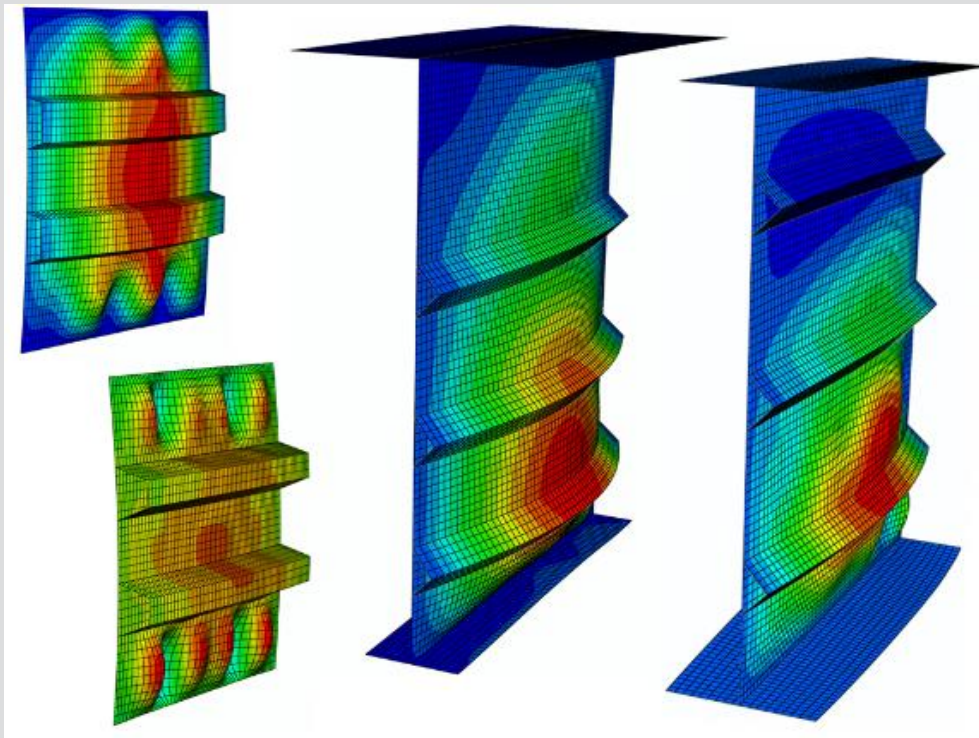


Realitätsnahes Beultragverhalten mehrfach ausgesteifter Beulfelder



D-5-61/2017

Tanja Stadler
Institut für Stahlbau
Technische Universität Graz



Realitätsnahes Beultragverhalten mehrfach ausgesteifter Beulfelder

Masterarbeit

verfasst von

Tanja Stadler

eingereicht am

Institut für Stahlbau

Technische Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Unterweger

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Kettler

Graz, Juni 2017

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die in den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Unterweger für das interessante Thema meiner Masterarbeit und die Bereitstellung eines Arbeitsplatzes danken. Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Kettler für die hervorragende Betreuung bedanken.

Besonders danken möchte ich meinem Freund, Andreas, der im Laufe meines Studiums immer für mich da war und mich mit viel Geduld tatkräftig unterstützt hat.

Außerdem danke ich meinen StudienkollegInnen für eine unvergesslich schöne Studienzeit.

Der größte Dank gilt jedoch meinen Eltern, die es mir überhaupt erst ermöglicht haben zu studieren.

Kurzfassung

Im Zuge dieser Masterarbeit wird das Beultragverhalten mehrfach ausgesteifter Beulfelder, welche vor allem im Brückenbau zur Anwendung kommen, untersucht. Nach EN 1993-1-5 kann die Beultragfähigkeit mit zwei verschiedenen Methoden nachgewiesen werden. Es gibt die Methode der effektiven Querschnitte und die Methode der reduzierten Spannungen, wobei letztere nach dem nationalen Anhang in Österreich empfohlen wird und das konservativere Verfahren darstellt. In Österreich sind in den 1970er und 1980er viele Stahl- bzw. Verbundbrücken, deren Hauptträger viele Längssteifen aufweisen, gebaut worden. Aufgrund höherer Verkehrslasten bzw. Fahrbahnverbreiterungen werden die Brückentragwerke zunehmend stärker belastet. Mit der Methode der effektiven Querschnitte könnten höhere Tragfähigkeiten erzielt werden und wirtschaftlicher gearbeitet werden. Das Hauptziel dieser Arbeit ist mit Hilfe geometrisch und materiell nichtlinearen FE-Berechnungen mit geometrischen Ersatzimperfektionen zu untersuchen, ob die Methode der effektiven Querschnitte auch bei mehrfach ausgesteiften Beulfeldern ohne Einschränkungen anwendbar ist. Insbesondere auf die Fragestellung, ob es möglicherweise zu einer verminderten Spannungsumlagerung kommen kann, wird in dieser Arbeit näher eingegangen. Außerdem wird die Interaktion von Schub und Biegemoment näher untersucht.

Abstract

In the course of this thesis, the buckling behavior of multiple stiffened buckling fields, which are first and foremost used in bridge construction, will be investigated. In EN 1993-1-5, the buckling resistance can be proved by two different methods. There are the effective width method and the reduced stress method, the latter is recommended by the Austrian national annex and represents the conservative method. In the 1970s and 1980s, many steel and composite bridges, which showed numerous longitudinal stiffeners on their main beams, were built. Due to the higher traffic load and roadway widening, the bridge support structure will face an increasingly heavier load. The effective width method could achieve higher load carrying capacity and generate economic benefits. The main aim of this work is, by means of a geometrical and material nonlinear finite element calculation with geometrical equivalent imperfections, to investigate whether the effective width method is applicable without limitations in case of multiple stiffened buckling fields. Particularly, the question whether it could, perhaps, lead to reduced stress rearrangement, will be addressed in more detail. Furthermore, the interaction between shear force and bending moment will be explored in greater detail.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	Allgemein	1
1.2	Motivation und Ziele der Arbeit	1
1.3	Umfang	2
2	VERGLEICH DER NACHWEISKONZEPTE NACH EUROCODE.....	4
3	SYSTEMBESCHREIBUNG & MODELLBILDUNG	8
3.1	FE-Modell.....	9
3.1.1	Material.....	9
3.1.2	Anzahl der Felder	9
3.2	Systeme	9
3.2.1	System S1.....	9
3.2.2	System S2.....	10
3.2.3	System S6.....	11
4	NUMERISCHE TRAGLASTBERECHNUNGEN.....	14
4.1	Lineare Analyse	14
4.2	Lineare Beulanalyse	15
4.2.1	Ansatz von Imperfektionen.....	17
4.2.2	Zusammenwirken von Imperfektionen.....	19
4.3	GMNIA - Berechnung.....	19
4.4	Vergleich der Beultragfähigkeit mit den Ergebnissen nach Eurocode [1].....	20
5	DEHNUNGSVERLÄUFE VOR UND NACH DEM TRAGLASTMAXIMUM	21
5.1	Erläuterung zur Vorgehensweise.....	21
5.1	Ermittlung der Dehnungen	22
5.2	System S1.....	23
5.3	System S2.....	28
5.4	System S6, Var-A	33
5.5	System S6, Var-B	36

