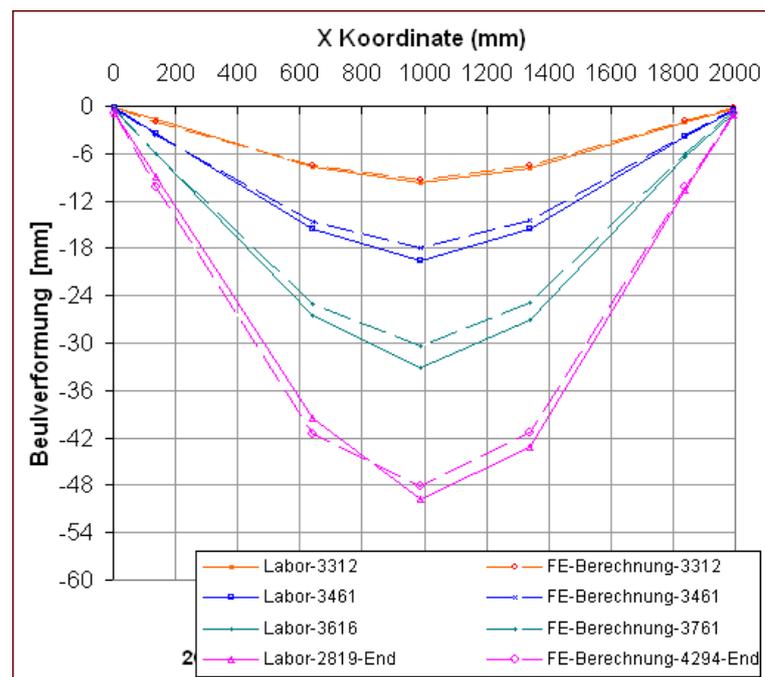


Bild 4-238 Horizontale Biegelinie-200-02

4.4.5.3 Versuch 200-03

Der Versuch wurde zwei Mal gestartet bis eine Auslenkungskraft von 5,7 kN die gewünschte Vorauslenkung des Versuchskörpers verursachte. Die damit erzeugte "Imperfektion" in der Plattenmitte betrug 2,9 mm. Der Vergleich des Laborwertes und der numerischen Berechnung wurde in einem Last-Verschiebungsdiagramm im Bild 4-239 dargestellt. Beide Kurvenverläufe weisen bis zu einer Last von 2700 kN ein gleiches Verhalten ($u_z = 14$ mm) auf. Ab diesem Zeitpunkt nimmt die Normalkraft bei der numerischen Berechnung etwas stärker als im Versuch zu. Die Beulverformung (u_z) in der Plattenmitte erreichte sowohl im Labor als auch bei der FE-Berechnung ein Maximum von 53 mm. Aus Sicherheitsgründen und um einen schlagartigen Bruch auszuschließen wurde der Versuch 200-03 vor Erreichen des endgültigen Bruches abgebrochen. Die maximale Normalkraft erreichte 3750 kN. Zu berücksichtigen ist, dass die geometrische Analyse der Platte generell eine dünnere Wandstärke als bei den Versuchskörpern 200-02 und 200-01 zeigte. Im Bild 4-240 ist der Versuchskörper (Außenseite) mit markierten Stellen, die für die analysiert des Tragverhaltens relevant sind dargestellt.

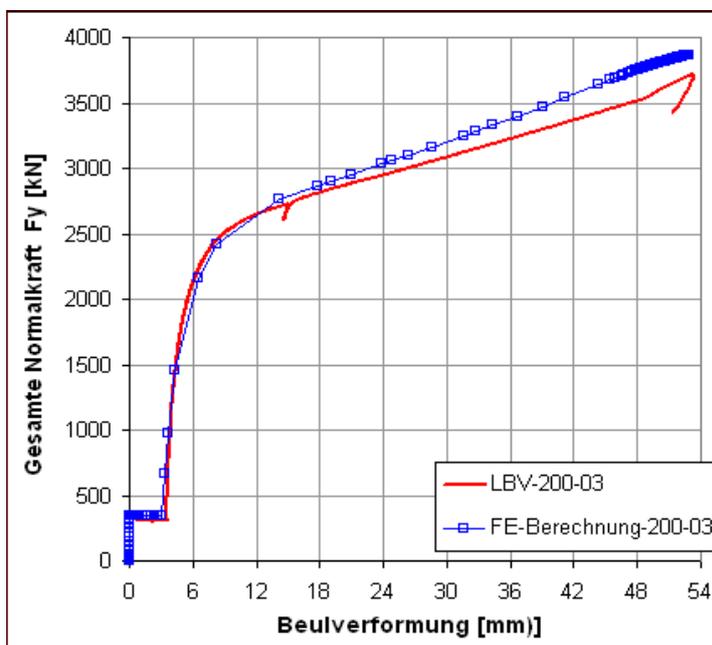


Bild 4-239 Last- Verschiebungsdiagramm

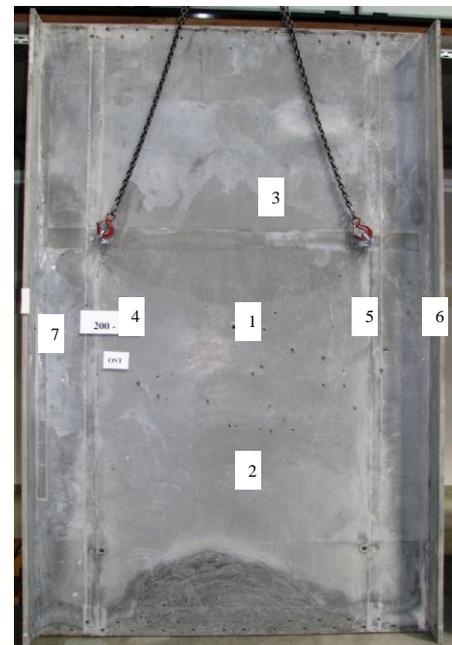


Bild 4-240 Versuchskörper 200-03

Außenseite



Bild 4-241 Rissbildung an der Stelle 1 (Unten)

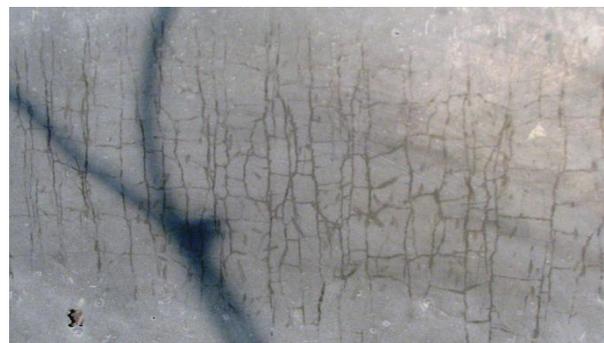


Bild 4-242 Rissbildung an der Stelle 1 (Oben)

Die Nachrisszugfestigkeit in der Plattenmitte wurde bei einer Last von 2416 kN erreicht, mit dem Steifigkeitsverlust des Bereiches nimmt die Beulverformung sehr stark zu. (Bild 4-239, von 8 bis

13 mm). Bereits bei einer Last von 2416 kN bilden sich in der Plattenmitte nicht nur Zugspannungen in vertikaler Richtung sondern auch in horizontaler Richtung. Am Ende der numerischen Berechnung beträgt die Zugdehnungswert in dem Bereich 5,6 %. Die zahlreichen Risse im Versuch bestätigt dieses Verhalten.

Es wurden eine großen Anzahl von horizontalen und vertikalen Rissen besonders im oberen Bereich der Plattenmitte gefunden (Bild 4-242). Im unteren Teil wurden trotz der großen erzielten Beulverformung nur vertikalen Risse beobachtet (Bild 4-241). Der Grund dafür liegt an dem beträchtlich großen Unterschied der Dickentoleranz. Da der obere Teil eine viel dünnere Wandstärke als der untere Bereich der Platte aufweist, wandert die Beulverformung bei einer Normalkraft von 3200 kN deutlich nach oben (Bild 4-254).

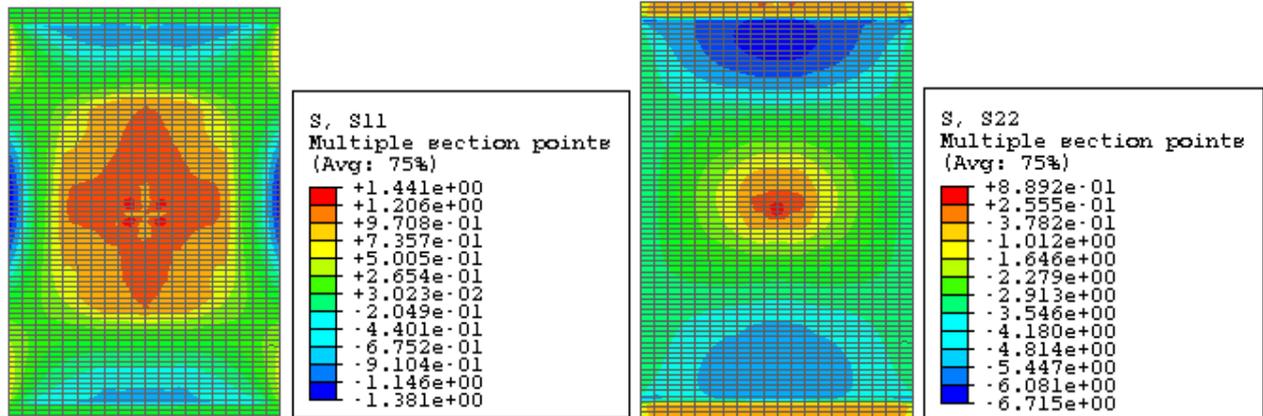


Bild 4-243 Horizontale Spannungen bei einer Last von 2761 kN- Außenseite

Bild 4-244 Vertikale Spannungen bei einer Last von 2761 kN- Außenseite

Die in der Plattenmitte ausgebildeten Risse breiteten sich nach unten bis zur Stelle 2 (Bild 4-240) aus. In diesem Bereich wurden ausschließlich feine vertikale Risse beobachtet (Bild 4-245, links). Am Ende der numerischen Berechnung erreicht die horizontale Zugspannung an dieser Stelle 1 kN/cm^2 .



Bild 4-245 Rissbildungen- Stelle 2 (links), Stelle 3 (mitte), Stelle 4 (rechts)

Da bereits bei einer Normalkraft von 3200 kN der obere Bereich des Versuchskörpers eine größere Beulverformung als der untere Teil der Platte zeigte (Bild 4-254), wurden im Bereich der Stelle 3 (Bild 4-240) horizontale und vertikale Risse beobachtet (Bild 4-245, Mitte). Dieses Verhalten zeigt den Einfluss der unterschiedlichen Wandstärke auf das Tragverhalten des Versuchskörpers. Die maximale Zugspannung (horizontale Richtung) erreicht in diesem Bereich circa 1 kN/cm^2 (Bild 4-246). An den Stellen 4 und 5 wurden im Vergleich zum Versuchskörper 200-02 hauptsächlich vertikale Risse gefunden (Bild 4-245, rechts). Rissbildungen an den vertikalen Rändern der Platte wurden allerdings nicht gesehen.

Gleich wie im Versuch 200-02 konzentrieren sich im oberen und im unteren Bereich (**m**, **n**) der vertikalen Ränder (Bild 4-246) hohe Zugspannungen, bei einer Normalkraft von 2930 kN wurde

die Zugfestigkeit (horizontale Richtung) an diesen Stellen erreicht. Zum gleichen Zeitpunkt wurde auch in der Plattenmitte (Außenseite) die Zugfestigkeit in vertikaler Richtung erreicht. Im Versuch wurden keine Rissbildungen im Bereich der Stellen **m** und **n** gefunden.

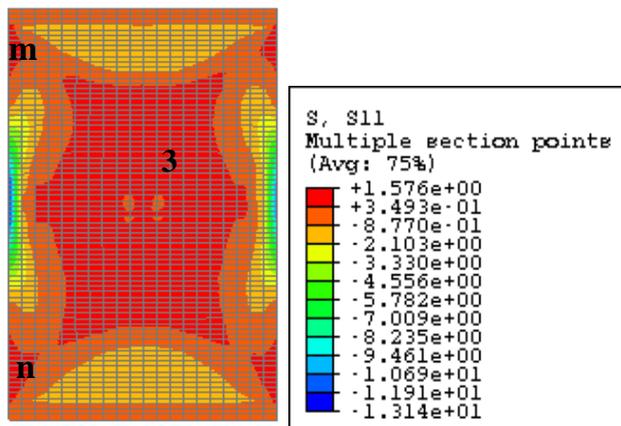


Bild 4-246 Horizontale Spannungen am Ende der FE- Berechnung- Außenseite

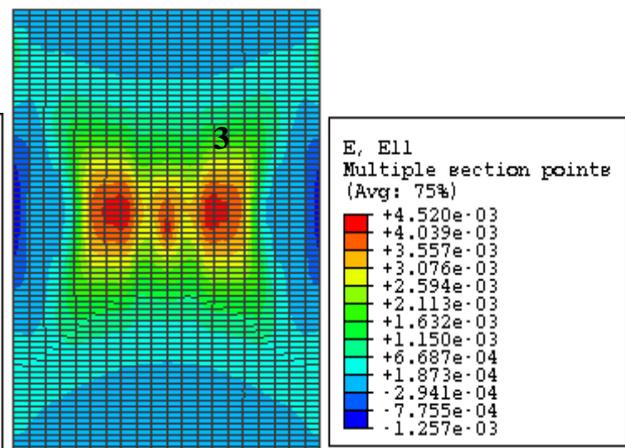


Bild 4-247 Horizontale Dehnungen am Ende der FE- Berechnung- Außenseite

Innenseite

Die Labor- und numerische Ergebnisse der horizontalen Dehnungen an den Stellen 23 und 29, (Bild 4-249), zeigen bis zu einer Normalkraft von 2930 kN eine gute Übereinstimmung. Die Dehnungen weisen ab dieser Normalkraft einen Rückgang auf. Dieses Verhalten fällt mit dem Erreichen der Zugfestigkeit im mittleren Bereich der Platte (Außenseite, vertikale Richtung) zusammen. Nach diesem Zeitpunkt und bis zum Ende des Versuches nehmen die Dehnungswerte sowohl im Versuch als auch bei der numerischen Simulation kontinuierlich ab. Am Ende des Versuches beträgt der Dehnungswert -0,02 %. Wegen der etwas höheren erzielten Normalkraft wurde bei der FE-Berechnung dieser Stellen mehr als im Versuch gestaucht, die horizontale Dehnung in Stelle 23 erreicht Zugdehnungswerte (0,2 %). Rissbildungen wurden im mittleren Bereich der Platte nicht gefunden.

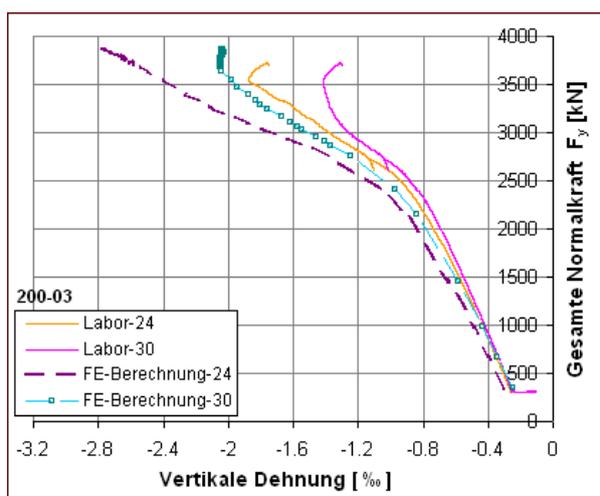


Bild 4-248 Last vs. vertikale Dehnung - Stellen 24 und 30

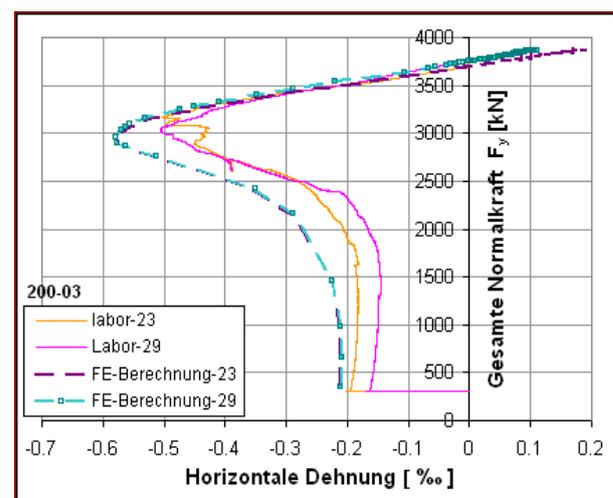


Bild 4-249 Last vs. horizontale Dehnung – Stellen 23 und 29

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die vertikalen Dehnungen an den Stellen 24 und 30 (Bild 4-248) bis zu einer Last von 2470 kN ein annähernd gleiches Verhalten aufweisen, zu diesem Zeit-

punkt wurde die Matrixfestigkeit an der Einspannstellen erreicht. Aufgrund des ausgeprägten Dickenunterschieds der Scheibe wurde die Stelle 24 etwas mehr gestaucht als die Stelle 30. Ab einer Last von 3470 kN ist ein Rückgang in dem Dehnungsverlauf zu erkennen. Nach der numerischen Simulation erreicht zu diesem Zeitpunkt die vertikale Dehnung in der Scheibenmitte 4 ‰.

Nach dem Steifigkeitsverlust (2416 kN) der Plattenmitte (Außenseite) und der zunehmenden Umlagerung der Zugbeanspruchung an der Einspannstellen werden als nächstes die vertikalen Ränder stärker gedehnt. Bei einer Normalkraft von 2761 kN wurde die Matrixfestigkeit an den Einspannstellen (A) erreicht. Im Versuch wurden am rechten Rand (34) (Innenseite) ausgeprägte Risse gefunden (Bild 4-251).

Die der horizontalen Dehnungen der Stellen 33 und 34 (Bild 4-250) stimmen bis zu einer Last von 2959 kN gut überein. Nach der FE-Berechnung entsteht zu diesem Zeitpunkt die ersten horizontalen Risse in der Plattenmitte (Außenseite). Im Versuch wurden im Bereich der Messstelle 34 ausgeprägte Risse direkt an der Messlänge gefunden. Deswegen nehmen die Dehnungswerte nach diesem Zeitpunkt stark zu. Bei einer Last von 3140 kN erreicht die Dehnung 6 ‰ (Bild 4-250, rosa Linie). Im Bereich der Stelle 33 wurden nur feine Risse beobachtet, das und die Wandstärkeunterschied erklärt das steifere Verhalten des Bereiches (Bild 4-250, gelbe Linie).

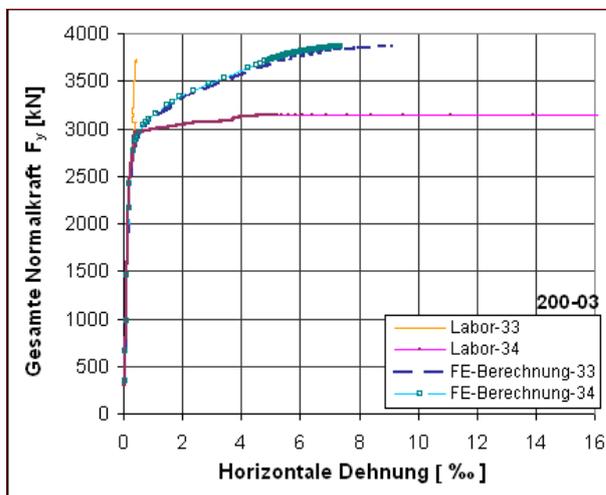


Bild 4-250 Last vs. horizontale Dehnung - Stellen 33 und 34



Bild 4-251 Rissbildung- Stelle 33(links) und 34 (rechts)

Der unterschiedliche Kurvenverlauf der vertikalen Dehnungen (Bild 4-252) an den Stellen 31 und 32 erklärt sich mit der großen Dickentoleranz des Versuchskörpers. Der obere Bereich weist eine wesentlich geringere Wandstärke als der untere Teil der Platte auf. Das bewirkt ab einer Normalkraft von 2400 kN eine Orientierung der Beulverformung nach oben. Der Vergleich mit der FE-Berechnung zeigt bis zum Erreichen der Nachrisszugfestigkeit in der Plattenmitte ($F=2416$ kN) ein annähernd gleiches Verhalten. Nach diesem Zeitpunkt ist ein Rückgang der Druckdehnungswerte aufgetreten. Dieses Verhalten fällt mit dem Erreichen der Zugfestigkeit (horizontale Richtung, $F = 3248$ kN) an den Einspannstellen zusammen (Bild 4-253).

Da die Beulverformung an der Stelle 31 größer ist als an der Stelle 32, bilden sich am Ende des Versuches Zugdehnungswerte in diesem Bereich (Bild 4-252, gelbe Linie). Ein Übergang von Druckdehnungswerten zu Zugdehnungswerten tritt bei einer Last von 3181 kN auf. Zu diesem Zeitpunkt wurde die Nachrisszugfestigkeit (horizontale Richtung) an den Rändern der Platte erreicht. Risse wurden im Bereich der beiden Messstellen allerdings nicht gefunden.

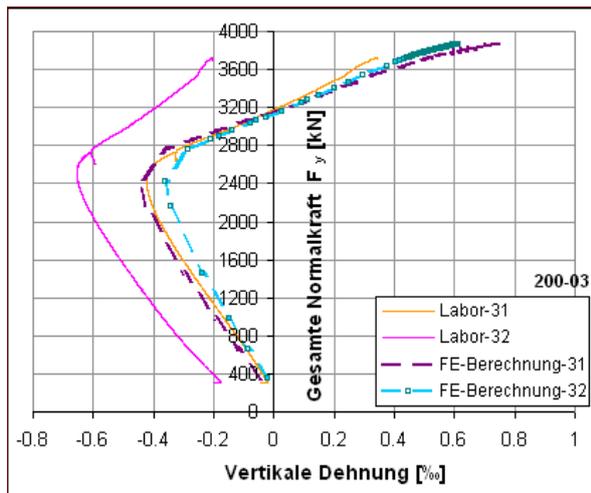


Bild 4-252 Last vs. vertikale Dehnung – Stellen 31 und 32

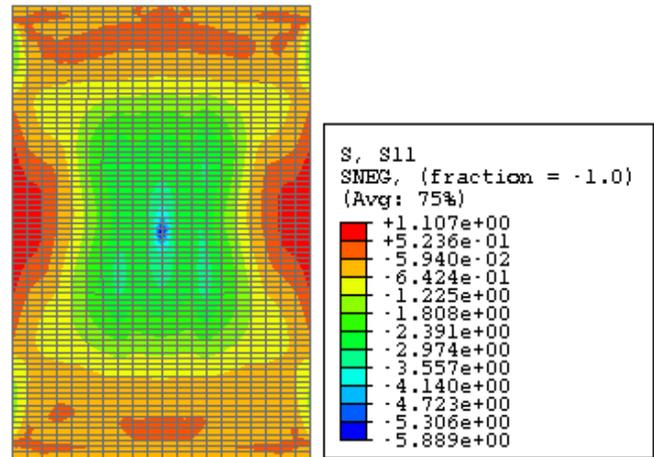


Bild 4-253 Horizontale Spannungen bei einer Last von 3248 kN- Innenseite

Biegelinie

Die **vertikale Biegelinie** zeigt bis zum Erreichen der Nachrisszugfestigkeit (horizontale Richtung) in der Plattenmitte ($F = 2416 \text{ kN}$) eine größere Beulverformung im unteren Bereich der Platte. Nach diesem Zeitpunkt mit dem Steifigkeitsverlust der Plattenmitte und wegen des Unterschieds in der Wandstärke wandert die Beulverformung eher nach oben. (Bild 4-254, hellblaue Kurve). Der untere Bereich des Versuchskörpers zeigte, im Unterschied zu 200-01 und 200-02, eine geringere Wandstärke als im mittleren Teil aber eine größere Dicke im oberen Bereich der Platte. Die **horizontale Biegelinie** zeigt von Anfang bis Ende des Versuches eine symmetrische Form (Bild 4-255).

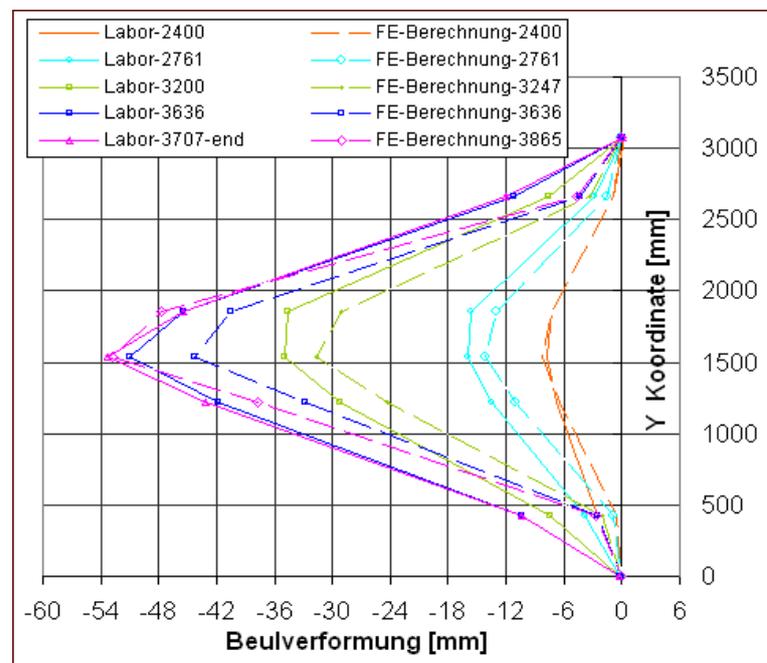


Bild 4-254 Vertikale Biegelinie -200-03

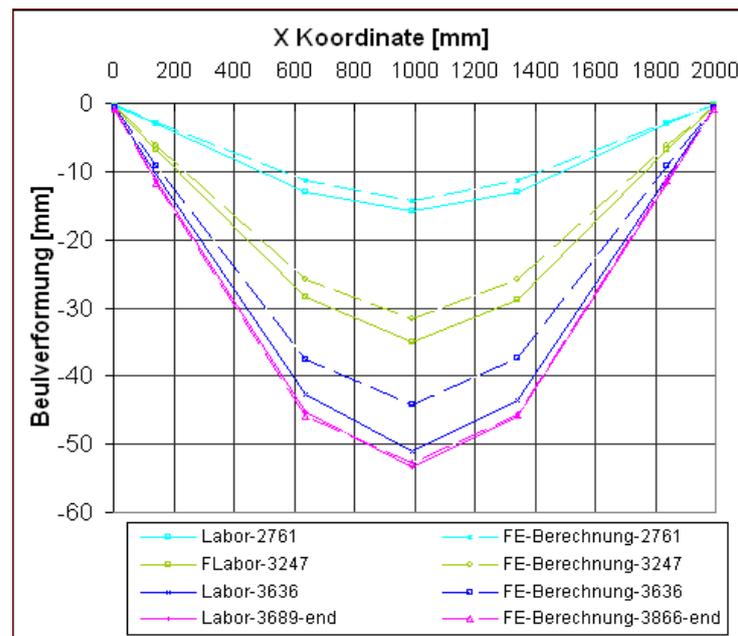


Bild 4-255 Horizontale Biegelinie-200-03

4.5 Schlussfolgerung der Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass die Versuchskörper der Beulserien 50-00 und 75-00 ein Druckversagen aufweisen. Nach der numerischen Simulation wurde in beiden Fällen die Druckfestigkeit im Bereich der Plattenmitte erreicht. Bei der Beulserie 75-00 ist zu berücksichtigen, dass die gewünschte Vorauslenkung beim Versuch nicht erzielt wurde.