5.6	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	41
6	INTERAKTION ZWISCHEN SCHUB UND BIEGEMOMENT	42
6.1	Berechnung nach EN 1993-1-5 [1], Abschnitt 7	42
6.2	Hintergrund der numerischen Berechnung.....	43
6.3	Ergebnisvergleich anhand eines Interaktionsdiagramms.....	44
6.3.1	Interaktionsdiagramm – Variante I	46
6.3.2	Interaktionsdiagramm – Variante II	47
7	PRAXISBEISPIEL.....	49
7.1	Anlageverhältnisse	49
7.2	Hintergrund der numerischen Berechnung.....	50
7.3	Problematik der zutreffenden Spannungsverteilung	50
7.4	Ergebnisvergleich anhand eines Interaktionsdiagramms.....	51
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	53
9	LITERATURVERZEICHNIS	55

Anhang A

A	ABMESSUNGEN DER UNTERSUCHTEN SYSTEME	A-1
A.1	System S1 & S2.....	A-1
A.2	System S6.....	A-2
A.3	Längssteifen	A-3
A.4	Quersteifen	A-4
A.5	Gurte.....	A-4

Anhang B

B	BERECHNUNGEN NACH EN 1993-1-5 [1]	B-1
B.1	System S1.....	B-1
B.1.1	Berechnungen nach dem MEQ-Verfahren.....	B-1

B.1.2	Berechnungen nach dem MRS-Verfahren	B-7
B.2	System S2	B-8
B.2.1	Berechnungen nach dem MEQ-Verfahren	B-8
B.2.2	Berechnungen nach dem MRS-Verfahren	B-11
B.3	System S6	B-12
B.3.1	Berechnungen nach dem MEQ-Verfahren	B-12
B.3.2	Berechnungen nach dem MRS-Verfahren	B-26
B.4	Praxisbeispiel	B-27
B.4.1	Berechnungen nach dem MEQ-Verfahren	B-27
B.4.2	Berechnungen nach dem MRS-Verfahren	B-37

Anhang C

C ERGEBNISSE DER NUMERISCHEN TRAGLASTBERECHNUNG

C.1	System S1	C-1
C.1.1	Belastung	C-1
C.1.2	Lineare Analyse	C-1
C.1.3	LBA-Berechnung	C-3
C.1.4	GMNIA-Berechnung	C-5
C.2	System S2	C-7
C.2.1	Belastung	C-7
C.2.2	Lineare Analyse	C-7
C.2.3	LBA-Berechnung	C-7
C.2.4	GMNIA-Berechnung	C-9
C.3	System S6, Var-A	C-11
C.3.1	Belastung	C-11
C.3.2	Lineare Analyse	C-12
C.3.3	LBA-Berechnung	C-13
C.3.4	GMNIA-Berechnung	C-15
C.4	System S6, Var-B	C-17
C.4.1	Belastung	C-17
C.4.2	Lineare Analyse	C-17
C.4.3	LBA-Berechnung	C-18
C.4.4	GMNIA-Berechnung	C-20
C.5	System S6, Var-C	C-22
C.5.1	Lastfall 1 – 100% M + 0% V	C-22
C.5.2	Lastfall 2 – 0% M + 100% V	C-25
C.5.3	Lastfall 3 – 25% M + 100% V	C-27
C.5.4	Lastfall 4 – 50% M + 100% V	C-29
C.5.5	Lastfall 5 – 75% M + 100% V	C-31
C.5.6	Lastfall 6 – 100% M + 100% V	C-33

C.5.7	Lastfall 7 – 100% M + 75% V	C-35
C.5.8	Lastfall 8 – 100% M + 50% V	C-37
C.5.9	Lastfall 9 – 100% M + 25% V	C-39
C.6	Praxisbeispiel	C-41
C.6.1	Lastfall 1 – 100% M&N + 0% V	C-41
C.6.2	Lastfall 2 – 0% M&N + 100% V	C-44
C.6.3	Lastfall 3 – 25% M&N + 100% V	C-46
C.6.4	Lastfall 4 – 50% M&N + 100% V	C-48
C.6.5	Lastfall 5 – 75% M&N + 100% V	C-50
C.6.6	Lastfall 6 – 100% M&N + 100% V	C-52
C.6.7	Lastfall 7 – 100% M&N + 75% V	C-54
C.6.8	Lastfall 8 – 100% M&N + 50% V	C-56
C.6.9	Lastfall 9 – 100% M&N + 25% V	C-58

1 Einleitung

1.1 Allgemein

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Beultragverhalten von dünnwandigen Stahlbauträgern mit mehreren Längssteifen, welche vor allem im Brückenbau zur Anwendung kommen. Die Beultragfähigkeit wird einerseits mit FE-Berechnungen und andererseits nach Eurocode [1], welcher zwei verschiedene Nachweiskonzepte zur Verfügung stellt, ermittelt. Es gibt die „Methode der effektiven Querschnitte (MEQ)“ nach EN 1993-1-5 [1], Abschnitt 4-7 und die „Methode der reduzierten Spannungen (MRS)“ nach EN 1993-1-5 [1], Abschnitt 10. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Anwendung nach dem MEQ-Verfahren, wobei näher auf die Spannungsumlagerung sowie die Interaktion von Schub und Biegemoment eingegangen wird.