Bei zunehmenden Schlankheiten wurden zwei Stellen im Versuchskörper am meisten beansprucht, nämlich die vertikalen Ränder (Einspanstellen A) und die Plattenmitte (B). Die Analyse der numerischen Berechnung zeigt, dass mit dem Steifigkeitsverlusts der Plattenmitte die Beulverformung sehr stark zunimmt. Die horizontalen Zugbeanspruchungen verlagern sich nach diesem Zeitpunkt mehr an den Einspanstellen (Innenseite), infolgedessen dehnen sich diese Bereiche (A) sehr stark. Dieses Verhalten wird mit den ausgeprägten Rissbildungen, die im Versuch beobachtet wurde, bestätigt. Ab der Beulserie 150-00 wurde auch gesehen, dass die Normalkraft nach diesem Zeitpunkt erneut zunimmt, dieses Verhalten deutet auf ein überkritisches Tragverhalten des Versuchskörpers hin. Im Versuch wurden ab der Beulserie 150-00 ausgeprägte Risse nicht nur an der Innenseite sondern auch an der Außenseite der vertikalen Ränder beobachtet. Es wird damit das Durchreißen der ganzen Wandstärke vermutet.

Ab der Beulserie 150-00 bilden sich im mittleren Bereich des Versuchskörpers nicht nur hohe Zugspannungen in horizontaler Richtung sondern auch in vertikaler Richtung. Ein eindeutiger hoher Einfluss dieser Beanspruchung wurde bei der Beulserie 200-00 beobachtet. Die Versuchsergebnisse weisen nicht nur zahlreiche vertikale Risse sondern auch klar horizontale Rissbildungen in der Plattenmitte auf. Damit ist zu erkennen, dass je größer die Schlankheit des Versuchskörpers, desto stärker wird der Einfluss der Membranzugspannungen.

Der ausgeprägte Unterschied der Wandstärke der Platte, der aufgrund der Betondruck und der Nachgiebigkeit der Schalung entsteht, verursachten bei den großen Beulserien einer Verschiebung der Beulverformung zum oberen Teil der Platte. Es wurde auch eine Erhöhung in der Tragfähigkeit der Versuchskörper beobachtet.

5 Zum Tragverhalten der Versuchskörper

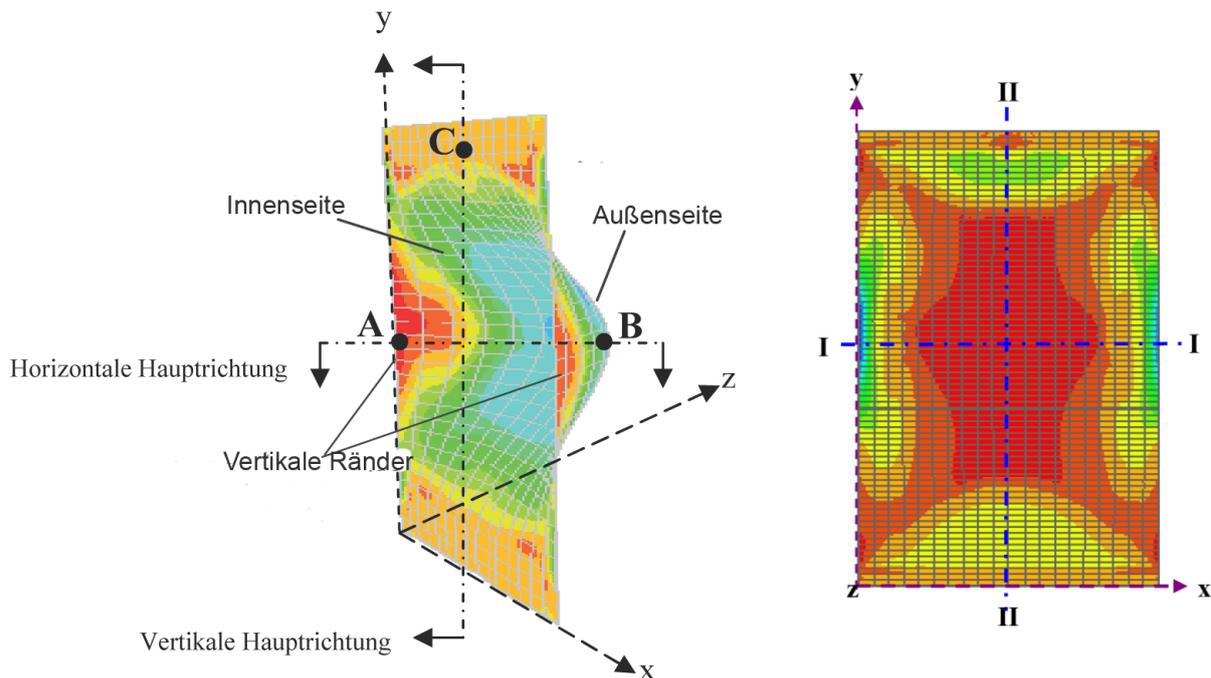


Bild 5-1 Bezeichnungen in der Scheibe

Um die Untersuchung des Beulverhaltens zu vereinfachen wurden im Bild 5-1 einige Bezeichnungen klar definiert. Für die folgende Abhandlung wurde von jeder Beulserie der Versuch ausgewählt, bei dem die Ergebnisse mit den numerischen Ergebnissen am besten übereinstimmen.

Für jede Beulserie wurden die Ergebnisse mit Hilfe von Interaktionsdiagrammen analysiert. Sie zeigen die Entwicklung der inneren Normalkräfte (n_x , n_y) und Biegemomente (m_{yx} , m_{xy}) in den relevanten Punkten der Platte (A, B, C). Um die inneren Kraftgrößen auf anschauliche Art und Weise der symmetrischen Querschnittstragfähigkeit (m,n) gegenüberstellen zu können, werden die Biegemomente als Absolutwerte (positives Vorzeichen) eingetragen.

Die Ergebnisse werden auch in einem Last-Beulverformungs-Diagramm (Verschiebung u_z aus der Ebene in B) dargestellt. In dem Kurvenverlauf werden relevante Zeitpunkte, an denen markante Änderungen eintreten, nummeriert. Diese Zeitpunkte werden auch in den Interaktionsdiagrammen eingetragen und ausführlich untersucht. Damit wird der Zusammenhang der einzelnen Beanspruchungslinien untereinander hergestellt

Die Materialversagenskurve (Querschnittstragfähigkeit) wird in erster Linie unter Verwendung von Arbeitslinien für einaxiale Belastungen per Handrechnung bestimmt. Aufgrund der tatsächlich aber zweiaxialen Spannungszustände in der Scheibe ist die Versagenskurve veränderlich in Abhängigkeit von der jeweils vorhanden Quernormalspannung.

Zur besseren Veranschaulichung einzelner Punkte des Versagens werden zusätzliche Versagenskurven für ausgewählte, im Versuch relevante Querspannungen dargestellt. Jene Schnittkraftkombinationen, die zur Rissbildung führen werden durch eine Gerade im n - m -Diagramm dargestellt.

Alle Diagramme enthalten zusätzlich die Schnittkraftentwicklung aus der materiell linearen aber geometrisch nichtlinearen Lösung an denselben Stellen. Dadurch lassen sich die Einflüsse der

Nichtlinearität des Materials gut von den geometrischen Nichtlinearitäten (große Verformungen) trennen.

Um das Tragverhalten des Versuchskörpers besser zu verstehen, wurde die Verteilung der bezogenen Normalkraft n_x im Versuchskörper während der gesamten numerischen Berechnung analysiert. Die Analyse wurde an den meist beanspruchten Bereichen der Scheibe, nämlich entlang der horizontalen Hauptachse durchgeführt (Bild 5-1, links, I-I) und die Werte in einem Diagramm dargestellt. Von den gleichen Stellen werden zusätzlich die bezogenen Momente m_{xy} ausführlich analysiert. Die Werte werden von den festgelegten Zeitpunkten in dem Last-Verschiebungsdiagramm entnommen.

Für eine ausführliche Analyse der Versagensstellen des Versuchskörpers werden zusätzlich an den Einspannstellen (A) und an der Scheibenmitte (B) eine Untersuchung des Spannungs- und Dehnungsverhaltens entlang der Wandstärke durchgeführt. Eine Schilderung des Spannungsverteilungs-Diagramms über die Dicke mit einigen definierten Parametern ist im Bild 5-2 dargestellt.

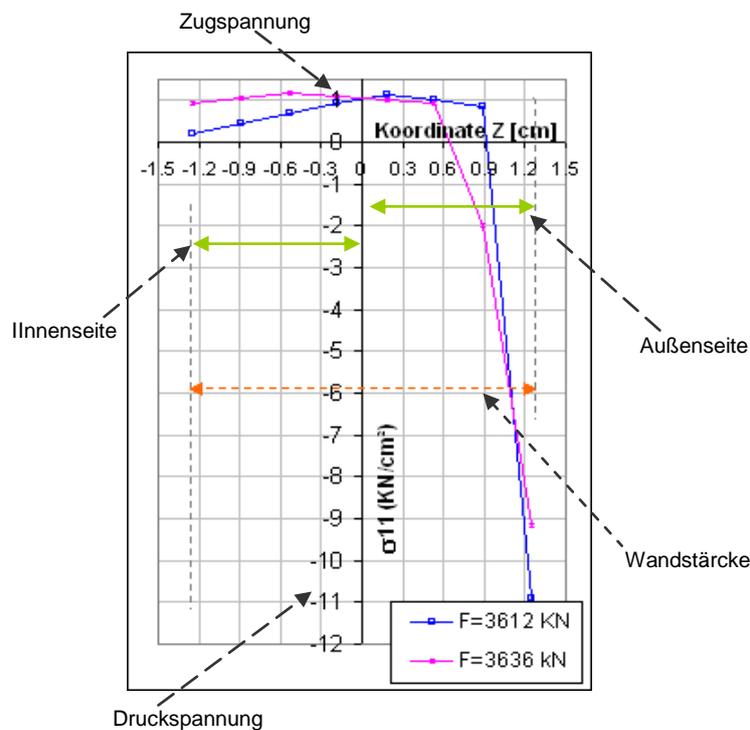


Bild 5-2 Bezeichnungen in der horizontalen Spannungsverteilung über die Dicke

5.1 Tragverhalten der Beulserie 50-00 (Schlankheit 15)

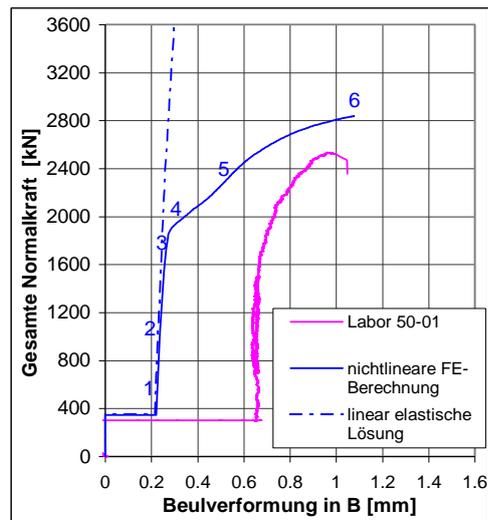


Bild 5-3 Last-Verschiebungsdiagramm des Versuchskörpers 50-01

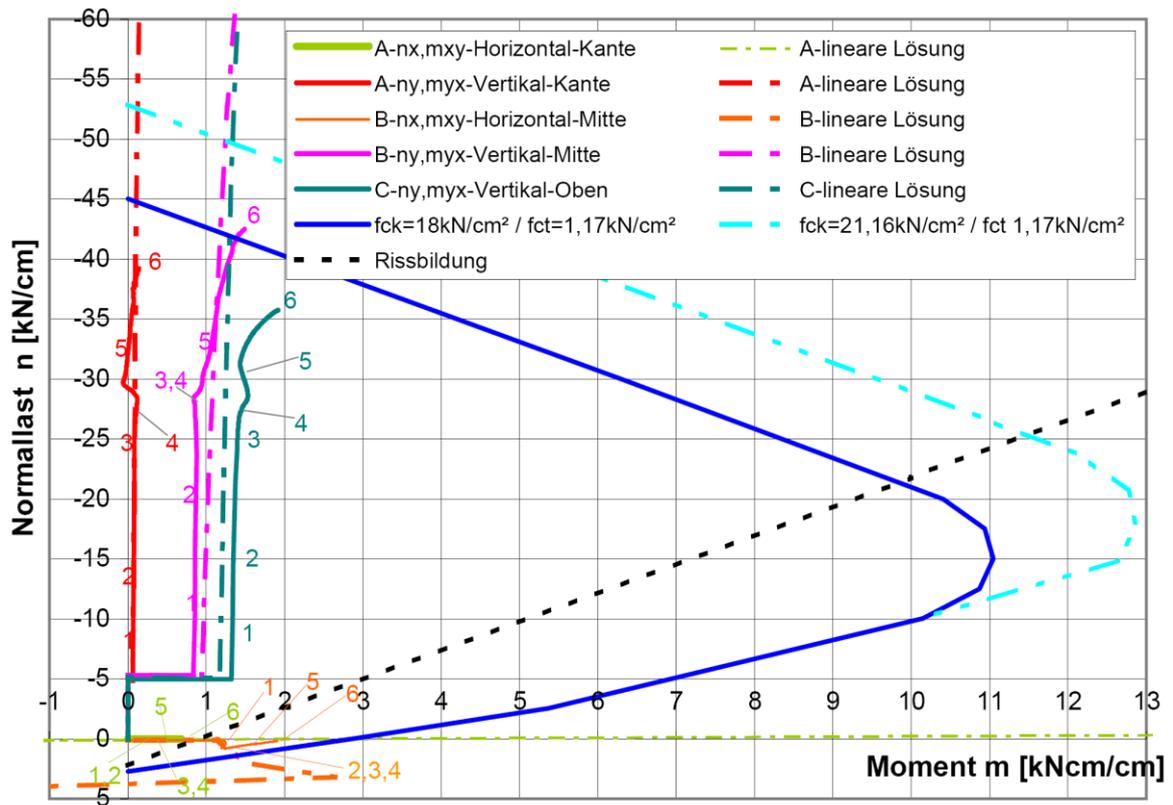


Bild 5-4 Schnittkraftentwicklung des Versuchskörpers 50-01

Für die Analyse des Tragverhaltens dieser Beulserie wurde der Versuchskörper 50-01 ausgewählt. Die numerische Ergebnisse zeigen, dass die Verteilung der bezogenen Normalkraft sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung (Bild 5-5 rechts, entlang I-I und II-II) annähernd konstant ist. Erst am Ende der numerischen Berechnung beteiligt sich der mittlere Bereich der Platte etwas mehr an der Lastübernahme. Gemäß dem Schnittkraftentwicklungs-Diagramm (Bild 5-4, orange Kurve) entstehen bereits beim Auslenken vertikale Risse in der Scheibenmitte (B), die aber keinen wesentlichen Einfluss auf das Tragverhalten haben.

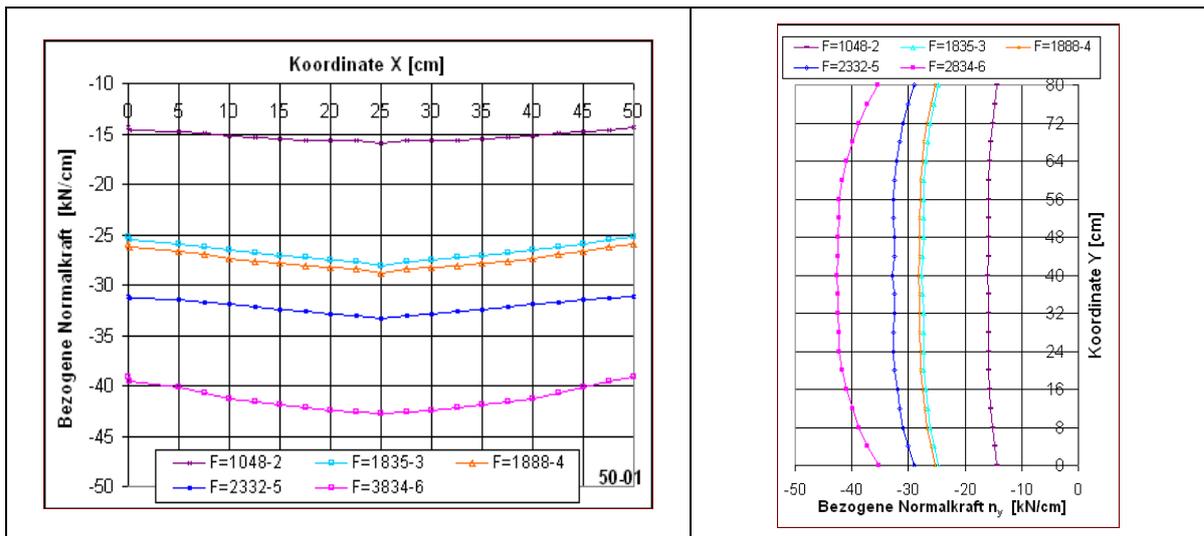


Bild 5-5 Verteilung der bezogenen Normalkraft n_y über die Breite (I-I) (links) und Höhe (II-II) (rechts) des Versuchskörpers 50-02

Zum [Zeitpunkt 3](#) nähert sich die horizontale Beanspruchung in B (Bild 5-4, orange Kurve) zur Versagenskurve des Querschnitts (Bild 5-4, blaue Linie). Dieses Verhalten signalisiert das Erreichen der horizontalen Querschnittstragfähigkeit in der Scheibenmitte. Damit verliert die Plattenmitte an Steifigkeit und bewirkt ab dem Zeitpunkt eine progressive Erhöhung der Beulverformung in B (Bild 5-3, blaue Kurve). Im Last-Verschiebungsdiagramm ist zu diesem Zeitpunkt klar eine Trennung der linearen von der nicht linearen Lösung zu erkennen (Bild 5-3, blaue gestrichelte Linie).

Anders als bei den großen Schlankheiten nehmen nach dem Zeitpunkt 3 die vertikalen Momente (m_{yx}) in B und in C nur unwesentlich zu (Bild 5-4, rosa und dunkelgrüne Kurve). Das zeigt den geringen Einfluss des Steifigkeitsverlusts des horizontalen Systems auf das gesamte Tragverhalten. Daher weist die vertikale Normalkraft n_y in der Scheibenmitte (und in C) und im Unterschied zu den großen Beulserien eine progressive Zunahme auf, bis die vertikale Querschnittstragfähigkeit in B zum Zeitpunkt 6 erreicht wird. (Bild 5-4, rosa Kurve, Zeitpunkt 6 - die vertikale Beanspruchung erreicht die Versagenslinie).

Entsprechend dieses Verhaltens bilden sich hohe Druckspannungen im mittleren Bereich der Platte, die letztendlich das Druckversagen des Bereiches hervorruft. In der Analyse der vertikalen Spannungsverteilung über die Dicke in B ist dieses Verhalten durch die Bildung von hohen Druckspannungen in der ganzen Wandstärke (Bild 5-6, rosa Linie) zu erkennen.

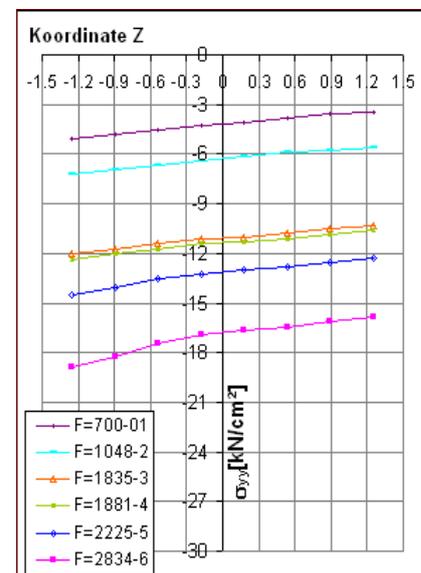


Bild 5-6 Vertikale Spannungsverteilung über die Dicke in B

Wegen des großen Unterschiedes der verwendeten Auslenkungskraft in der FE- Simulation und der tatsächlichen aufgetragenen Vorauslenkung im Labor (Bild 5-3), haben die Ergebnisse der numerischen Traglastberechnungen entsprechend verminderte Aussagekraft. Unabhängig davon ist die Versagensform sehr klar. Es handelt sich um ein Druckversagen mit leichter Biegung. Im Unterschied zu den größeren Beulserien bleiben die Ränder der Scheibe für diese Schlankheit ungerissen (Bild 5-4, grüne Kurve).

5.2 Tragverhalten der Beulserie 75-00 (Schlankheit 22)

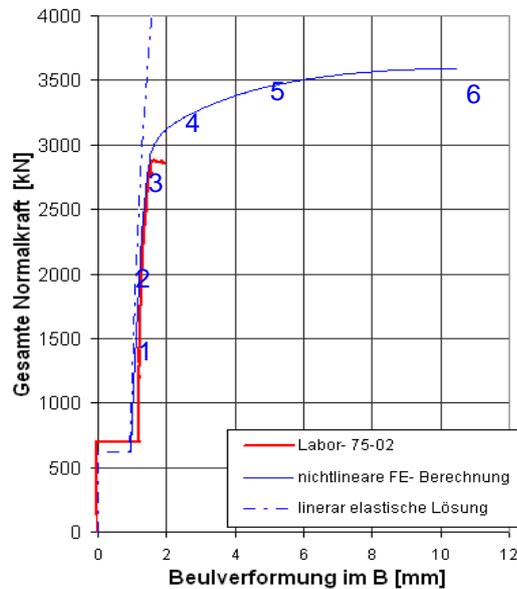


Bild 5-7 Last-Verschiebungsdiagramm des Versuchskörpers 75-02

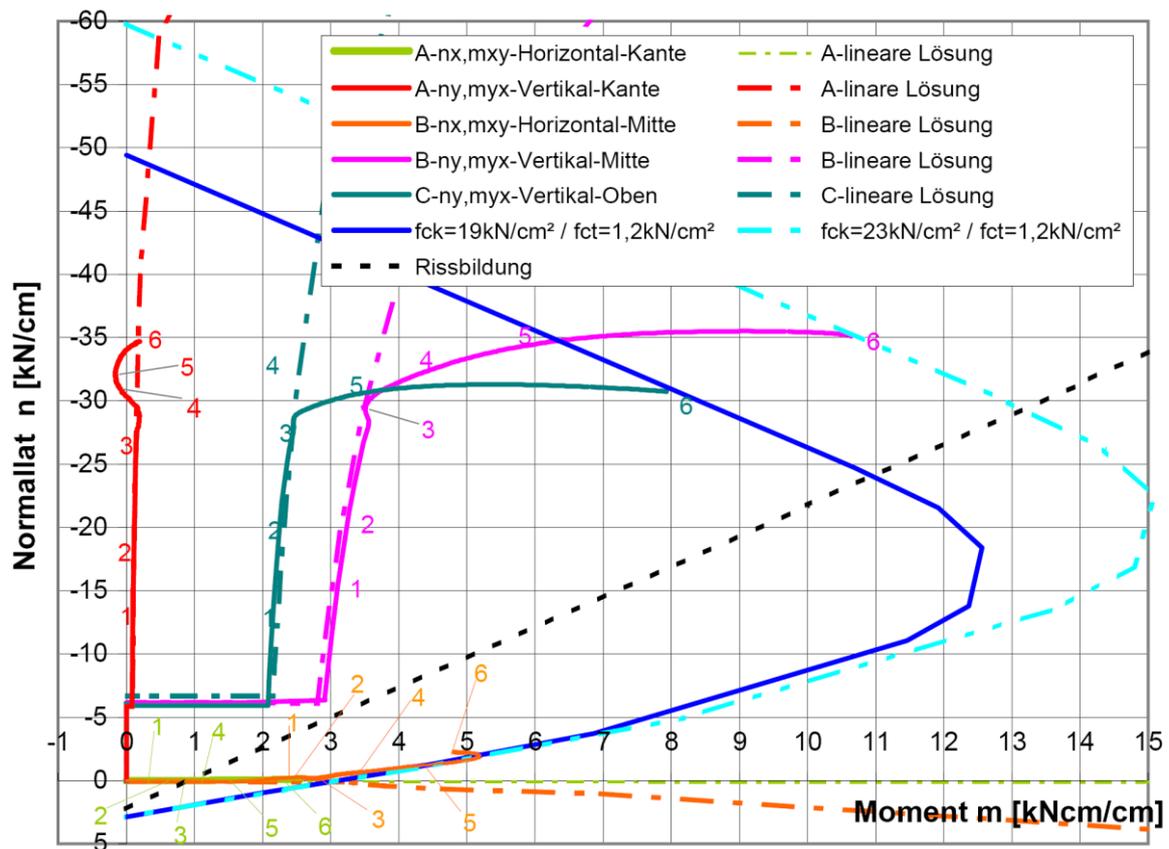


Bild 5-8 Schnittkraftentwicklungsdiagramm des Versuchskörpers 75-02

Für die Analyse des Tragverhaltens dieser Beulserie wurde der Versuchskörper 75-02 ausgewählt. Ähnlich wie bei der Schlankheit 15 verteilt sich die bezogene Normalkraft (n_y) (Bild 5-9) während des gesamten Versuches ziemlich gleichmäßig über die ganze Scheibe. Erst am Ende der numerischen Berechnung beteiligt sich die Scheibenmitte (B) eher wenig an der Lastübernahme (Bild

5-9, links, rosa Linie). Ist jedoch dieses Verhalten verglichen mit den großen Schlankheiten nicht relevant.