1.2 Motivation und Ziele der Arbeit

In Österreich sind in den 1970er und 1980er viele Stahl- bzw. Verbundbrücken, deren Hauptträger viele Längssteifen aufweisen, gebaut worden. Aufgrund höherer Verkehrslasten bzw. Fahrbahnverbreitungen, werden die Brückentragwerke zunehmend stärker belastet. Berechnet wurde die Beultragfähigkeit damals nach ÖNORM B 4300-3 [3] bzw. DIN 18800-3 [4] mit dem nun im Eurocode [1] bezeichneten „MRS-Verfahren“, nach welchem die Querschnitte voll ausgelastet sind und für eine weitere Laststeigerung kostspielige Verstärkungen notwendig wären. Mit dem MEQ-Verfahren, welches das Standardverfahren im Eurocode [1] darstellt, können höhere Tragfähigkeiten erzielt werden und folglich auch wirtschaftlicher gearbeitet werden. In der Forschung sind aber bisher vor allem Querschnitte ohne bzw. mit nur wenigen Längssteifen betrachtet worden. Zudem darf im Falle von Plattenbeulen bei Querschnitten der Klasse 4 nach dem nationalen Anhang, ÖNORM B 1993-2 [5] sowie ÖNORM B 1994-2 [6], nur die Methode der reduzierten Spannungen angewendet werden.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist nun mit Hilfe numerischer Berechnungen zu untersuchen, ob das MEQ-Verfahren auch bei mehrfach ausgesteiften Beulfeldern ohne Einschränkungen anwendbar ist. Möglicherweise kann es bei zu steifen Querschnitten zu einer verminderten Spannungsumlagerung kommen. Dies hätte zur Folge, dass die Tragfähigkeit nicht so hoch angenommen werden darf, als wie sie berechnet worden ist. Weiterhin wird die Interaktion von Schub und Biegemoment für Querschnitte mit mehreren Längssteifen untersucht und mit den Nachweisen nach EN 1993-1-5 [1], Abschnitt 7, verglichen.

1.3 Umfang

Die Beultragfähigkeit wird mit einer numerischen Traglastanalyse mit der Software Abaqus [8] ermittelt. Zur Überprüfung der Modellierung und Lasteinleitung erfolgt eine Lineare Analyse (LA). Danach wird eine Lineare Beulanalyse (LBA) zur Ermittlung der lokalen und globalen Eigenwerte durchgeführt. Die dadurch ermittelten Eigenformen werden mit einer geeigneten Skalierung der Amplitude als geometrische Ersatzimperfectionen in der nichtlinearen Traglastanalyse (GMNIA) angesetzt. Der resultierende Laststeigerungsfaktor (LSF) ist gleichbedeutend mit der Ausnutzung η nach dem MEQ-Verfahren bzw. mit dem Abminderungsfaktor ρ_c nach dem MRS-Verfahren – vorausgesetzt es wird in der numerischen Berechnung die Referenzbelastung derart gewählt, dass die elastische Querschnitttragfähigkeit erreicht wird (Fließgrenze f_y in der gedrückten Randfaser). Um die Dehnungen und folglich die Spannungumlagerung zu bestimmen, wird das Nachbeulverhalten genauer untersucht. Die Ergebnisse aus den FE-Berechnungen werden mit jenen nach Eurocode [1] verglichen. Die Modelle setzen sich aus drei Teilfeldern zusammen, die durch ausreichend steife Quersteifen getrennt sind.

Abb. 1.1 stellt die betrachteten Systeme S1 & S2 dar, welche mit einer konstanten Druckspannungsverteilung belastet werden und sich nur in der Bauhöhe der Längssteifen unterscheiden. Diese Systeme stellen Bodenbleche von biegebeanspruchten Kastenquerschnitten dar. Das System S6 wird mit einer veränderlichen Spannungsverteilung ($\psi = -0,25$) belastet, siehe Abb. 1.2, und stellt den Steg eines Hauptträgers dar.

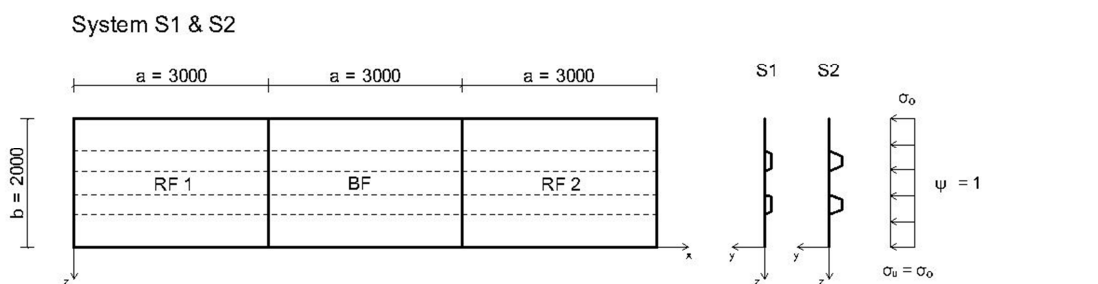


Abb. 1.1: Übersicht System S1 und S2

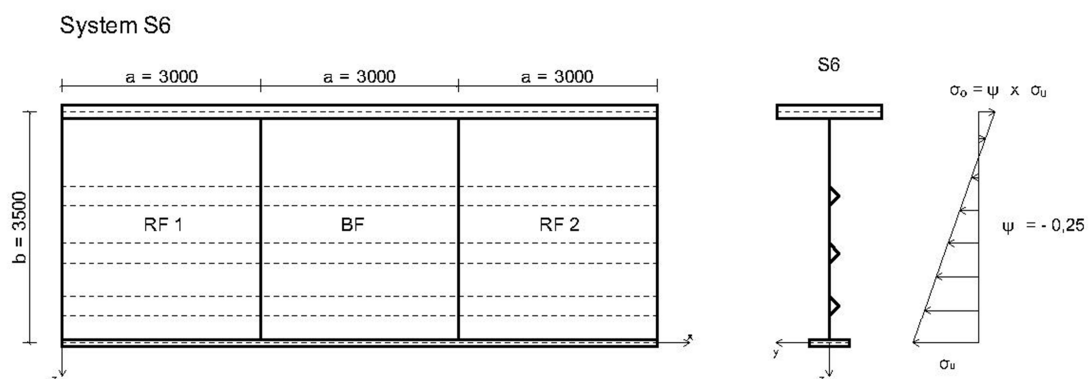


Abb. 1.2: Übersicht System S6

Zudem wird die Beultragfähigkeit bei gleichzeitigem Auftreten von Querkraft und Moment am System S6 sowie an einem Beispiel aus der Praxis, welches in Abb. 1.3 dargestellt ist, untersucht. Es handelt sich dabei um den Hauptträger des Objekts L40 auf der A10 Tauernautobahn. Die numerische Berechnung des Praxisbeispiels erfolgt ebenfalls mittels einer LBA und GMNIA, wobei hier nur mehr ein Feld modelliert wird. Die Ergebnisse werden in Form eines Interaktionsdiagramms dargestellt und mit den Nachweisen nach EN 1993-1-5 [1], Abschnitt 7 verglichen.

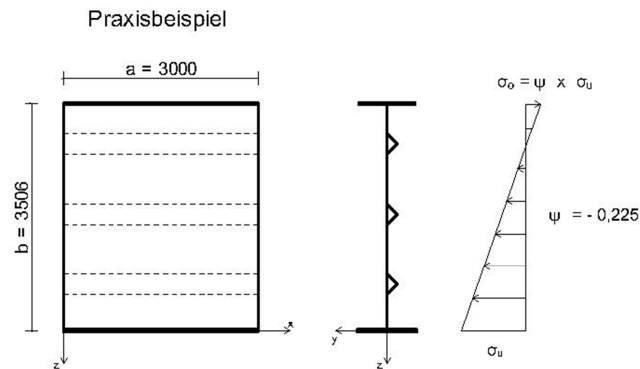


Abb. 1.3: Übersicht Praxisbeispiel

Die Detailabmessungen aller untersuchten Systeme bzw. Beulfelder finden sich in Abschnitt 3.2.

2 Vergleich der Nachweiskonzepte nach Eurocode

Die Nachweise für längsausgesteifte Träger werden in jedem Fall nach EN 1993-1-5 [1] geführt, da die Klassifizierung der Querschnitte nach EN 1993-1-1 [7] nur für Querschnitte ohne Längssteifen gültig ist. Der Eurocode bietet grundsätzlich zwei verschiedene Nachweiskonzepte an: Die „Methode der effektiven Querschnitte (MEQ)“ nach EN 1993-1-5 [1], Abschnitt 4-7 und die „Methode der reduzierten Spannungen (MRS)“ nach EN 1993-1-5 [1], Abschnitt 10.

Bei dem MRS-Verfahren wird die Beanspruchbarkeit durch das schwächste Bauteil bestimmt. Der Nachweis der Beultragfähigkeit ist erbracht, wenn die einwirkende Spannung kleiner ist als die infolge des Beulens abgeminderte Fließspannung. Der Abminderungsfaktor ρ ist von der Geometrie und der Belastung abhängig, worauf hier nicht näher eingegangen wird. Weiterführende Erklärungen sind in [10] zusammengestellt.

Bei der MEQ-Methode werden die Beanspruchungen durch Längs-, Schub und Querbelastungen (lokale steifenlose Lasteinleitung) getrennt betrachtet. In einem weiteren Schritt wird die gleichzeitige Belastung durch einen Interaktionsnachweis abgedeckt. Bei diesem Verfahren werden effektive Querschnittswerte ermittelt, mit welchen sämtliche Nachweise geführt werden. Unter Druckbeanspruchung fallen einzelne Bereiche des Querschnitts aus und der Restquerschnitt nimmt die resultierenden Lasten auf. Die Querschnittsfläche bzw. das Widerstandsmoment des Gesamtquerschnitts werden abgemindert, während in der Randfaser immer die volle Fließspannung erreicht werden kann. Eine Spannungsumlagerung von hochbeanspruchten Querschnittsteilen zu weniger belasteten Teilen ist damit implizit möglich (siehe dazu auch [9] und [11]).

Zur Veranschaulichung der Unterschiede der beiden Verfahren ist in [11] ein vereinfachtes Beispiel beschrieben. Wird ein quadratischer Hohlkastenquerschnitt mit konstanter Wanddicke mit einer Normalkraft belastet, ist die Traglast nach beiden Verfahren gleich groß, da alle Bereiche gleich ausgenutzt sind, wie in Abb. 2.1 zu erkennen ist. Besteht der Kastenquerschnitt allerdings aus zwei dickeren Gurten, ist die Normalkrafttragfähigkeit nach der MEQ-Methode größer als nach der MRS-Methode, bei welcher die dünneren Stege die Tragfähigkeit mit der reduzierten Spannung limitieren. Im Gegensatz dazu werden nach der MEQ-Methode nur die Querschnittsflächen der Stege abgemindert. Diese Stege können sich in der Folge mehr stauchen bis sie die beulsicheren Gurte bei einer Laststeigerung aktivieren und es zu einer Spannungsumlagerung kommt.

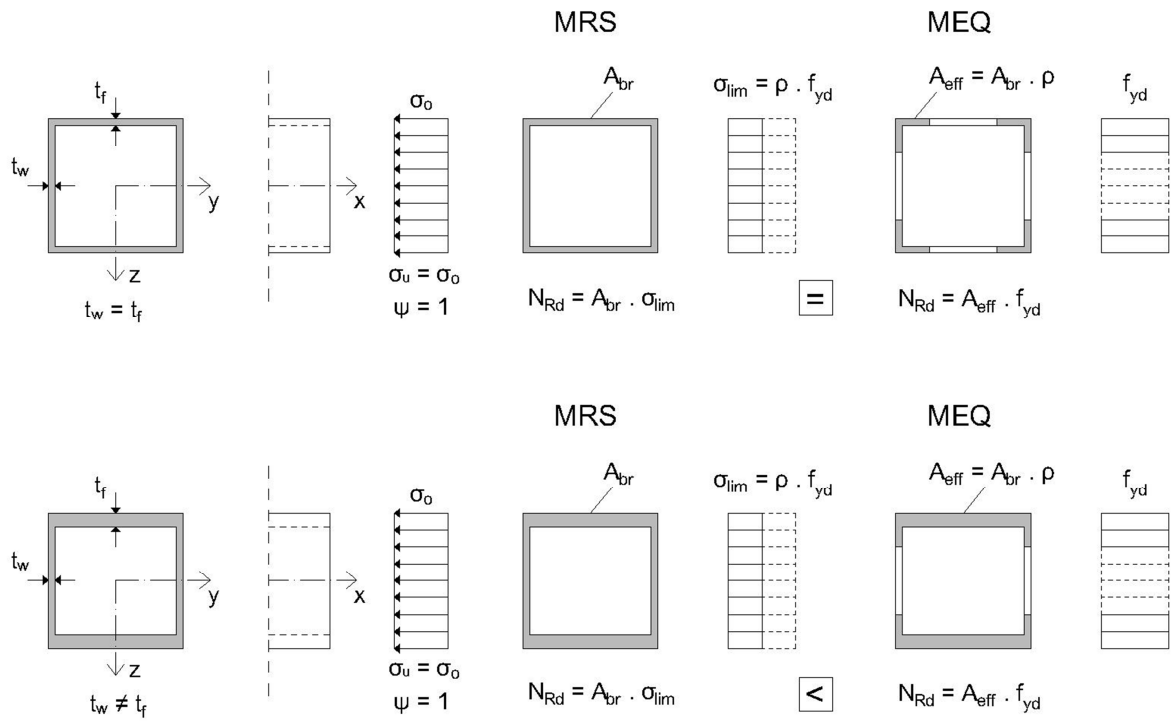


Abb. 2.1: Vergleich der Berechnungsverfahren anhand eines quadratischen Hohlkastenquerschnitts [11]