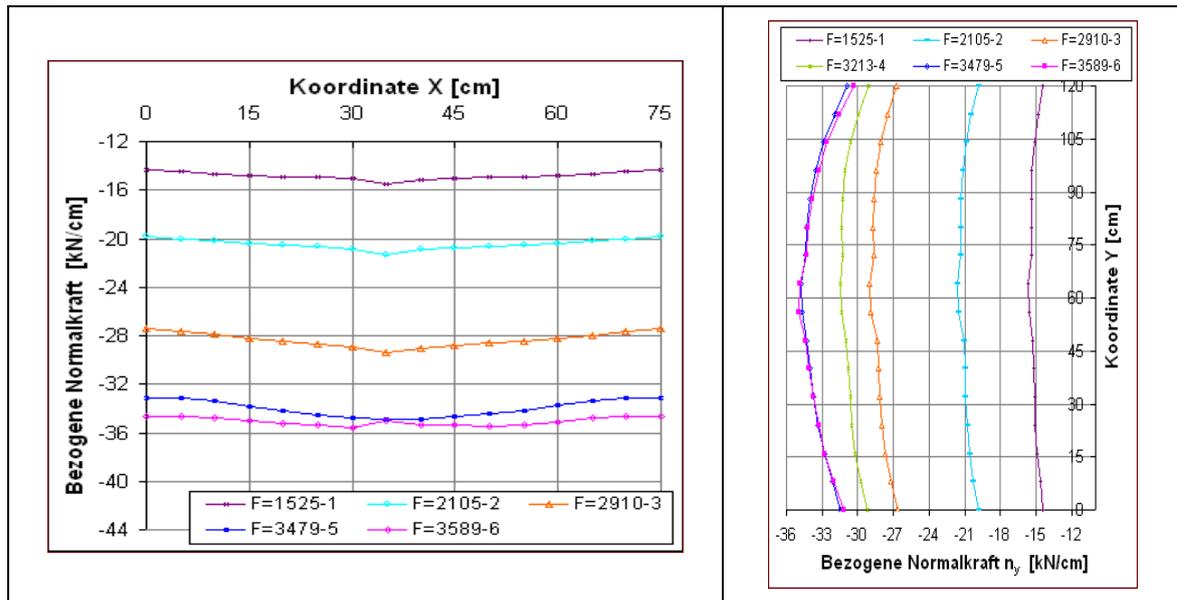


Bild 5-9 Verteilung der bezogenen Normalkraft n_y über die Breite (I-I) (links) und über die Höhe (II-II) (rechts) des Versuchskörpers 75-02

Nach dem Schnittkraftentwicklungs-Diagramm wird mit der Vorauslenkung der mittlere Bereich der Platte gerissen (Bild 5-8- orange Kurve). Bereits zum Zeitpunkt 1 nähert sich der horizontale Kurvenverlauf zur Versagenskurve des Querschnitts (Bild 5-8- orange Kurve nähert sich zur blauen Kurve). Das bewirkt aber keinen relevanten Einfluss auf die Steifigkeit des Systems.

Zum [Zeitpunkt 3](#) wurde die horizontale Querschnitttragfähigkeit in der Scheibenmitte erreicht (Bild 5-8- orange Kurve, Zeitpunkt 3). Zum gleichen Zeitpunkt entstehen die ersten vertikalen Risse an den Einspannstellen (A) (Bild 5-8, grüne Kurve, überschneidet die Rissbildungsgerade). Damit verliert das horizontale System an Steifigkeit und verursacht eine progressive Zunahme der Beulverformung in B (Bild 5-7, blaue Kurve, Zeitpunkt 3). Zu diesem Zeitpunkt trennt sich auch in dem Last-Verschiebungsdiagramm die lineare von der nicht linearen Lösung (Bild 5-7, blaue gestrichelte Linie).

Im Unterschied zur Serie 50-00 bewirkt der Steifigkeitsverlust des horizontalen Systems eine starke Erhöhung des vertikalen Momentes (m_{yx}) sowohl in B als auch in C (Bild 5-8, rosa und dunkelgrüne Kurve, nach dem Zeitpunkt 3). Die Normalkraft (n_{yx}) dagegen nimmt nur wenig zu und verhält sich ab dem Zeitpunkt 5 an beiden Stellen (B und C) annähernd konstant.

Anders als das konventionelle lineare Beulverhalten ist auch ab dem [Zeitpunkt 3](#) mit der stetigen Entwicklung der Beulverformung in B und den gleichzeitigen abnehmenden Zugspannungen am Biegezugrand, die Entstehung von horizontalen Druckkräften in der Scheibenmitte zu erkennen, die allmählich mit zunehmenden Belastung steigen (Bild 5-8- orange Kurve).

Zum [Zeitpunkt 6](#) mit dem Erreichen der vertikalen Beanspruchung in B der Versagenskurve (Bild 5-8- rosa Kurve gelangt an die hellblaue Kurve) tritt in der Druck-Druck-Zone das endgültige Versagen des Systems ein, es handelt sich um ein Bruchspannungszustand.

Da am Ende der FE-Berechnung die Last-Beulverformungskurve bereits der Horizontalen annähert und die Normalkraft (n_{yx}) in B und C zu dem Zeitpunkt bereits stagnieren, zeigt dieses

Verhalten, dass auch ohne vertikales Materialversagen ein lokales Maximum der aufnehmbaren Last erreicht ist.

Nach dem Schnittkraftentwicklungsdiagramm wurde die horizontale Querschnittstragfähigkeit an den Einspannstellen nicht erreicht (Bild 5-8, Zeitpunkt 6- grüne Kurve), jedoch die Zugspannungsverteilung über die Dicke in A zeigt dass die Risse cirka über 70 % der Wandstärke erreichen (Bild 5-10, rosa Kurve). Im Vergleich zur Beulserie 50-00 erreichen die Beanspruchungen in A beträchtlich große Werte, deswegen sollte ab dieser Schlankheit die Bedeutung der Einspannstelle (A) des horizontalen Systems berücksichtigt werden.

Im Versuch wurde ein klassischer Druckbruch mit typischem Schubversagen schräg aus der Ebene beobachtet (Bild 4-113). Da im Versuch nach Zeitpunkt 3 sich die Last nicht mehr steigern lässt (Bild 5-7, rote Kurve), ist eine wesentliche niedrige Druckfestigkeit des Versuchskörpers gegenüber dem Prüfkörper (Würfeln), an den die Druckfestigkeit ermittelt wurde, zu erkennen. Dieses Verhalten erklärt sich mit der Verteilung der Fasern, die wegen der geringeren Wandstärke der Platte einen schwachen Faserorientierungszustand gegenüber der Faserverteilung im Würfel ergibt. Bei den Würfeln beschränkt sich dieser schwächende Faserorientierungszustand auf die Randzonen.

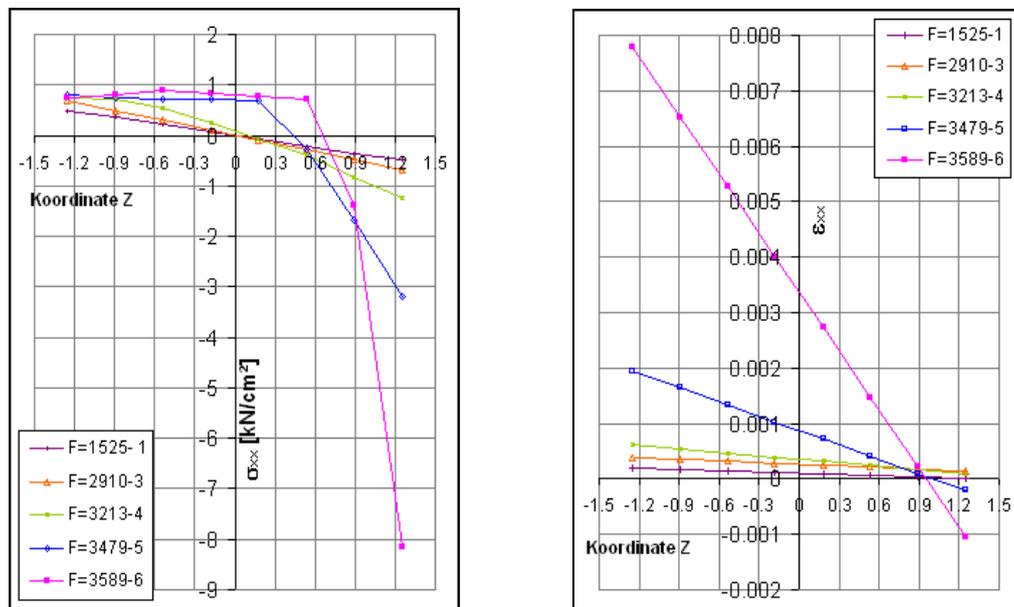


Bild 5-10 Horizontale Spannungs- Dehnungsverlauf über die Dicke im A

5.3 Tragverhalten der Beulserie 100-00 (Schlankheit 30)

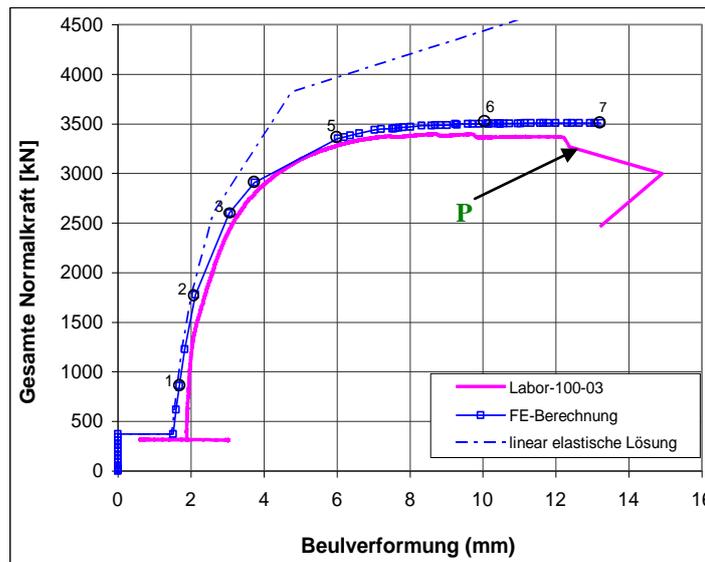


Bild 5-11 Last Beulverformungsdiagramm

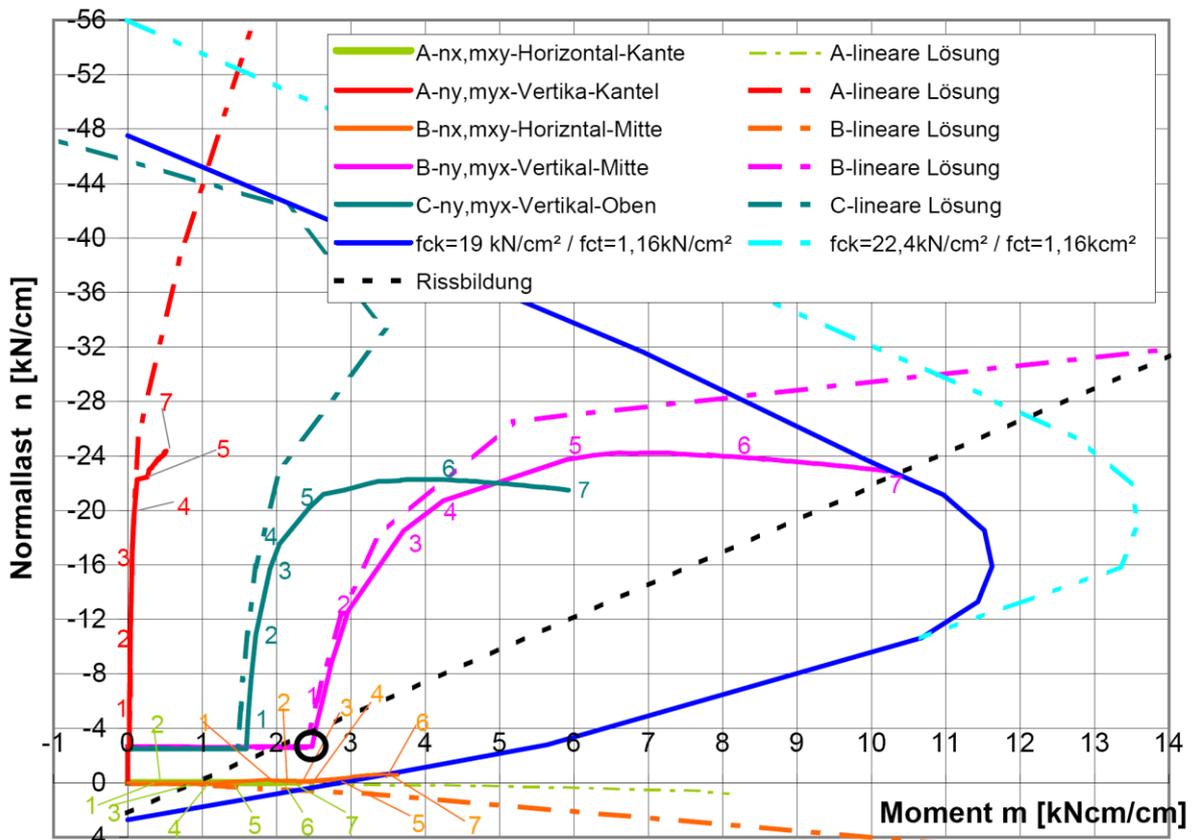


Bild 5-12 Schnittkraftentwicklung und Last Beulverformungskurve des Versuchskörpers 100-03

Für die Analyse des Tragverhaltens dieser Beulserie wurde der Versuchskörper 100-03 ausgewählt. Das Last-Beulverformungsdiagramm (Bild 5-11) weist im Unterschied zu den bis jetzt analysierten Beulserien keinen ausgeprägten Knick, sondern einen allmählich zunehmenden Kurvenverlauf auf. Der Grund dafür liegt an der Schlankheit, die im Vergleich zu den Festigkeitseinflüs-

sen dominanter werden. Die Analyse der numerischen Berechnung zeigt, dass für diese Beulserie die ideale Beullast zum ersten Mal unter dem reinen Materialversagen liegt (Bild 5-40).

Das Last-Beulverformungs-Diagramm (Bild 5-11) weist auch ähnlich wie bei dem Versuch 75-02 nach Erreichen der horizontalen Biegetragfähigkeit in B (zum Zeitpunkt 5) eine ziemlich konstante Normalkraft (F_y) auf, die Beulverformung dagegen nimmt stark zu.

Die bezogene Normalkraft (n_y) entlang der horizontalen Hauptachse (Bild 5-1 rechts, entlang I-I) zeigt in der ersten Phase eine gleichmäßige Verteilung (Bild 5-13).

Mit zunehmender Belastung wird der mittlere Bereich (B) etwas mehr als der restliche Teil der Scheibe beansprucht. Nach dem Steifigkeitsverlust der Scheibenmitte (Bild 5-12, orange Kurve, Zeitpunkt 5) nehmen die Werte in B stetig ab (Bild 5-13, blaue Linie), daher wird nach diesem Zeitpunkt die weitere Erhöhung der Last etwas mehr von den vertikalen Rändern übernommen. Zum Zeitpunkt 7 ist zu erkennen, dass sich die vertikale Ränder eindeutig mehr an der Lastübernahme beteiligen (Bild 5-13, rosa Kurve). Im Vergleich zu den größeren Schlankheiten ist die Umlagerung der Normalkraft zu den Einspannstellen in sehr geringem Ausmaß.

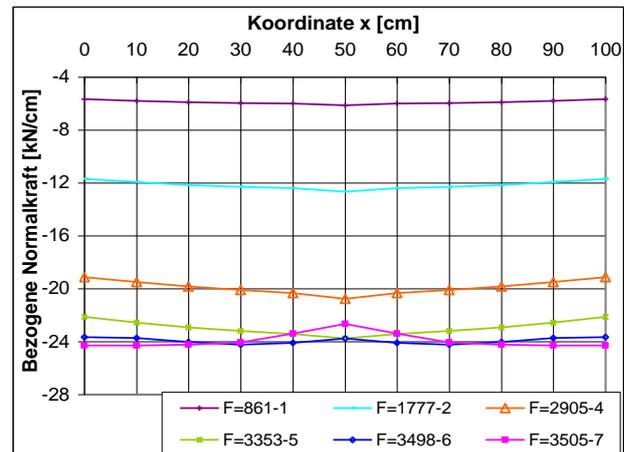


Bild 5-13 Verteilung der bezogenen Normalkraft n_y über die Bereiche (I-I) des Versuchskörper

Anders als bei den bis jetzt untersuchten Beulserien wurde in diesem Fall festgestellt, dass die Vorauslenkung (F_z) horizontale (Bild 5-12, orange Kurve) und vertikale (Bild 5-12, rosa Kurve) Risse in B hervorruft. Das führte zu einem generell weicherem Verhalten des Versuchskörper. Die horizontalen Risse wurden aber mit zunehmender Last wieder überdruckt.

Zum [Zeitpunkt 4](#) entstehen die ersten Risse an den vertikalen Rändern (Bild 5-12, grüne Kurve überschneidet die Rissbildungsgerade), damit verliert das horizontale System an Steifigkeit und bewirkt in der Scheibenmitte eine schnellere Erhöhung der Beulverformung (Bild 5-11, Zeitpunkt 4 zu 5). Dieses Verhalten führt auch zur stärkeren Zunahme des vertikalen Momentes (m_{yx}) sowohl in B als auch in C (Bild 5-12, dunkelgrüne und rosa Kurve). Im Unterschied zur Schlankheit 22 nimmt die bezogene Normalkraft n_y in der Scheibenmitte nach dem Zeitpunkt 5 ($n_y = 24$ kN) ab.

Zum [Zeitpunkt 5](#) wird die horizontale Querschnitttragfähigkeit in der Scheibenmitte erreicht (Bild 5-12, orange Kurve) und anders als das konventionelle lineare Beulverhalten bilden sich ab dem Zeitpunkt keine Membranzugspannungen aus, im Gegenteil weist die bezogene Normalkraft n_x mit der allmählichen Entwicklung der Beulverformung und zugleich abnehmenden Zugspannungen an dem Biegezugrand klare Druckkräfte in der Scheibe (B) auf (Bild 5-12, orange Kurve und Bild 5-14, grüne Kurve).

In der Verteilung der bezogenen Normalkraft (n_x) (Bild 5-14) entlang der horizontalen Achse (entlang I-I) ist die progressive Zunahme der Druckkräfte in der Scheibenmitte deutlich zu erkennen (Bild 5-14, ab Zeitpunkt 3, grüne Kurve). Im Allgemeinen weist die Scheibenmitte wegen des frühen Auftretens von Rissen in B bereits zum Zeitpunkt 1 ein weichereres Verhalten auf (horizontaler Richtung). Der steigende Moment m_{xy} in B nimmt nach Erreichen der horizontalen Biegetragfähigkeit ähnlich wie bei der Schlankheit 22 stetig zu.

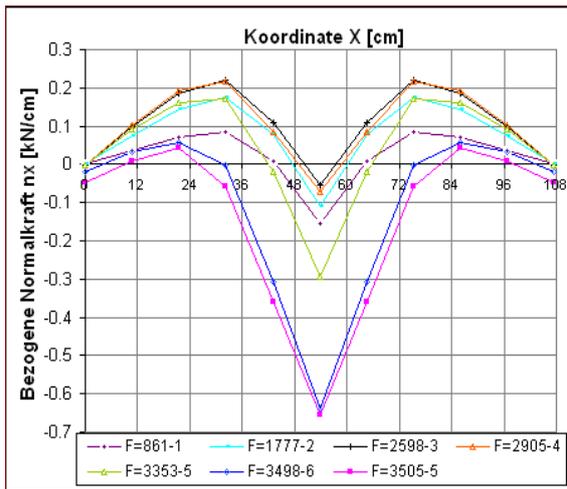


Bild 5-14 Bezogenen Normalkraft n_x über die Breite (I-I) des Versuchskörpers 100-03

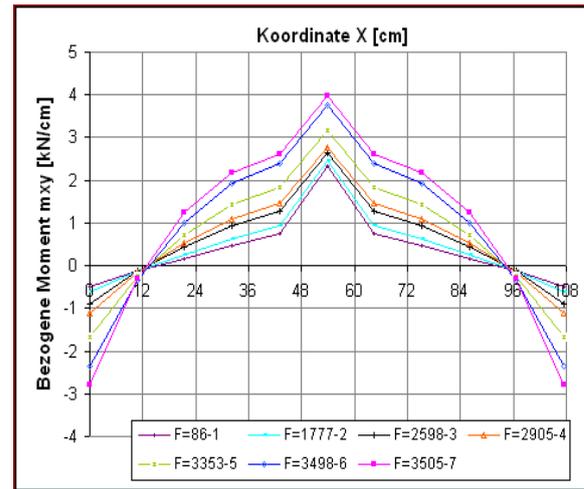


Bild 5-15 Bezogenen Moment m_{xy} über die Breite (I-I) des Versuchskörpers 100-03

Im Versuch wurde zum [Zeitpunkt 6](#) die maximale Normalkraft erreicht und kündigt mit dem Lastabfall (Bild 5-11, Punkt P) den endgültigen Bruch des Versuchskörpers an. Obwohl im Schnittkraftentwicklungs-Diagramm zu diesem Zeitpunkt das Erreichen der horizontalen Biegetragfähigkeit in A noch nicht deutlich zu erkennen ist, ist in der Spannungsverteilung über die Dicke in A zu sehen, dass die Zugspannungswerte in der Innenseite der Scheibe bereits zum Zeitpunkt 6 nicht mehr viel zunehmen (Bild 5-16, blaue Kurve).

Das würde signalisieren, dass im Versuch zu diesem Zeitpunkt die Tragfähigkeit in A erreicht wurde. Im Labor weisen die Lokalisierungen von Rissen an den Einspannstellen das Überschreiten der Tragfähigkeit in dem Bereich auf.

Dieses Verhalten bewirkt eine rasche Umlagerung der Normalkraft an einen der Flansche (linke), der dann auf Druck versagt. Zu berücksichtigen ist auch, dass zum Zeitpunkt 7 die vertikale Beanspruchung in B (Bild 5-12, rosa Kurve) die Versagenkurve erreicht (Bild 5-12, dunkelblaue Kurve).