Betrachtet man einen längsausgesteiften I-Querschnitt unter Biegebeanspruchung, wobei die Gurte beulsicher sind, ergeben sich auch deutliche Unterschiede in der Traglast. Nachdem die Gurte zur Momententragfähigkeit beitragen, ist die Traglast nach dem MEQ-Verfahren höher als beim MRS-Verfahren, da bei diesem wieder das schwächste Querschnittsteil und somit der Steg bemessungsbestimmend ist und die Mithilfe der Gurte nicht berücksichtigt wird. Bei ausgesteiften Trägern muss nun einerseits das lokale und globale Beulen unterschieden werden und andererseits beim globalen Beulen das knickstabähnliche Verhalten mitberücksichtigt werden. Beim MRS-Verfahren wird das lokale und globale Beulen getrennt betrachtet, wobei der kleinere Abminderungsfaktor maßgebend ist. Beim MEQ-Verfahren hingegen wird im ersten Schritt die Querschnittsfläche aus lokalem Beulen abgemindert und in einem zweiten Schritt infolge globalen Beulens, siehe Abb. 2.2. [10]

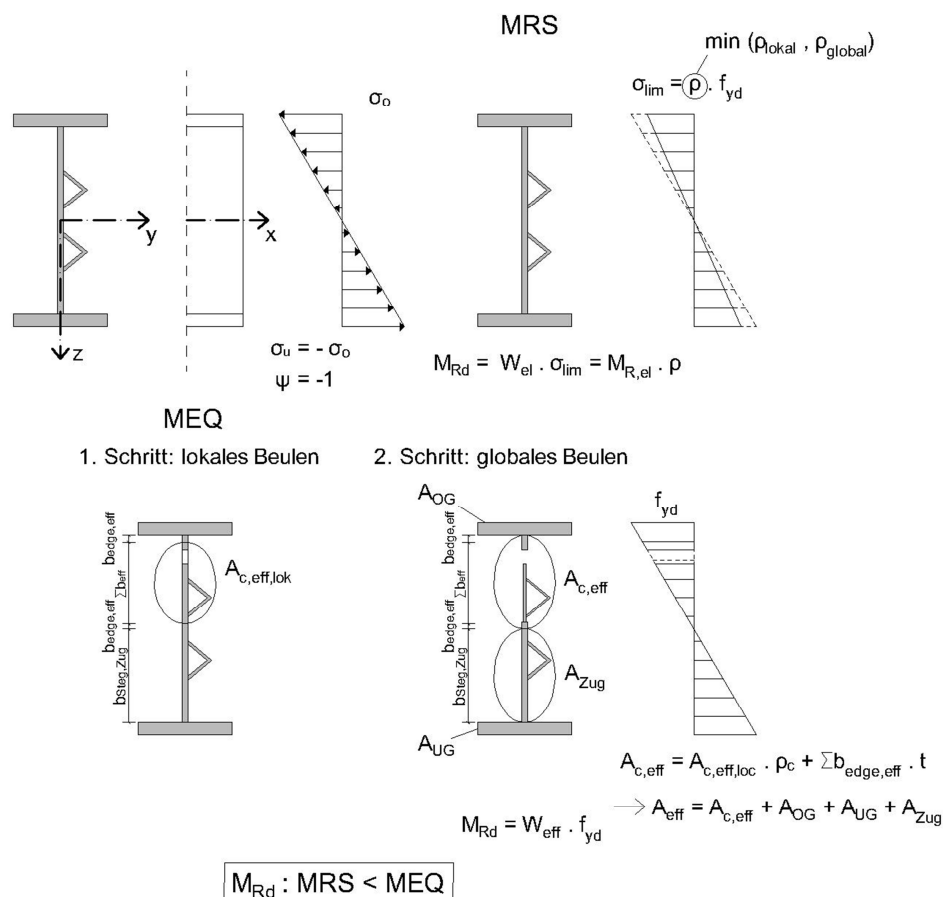


Abb. 2.2: Vergleich der Berechnungsverfahren anhand eines längsausgesteiften Biegeträgers

Bei der Betrachtung des globalen Beulens versagt der längsausgesteifte Querschnitt aufgrund von plattenähnlichen oder knickstabähnlichen Verhalten, meist aber in Form einer Kombination aus beiden.

Für das plattenähnliche Verhalten wird mittels numerischen Berechnungen die kritische Plattenbeulspannung $\sigma_{cr,p}$ bestimmt. Der Eigenwert der globalen Beulfigur entspricht bei einer linearen Beulanalyse dem Laststeigerungsfaktor α_{cr} . Alternativ können die Beulwerte nach Klöppel-Scheer Tabellen [13] oder nach EN 1993-1-5 [1], Anhang A, berechnet werden. Der

Abminderungsfaktor ρ_p wird mit der elastischen Plattenbeulspannung $\sigma_{cr,p}$ über den bezogenen Plattenschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ ermittelt. [12]

Um das knickstabähnliche Verhalten zu erfassen wird bei der MRS-Methode der Plattenschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ herangezogen und der Abminderungsfaktor χ_c bestimmt. Bei der MEQ-Methode wird hingegen der bezogene Knickschlankheitsgrad $\bar{\lambda}_c$ des Ersatzdruckstabes, der sich aus der Bruttofläche der Längssteife und dem mitwirkenden Steganteil zusammensetzt, berechnet. Die Knickspannung $\sigma_{cr,sl}$ der am höchsten belasteten Längssteife wird ermittelt und durch Extrapolation dieser die elastische Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ am Stegblechrand bestimmt. Diese Extrapolation führt zu mitunter sehr konservativen Ergebnissen. [11]

Zur Ermittlung des endgültigen Abminderungsfaktors ρ_c sind die Abminderungsfaktoren ρ_p für plattenähnliches und χ_c für knickstabähnliches Verhalten zu bestimmen und mit Hilfe einer Interaktionsbeziehung nach EN 1993-1-5 [1], Abschnitt 7 zu kombinieren.

$$\rho_c = (\rho_p - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c \quad \text{Gl. (2.1)}$$

$$\text{mit } \xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 ; 0 \leq \xi \leq 1 \quad \text{Gl. (2.2)}$$

Ist die elastische Plattenbeulspannung $\sigma_{cr,p}$ kleiner oder gleich der elastischen Knickspannung $\sigma_{cr,c}$, wird der Querschnitt ein reines knickstabähnliches Verhalten aufweisen. Ein plattenähnliches Verhalten ist wiederum zu erwarten, wenn die elastische Plattenbeulspannung $\sigma_{cr,p}$ doppelt so groß ist als die elastische Knickspannung $\sigma_{cr,c}$, siehe Abb. 2.3.