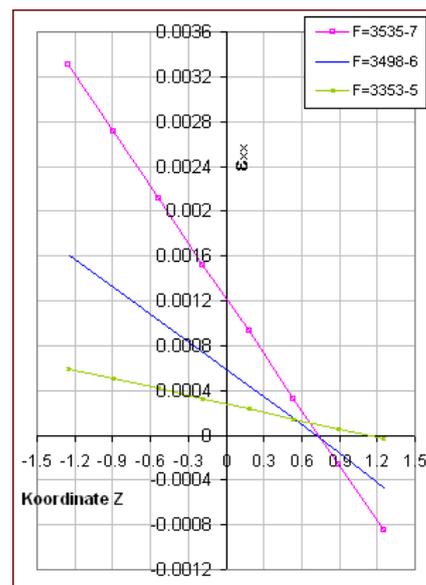
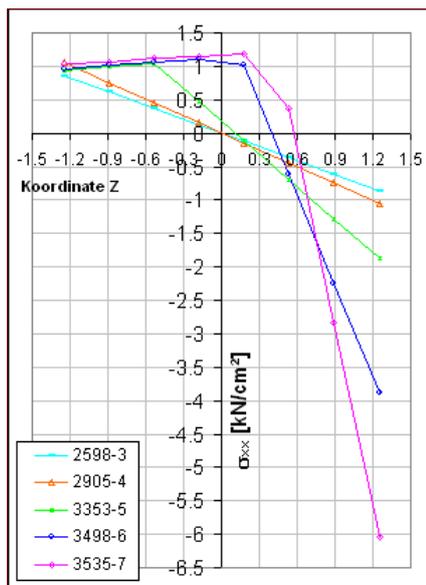


Bild 5-16 Horizontale Spannungs- Dehnungsverlauf über die Dicke in A

5.4 Tragverhalten der Beulserie 150-00 (Schlankheit 40)

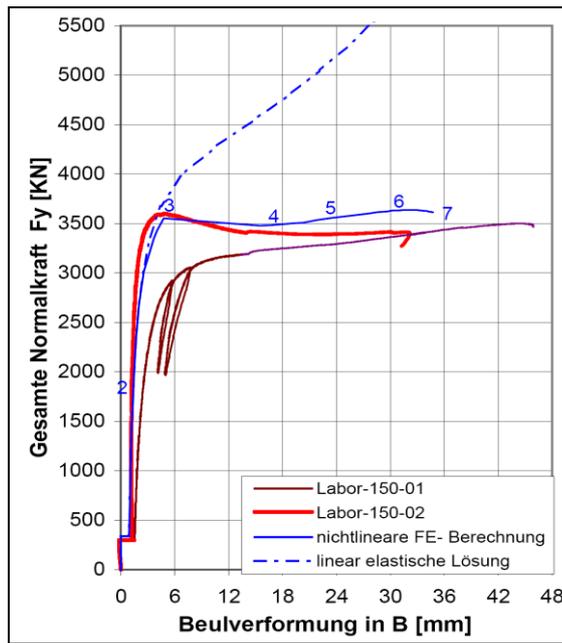


Bild 5-17 Last Beulverformungskurve des Versuchskörpers 150-02

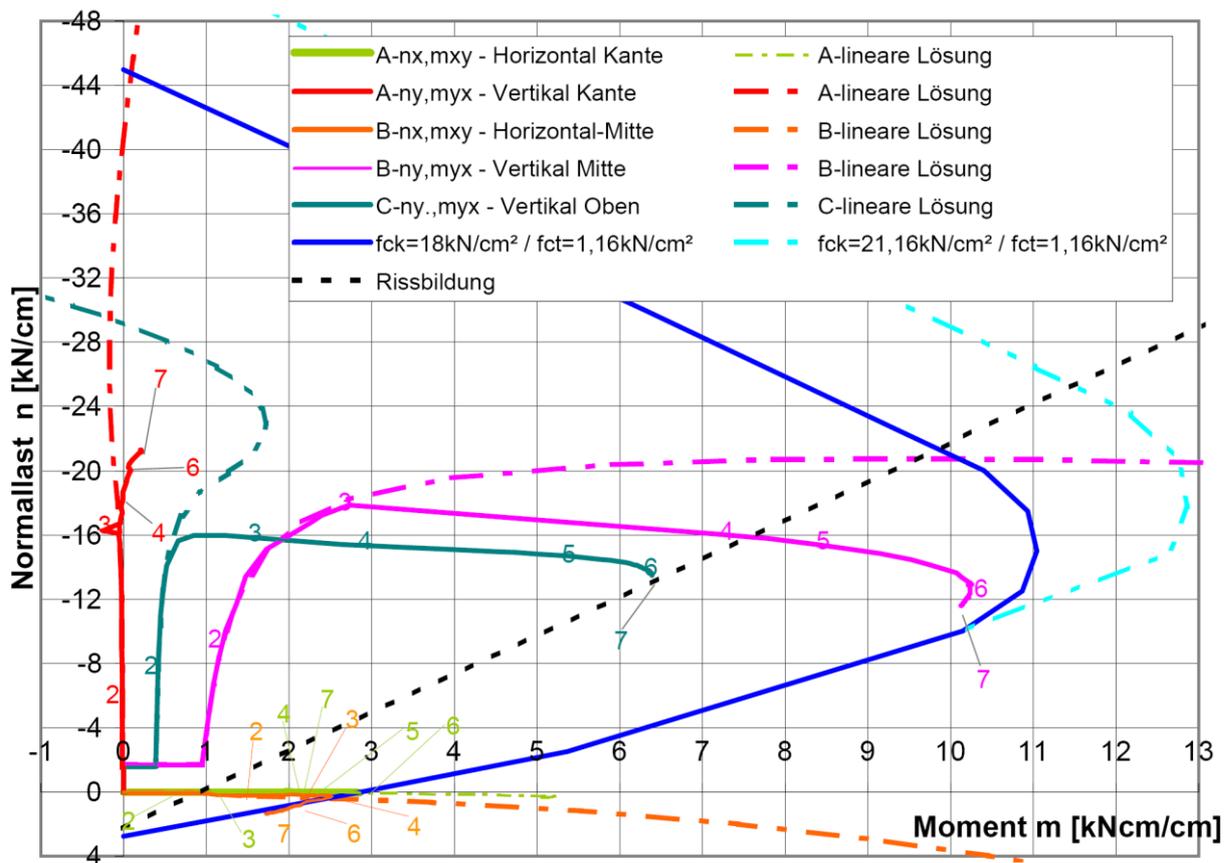


Bild 5-18 Schnittkraftentwicklung 150-02

Für die Analyse des Tragverhaltens dieser Beulserie wurde der Versuchskörper 150-02 ausgewählt. Nach der Auswertung der Laborergebnisse, wurde überprüft, ob die Tragfähigkeit im großen Teil von dem Unterschied der Wandstärke der Scheibe und nicht von der angebrachten Imper-

fektion beeinflusst wird. Zu diesem Zweck wurde der Versuchskörper 150-00 mit einer perfekten ebenen Fläche (2,5 cm Dicke) und unterschiedlichen Auslenkungskräften (Bild 5-19, 3 kN grüne Linie und 4 kN rote Linie) modelliert.

Die Ergebnisse, dargestellt in einem Lastverschiebungsdiagramm (Bild 5-19), wurden mit dem tatsächlichen Kurvenverlauf des Versuchskörpers 150-02 verglichen, welcher eine erhebliche Dicktoleranz der Scheibe zeigte (Bild 5-19, blaue Linie). Die Kurvenverläufe zeigen, dass die Tragfähigkeit mehr von den unterschiedlichen Wandstärken (Bild 5-19, blaue und grüne Kurve) und minimal von der angewendeten Imperfektion (Bild 5-19, rote und grüne Kurve) beeinflusst wird.

Um im Versuch den tatsächlichen Einfluss des oben genannten Parameters besser zu erkennen, sind die Laborergebnisse des Versuchskörpers 150-01 und 150-02 zusammen dargestellt (Bild 5-20). Geometrisch gesehen weisen beide Versuchskörper eine nicht gleiche aber sehr ähnliche Wandstärke auf. Der Versuch 150-01 wurde mit einer größeren Ausgangsauslenkungskraft (4 kN) als bei dem Versuch 150-02 (3 kN) durchgeführt. Die tatsächliche Wirkung dieses Unterschiedes zeigt keinen großen Einfluss auf die Tragfähigkeit, sondern eher mehr im Kurvenverlauf des Lastverschiebungs-Diagramms.

Während im Versuch 150-02 vor Erreichen der Beullast ein steiferes Verhalten der Platte und eine klare Stagnierung der Lastaufnahme zum Zeitpunkt 3 deutlich zu sehen ist, ist in dem Kurvenverlauf des Versuchskörpers 150-01 (Bild 5-20, rosa Verlauf) gut der Übergang von einem Stabilitätsproblem zum so genannten Spannungsproblem II. Ordnung zu erkennen. Dieses Beulverhalten im Labor stimmt in großen Teil mit dem theoretischen Beulverhalten überein.

Es wurde auch festgestellt, dass im Versuch 150-01 bereits die Vorauslenkung (4 kN) Risse in B hervorrufen. Die Vorauslenkung mit 3 kN löste keine Rissbildungen in B aus. Das erklärt das steifere Verhalten des Versuchskörpers 150-02 und den fast senkrechten Last-Verschiebungsverlauf bis zum Zeitpunkt 3 (Bild 5-20, blaue Kurve).

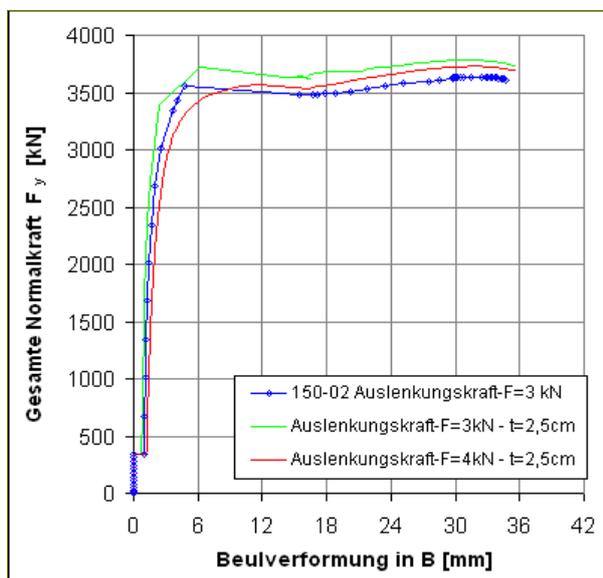


Bild 5-19 Vergleich der Last-Beulverformungs-Diagramm der Versuchsmodell 150-0 und 150-02

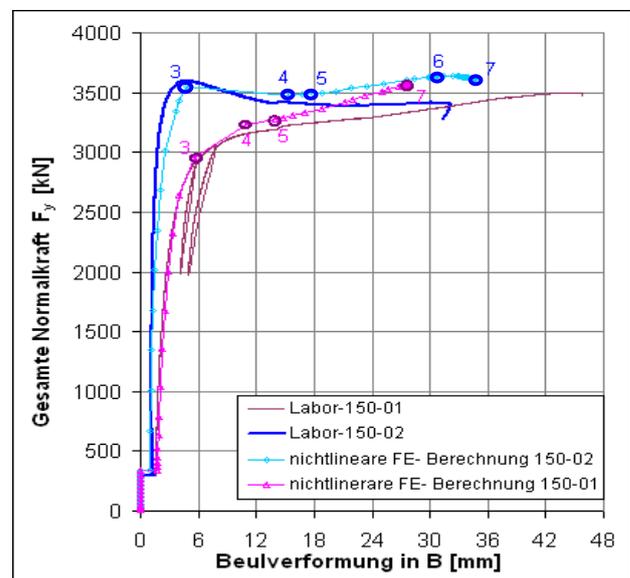


Bild 5-20 Last- Beulverformungsdiagramm der Versuchskörper 150-01 und 150-02

Die Analyse der Entwicklung der bezogenen Normalkraft (n_y) (Bild 5-21) entlang der horizontalen Hauptachse (Bild 5-1, entlang I-I) zeigt, dass sich mit dem Nachlassen der Steifigkeit im mittleren Bereich der Scheibe, die anfänglich gleichmäßige Verteilung der Belastung zu den Rändern umlagert.

Gemäß der numerischen Berechnung entstehen bereits zum Zeitpunkt 2 vertikale Risse in B (Bild 5-18, orange Kurve, Zeitpunkt 2), die aber keine große Wirkung im System bewirken. Erst zum

Zeitpunkt 3 zeigt die bezogene Normalkraft (n_y) das Erreichen der maximalen aufnehmbaren Last in der Plattenmitte (Bild 5-21, hellblaue Kurve) an. Dieses Verhalten ist im Vergleich zu dem bis jetzt analysierten Serien sehr deutlich zu erkennen und signalisiert das Erreichen der kritischen Beullast im System. Zu diesem Zeitpunkt (3) trennt sich auch eindeutig die lineare von der nicht linearen Lösung (Bild 5-17, blau gestrichelte Kurve, Zeitpunkt 3).

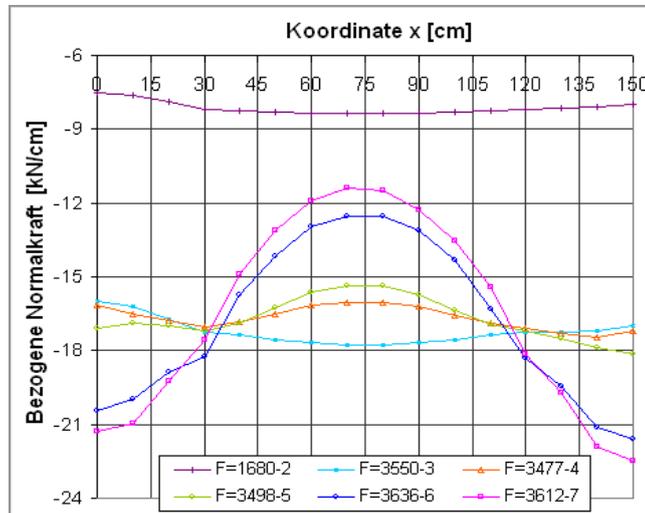


Bild 5-21 Verteilung der bezogenen Normalkraft (n_y) über die Breite (I-I) des Versuchskörpers

Zum [Zeitpunkt 3](#) ist die maximale Normalkraft im Versuch erreicht (Bild 5-17, rote Kurve). Der Lastabfall nach diesem Zeitpunkt fällt mit der Entstehung der ersten Risse an den Einspannstellen (A) zusammen (Bild 5-18, Zeitpunkt 4- hellgrüne Kurve). Damit verliert das horizontale System an Steifigkeit. Dieses Verhalten löst eine rasche Erhöhung der Beulverformung (Bild 5-20, Zeitpunkt 3 bis 4) und die stärker Zunahme der vertikalen Momenten in B und C aus. Im Vergleich zur Schlankheit 30 hat die bezogene Normalkraft n_y in B zum Zeitpunkt 3 ein Maximum (Bild 5-18, Zeitpunkt 3- rosa Kurve).

Zum [Zeitpunkt 4](#) wird die horizontale Tragfähigkeit in der Plattenmitte erreicht (Bild 5-18, Zeitpunkt 4- orange Kurve). Zum gleichen Zeitpunkt bilden sich die ersten horizontalen Risse in der Scheibenmitte (Bild 5-18, Zeitpunkt 4- rosa Kurve).

Das vertikale System wird dadurch sehr weich und anders als bei den kleinen Schlankheiten erlaubt dieses Verhalten die Aktivierung eines Zugfelds (n_x) in horizontaler Hauptrichtung (Bild 5-18, orange Kurve, ab Zeitpunkt 4), das gegen den destabilisierenden Kräfte wirkt. Dieses neue Zugfeld ermöglicht die weitere Erhöhung der Normalkraft.

Es wird ab dem Zeitpunkt 4 die weitere Zunahme der Last nur bei gleichzeitiger Abnahme der vertikalen Druckkräfte in der Plattenmitte (n_y) möglich (Bild 5-27, rosa Kurve, ab Zeitpunkt 4). Mit zunehmenden horizontalen Rissen in B wird ein weiterer Anstieg der Last ermöglicht, die sich dann hauptsächlich zu den Einspannstellen (A) umlagert (Bild 5-21). Dieses Verhalten ist der Übergangspunkt von einem kritischen zu einem überkritischen Tragverhalten.

Anders als bei den kleinen Schlankheiten ist ab hier mit der Bildung der Membranzugspannungen eine klare Abnahme der Momente m_{xy} in der Plattenmitte zu erkennen (Bild 5-27, orange Kurve, ab Zeitpunkt 4). Dieses Verhalten ist wiederum durch die weitere Bildung horizontaler Risse in B zu erklären, die das weichere Verhalten der Plattenmitte verstärkt. In der Verteilung der bezogenen Momente m_{xy} entlang der Breite der Scheibe (Bild 5-23) ist sehr deutlich das Erreichen

der maximale Momente m_{xy} in der Scheibenmitte zum Zeitpunkt 4 und die Abnahme der Momente m_{xy} nach diesem Zeitpunkt geschildert.

In der horizontalen Spannungsverteilung über die Dicke in B ist ab dem Zeitpunkt 4 durch einen unregelmäßigen Kurvenverlauf die zunehmende Entstehung der horizontalen Risse in B zu erkennen (Bild 5-25, grüne Linie).

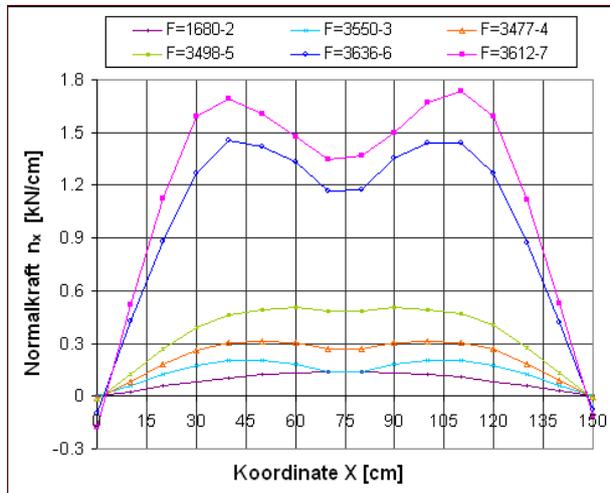


Bild 5-22 Verteilung der bezogenen Normalkraft n_x über die Breite (I-I) des Versuchskörpers 150-02

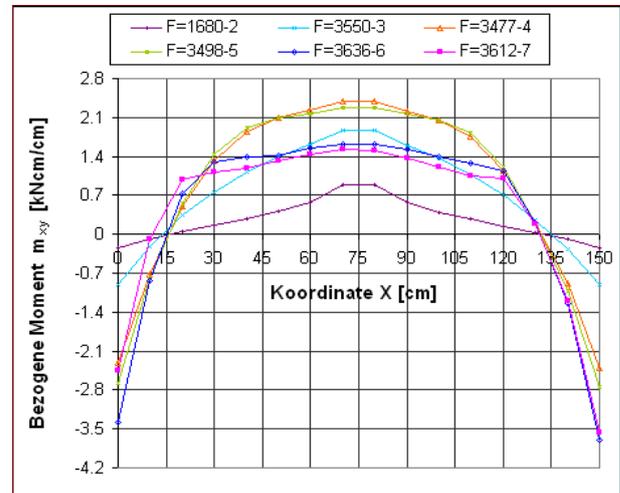


Bild 5-23 Verteilung der bezogenen Moment m_{xy} über die Breite (I-I) des Versuchskörpers 150-02

Zum [Zeitpunkt 6](#) ist bei der FE-Berechnung die maximale Normalkraft des gesamten Systems erreicht (Bild 5-20) und fällt mit dem Erreichen der horizontalen Biegetragfähigkeit m_{xy} an der Einspannstelle (A) zusammen (Bild 5-18, Zeitpunkt 6- grüne Verlauf). In der Spannungsverteilung über die Dicke in A ist dieses Verhalten durch einen deutlichen Rückfall des Zugspannungswertes zwischen Zeitpunkt 6 und 7 gut zu erkennen (Bild 5-24, blaue und rosa Linie).

Im Unterschied zur numerischen Simulation wurde im Versuch die maximale Normalkraft zum Zeitpunkt 3 erreicht und weist nachher keine signifikante Erhöhung auf (Bild 5-17, rote Kurve). Es wird aber darauf hingewiesen, dass um Risse im Versuchskörper analysieren zu können, der Versuch nicht bis zum endgültigen Bruch durchgeführt wurde.

Die Last verhält sich zwischen dem Zeitpunkt 4 und 6 ziemlich konstant. Jedoch bestätigt das Auftreten von Rissbildungen an beiden Seiten (Innen und Außen) der Einspannstellen (A) das lokale Querschnittsversagen. Stark ausgeprägte Rissbildungen wurden besonders entlang der Einspannstellen der Biegedruckseite (Innenseite) beobachtet.

Mit dem Erreichen der horizontalen Biegetragfähigkeit m_{xy} in A (Bild 5-23) wird das horizontale System sehr schnell weicher und die stabilisierende Wirkung lässt stark nach. Nach der Spannungsverteilung über die Dicke in A erreichen zu diesem Zeitpunkt (6) die Risse ca. über 75% der Wandstärke (Bild 5-24, blaue Linie).

Der vertikale Moment m_{yx} nimmt ab dem Zeitpunkt 6 in der Plattenmitte (B) kaum mehr zu (Bild 5-18- rosa Verlauf), dieses Verhalten kündigt das lokale Versagen in B an.

Zum [Zeitpunkt 7](#) zeigt die Schnittkraftentwicklungs-Diagramm, dass die vertikale Beanspruchung in B die Versagenskurve erreicht (Bild 5-18, blaue Kurve). Jedoch die Tatsache, dass die Matrixfestigkeit in cirka 90 % der Dicke in A überschritten wurde (Bild 5-24, rosa Linie) und dass die Momente (m_{xy}) (Bild 5-18, - grüne Kurve) an den Einspannstellen (A) bereits zum Zeitpunkt 6 nicht mehr zunehmen, kündigt dieses Verhalten das lokale Versagen dieses Bereiches an. Im

Versuch bestätigen die ausgeprägten Rissbildungen im Bereich der vertikalen Ränder der Platte diese Aussage.

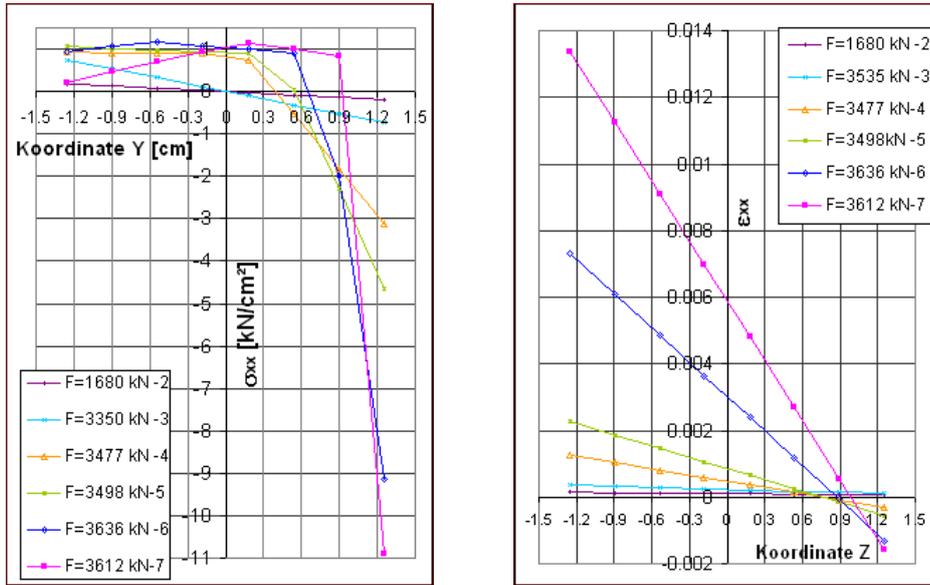


Bild 5-24 Horizontale Spannungs- Dehnungsverlauf über die Wandstärke in der Einspannstelle A

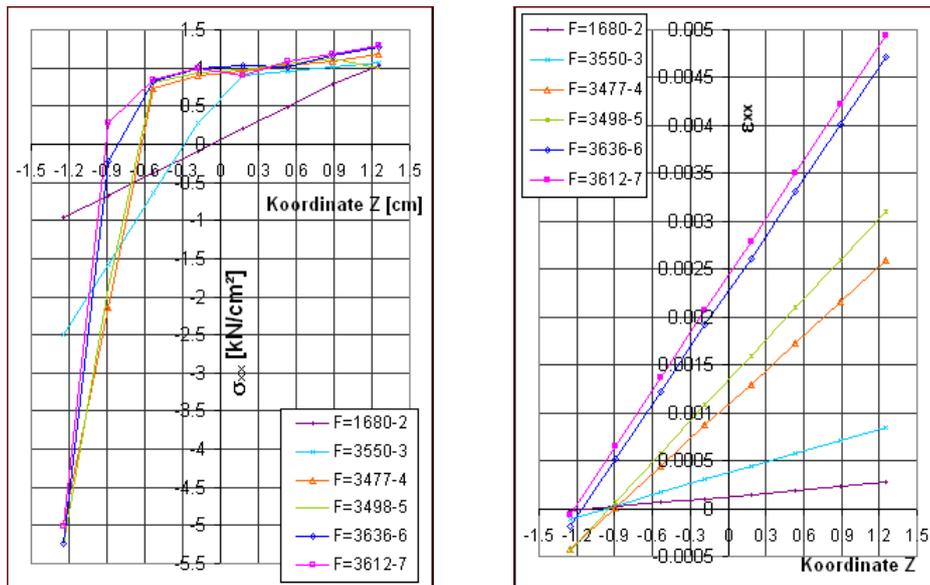


Bild 5-25 Horizontale Spannungs- Dehnungsverlauf über die Wandstärke in der Scheibemitte B

5.5 Tragverhalten der Beulserie 200-00 (Schlankheit 60)

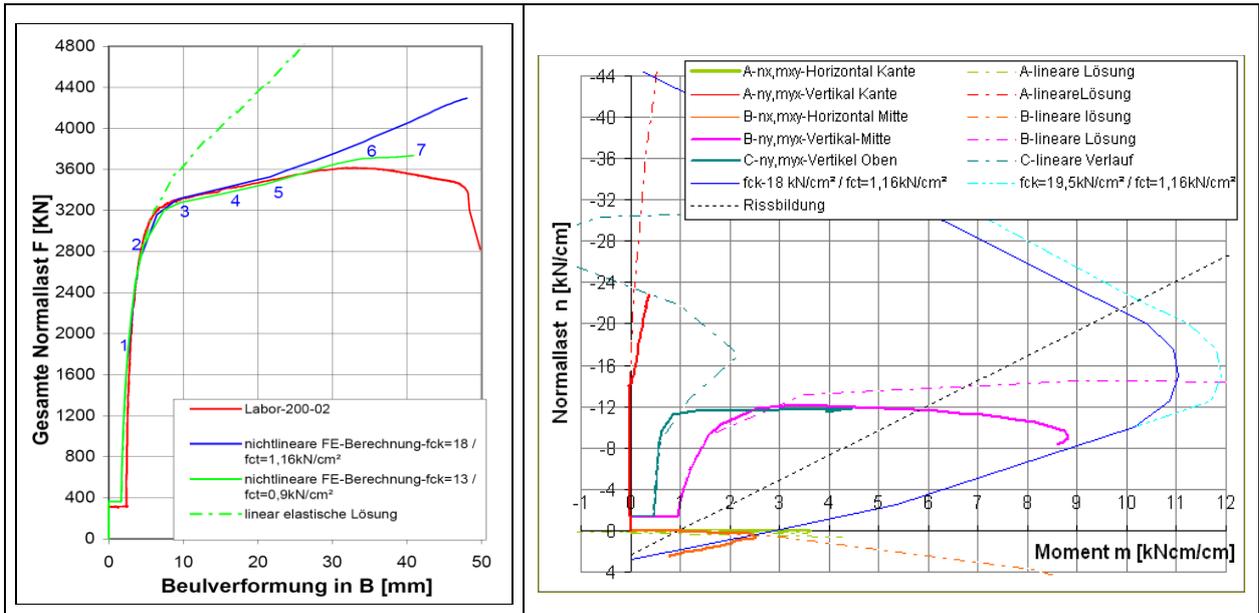


Bild 5-26 Last- Beulverformungs- Diagramme und Schnittkraftentwicklung des Versuchskörpers 200-02 mit $f_{ck}=18$ kN/cm² und $f_{ct}=1,16$ kN/cm²