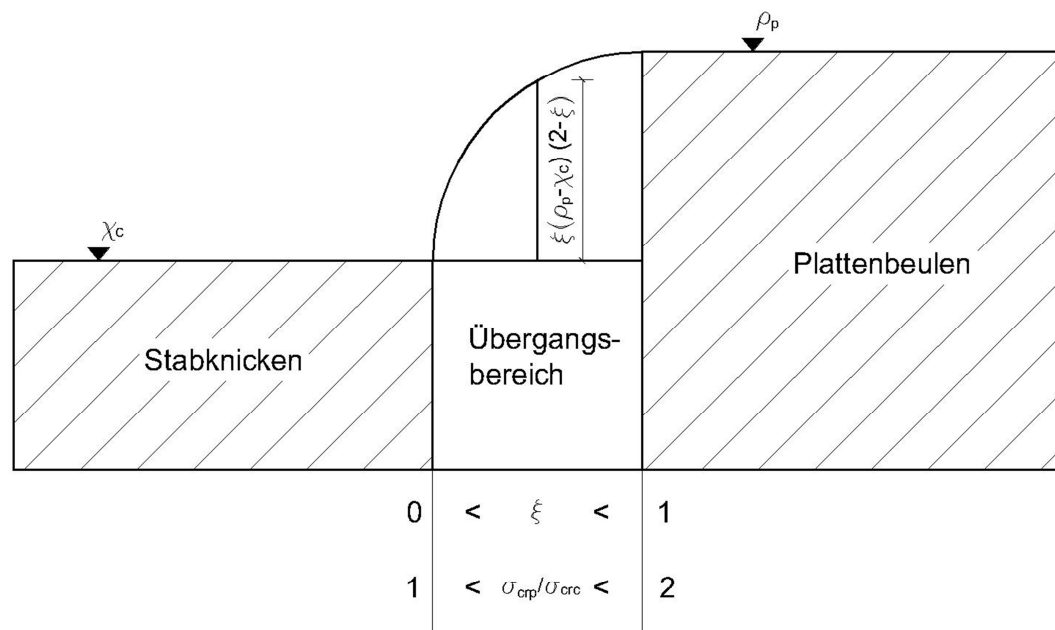


Abb. 2.3: Graphische Darstellung der Interaktionsbeziehung nach EN 1993-1-5 [1]

3 Systembeschreibung & Modellbildung

Die betrachteten Systeme S1, S2 und S6 entsprechen direkt den in der Diplomarbeit von Herrn Gänsluckner [12] in anderem Zusammenhang untersuchten Systemen. Daher wurde auch dieselbe Bezeichnung übernommen, wobei die Systeme S3 bis S5 in dieser Arbeit nicht weiter untersucht wurden.

Die Systeme S1 und S2 spiegeln ein Untergurtblech eines Kastenquerschnitts wider, siehe Abb. 3.1. Der Querschnitt wird mit einer konstanten Normalspannung beansprucht. Die Querkraft wird hier nicht betrachtet.

Das System S6 stellt einen Hauptträger einer Stahl- oder Verbundbrücke dar, siehe Abb. 3.1. Der Bereich nahe der Innenstütze wird betrachtet, wobei der Querschnitt zuerst nur eine Beanspruchung durch ein Biegemoment erfährt. Das gleichzeitige Auftreten von Biegemoment und Querkraft wird in einem weiteren Schritt berücksichtigt. Im Folgenden liegt der Untergurt immer auf der Druckseite bzw. der Obergurt auf der Zugseite.

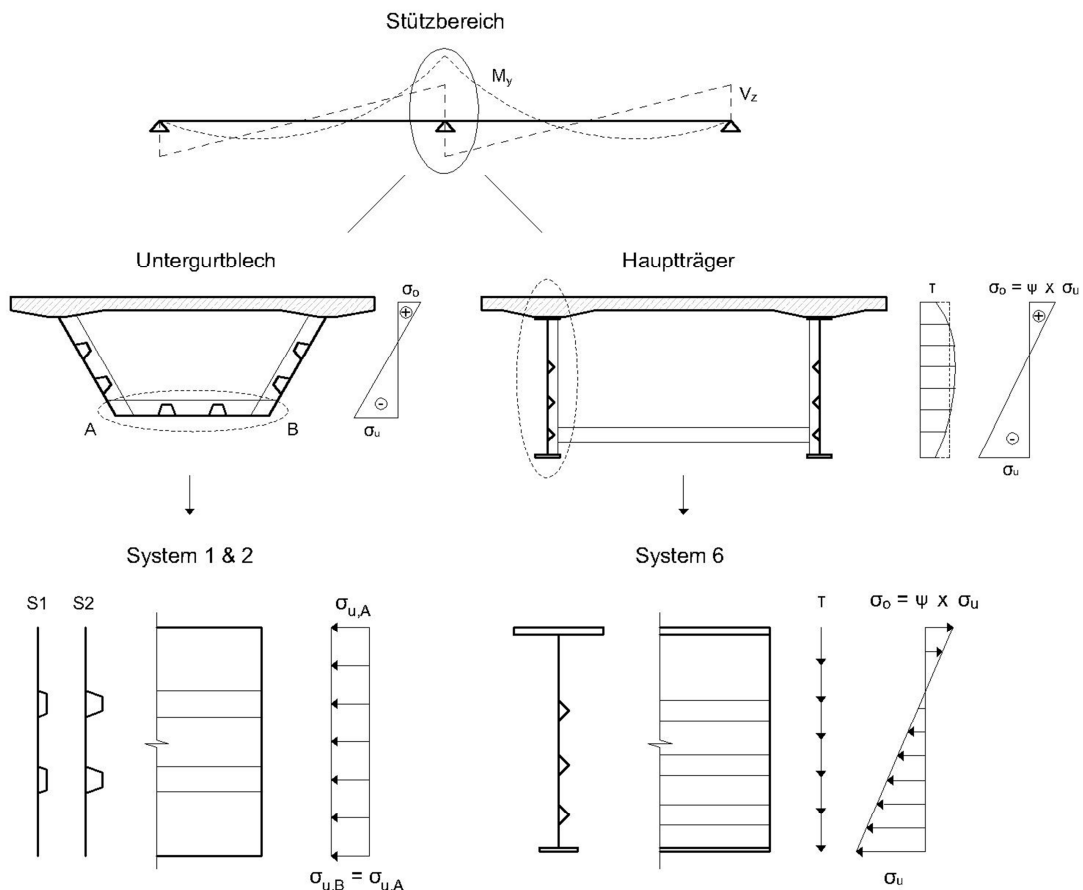


Abb. 3.1: Untersuchte Systeme

3.1 FE-Modell

Alle Elemente des Stegblechs und der Längs- und Querrippen werden als Schalenelemente mit einer Netzgröße von etwa 50 bis 60 mm modelliert (Anpassung an Längsrippenanschlüsse). Die Längs- und Quersteifen sind an das Stegblech direkt biegesteif angeschlossen. Beim System S6 werden die Gurte gelenkig an das Stegblech angeschlossen.

3.1.1 Material

Das Material Stahl mit der Güte S355 wird allen Elementen zugewiesen. Der Werkstoff verhält sich bis zur Streckgrenze linear elastisch, danach bildet sich ein Fließplateau aus (somit linear elastisch – ideal plastisches Materialverhalten). Die Kennwerte sind nachfolgend aufgelistet:

- Streckgrenze f_y : 355 N/mm²
- E-Modul: 210000 N/mm²
- Querkontraktionszahl ν : 0,3 [-]
- Fließdehnung ϵ_y : $f_y / E = 1,69 \text{ ‰}$

3.1.2 Anzahl der Felder

Auf Basis der Diplomarbeit von Gänsluckner [12] werden die Systeme mit 3 gleich großen Teilfeldern modelliert, damit mögliche Unstimmigkeiten bei der Krafteinleitung nur die äußeren Felder („Randfelder“) betreffen und das „Beobachtungsfeld“ gleichmäßig belastet wird. Im Zuge dieser Masterarbeit stellte sich heraus, dass eine störungsfreie Lasteinleitung auch für nur ein modelliertes Teilfeld gewährleistet werden kann, wenn die Belastung nicht als äußeres Moment sondern in Form einer äquivalenten Spannungsverteilung direkt auf die Schalenelemente aufgebracht wird. Aus diesem Grund werden die Berechnungen über den Zusammenhang von Querkraft und Biegemoment nur mehr mit einem Feld durchgeführt.

Ein Teilfeld wird im Folgenden als Gesamtfeld bezeichnet.

3.2 Systeme

Die detaillierten Abmessungen der Systeme sind auch im Anhang A zu finden.

3.2.1 System S1

Das System S1 hat eine Teilfeldlänge a von 3000 mm und eine Breite b von 2000 mm und weist somit ein Seitenverhältnis von $\alpha = a/b = 1,5$ auf. Die Felddicke t beträgt 10 mm. Die trapezförmigen Längssteifen sind 100 mm hoch und haben eine Dicke von 8 mm. Der vertikale Abstand der Längssteifen ist Abb. 3.2 zu entnehmen. Das System ist entlang der horizontalen Ränder A und B aus der Ebene gehalten und in den Punkten 1 und 2 in z-Richtung gelagert. Damit eine FE-Berechnung möglich ist, ist das Modell auch in x-Richtung zu fixieren und zwar in Punkt 3. Die konstante Belastung erfolgt an den vertikalen Rändern C und D mittels einer Linienlast.

3.2.2 System S2

Das System S2 hat ebenfalls eine Teilfeldlänge a von 3000 mm, eine Breite b von 2000 mm und eine Felddicke t von 10 mm. Die Längssteifen hingegen haben eine Höhe von 200 mm. Die Auflagersituation sowie die Belastung sind analog zum System S1.

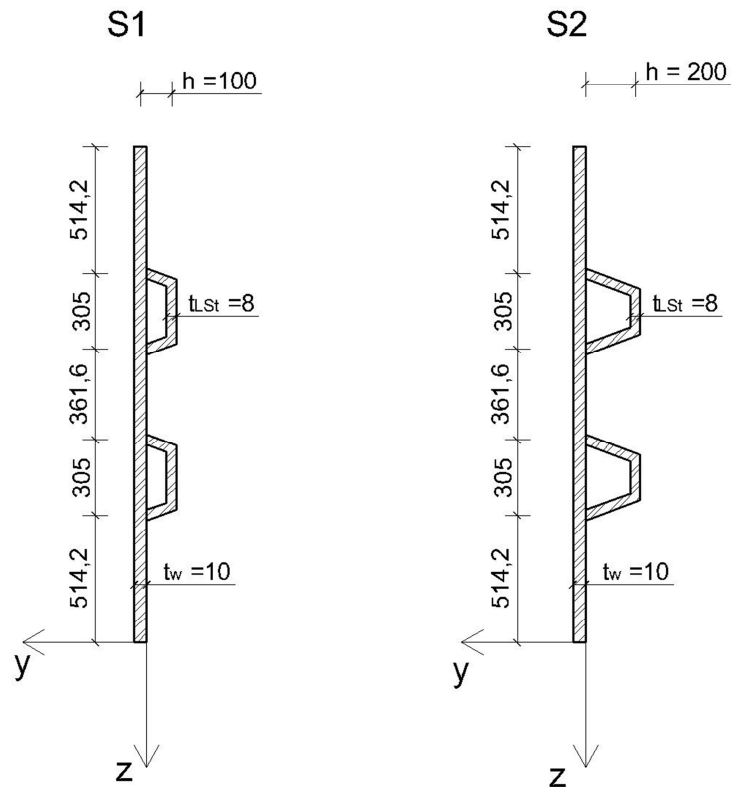


Abb. 3.2: System S1 & S2 – Querschnitt (die Dicke der Plattenelemente und der Längssteifen ist größer dargestellt)

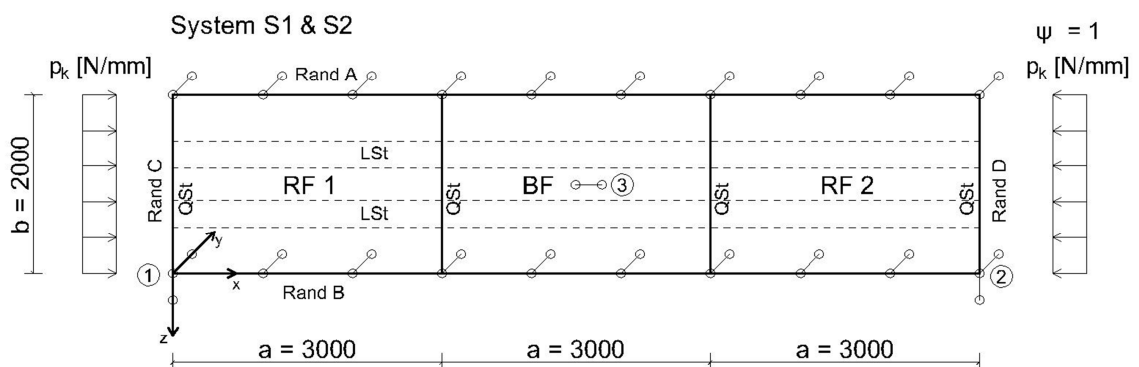


Abb. 3.3: System S1& S2 – Auflagersituation & Belastung

3.2.3 System S6

Das System S6 weist eine Teilfeldlänge a von 3000 mm, eine Breite b von 3500 mm und eine Dicke t von 12 mm auf. Das Seitenverhältnis α beträgt 0,86. Die Längssteifen sind dreiecksförmig und haben eine Höhe von 148 mm. Die Geometrie der Gurte ist so gewählt, dass sich aus einer reinen Biegemomentenbeanspruchung das gewünschte Spannungsverhältnis einstellt. Der Spannungsnullpunkt geht durch den Schwerpunkt des Querschnitts. Die Breite des Obergurts beträgt 1590 mm und die Dicke 200 mm. Der Untergurt, welcher sehr gedungen ausgeführt ist, damit keine Beulgefahr besteht, hat eine Breite von 600 mm und eine Dicke von 100 mm. Eine Spannungsverteilung von $\psi = \sigma_o / \sigma_u = -0,25$ wird betrachtet. Diese Bedingungen sind für alle untersuchten Varianten gleich.