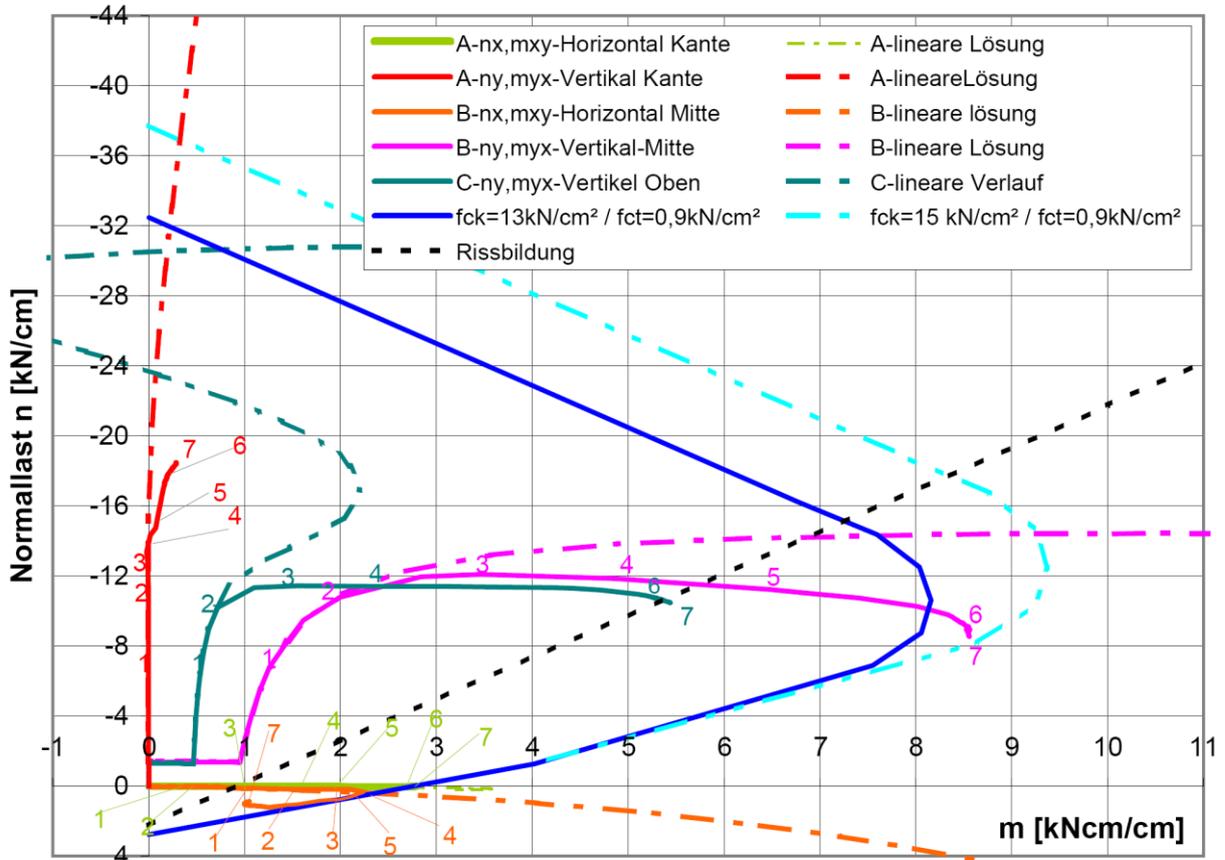


Bild 5-27 Schnittkraftentwicklung des Versuchskörpers 200-02 mit $f_{ck}=13$ kN/cm² und $f_{ct}=0,9$ kN/cm²

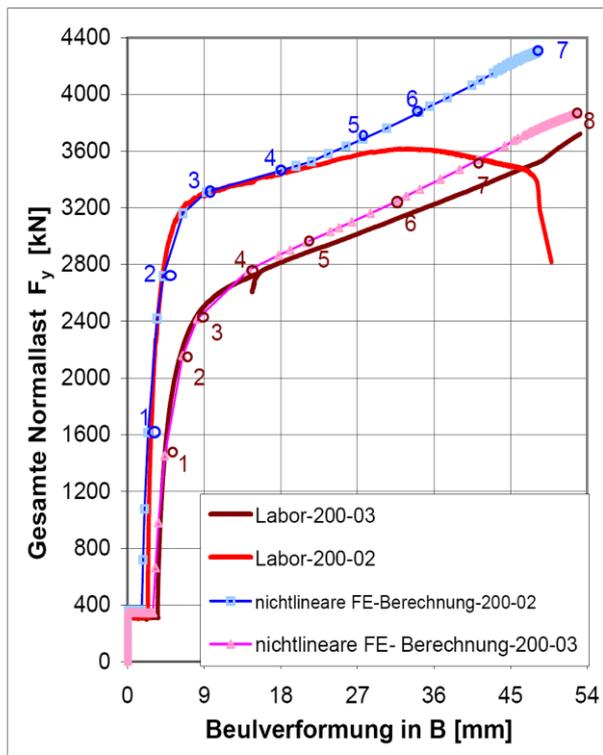


Bild 5-28 Last- Beulverformungs- Diagramm des Versuches 200-2 und 200-03

Für die Analyse des Tragverhaltens dieser Beulserie wurde der Versuchskörper 200-02 ausgewählt.

Nach der Auswertung der Laborergebnisse und der numerischen Berechnung wurde festgestellt, dass bei dieser Beulserie wegen der markanten Dickentoleranz der Scheibe, besonders bei dem Versuchskörper 200-02, die Beulverformung nicht mittig, sondern etwas mehr nach oben gerichtet wurde (Bild 4-237). Im Bild 5-28 wurden die Ergebnisse des Versuches 200-02 und 200-03 in einem Last-Verschiebungsdiagramm dargestellt. Gleich wie bei der Serie 150-00 zeigen die Laborwerte, dass die Variation der Imperfektion keinen relevanten Einfluss auf die Traglast hat.

Die Kurvenverläufe zeigen auch, dass das Erreichen der kritischen Beullast, im Unterschied zu den kleineren untersuchten Schlankheiten, nicht mehr so klar als horizontaler oder sogar fallender Kurvenverlauf zu erkennen ist. Beim Versuch 200-02 manifestierte sich dieses Verhalten zwischen den Zeitpunkten 2 und 3.

Bei dem Versuchskörper 200-02 wurde festgestellt, dass die für die numerische Simulation anfänglich angewendeten Materialeigenschaften ($f_{ck}=18\text{kN/cm}^2$, $f_{ct}=1,16\text{kN/cm}^2$) den überkritische Lastanstieg deutlich überschätzt haben (Bild 5-26, linkes Bild- blaue Kurve). Daher wurden für die weitere Analyse des Tragverhaltens diese Parameter variiert. Für die neue FE-Berechnung wurde eine Druckfestigkeit von 13 kN/cm^2 und eine Nachrisszugfestigkeit von $0,9\text{ kN/cm}^2$ verwendet. Verglichen mit den ersten Ergebnissen (Bild 5-26, rechts) ist der Einfluss dieser neuen Parametern besonders in der vertikalen Beanspruchung an der Stelle A (Bild 5-27, rote Kurve) und an der Stelle C zu erkennen (Bild 5-27, grüne Kurve). Zu bemerken ist auch, dass in der Scheibenmitte die ausgebildete Zugkraft (n_x) am Ende der FE-Berechnung abnimmt (Bild 5-27, orange Kurve) und der horizontale Moment (m_{xy}) in A eindeutig reduziert wird (Bild 5-27, hellgrüne Kurve). Die genauere Analyse und der Einfluss dieser neuen Kennwerte werden im Kapitel 5.5.1 beschrieben.

Gleich wie bei der Schlankheit 40 ist in der Entwicklung der bezogenen Normalkraft (Bild 5-29) entlang der horizontalen Hauptrichtung (Bild 5-1, entlang I-I) festzustellen, dass die zuerst gleichmäßig verteilte Normalkraft zum großen Teil mit dem Steifigkeitsverlust der Scheibenmitte (B), ausschließlich von den vertikalen Rändern übernommen wird (Bild 5-29, grüne Kurve).

Da bereits mit der Vorauslenkung vertikale Risse in der Scheibenmitte entstehen, die mit zunehmender Belastung ein schwächeres Verhalten des mittleren Bereiches der Scheibe verursachen, ist für diesen Fall das Erreichen der maximalen aufnehmbaren Last in der Scheibenmitte nicht mehr so klar wie bei der Schlankheit 40 zu erkennen. Die kritische Beullast ist dann für diese Schlankheit zwischen Zeitpunkt 2 und 3 erreicht (Bild 5-29, dunkel rosa und hellblaue Kurve). Gleich wie bei der Beulserie 150-00 trennt sich auch zu diesem Zeitraum die lineare von der nichtlinearen Lösung (Bild 5-26 linkes Bild, gestrichelte grüne Kurve).

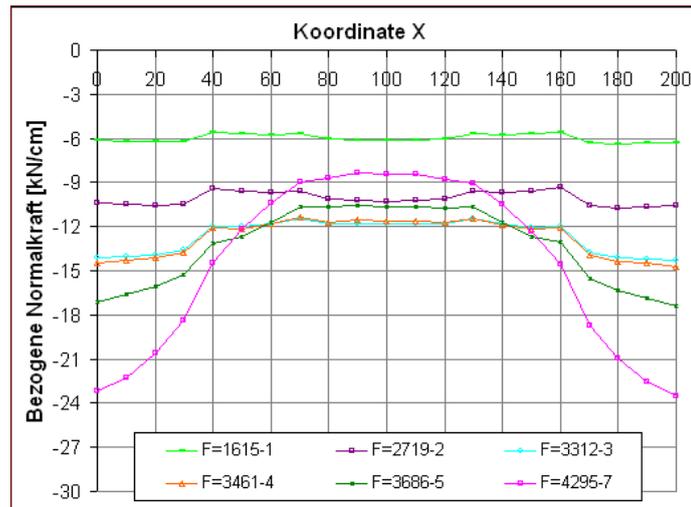


Bild 5-29 Verteilung der bezogenen Normalkraft (n_y) über die Breite des Versuchskörpers 200-02

Zum [Zeitpunkt 3](#) bilden sich die ersten vertikalen Risse an den Einspannstellen (A) (Bild 5-27, grüne Kurve), das horizontale System verliert damit an Steifigkeit und bewirkt einer schnelleren Erhöhung der Beulverformung in B (Bild 5-28, Zeitpunkt 3 - 4). Ähnlich wie im Versuch 150-02 führt dieses Verhalten ab dem Zeitpunkt zu der stärkeren Zunahme der vertikalen Biegemomente (m_{xy}) in B und in C zu. Die vertikale Normalkraft (n_y) nimmt ab diesem Zeitpunkt in B ab.

Zum [Zeitpunkt 4](#) wird die horizontale Querschnittstragfähigkeit in der Scheibenmitte erreicht (Bild 5-27, orange Kurve). In der horizontalen Spannungsverteilung über die Wandstärke in B ist dieses Verhalten durch den Ausfall des Zugspannungswertes an der Außenseite der Platte zu erkennen (Bild 5-31, grüne Kurve).

Zum ungefähr gleichen Zeitpunkt, bei einer Last von 3496 kN, bilden sich die ersten horizontalen Risse in der Scheibenmitte (Bild 5-27 rosa Kurve). Das vertikale System wird dadurch sehr weich. Wie bei der Schlankheit 40 bewirkt dieses Verhalten als ein stabilisierendes System die Aktivierung eines Zugfeldes (n_x) in horizontaler Hauptrichtung der Platte (Bild 5-27, orange Kurve, ab Zeitpunkt 4), das gegen die destabilisierende Kräfte wirkt. Dieses neue Zugfeld ermöglicht den weiteren Anstieg der Normalkraft.

Die Erhöhung der Last nach dem Zeitpunkt 4 wird dann nur möglich bei gleichzeitiger Abnahme der vertikalen Druckkräfte (n_y) in der Plattenmitte (Bild 5-27, rosa Kurve, ab Zeitpunkt 4). Mit zunehmenden horizontalen Rissen in B wird ein weiterer Anstieg der Last ermöglicht, die sich dann hauptsächlich zu den vertikalen Rändern (A) umlagert. Dieses Verhalten zeigt den Übergang zu einem überkritischen Tragverhalten.

Gleich wie im Versuch 150-02 ist mit der Bildung von Membranzugspannungen eine klare Abnahme des Momentes m_{xy} in der Plattenmitte (B) zu erkennen (Bild 5-27, orange Kurve). Dieses Verhalten ist durch die weitere Bildung horizontaler Risse in B zu erklären, die das weichere Verhalten der Plattenmitte verstärkt.

In der Verteilung der horizontalen Momente m_{xy} entlang der Breite der Scheibe (Bild 5-30) ist dieses Verhalten etwas genauer zu verfolgen. Nach dem Zeitpunkt 5 und im Vergleich zur Schlankheit 40 ist ein stärkerer unregelmäßiger Kurvenverlauf zu sehen (Bild 5-30, blaue und rosa Kurve), diese entsteht hauptsächlich wegen der Modellierung des Versuchskörpers. An den Stellen

des ausgeprägten unregelmäßigen Kurvenverlaufs wurde die Scheibe mit ausgeprägten Dickenunterschied modelliert.

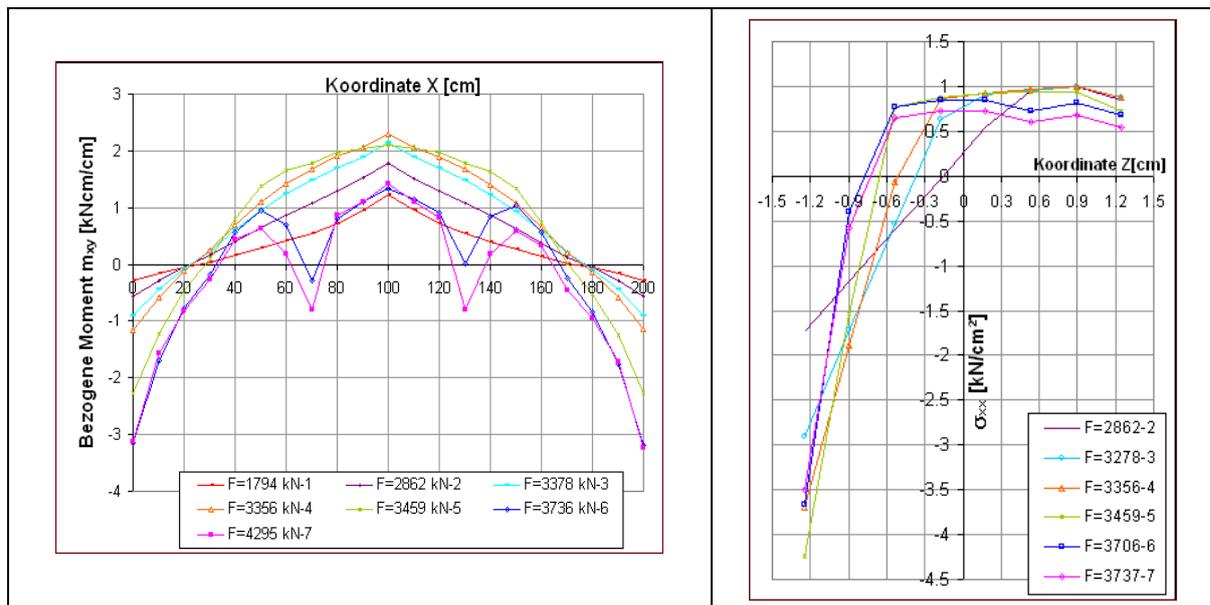


Bild 5-30 Verteilung der bezogenen Momente m_{xy} über die Breite des Versuchskörpers 200-02

Bild 5-31 Horizontale Spannungsverteilung über die Dicke in B

Zum [Zeitpunkt 6](#) wird im Versuch die maximale Normalkraft erreicht, der Abfall der Last nach diesem Zeitpunkt kündigt den endgültigen Bruch an. Nach der FE- Berechnung werden die Einspannstellen im Vergleich zum Versuch 150-02 nicht so hoch belastet, jedoch die Spannungsverteilung über die Dicke in A zeigen, dass zu diesem Zeitpunkt (6) die Biegedruckseite (Innenseite) am höchsten belastet wurde (Bild 5-32, blaue Kurve).

Zum gleichen Zeitpunkt 6 nähert sich die vertikale Beanspruchungslinie in B der Versagenskurve und wird auch nach diesem Zeitpunkt kein weiteres Moment m_{yx} mehr von der Scheibenmitte übernommen (Bild 5-27 rosa Kurve).

Eine andere Anzeige des Erreichens der Querschnitttragfähigkeit in der Plattenmitte (Zeitpunkt 6), zeigt sehr deutlich die horizontale Spannungsverteilung über die Wandstärke in B. Die Zugspannungswerte nehmen nach dem Zeitpunkt 6 nicht mehr zu. (Bild 5-31, blau und rosa Kurve).

Zum [Zeitpunkt 7](#) wurde die horizontale Biegetragfähigkeit in A erreicht (Bild 5-27 grüne Kurve, Zeitpunkt 7), der eindeutige Rückfall des Zugspannungswertes in der Spannungsverteilung über die Dicke in A zeigt (Bild 5-32, rosa Kurve) das Versagen der Einspannstelle.

In der Scheibenmitte erreicht auch zu diesem Zeitpunkt die vertikale Beanspruchung der Versagenskurve (Bild 5-27 rosa Kurve, Zeitpunkt 7). Dieses Verhalten zusammen mit der Versagen der Einspannstellen verursacht einen explosionsartigen Bruch von einem Teil des rechten Flansches. Im Versuch wurden an der linken Seite (33) zahlreiche Rissbildungen gefunden.

Da bereits ab dem Zeitpunkt 6 keine vertikalen Momente m_{yx} mehr im mittleren Bereich der Scheibe übernommen werden (Bild 5-27, rosa Kurve) und da die horizontale Biegetragfähigkeit in A erst zum Zeitpunkt 7 erreicht ist, wird daraus geschlossen, dass solange das horizontale stabilisierende System nicht versagt, der überkritische Anstieg mit der Querschnittstragfähigkeit in Plattenmitte begrenzt ist.

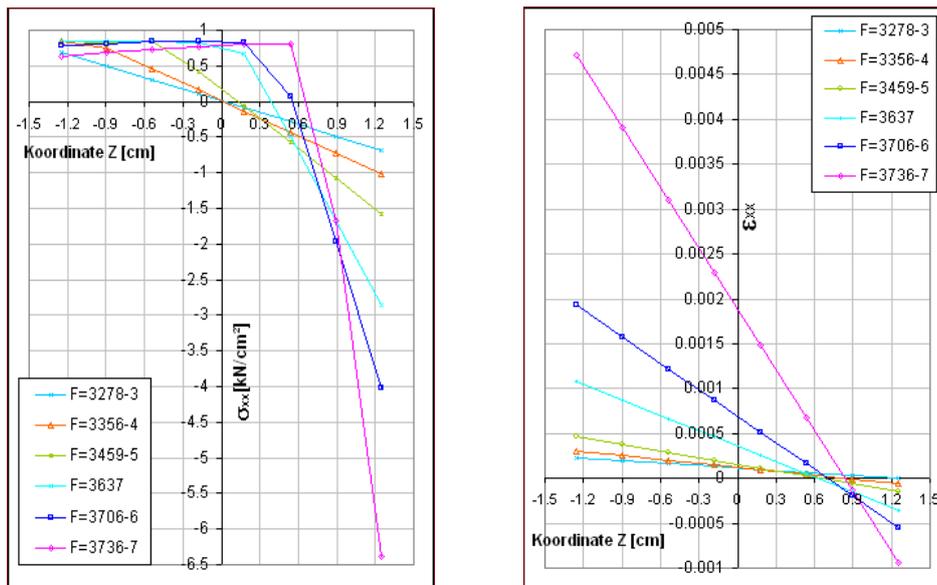


Bild 5-32 Horizontale Spannungs- Dehnungsverteilung über die Dicke in A

Um etwas genauer die Entwicklung der vertikalen Beanspruchung in der Plattenmitte (B) zu verfolgen wurde eine Analyse des vertikalen Spannungs- Dehnungsverlaufes über die Wandstärke in B durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass zum Zeitpunkt 5 die Matrixfestigkeit (vertikale Richtung) in B erreicht wird (Bild 5-33, grüne Kurve), obwohl sich die vertikalen Zugspannungen nach diesem Zeitpunkt stetig über die Wandstärke verteilen (Bild 5-33, blaue und rosa Kurven), erreichen die Zugspannungswerte nicht die Zugfestigkeit, weil es sich um eine Zweiaxialefestigkeit handelt. (ein gleiches Verhalten wurde im Versuch 200-03 überprüft). Dieses Verhalten wird mit dem Bild 5-37 (rechts, biaxiale Versagenskriterien) erklärt, wenn sich die horizontale Hauptspannung σ_1 der Nachrisszugfestigkeit nähert, kommt die vertikale Hauptspannung σ_2 zur Null heran. Das erklärt das reduzierte vertikale Zugtragverhalten ab dem Zeitpunkt 6 (Bild 5-33).

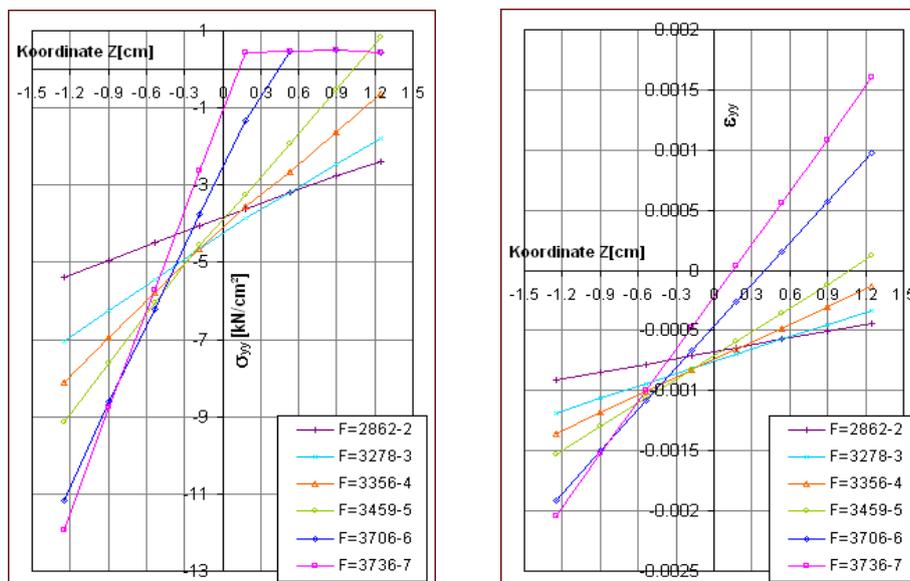


Bild 5-33 Vertikalespannungs- Dehnungsverteilung über die Dicke in B des Versuchskörpers 200-02

5.5.1 Einfluss der Druck- und Zugeigenschaften auf das Tragverhalten

Der Vergleich zwischen der im Versuch gemessenen Traglast und den Ergebnissen der numerischen Berechnung lässt erkennen, dass vor allem bei größeren Schlankheiten die verwendeten Materialeigenschaften das tatsächliche Tragverhalten deutlich überschätzen. Um das zu überprüfen, wurden der Einfluss des E-Moduls, der Druck- und Zugfestigkeit und der Nachrisszugfestigkeit in den Ergebnissen analysiert. Dafür wurden diese Parameter variiert und neue FE-Berechnungen für die Versuchskörper 200-02 durchgeführt. Die Variation des E-Moduls in der numerischen Berechnung hat fast keinen Einfluss auf die Ergebnisse, deswegen wird für die weitere Analyse dieser Parameter unverändert angenommen.

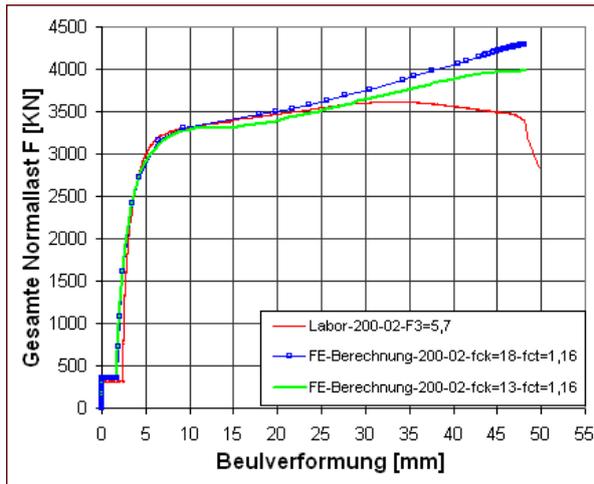


Bild 5-34 Last-Beulverformungs-Diagramm mit reduzierter Druckfestigkeit

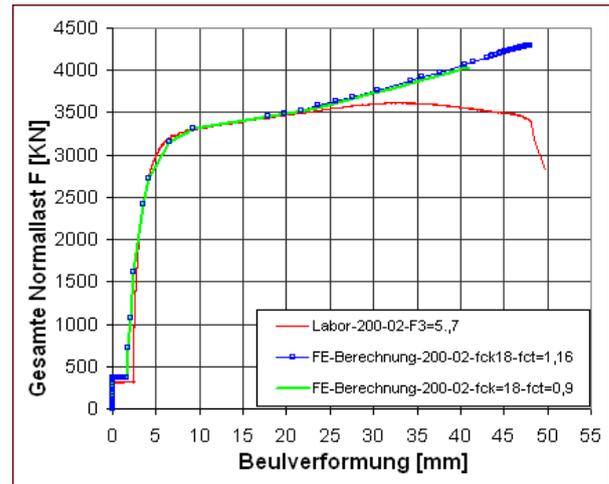


Bild 5-35 Last-Beulverformungs-Diagramm mit reduzierter Nachrisszugfestigkeit

Um den Einfluss der restlichen Parameter besser zu kennen, wurde in der numerischen Simulation (200-02) zuerst nur eine Verringerung der Druckfestigkeit von 18 kN/cm^2 auf 13 kN/cm^2 vorgenommen. In einer zweiten FE-Berechnung wurde die Nachrisszugfestigkeit von $1,16 \text{ kN/cm}^2$ auf $0,9 \text{ kN/cm}^2$ verringert und die Matrixfestigkeit unverändert angenommen. Die Ergebnisse dargestellt in Bild 5-34 und Bild 5-35 (grüner Verlauf), zeigen in beiden Fällen eine niedrigere Tragfähigkeit als die ursprünglichen Daten. Größeren Einfluss zeigt die FE-Berechnung mit geänderter Druckfestigkeit.

Dennoch wird klar, dass die Änderung der Zug- und Druckeigenschaften getrennt nicht die erwarteten Ergebnisse liefern wird. Erst mit der Variation beider Parameter zusammen gleichen sich die Ergebnisse der numerischen Simulation mehr an die Laborwerte an. Eine ausreichend gute Übereinstimmung der Ergebnisse erhält man, wenn die Matrixzugfestigkeit unverändert bleibt, aber der Nachrissbereich entfestigend modelliert wird und gleichzeitig die einaxiale Druckfestigkeit gegenüber den geprüften Ausgangswerten um circa 25% reduziert wird (Bild 5-36; grüne Kurve).

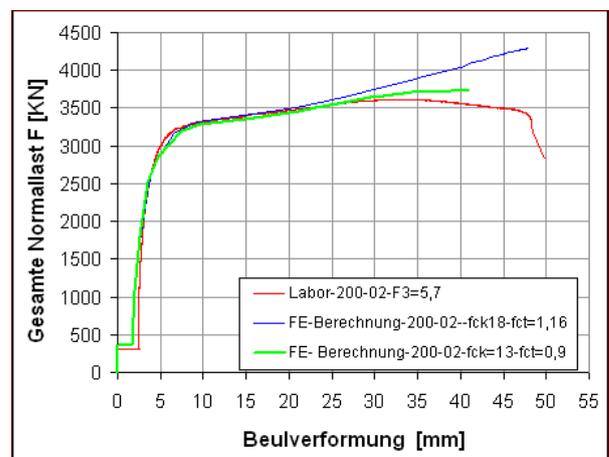


Bild 5-36 Last-Beulverformungs-Diagramm mit $f_{ck}=13 \text{ kN/cm}^2$ und $f_{ct}=0,9 \text{ kN/cm}^2$

Für einen besseren Überblick der geänderten Eigenschaften wurden die Ergebnisse der neuen Materialkennwerte zusammen mit den Ausgangswerten der Beullserie 150-00 im Bild 5-37 dargestellt.

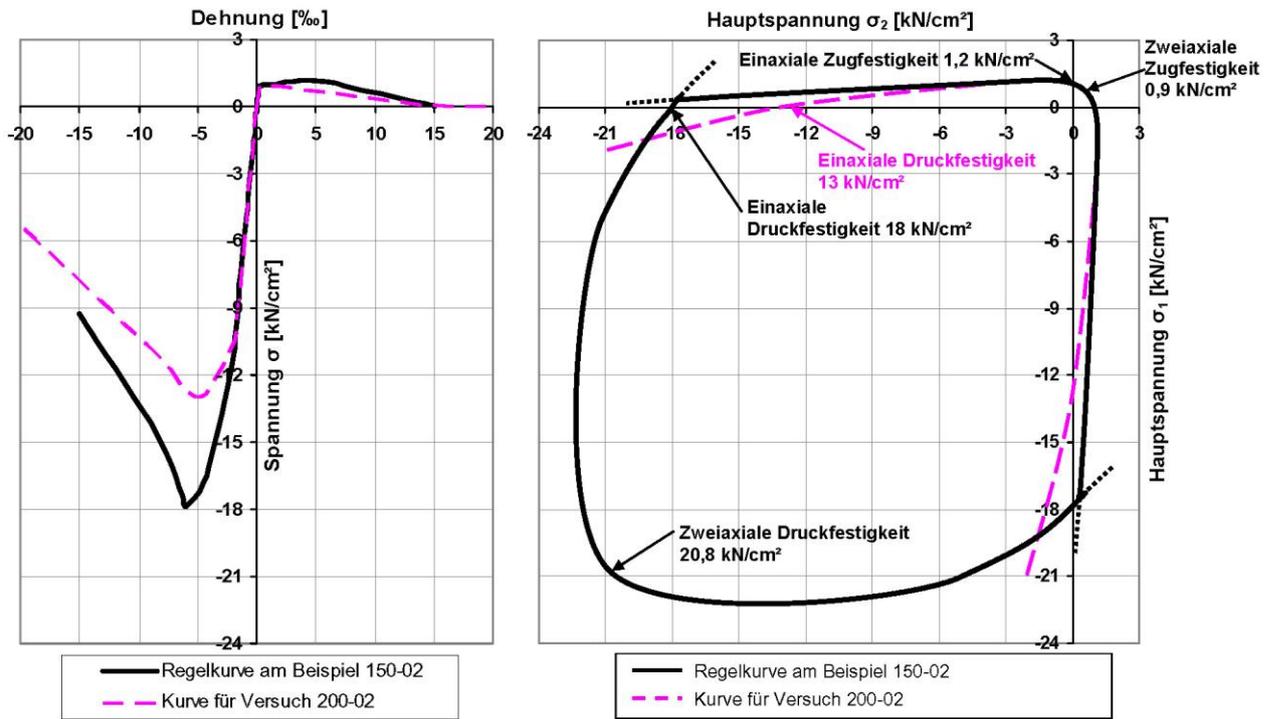


Bild 5-37 Einaxiale Stoffgesetze (links) und biaxiale Riss- bzw. Versagenskriterien (rechts)

Gemäß des Vergleichs der neuen FE-Ergebnisse mit dem ursprünglichen Modell (Bild 5-26 grüne und blaue Kurven) kann festgestellt werden, dass die Änderung dieser Parametern erst nach Erreichen der kritischen Beullast und nach der Bildung von horizontalen Rissen zu etwa Zeitpunkt 4 (Bild 5-28- rosa Kurve) einen maßgebenden Einfluss auf das Tragverhalten hat.

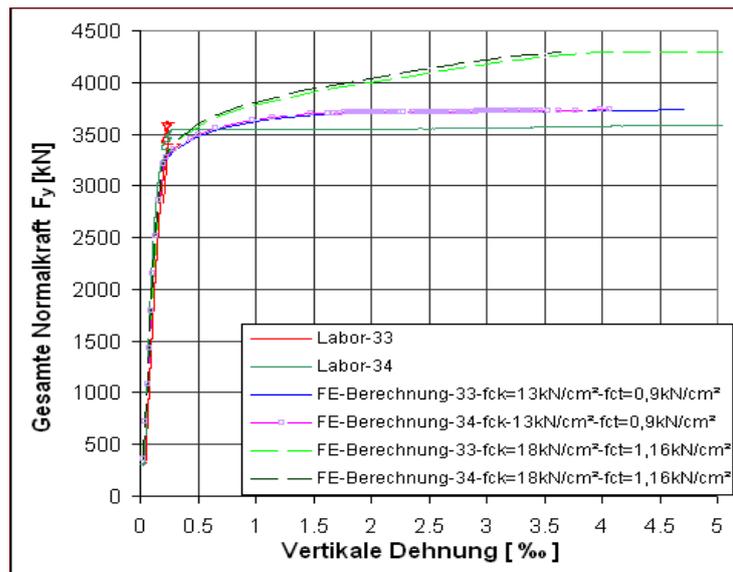


Bild 5-38 Horizontale Dehnung ϵ_{xx} [%] in A mit $f_{ck}=13 \text{ kN/cm}^2$ und $f_{ct}=0,9 \text{ kN/cm}^2$

Die neuen Ergebnisse werden zusammen mit den Laborwerten und den alten numerischen Berechnungsergebnissen dargestellt. Die Dehnungswerte und Kurvenverläufe zeigen besonders am Ende der numerischen Berechnung den klaren Einfluss der veränderten Parameter auf das Beulverhalten. Die gemessenen Dehnungen in der Plattemitte wurden im Bild 5-39 abgebildet und die Dehnungswerte an den Einspannstellen wurden im Bild 5-38 dargestellt.

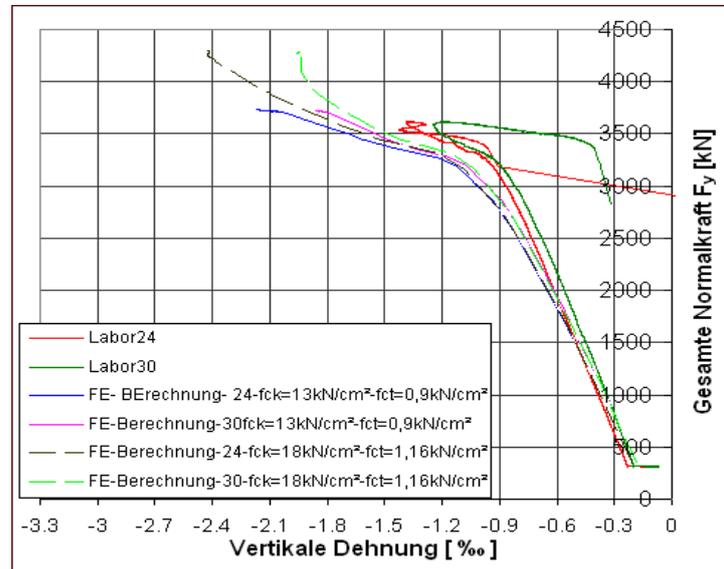


Bild 5-39 Vertikale Dehnung ε_{yy} [%] in B mit $f_{ck}=13\text{ kN/cm}^2$ und $f_{ct}=0,9\text{ kN/c}$

5.6 Schlussfolgerungen des Beultragverhaltens

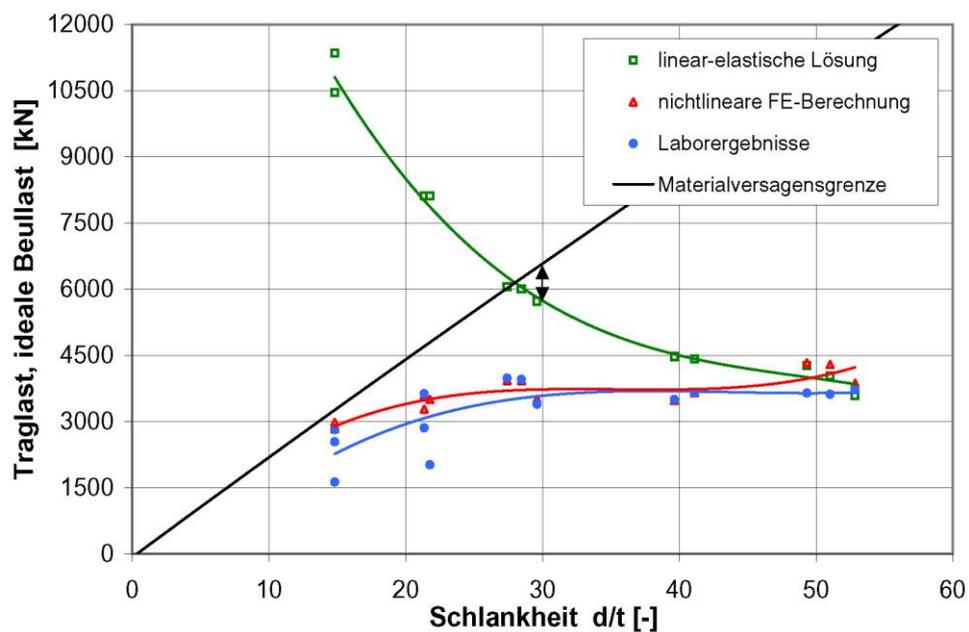


Bild 5-40 Traglasten, ideale Beullast und Material Versagensgrenze in Abhängigkeit von der Schlankheit

Die Ergebnisse der gesamten Beulversuche wurde in einem Normalkraft- Schlankheitsdiagramm dargestellt (Bild 5-40), zusammen mit den Traglasten (blauer Verlauf) sind im gleichen Diagramm die kritischen Beullasten (grüner Verlauf), die mit der linearen Beultheorie ermittelt wurden, und die idealen Materialversagensgrenze (schwarze Verlauf) auf zentrischen Druck abgebildet.

Die unterschiedlichen erzielten Traglasten (Laborergebnisse) besonders bei den kleineren Schlankheiten lässt sich auf die Spannungsmäßig wesentliche höhere Auslastung des Querschnitts und der damit verbundenen geringeren Umlagerungsmöglichkeit zurückzuführen, woraus sich eine erhöhte Empfindlichkeit auf unvermeidbare Ungleichmäßigkeiten bei der Herstellung oder Lasteinleitung ergibt.

Die gesamte Analyse des Tragverhaltens zeigt, dass es bei Scheiben aus UHPFRC eine Verzweigungslast gibt, die aufgrund der charakteristischen Rissbildung kleiner ist als jene nach linear elastischer Beultheorie. Sie wird im Folgenden als Verzweigungslast im Zustand II bezeichnet. Entsprechend dieses Verhaltens verschiebt sich auch das überkritische Tragverhalten. Es beginnt bereits beim Überschreiten der Verzweigungslast im gerissenen Zustand II.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass ab einer Schlankheit von 30 der Versuchskörper ein überkritisches Tragverhalten zeigt. Dieses Verhalten ist durch die zunehmende Umlagerung der Last von der Mitte zu den vertikalen Rändern der Platte zu erkennen. Je größer die Schlankheit, desto mehr steigt diese Umlagerung an den Einspannstellen. Im Schnittkraftentwicklungsdiagramm manifestiert sich dieses Verhalten durch das Erreichen eines Maximums bei der vertikalen Beanspruchung in der Scheibemitte (rosa Verlauf).

Wegen der geringeren Zugfestigkeit des Betons weisen die untersuchten Beulserien keine große Beulverformung vor dem Erreichen des lokalen Materialversagens auf, daher ist die zunehmende Umlagerung der Last zu den Einspannstellen nur durch den Steifigkeitsverlust der Scheibemitte ermöglicht und ist hauptsächlich bei der Bildung horizontaler Risse in diesem Bereich gegeben. Dieses Verhalten erlaubt das Entstehen eines Zugfelds in horizontaler Hauptrichtung (Membranzugspannungen), das gegen die vertikalen destabilisierenden Kräfte wirkt und den weiteren Anstieg der Last zulässt. Je größer die Schlankheit, desto ausgeprägt ist der Einfluss der Membranzugspannungen.

Im überkritischen Bereich weisen die Last-Beulverformungs-Diagramme für die kleinen Schlankheiten einen flachen Anstieg auf, die aber mit zunehmender Schlankheit eine stetige Steigerung in diesen Kurvenverläufen zu erkennen ist.

Die erzielten numerischen Ergebnisse zeigen, dass sich eine endgültige obere Grenze der Belastbarkeit entweder aus dem Versagen des horizontalen, stabilisierenden Tragsystems oder aus dem vertikalen Querschnittsversagen in der Plattenmitte ergibt.

6 Numerische Beuluntersuchung der Druckgurtscheibe einer Brücke mit Kastenquerschnitt



Bild 6-1 Brücke mit Kastenquerschnitt

Die hohe Festigkeit des Ultra-Hochfesten Betons, das geringe Eigengewicht und der gute Verbund mit anderen Stoffen, wie Stahlfasern eröffnet den Weg zu neuen konstruktiven Lösungen. Diese vorragenden Materialeigenschaften ermöglichen den Bau von Brücken mit sehr großen Spannweiten, wo das Eigengewicht zum dominierenden Lastfall wird. Besonders interessant sind die neuen Versagensmechanismen, die sich aus der Dünnwandigkeit solcher Konstruktionen ergeben.

In diesem Teil der Arbeit wird das Tragverhalten der Bodenplatte einer Kastenbrücke (Bild 6-1) analysiert. Im Bild 6-2 und Bild 6-3 ist jeweils ein Längsschnitt- und ein Querschnitt der untersuchten Brücke dargestellt.

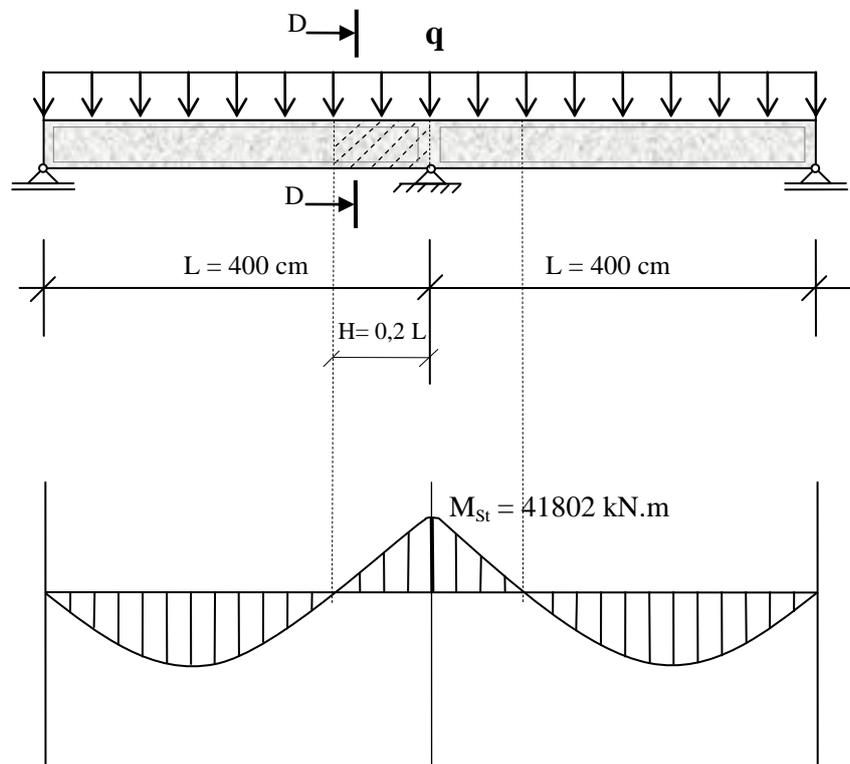


Bild 6-2 Längsschnitt durch die Brücke, Lasten und Biegemomente

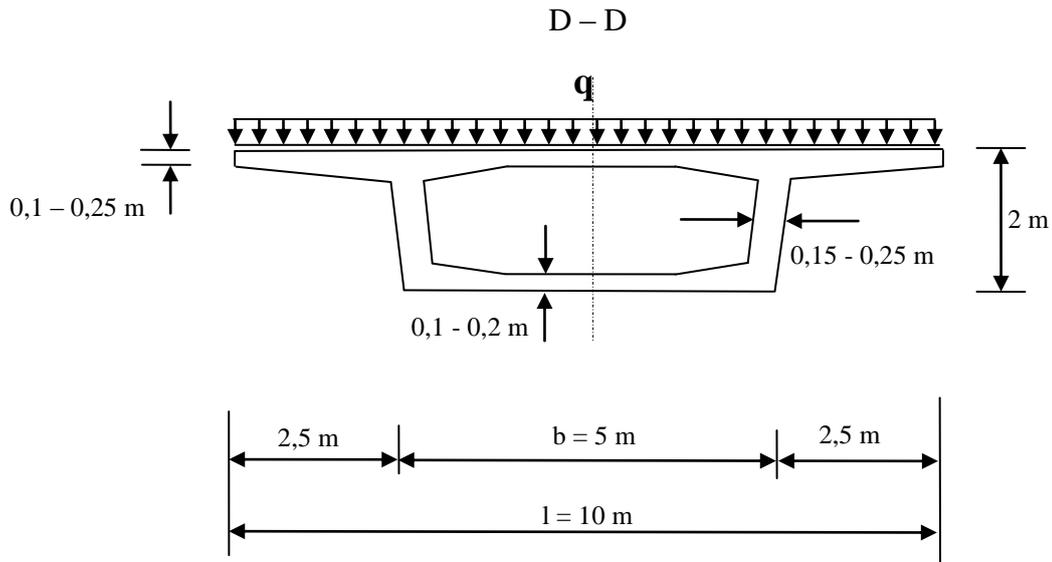


Bild 6-3 Querschnitt D-D der Brücke

Der Wert des Stützmoments im Bild Bild 6-2 ist für eine Bodenplatte mit 9 cm Wandstärke ermittelt. Dabei beträgt das Eigengewicht 119,01 kN/m und eine Verkehlst von 90 kN/m für einen Fahrstreifen angenommen (EN-1991-2) [35].

Das Ziel in diesem Teil der Arbeit ist, die kleinste Scheibendicke zu ermitteln, für die keine Beulgefahr besteht und die Tragfähigkeit dieser zu überprüfen. Für diesen Zweck wurde eine Serie von numerischen Simulationen für verschiedenen Scheibendicken mit dem FE-Programm ABAQUS durchgeführt.

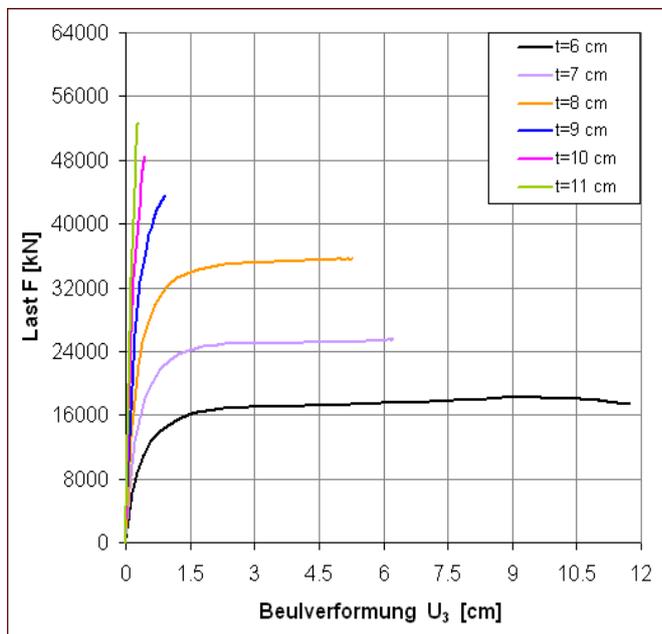


Bild 6-4 Last-Beulverformungs-Diagramme für verschiedene Dicke der Bodenplatte

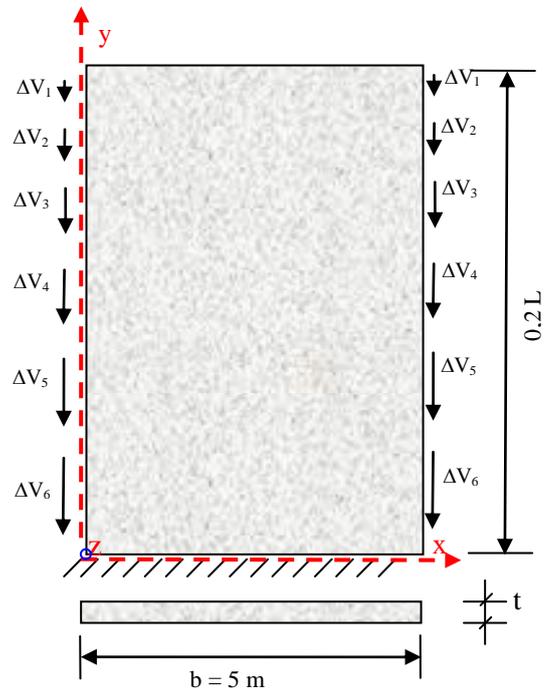


Bild 6-5 Skizze des modellierten Bauteils

Die Abmessungen der Scheibe betragen 5,0 x 8,0 m. Die Beuluntersuchung erfolgte für die Dicke 6, 7, 8, 9, 10 und 11 cm Wandstärken (t). Die Ränder der Scheibe wurden wie im Bild 6-5 dargestellt gelagert. Der untere horizontale Rand repräsentiert den Anschluß der Bodenplatte an den Auflagerquerträger. Aus Kontinuitäts- und Symmetriegründen ist dort die Bodenplatte unverdrehbar

gelagert und der gegenüber liegende Rand im ersten Schritt frei gelassen. Die Bodenplatte geht zwar über das gesamte Tragwerk durch, es wird aber näherungsweise davon ausgegangen, dass jene Teile der Bodenplatte, die vom Mittelaufflager mehr als 8,0 m entfernt sind, das Beulverhalten nicht beeinflussen. Die im Bild 6-5 seitlich dargestellten Ränder werden frei drehebbar gelagert angenommen und außerdem sind die Verschiebung aus der Ebene (z -Richtung) gesperrt. Die Belastung wurde in Form von Schubkräften an den vertikalen Rändern aufgebracht (Bild 6-5). Diese wurde von der oberen Ecke bis zur unteren Ecke der Scheibe (Bild 6-5) steigend (entsprechend dem Momentverlauf) aufgebracht. Nach den erzielten Ergebnissen im Kapitel 4.4.5 wurde für die numerische Simulation in diesem Teil der Arbeit eine 3 mm Imperfektion in der Form der ersten Eigeform angewendet. Die Arbeitslinie für diese Berechnungen wurde von der Beulserie 150-00 übernommen.

Die ersten FE- Ergebnisse zeigten Querdehnungsverformungen in dem frei liegenden horizontalen Rand, die im Tragwerk in dieser Form nicht auftreten können. Um die tatsächliche Randbedingung dieses Teils der Scheibe (Bild 6-6, orange Linie markiert) besser anzunähern, wurde die 5 x 8 m Scheibe mit zusätzlichen 4 m Länge modelliert (Bild 6-6, mit blauer Farbe markiert). Damit sind ungeplante Dehnungen in horizontaler Richtung des Bereiches ausgeschlossen. Um das Beulverhalten der Scheibe nicht zu beeinflussen wurden die vertikalen Ränder dieses Teils des Modells (Bild 6-6, vertikale Ränder in Blau markiert) nur aus der Ebene gesperrt. Belastungen auf diesen Rändern wurden nicht aufgebracht. Im Bild 6-6 ist die Darstellung des modellierten Versuchskörpers. In der Analyse des Tragverhaltens der Scheibe wird die zusätzliche 4 x 5 m Scheibe nicht dargestellt.

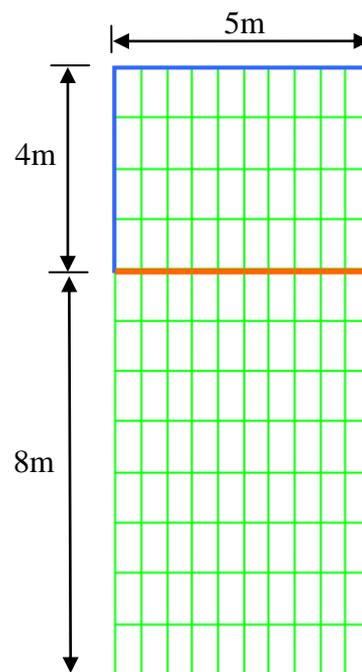


Bild 6-6 FE-Modell eines Versuchskörpers

Gleich wie bei der Interpretation der Ergebnisse im Kapitel 3.4 wird die Verschiebung aus der Ebene als Beulverformung bezeichnet. Je nach der Orientierung der Beulverformung wird eine Außen- und eine Innenseite der Scheibe definiert (siehe Bild 3-15).

Die Ergebnisse sind in einem Last-Beulverformungs-Diagramm (Bild 6-4) dargestellt. Gemäß der numerischen Berechnung erreicht die Verschiebung aus der Ebene (Bild 6-8, im Punkt A) besonders bei der Scheibe mit 6 und 7 cm Wandstärke relativ große Werte (Bild 6-4, schwarze und violette Kurve). Die Beulverformung bildet sich näher zum Auflagerbereich (Bild 6-8) und erreicht ein Maximum von 11,8 cm. Bei den Scheiben mit größeren Dicken (9 cm, 10 cm und 11 cm) ist eindeutig eine geringere Beulverformung zu erkennen (Bild 6-4, blaue, rosa und grüne Kurve) und wird daher der Einfluss des Beulens für diese Fälle nicht maßgebend werden.

Für die Untersuchung des Tragverhaltens wurde die Platte mit 8 und 9 cm Wandstärke ausgewählt, im Bild 6-7 ist eine genauere Abbildung des Last-Beulverformungs-Diagramms für diese Fälle dargestellt. In den Kurvenverläufe für die Scheibe mit 8 cm Dicke sind einige Zeitpunkte markiert (Bild 6-7, orange Kurve), die während der Analyse des Beulverhaltens zu berücksichtigen sind. Im gleichen Diagramm sind die linearen Lösungen abgebildet (Bild 6-7, strichlierte Linien).

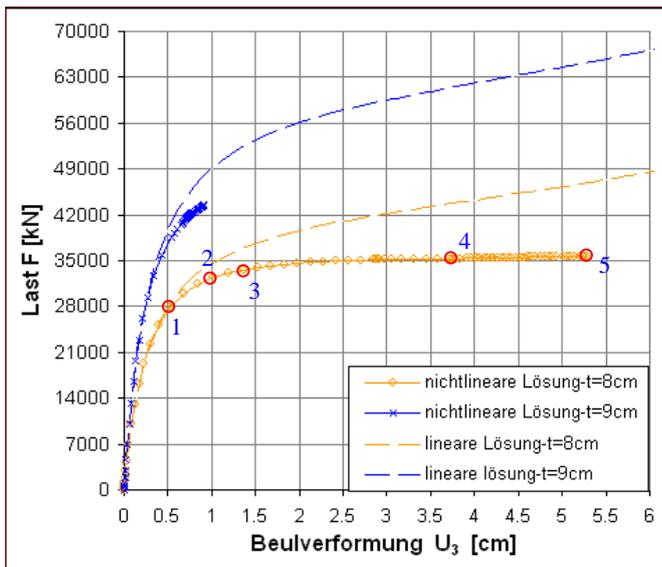


Bild 6-7 Last- Beulverformungs-Diagramm der Platten mit 8 cm und 9 cm Wandstärke

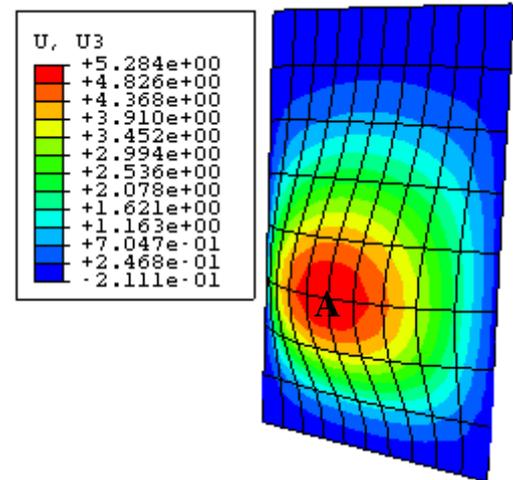


Bild 6-8 Beulverformungsbild der Platte mit 7 cm Wandstärke

6.1 Ergebnisse für Scheibendicke 8 cm

Die Analyse des Tragverhaltens der Scheibe mit 8 cm Wandstärke zeigt in der ersten Phase das Bilden von Schubspannungen in der Stelle C (Bild 6-9 vertikale Ränder, untere Bereich). Zum Zeitpunkt 1 beträgt die maximale Hauptdehnung in dem Bereich 0,7 ‰ (Bild 6-7, Zeitpunkt 1)

Bei zunehmender Belastung werden als nächstes die Stellen A und B (Bild 6-9) in der Scheibe mehr beansprucht. Zuerst konzentrieren sich hohe horizontale Zugbeanspruchungen in der Stelle A, die Matrixzugfestigkeit wurde in diesem Bereich bei einer Last von 32480 kN erreicht (Bild 6-10, blaue Kurve, Zeitpunkt 2). Mit dem Steifigkeitsverlust des Bereiches nimmt eindeutig die Beulverformung in A wesentlich zu und flacht den Last-Beulverformungs- kurvenverlauf ab (Bild 6-7, nach Zeitpunkt 2).

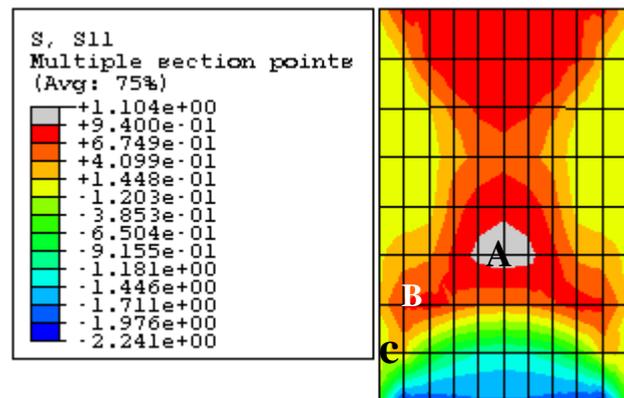


Bild 6-9 Horizontale-Spannungen bei einer Last von 22182 kN - Außenseite

Nach diesem Zeitpunkt wandert die Beanspruchungen mehr zu der Stelle B. Die horizontale Zugfestigkeit wurde in dieser Stelle bei einer Last von 33625 kN erreicht, die Beulverformung beträgt zu diesem Zeitpunkt 1,35 cm (Bild 6-7, orange Kurve, Zeitpunkt 3). Eine Abbildung der horizontalen Spannungsverteilung in der Scheibe ist zum Zeitpunkt 2 im Bild 6-9 dargestellt, der graue gefärbte Bereich zeigt die Stelle, wo die Zugfestigkeit erreicht wurde. Im gleichen Bild sind die Stellen A, B und C, die für die Interpretation der Ergebnisse maßgebend sind, gekennzeichnet.

Entsprechend des Schnittkraftentwicklungs-Diagramms erreicht bei einer Last von 33625 kN die vertikale Beanspruchung in A ein Maximum (Bild 6-10, rosa Kurve, ca. Zeitpunkt 3). Gemäß der Analyse des Tragverhaltens im Kapitel 5, signalisiert dieses Verhalten das Erreichen der ideellen

Beullast in der Scheibe. Dieses Verhalten fällt mit dem Erreichen der Matrixzugfestigkeit (horizontale Richtung) in der Stelle B zusammen (Bild 6-10, grüne Kurve, Zeitpunkt 3).

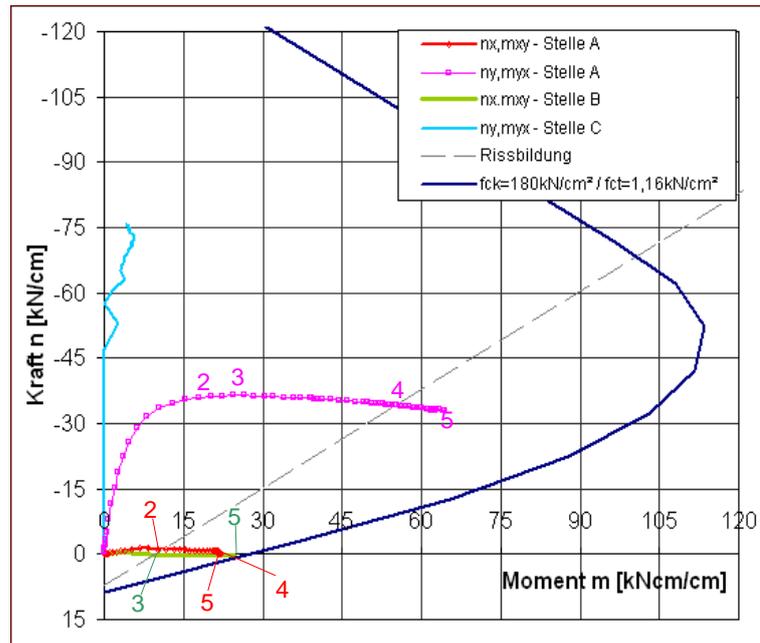


Bild 6-10 Schnittkraftentwicklungs-Diagramm- Wandstärke 8 cm

Zum Zeitpunkt 4 wird die horizontale Biegetragfähigkeit in A erreicht (Bild 6-10, rote Kurve, Zeitpunkt 4). Die vertikale Zugbeanspruchung zeigt zu diesem Zeitpunkt das Bilden der ersten horizontalen Risse in A (Bild 6-10, rosa Kurve überschneidet die Rissbildungsgerade, Zeitpunkt 4). Dadurch wird das vertikale System sehr weich und bewirkt bei zunehmender Last das Bilden von horizontalen Membranzugspannungen in der Scheibe (Bild 6-10, rote Kurve, nach dem Zeitpunkt 4). Dieses Verhalten ist die Anzeige von einem überkritischen Beulverhalten der Platte, das sich nur geringfügig ausbilden kann (Bild 6-7, orange Kurve, Laststeigerung von Zeitpunkt 3 bis 5). In dem roten Kurvenverlauf (Bild 6-10) ist auf dem ersten Blick das Erreichen der horizontalen Biegetragfähigkeit (Zeitpunkt 4) in A nicht deutlich erkennbar und auch wenn das abnehmende Moment m_{xy} in A nach dem Zeitpunkt 4 gering ist, lässt sich bei einer genaueren Analyse dieses Verhalten gut verfolgen.

Das endgültige Versagen der Platte tritt in der Stelle B ein, die horizontale Beanspruchung erreicht zum Zeitpunkt 5 die Versagenslinie (Bild 6-10, grüne Kurve). Am Ende der numerischen Simulation wurde auch hohe Zug- und Schubspannungen an der Stelle C (Innenseite) erkannt, die maximale Hauptdehnung beträgt in dem Bereich 4 ‰ (Bild 6-11). Nach dem Schnittkraftentwicklungs-Diagramm erreicht die Normalkraft in dieser Stelle ca. 75 kN/cm (Bild 6-10, hellblaue Kurve).

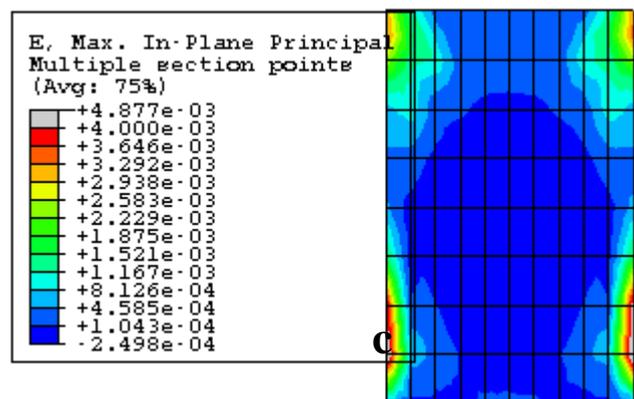


Bild 6-11 Hauptdehnungen am Ende der FE- Berechnung- Innenseite

6.2 Ergebnisse für Scheibendicke 9 cm

Bei der Scheibe mit 9 cm Wandstärke erreicht die Verschiebung aus der Ebene ein Maximum von 0,91 cm (Bild 6-12 und Bild 6-4, blaue Kurve). In der Außen- und in Innenseite der Scheibe (Bild 6-13 und Bild 6-15) konzentrieren sich die horizontalen Zugspannungen mehr in der Stelle C. Die Zugdehnungen erreichen in dem Bereich ein Maximum von 4.8 ‰.

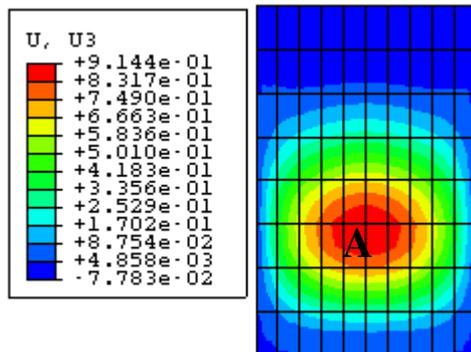


Bild 6-12 Beulverformung am Ende der FE-Berechnung

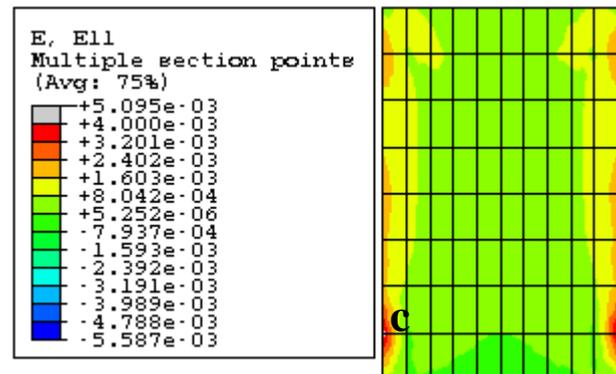


Bild 6-13 Horizontale-Spannungen am Ende der FE-Berechnung

Entsprechend dem Schnittkraftentwicklungs-Diagramm (Bild 6-14) erreicht aber in der Stelle C die vertikale (Bild 6-14, orange Farbe) und horizontale Beanspruchung (Bild 6-14, grüne Kurve) nicht die Versagenslinie.

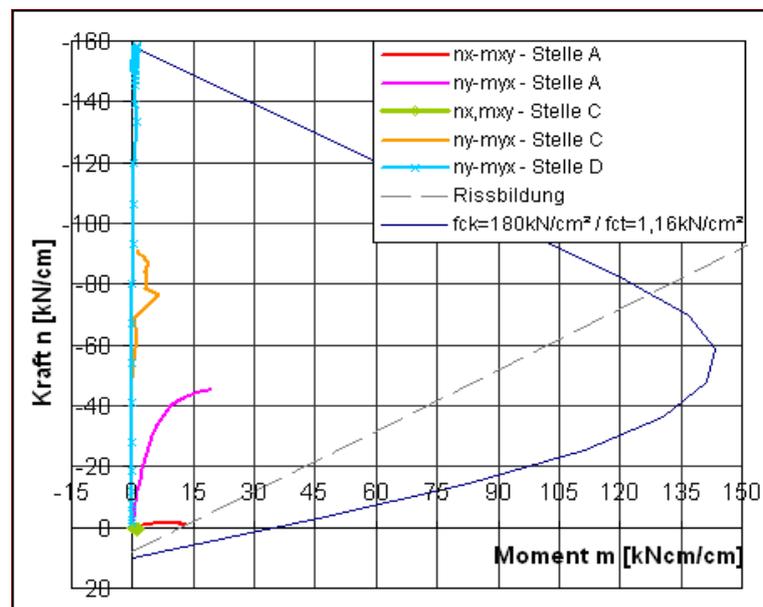


Bild 6-14 Schnittkraftentwicklungs-Diagramm- Wandstärke 9 cm

Die FE-Ergebnisse zeigen aber, dass sich in der Innenseite hohe Druckdehnungswerte an beiden unteren Ecken der Scheibe bilden (Bild 6-16, Stelle D). Das Schnittkraftentwicklungs-Diagramm zeigt, dass die vertikale Beanspruchung in der Stelle D die Versagenskurve erreicht (Bild 6-14, blaue Kurve erreicht die dunkel blaue Kurve). Es handelt sich hier bei der numerischen Berechnung um ein lokales Druckversagen. In der Realität kann sich bei zunehmender Last die Druckkraft eventuell noch in Richtung der Scheibenmitte umlagern. Bei dem Kurvenverlauf der linearen Lösung dieser Schiebung (Bild 6-7, blaue strichelierte Linie) ist zu erkennen, dass es sich bei diesem

Fall um ein mögliches Beulverhalten handelt, dass aufgrund des frühzeitigen Versagens der nicht-linearen Berechnung sich nicht vollständig berechnen lässt.

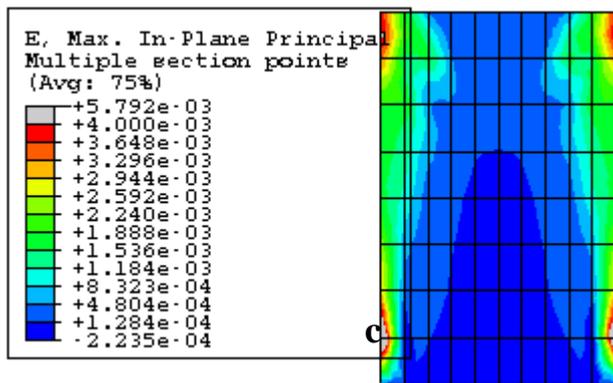


Bild 6-15 Hauptdehnungen am Ende der FE-Berechnung
- Außenseite

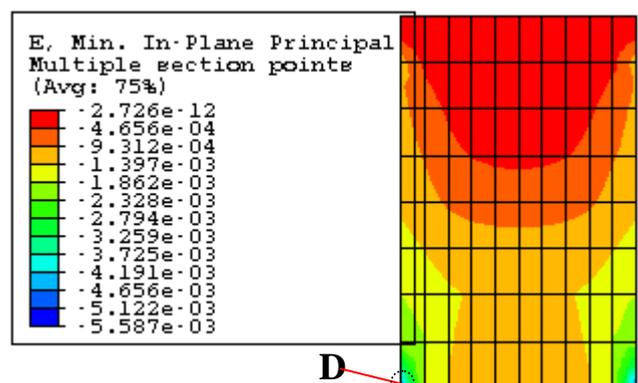


Bild 6-16 Hauptdehnungen am Ende der FE-Berechnung
- Innenseite

Um das Tragverhalten der Scheibe mit 9 cm Dicke zu überprüfen, wurde die Scheibe mit 10 cm Dicke analysiert. Diese weist ein ähnliches Verhalten wie die Scheibe mit 9 cm Dicke auf, es handelt sich auch in diesen Fall um ein lokales Druckversagen in der Stelle D (Bild 6-17). Nach der FE-Berechnung konzentrieren sich hohe Druckdehnungen (5,7 ‰) in den unteren Kanten der Scheibe (Stelle D, Innenseite und Außenseite). Bei diesem Fall erreicht die Verschiebung aus der Ebene ein Maximum von 0,4 cm (Bild 6-4, rosa Kurve).

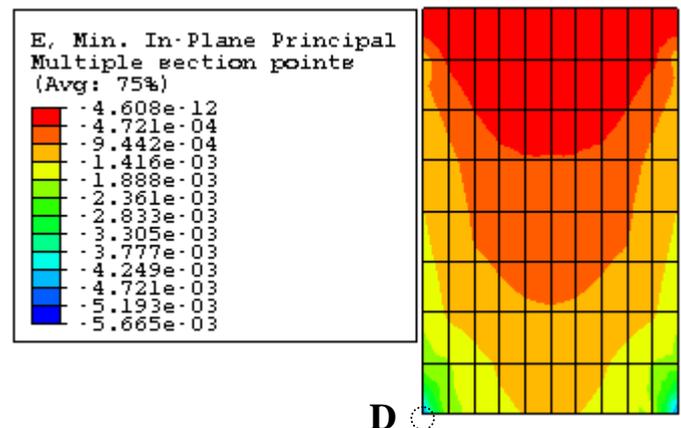


Bild 6-17 Hauptdehnungen am Ende der FE-Berechnung
- Innenseite

6.3 Tragfähigkeit der Scheiben

Um die Tragfähigkeit der untersuchten Scheiben zu bestimmen, wurde in einem Last-Beulverformungsdiagramm die einwirkenden Lasten (F_{sd}), die per Handrechnung bestimmt wurden, zusammen mit den reaktiven Kräften F_{Rd} , dargestellt (Bild 6-18). Die Last F_{Rd} , ist wie folgt ermittelt:

$$F_{Rd} = C / [\gamma_R (f_{ck} / f_{cm})]$$

- C Rechnerische Last aus der FE-Berechnung
 γ_R Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand ($\gamma_R=1,4$)
 f_{cm} mittlere Druckfestigkeit des Betons (180 kN/cm²).
 f_{ck} Druckfestigkeit des Betons ($f_{ck} = f_{cm}-8$) ([34], Tabelle 3.1)

Die Erzielte Ergebnisse zeigen, dass erst bei einer Bodenplatte mit 10 cm Dicke die reaktive Kräfte F_{Rd} (Bild 6-18, rosa Kurve) größer ist als die einwirkende Last F_{sd} (Bild 6-18, strichlierte rosa Kurve), damit ist für einen Bodenplatten, dessen Dicke über 9 cm liegt, die Tragfähigkeit erfüllt ($F_{sd} < F_{Rd}$). Unter dieser Wandstärke weisen, aufgrund des Beulens, die untersuchten Scheiben ein schwaches Verhalten auf.

Zu berücksichtigen ist, dass wenn die nichtlineare Berechnung der Bodenplatte mit 9 cm Dicke bis zum tatsächlichen Ende gerechnet werden könnte, würde die Tragfähigkeit für dies Wandstärke wahrscheinlich auch erfüllt.

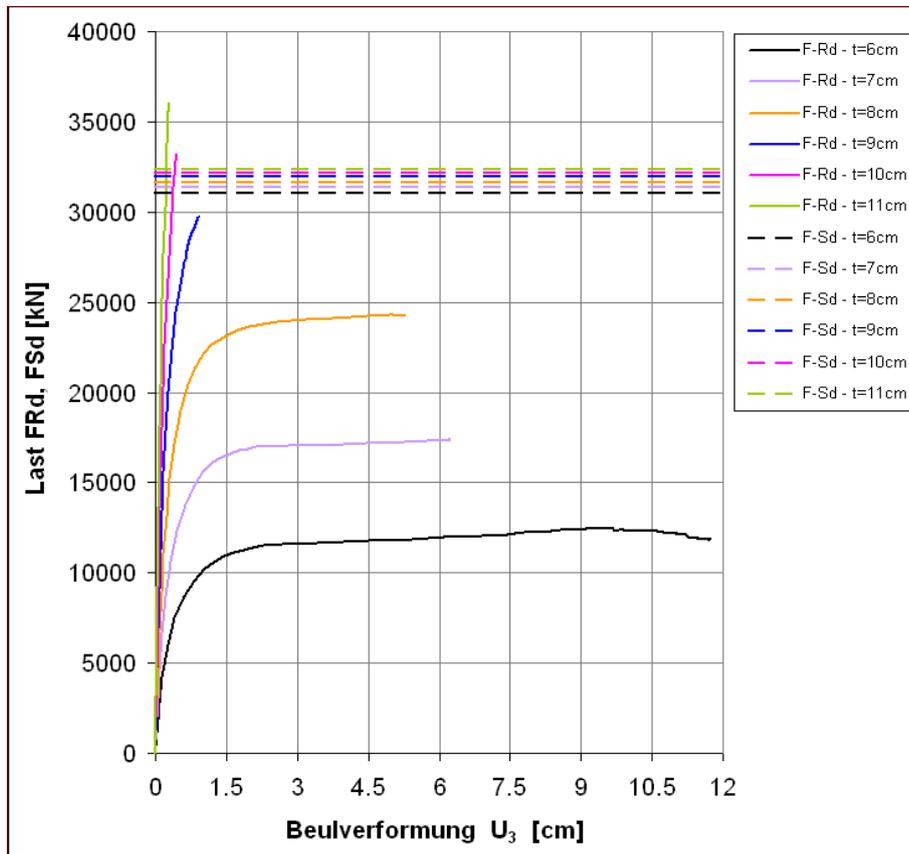


Bild 6-18 Last Beulverformungs-Diagramm für die einwirkenden- und rechnerischen Traglast

6.4 Schlussfolgerung

Nach den erzielten Ergebnissen wird die Tragfähigkeit der Bodenplatte der untersuchten Brücke ab einer Wandstärke von 10 cm erfüllt, eine Beulfahrt ist bei diesen Dicken ($t \geq 10$ cm) nicht gegeben. Aufgrund des Beulens ist bei den anderen analysierten Scheiben ($t \leq 9$ cm) ein schwaches Verhalten erkennbar.

Entsprechend der numerischen Simulation tritt ein klares Beulverhalten bei den Bodenplatten ab 8 cm Dicke ein. Die untersuchten Scheiben weisen bereits ab dieser Wandstärke ein überkritisches Beulverhalten auf. Wie im Kapitel 5 erwiesen wurde, ist durch das Erreichen ein Maximum in der vertikalen Beanspruchung (Bild 6-10, Zeitpunkt 3, rosa Kurve) eine Anzeige der überkritischen Tragreserve der Scheibe erkennbar.

Die Plausibilität dieser Ergebnisse bestätigen, dass die Art und Weise der bereits verwendeten FE-Simulation im Kapitel 4.4 auch sehr gut für die Analyse des Beulverhaltens von Scheiben aus UHPFRC mit anderen Belastungsfällen und unterschiedlichen Randbedingungen verwendet werden kann, wie in diesem Kapitel der Fall ist.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund der hervorragenden Eigenschaften des ultrahochfesten faserbewehrten Betons eröffnet dieses neue Material den Weg zu neuen konstruktiven Lösungen. Eine erhebliche Bedeutung bei diesen neuen Konstruktionen gewinnt die Schlankheit, die einen wesentlichen wirtschaftlichen Vorteil bietet. Der UHPFRC ermöglicht das Bauen äußerst dünnwandiger Konstruktionen, wie z.B. die Stege oder Bodenplatten von Brückenquerschnitten. Mit diesem neuen Merkmal übersteigt die Schlankheit solcher Konstruktionsteile den gewohnten Bereich und führt zur starken Erhöhung der Beulgefahr, die bis jetzt im klassischen Stahlbetonbau keine wesentliche Rolle spielte. Deshalb müssen derartige Konstruktionsteile gleich wie im Leichtbau nach den Regeln der Stabilitätstheorie bemessen werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist die ersten Erkenntnisse des Beulverhaltens dünner UHPFRC-Scheiben unter reiner Druckbeanspruchung zu gewinnen. Zu diesem Zweck wurden anhand von Beulversuchen und zahlreichen FE-Simulationen die grundlegenden Merkmale des Tragverhaltens UHPFRC-Scheiben festgestellt.

Für eine sorgfältige Planung des Versuchsaufbaus wurde zuerst im ersten Teil dieser Arbeit der Grundfall des Beulens an vierseitig gelenkig gelagerten UHPFRC quadratischen Scheiben ausführlich untersucht. Die erzielten Ergebnisse ermöglichen die ersten Abmessungen des Versuchskörpers (Wandstärke und Breite) unter Berücksichtigung der maximalen Prüflast im Labor und der Komplexität der Herstellung festzulegen. Die Analyse der linearen und nicht linearen Berechnung zeigen, dass die kritische Beullast über die Eulerkurve liegen, dieses Verhalten bezeichnet im Stahlbau ein überkritisches Beulverhalten und ist bei den untersuchten UHPFRC Quadratscheiben ab einer Breite von 200 cm gegeben.

Für die Abmessungen des Versuchskörpers wurde gezielt die Höhe so festgelegt, dass es nur einwellige in der Mitte der Scheibe beult. Damit sollte die entstehende Beulfigur in der Scheibemitte eine ähnliche Form und ein ähnliches Verhalten, wie die Beulfigur einer Quadratscheibe aufweisen. Es drängt sich damit der Vergleich mit Druckstäben auf, wo man ebenfalls mit einer Ersatzstablänge nämlich der Knicklänge arbeitet. Flansche wurden an den vertikalen Rändern der Scheibe angeordnet um Verschiebungen von diesen aus der Ebene zu verhindern, jedoch wegen der geringen Torsionssteifigkeit der Flansche sind Verdrehungen der vertikalen Ränder möglich. Gleich wie bei den Quadratscheiben wurde auch bei den numerischen Ergebnissen des Versuchskörpers ein überkritisches Tragverhalten erkannt, ist aber solchem Verhalten ab einer Breite von 150 cm gegeben. Da für den Erfolg des Versuchsaufbaus die Auswirkungen der numerischen Voraussage ausschlaggebend sind, wurde vor dem Versuch das Tragverhalten des Versuchskörpers ausführlich analysiert und interpretiert. Dafür wurde für diesen ersten Teil der Arbeit der Versuchskörper mit den Abmessungen 150-240 cm ausgewählt. Anhand der erzielten Ergebnisse wurde die Anordnung der Messaufnehmern im Versuchskörper festgelegt.

Für die Herstellung des Versuchskörpers wurde der ultrahochfeste Feinkornbeton Ductal mit Stahlfasergehalt verwendet. Der Beton wurde in stehender Schalung von oben mittig eingefüllt. Es wurden insgesamt 15 Versuchskörper hergestellt, die entsprechend Ihrer Geometrie in 5 Beulserien gruppiert wurden. Die Beulserien wurden gemäß der Breite des Versuchskörpers gekennzeichnet (50-00, 75-00, 100-00, 150-00 und 200-00). Nach dem Ausschalen des Versuchskörpers stellte sich heraus, dass durch Absetzen des Frischbetons besonders bei den großen Beulserien beachtliche Unebenheiten im oberen Rand entstanden. Um das zu verbessern wurden einige Zen-

timeter dieses Randes abgeschnitten. Die FE-Berechnung zeigte, dass diese veränderten Abmessungen keinen relevanten Einfluss auf dem gesamten Tragverhalten haben.

Nach der Messung der Wandstärke des Versuchskörpers wurde auch festgestellt, dass die flüssige Konsistenz der Mischung ein besonders hoher Druck auf der Schalung bewirkte, das verursachte vor allem bei den großen Beulserien markante Abweichungen von der planmäßigen Dicke. Die gemessenen Stellen zeigten besonders im unteren Bereich der Scheibe großen Dickenunterschied. Die numerische Simulation zeigte, dass diesen veränderten Parameter bei manchen Fällen eine erhebliche Erhöhung der Tragfähigkeit verursachte. Für die Auswertung und Interpretation der Versuchsergebnisse wurde die numerische Simulation jedes Versuchs unter Berücksichtigung dieser Kenngröße nachgerechnet.

Ein bedeutender Punkt während der Durchführung des Versuches war die Einleitung der Vorauslenkung. Da bei den FE-Berechnungen eine Vorverformung von 1 mm in Form der ersten Eigenform zufriedenstellende Ergebnisse ergaben, ist im Versuch die Annahme solcher Größe undenkbar, den ohnehin bereits die eigene imperfekte Wandstärke der Scheibe besonders bei den großen Schlankheiten ausgeprägte Unterschied zeigte.

Die planmäßige "Imperfektion" im Versuchskörper wurde mittels einer Auslenkungskraft (F_z) erhalten, die auf der Mitte der stehenden Scheibenebene aufgebracht wurde. Die Zielsetzung war eine planmäßige Vorverformung einerseits so gering auszubilden, dass sich das Lastniveau der Verzweigungslast in einer Last-Beulverformungskurve deutlich abbilden aber andererseits so groß zu wählen, dass die Richtung der Beulverformung vorweg bekannt ist. Die Einleitung der Vorauslenkung ergab sich im Versuch als sehr aufwendig, es wurden bei den ersten Versuchen (Beulserie 75-00) mehrere Methoden anprobiert, bis die endgültige Einleitung der Vorauslenkung erzielt wurde (ab der Beulserie 100-00).

Im Versuch wurde die Belastung des Versuchskörpers in 3 Etappen erfolgt. Zuerst wurde eine geringere Normalkraft (F_y) aufgebracht, um ausreichende Reibung in der Last-Einleitungsfuge zu aktivieren, sodass die Auslenkungskraft (F_z), die in der zweiten Etappe aufgebracht wurde, aufgenommen werden konnte. Drittens wurde nach der erzielten Vorauslenkung die endgültige Belastung (F_y) aufgebracht. Da die erreichte Vorverformung der Scheibe im Gegenteil zu einer echten Imperfektion ein elastisch verformter Zustand ist, ist bei der Ausführung der dritten Etappe zu berücksichtigen, dass die Auslenkungskraft über die gesamte Dauer des Versuchs erhalten bleiben muss.

Nach den ersten Versuchsergebnissen wurde festgestellt, dass der verwendete Ausgleichmörtel (am oberen Rand des Versuchskörpers) nicht für die Querdehnungsbehinderung sorgte, das führte zum vorzeitigen Versagen im Lasteinleitungsbereich des Versuchskörpers (oberer Rand), um dieses Problem zu verbessern wurden die horizontalen Ränder mit Stahlplattenmanschetten verstärkt. Die numerische Berechnung zeigte, dass das Tragverhalten des Versuchskörpers mit verstärkten und unverstärkten Rändern sich einander unwesentlich unterscheiden.

Während der Durchführung des Versuchs wurden im Versuchskörper (Innenseite) horizontale und vertikale Dehnungen im Bereich der Scheibenmitte aufgenommen, es wurden auch horizontale Dehnungen an den Einspannstellen und vertikale Dehnungen in oberen und unteren Bereich der Scheibe gemessen. Zusätzlich wurden die Verformungen aus der Ebene entlang einer vertikalen und horizontalen Biegelinie gemessen, wobei als Referenzpunkt 0,0 genommen wurde.

Wegen des beträchtlichen Wandstärkeunterschieds der Scheibe, der trotz der sorgfältigen Modellierungsarbeit bei bestimmten Fällen nicht so genau realisiert wurde, weichen an einigen Mess-

stellen die gemessenen Dehnungen im Labor und bei der FE-Ergebnisse etwas ab, außerdem ist zu berücksichtigen, dass im Bereich der Einspannstellen die Rissbildungen bei manchen Fällen etwas entfernt von den Messaufnehmern auftraten, und daher nicht von diesen erfasst wurden. Abgesehen davon stimmen die Ergebnisse der gemessenen Dehnungen im Versuch und der FE-Ergebnisse ziemlich gut überein. Im Versuchskörper wurden vor allem im Bereich der Scheibenmitte (Außenseite) zahlreiche vertikale und horizontale Risse (ab der Beulserie 100-00) gefunden. An den Einspannstellen wurden insbesondere in der Innenseite ausgeprägte vertikale Risse beobachtet.

Da ab der Beulserie 150-00 der untere Bereich eine wesentliche große Wandstärke als der obere Teil der Scheibe zeigte, wurde nach den vertikalen Biegelinien erkannt, dass sich die Beulverformung etwas mehr nach oben verschoben hatte.

Für die Analyse und Interpretation des Beulverhaltens wurden die Normalkraft-Moment-Interaktionsdiagramme herangezogen. Sie zeigten die Entwicklung der inneren Normalkräfte (n_y , n_x) und Biegemomente (m_{xy} , m_{yx}) in den relevanten Punkten der Scheibe, nämlich die Scheibenmitte (B), die Einspannstellen (A) und der obere Bereich der Scheibe (C).

Zusätzlich lieferte eine genauere Untersuchung der Verteilung der bezogenen Normalkraft n_y , n_x , und des bezogenen Moments m_{xy} entlang der Breite der Scheibe einen ausführlichen Überblick des Tragverhaltens. Abschließend um vollständig den Versagensmechanismus der gefährdeten Stellen zu interpretieren, wurde die Spannungs- und Dehnungsverhalten über der Wandstärke gründlich analysiert. Für die Untersuchung des Tragverhaltens wurde von jeder Beulserie der Versuch ausgewählt, bei dem die Laborwerte mit den FE-Ergebnissen am besten übereinstimmen.

Bei dem Tragverhalten der Beulserie 50-00 (Schlankheit 15) wurde erkannt, dass sich der mittlere Bereich der Scheibe während des gesamten Versuchs etwas mehr an der Lastübernahme als der restliche Teil des Versuchskörpers beteiligt. Die Zugfestigkeit in horizontaler Richtung wurde in der Scheibenmitte erreicht, das führte zum Steifigkeitsverlust des horizontalen Systems, der aber einen minimalen Einfluss auf dem gesamten Tragverhalten hatte. Nach dem Normalkraft-Moment-Interaktionsdiagramm nimmt die Normalkraft n_y in der Scheibenmitte progressiv zu, bis die Versagenskurve in der Druck-Druck-Zone erreicht wurde. Für diese Schlankheit wurde im Versuch ein Druckversagen mit leichter Biegung beobachtet.

Da während der Durchführung der Versuche der Beulserie 75-00 (Schlankheit 22) die endgültige Einleitung der Auslenkungskraft nicht erzielt wurde, ist der Einfluss dieser Parameter bei den Laborergebnissen zu erachten. Eine klare Einwirkung dieser Parameter während des Versuchs war die geringe erreichte Beulverformung gegenüber der FE-Berechnung. Daher hat die Ergebnisse der numerischen Simulation für diesen Fall verminderte Aussagekraft. Abgesehen davon wurde in Versuch ein klassischer Druckbruch mit typischen Schubversagen aus der Ebene beobachtet. Bei der numerischen Berechnung wurde einen Bruchspannungszustand in der Druck-Druck-Zone erkannt.

Bei der Beulserie 100-00 (Schlankheit 30) wurde festgestellt, dass die Scheibenmitte in der ersten Phase etwas mehr als der restliche Teil des Versuchskörpers belastet wurde, mit dem Steifigkeitsverlust des Bereiches nahmen die bezogene Normalkraft n_y in B stetig ab. Eine Umlagerung der Normalkraft zu den vertikalen Rändern ist im Vergleich zu den größeren Schlankheiten für diese Beulserie sehr gering.

Für diesen Fall wurde gesehen, dass die verwendete Vorauslenkung horizontale und vertikale Risse in B verursachten, diese bewirkten ein generell weiches Verhalten der Scheibenmitte. Mit der Bildung von vertikalen Rissen an den Einspannstellen verliert das horizontale System an Steifigkeit, und verursacht dadurch eine starke Erhöhung der vertikalen Momente m_{yx} in B und C. Zu berücksichtigen ist, dass ab dieser Schlankheit die vertikale Beanspruchung in B in dem Schnittkraftentwicklungs-Diagramm ein Maximum erreicht.

Anders als bei dem konventionellen linearen Beulverhalten wurde für diese Schlankheit erkannt, dass mit der stetigen Zunahme der Beulverformung in B und den gleichzeitigen abnehmenden Zugspannungen am Biegezugrand Druckkräften in der Scheibenmitte entstehen, die allmählich mit der Belastung steigen. Am Ende der numerischen Simulation erreichten sowohl die vertikale Beanspruchung in B als auch die horizontale Beanspruchung in A die Versagenskurve.

Im Versuch wurden zahlreiche vertikale Risse besonders im Bereich der Scheibenmitte gefunden. Mit der Lokalisierung von ausgeprägten Rissbildungen an den Einspannstellen ist erkennen, dass die Tragfähigkeit des Bereiches überschritten wurde, dieses Verhalten bewirkte eine rasche Umlagerung der Normalkraft an einem Flansch, der dann auf Druck versagte.

Aufgrund des markanten Unterschieds der Wandstärke ist bei den anderen zwei Versuchen der Serie 100-00 eine erhebliche Steigerung in der Tragfähigkeit der Versuchskörper beobachtet. Horizontale Risse wurden nur in der Scheibenmitte und in geringer Anzahl beobachtet.

Bei der Beulserie 150-00 (Schlankheit 40) wurde festgestellt, dass sich mit dem Steifigkeitsverlust die Scheibenmitte (B) die vertikalen Ränder eindeutig mehr an die Lastübernahme beteiligten. In der Verteilung der bezogenen Normalkraft n_y entlang der Breite der Scheibe ist für diese Schlankheit gut zu erkennen, dass die Normalkraft n_y in der Scheibenmitte ein Maximum erreicht, dieses Verhalten signalisiert das Erreichen der kritischen Beullast im System.

Mit der Bildung der ersten vertikalen Risse an den Einspannstellen verliert das horizontale System an Steifigkeit und bewirkt die progressive Erhöhung der vertikalen Momente m_{xy} in B und C. Nach diesem Zeitpunkt mit dem Erreichen der horizontalen Biegetragfähigkeit in B bilden sich ab dieser Schlankheit horizontale Risse in der Scheibenmitte, dadurch wird das horizontale System sehr weich und erlaubt dieses Verhalten die Aktivierung eines Zugfelds in horizontaler Hauptrichtung, das gegen die destabilisierenden Kräfte wirkt. Dieses Zugfeld ermöglicht den weiteren Anstieg der Normalkraft, die hauptsächlich von den Einspannstellen übernommen wird. Der weitere Anstieg der Last wird nach diesem Zeitpunkt nur bei gleichzeitiger Abnahme der vertikalen Druckkraft in der Scheibenmitte (B) und ist mit den zunehmenden horizontalen Rissen in B ermöglicht.

Bei der FE-Berechnung fällt das Erreichen der maximalen Normalkraft im System (Last-Verschiebungsdiagramm) mit dem Erreichen der horizontalen Biegetragfähigkeit an den Einspannstellen zusammen, nach diesem Zeitpunkt fällt die horizontalen Momente m_{xy} in A zurück, auch die vertikalen Momente m_{yx} in B nehmen nach diesem Zeitpunkt nicht mehr zu und kündigen damit das lokale Versagen des Bereiches an.

Im Versuch das Auftreten von ausgeprägten Rissen an beiden vertikalen Rändern (Innen und Außenseite) bestätigt das lokale Querschnittversagen der Einspannstellen (A). In der Scheibe selbst wurden hauptsächlich vertikale Risse gefunden, feine horizontale Risse wurden im Vergleich zur Schlankheit 60 nur in geringerer Anzahl im Bereich der Scheibenmitte gesehen. Zu berücksichtigen ist, dass um Risse analysieren zu können, der Versuch vor dem endgültigen Bruch des Versuchskörpers abgebrochen wurde.

Gleich wie bei der Schlankheit 40 wird bei der Beulserie 200-00 (Schlankheit 60) die Normalkraft n_y nach dem Steifigkeitsverlust der Scheibenmitte ausschließlich von den Einspannstellen übernommen. Da die verwendete Auslenkungskraft vertikale Risse in B verursachten, die das schwächere Verhalten des Bereiches hervorrufen, ist ab dieser Schlankheit zu berücksichtigen, dass das Erreichen der maximalen aufnehmbaren Last in der Scheibenmitte nicht mehr so klar zu erkennen ist.

Das Tagverhalten dieser Beulserie verhält sich ziemlich gleich als bei der Schlankheit 40. Erst am Ende der numerischen Simulation unterscheidet sich das Versagens Mechanismus der Beulserie 200-00 zur Beulserie 150-00 etwas von einander.

Im Versuch 200-02 kündigt der Lastabfall nach Erreichen der maximalen Normalkraft den endgültigen Bruch des Versuchskörpers an. Anders als Schlankheit 40 wurde die Einspannstellen nicht zu hoch belastet, die Spannungsverteilung über die Dicke in A zeigten, dass zum Zeitpunkt des Erreichen der maximalen Normalkraft die Biegedruckseite an der Innenseite am höchsten belastet wurde. Zum gleichen Zeitpunkt nähert sich auch die vertikale Beanspruchung in der Scheibenmitte zur Versagenskurve und wird kein vertikales Moment m_{yx} von B übernommen. Am Ende der numerischen Berechnung erreichen sowohl die horizontale Beanspruchung n_x in A als auch die vertikale Beanspruchung n_y in B die Versagenskurve.

Im Versuch wurde ein explosionsartiger Bruch von einem Teil des rechten Flansches beobachtet. Für diese Beulserie zeigten die Versuchsergebnisse, dass die Scheibenmitte im Vergleich zur Schlankheit 40 viel mehr beschädigt wurde, zahlreiche und ausgeprägte vertikale und horizontale Risse wurden im Bereich der Scheibenmitte gefunden, an die Einspannstellen wurden hauptsächlich in der Innenseite erhebliche vertikale Risse entlang der Höhe beobachtet.

Die gesamten erzielten Erkenntnisse in dieser Arbeit zeigen, dass es bei Scheiben aus UHPFRC eine Verzweigungslast gibt, die aufgrund der charakteristischen Rissbildung kleiner ist als jene nach linear elastischer Beultheorie. Sie wird im Folgenden als Verzweigungslast im Zustand II bezeichnet. Entsprechend dieses Verhaltens verschiebt sich auch das überkritische Tragverhalten. Es beginnt bereits beim Überschreiten der Verzweigungslast im gerissenen Zustand II, dieses Verhalten ist durch die zunehmende Umlagerung der Normalkraft von der Mitte zu den vertikalen Rändern und durch einen Peak in der m-n Linien des Interaktions-Diagramms (vertikaler Beanspruchung in B) zu erkennen

Die gute Übereinstimmung der Laborergebnisse und FE-Berechnungen, und die Plausibilität der Ergebnisse im Kapitel 6 (numerische Untersuchung der Bodenplatte einer Brücke mit Kastenquerschnitt) bestätigt außerdem, dass die FE-Simulationen, wie sie in dieser Arbeit gemacht wurden, bestens geeignet sind, um andere Lagerungsbedingungen und Belastungsfälle mit dem Ziel der Verallgemeinerung zu studieren.

Ausblick

Die vorliegende Arbeit behandelt das Tragverhalten einer dünnwandigen Scheibe unter einer in der Scheibenebene einwirkenden Normalkraft. Beispielweise tritt eine derartige Beanspruchung bei Kastenbeanspruchung in Druckgurt (unter einer Biegebeanspruchung) auf. Ein weiteres Stabilitätsproblem könnte auch in den Stegen der Kästen eintreten, wenn dort eine entsprechende hohe Querkraft wirkt. Diese Instabilität wird als "Schubbeulen" bezeichnet. Dieses interessante Problem übersteigt den Rahmen der vorliegenden Arbeit und ist deshalb in einer eigenen Forschungsarbeit zu untersuchen.

Die großen Streuungen bei den Versuchen mit sehr kleiner Schlankheit zeigen, dass die Druckfestigkeit aufgrund der Dünnwandigkeit eine sehr sensible Größe ist. Die Berücksichtigung der Abnahme der Druckfestigkeit aufgrund der überwiegend parallel zur Scheibenebene ausgerichteten Fasern in Abhängigkeit der Wandstärke und Faserlänge darf in künftigen Bemessungsregeln nicht fehlen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Hirt, M., Bez, R.: Stahlbau: Grundbegriffe und Bemessungsverfahren, Berlin, 1998
- [2] Grote, H.: Zum Einfluss des Beulen auf die Tragfähigkeit von Walzprofilen aus hochfestem Stahl. Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum, 2003
- [3] Bryan, G. H.: On the stability of a plate under thrust in its own plane, with applications to the Buckling of the sides of a ship; Proc. London Math. Society, Vol. 22, 1891
- [4] Luible, A.: Stabilität von Tragelemente aus Glas, Dissertation, Lausanne, 2004
- [5] Petersen, C.: Statik und Stabilität der Baukonstruktionen: elasto- u. plasto-stat. Berechnungsverfahren druckbeanspruchter Tragwerke; Nachweisformen gegen Knicken, Kippen, Beulen; Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden 1980
- [6] Karman, Th. :, Festigkeitsprobleme im Maschinenbau; Encyclopädie der Math. Wissenschaften, Teilband IV.4, Leipzig, 1910
- [7] Spiegelhalter U. :, Zum Material Ermüdung infolge Stegatemung. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart, 2000
- [8] Winter, G. Thin-walled structures - Theoretical solutions and test results. Prelim Publ., 8th. Congress IABSE, New York 1968, 101-112
- [9] Marguerre, K. :, Die mitragende Breite der gedrückte Scheibe , Luftfahrt-Forschung 14, 121-128, 1937
- [10] Marguerre, K. :, Zur Theorie der gekrümmten Scheibe großer Formänderung; Proc. 5th Int. Congress for Appl. Mech (Cambridge Mass. 1938), New York 1939
- [11] Wolmir, A.S.:Biegsame Platten und Schalen. VEB Verlag für Baugeswesen, Berlin, 1962
- [12] Verein Deutscher Eisenhüttenleute:Stahl im Hochbau, Auflage 14, Band I/Teil 2, Düsseldorf, 1986
- [13] Knobloch, M.:Zum Tragverhalten Beulgefährdeter Stahlquerschnitte bei Brandeinwirkung. Dissertation, Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zurich, 2007
- [14] EUROCODE 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten- Teil1-5: Scheibenbeulen (EN 1993 1-5:2006), 2006

- [15] DIN EN 12620: Gesteinkörnungen für Normalbeton, 2004
- [16] Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T., Fröhlich, S.: Ultrahochfester Beton UHPC. In Proc. Betonkalender 2013, (Bergmeister K., Fingerloos F., Detrich- Wörner J.): Lebensdauer und Instandsetzung- Brandschutz, Heft 9, S. 119-131, Berlin, 2013.
- [17] Scheydt, J.; Herold, G.; Müller Harald S: Ultrahochfester Beton; Innovationen in der Betonbautechnik, 3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Universität Karlsruhe (TH), pp. 33-44, 2006
- [18] Reinhard, H.: Beton. In Proc. Betonkalender 2007, (Bergmeister K., Detrich- Wörner J.): Verkehrsbauten Flächentragwerke, Heft 4, S. 461-470, Berlin, 2007.
- [19] Nachhaltige Bauen mit Ultra-Hochfesten Beton (UHPC) zur Leistungssteigerung, Umweltentlastung und Kostensenkung im Betonbau, Kassel 2004
- [20] Mazanec, J.: Charakterisierung der Mischzeit und des rheologischen Verhaltens ultrahochfester Betone unter Einbeziehung interpartikulärer Wechselwirkung. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Technische Universität München, 2012
- [21] Thienel, K.-CH., Kusterman, A.: Sonderbetone. Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, 2011
- [22] Freytag, B.: Die Glas-Beton-Verbundbauweise. Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwissenschaften, Technische Universität Graz, 2002
- [23] Dassault Systems: Abaqus Version 5.8, Volumen II, Abaqus Standard
- [24] Lubliner, J., Oliver, J.; Oller, S.; Onate, E.: A plastic-damage model for concrete. International Journal of Solids and Structures, 25(3), pp. 299-326, 1989
- [25] Lee, J.; Fenves, G. L.: Numerical implementation of plastic-damage model for concrete under cyclic loading: Application to Concrete dam. Rep. No. UCB/SEMM-94/03, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley 1994
- [26] Lüftnegger, M.: Ermittlung der Stahlfasernorientierung an scheibenartigen Bauteile aus ultrahochfestem Beton und Erfassen des Einflusses unterschiedlicher Herstellungsmethoden. Diplomarbeit, Institut für Betonbau, Technische Universität Graz, 2007
- [27] Institut für Stahlbau: Holzbau und Flächentragwerke; Vorlesungsskriptum Stahlbau, Technische Universität Graz; 2002

- [28] Heinzle, G., Freytag, B.: Bestimmung von Fasergehalt und- Orientierung mittels fotografischem Verfahren - Theorie und Anwendung. FGG-Projekt 813129/621, Endbericht Teil 3/7, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Technische Universität Graz, 2009
- [29] Heinzle, G., Freytag, B., Sparowitz L.: Herstellungsmethoden, Faserorientierung/-verteilung und Bogenmontage der Wild-Brücke. FGG-Projekt 819342, Endbericht Teil 2/6, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Technische Universität Graz, 2010
- [30] Freytag, B., Heinzle, G., Santner, H.: Zerstörungsfreier Bestimmung der richtungsabhängigen Zugtrageigenschaften von stahlfaserbewerten Bauteilen aus UHPC. FibreScan A3-22.F-10 /2009-6, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Technische Universität Graz, 2013
- [31] Österreichisches Normungsinstitut: ONR 23303 Prüfverfahren Beton (PVB) Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe. 2010
- [32] Curbach, M.; Speck, K.: Zweiaxiale Druckfestigkeit von ultrahochfestem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 102, Heft 10, pp. 664-673, 2007
- [33] Wiegand, E.: Ein Beitrag zur Beulstabilität von Stahlbetonwände mit nichtlinear-elastische Werkstoffgesetz. Dissertation. Fakultät für Bauingenieurwesen, Technische Hochschule Darmstadt, 1970
- [34] Fehling, E.; Leutbecher, T.; Röder, F-K.; Stürwald, S.: Structural behavior of UHPC under biaxial loading. In: Ultra High Performance Concrete (UHPC), Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, pp. 569-5
- [35] Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken- Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, 2009