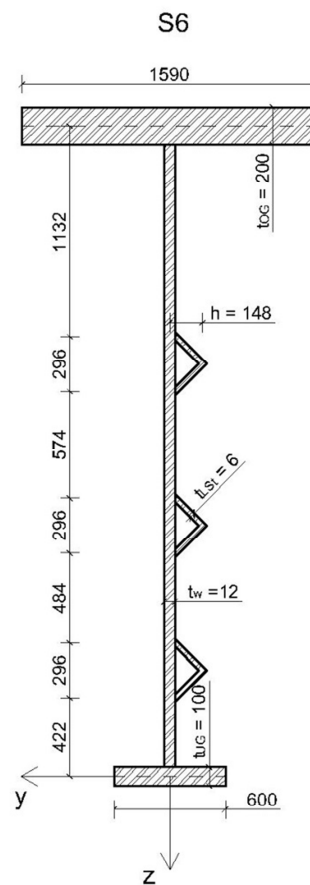


Abb. 3.4: System S6 – Querschnitt (die Dicke des Stegblechs und der Längssteifen ist größer dargestellt)

– Variante A

Die Auflagerbedingungen sind analog zum System S1. Nachdem die Gurte mit dem Stegblech gelenkig verbunden sind, werden diese an den Trägerenden gegen Verdrehung gelagert. Zusätzlich liegen Lager in y-Richtung vor, damit sie den Stegrand aus dessen Ebene unverschieblich abstützen. Die Normalspannung wird bei der Variante A durch Linienlasten erzeugt. Die Ränder C und D haben hier keine zusätzlichen Randbedingungen und somit wird das Ebenbleiben des Querschnitts nicht garantiert.

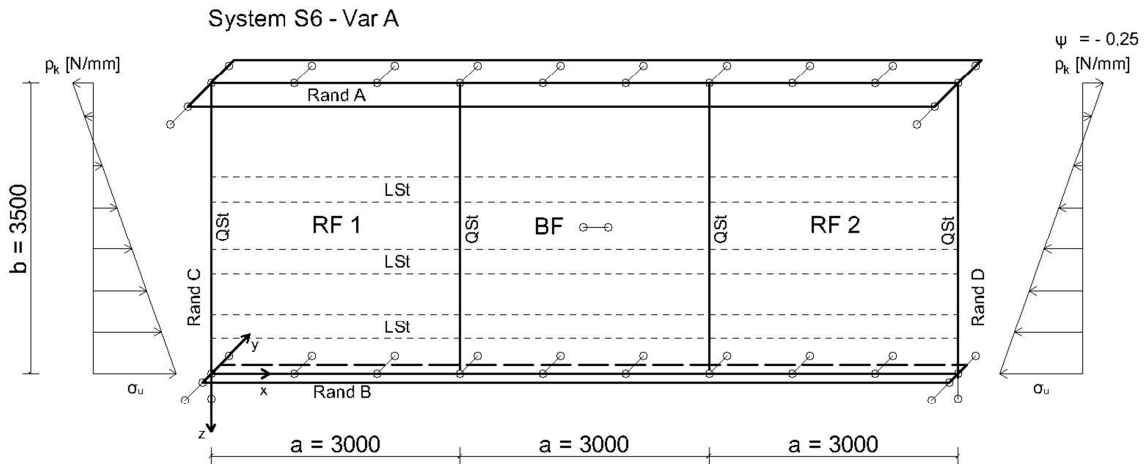


Abb. 3.5: System S6 Var A - Auflagersituation & Belastung

– Variante B

Bei dieser Variante werden die vertikalen Ränder C und D mit Hilfe des Befehls „MPC-Beam“ (die Verschiebungen sowie die Verdrehungen sind gekoppelt in Abhängigkeit von der Lage zum Referenzpunkt) definiert. Das Ebenbleiben des Querschnitts wird somit in diesen Querschnitten gewährleistet. Die Referenzpunkte - mit RP bezeichnet - befinden sich im gewünschten Spannungsnullpunkt. Die Belastung erfolgt über eine Knotenverdrehung der beiden RPs. Die Auflagersituation ist gleich der Variante A.

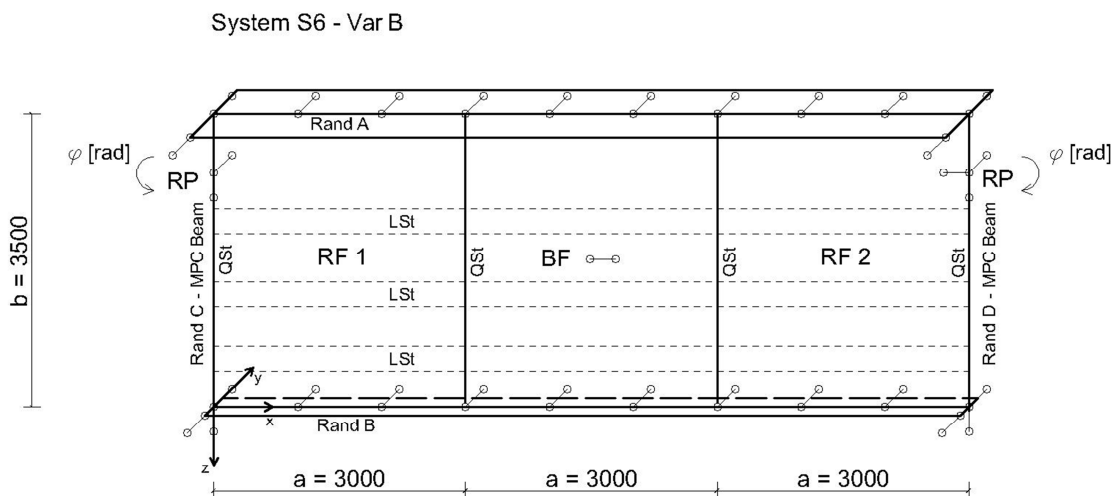


Abb. 3.6: System S6 Var B - Auflagersituation & Belastung

– Variante C

Durch die Erkenntnis einer störungsfreien Lasteinleitung wird das System S6 für die Untersuchung der Interaktion von Querkraft und Biegemoment nur mehr mit einem Teilfeld modelliert. Das Modell stellt nun einen Kragträger dar. Der Rand C ist eingespannt und die horizontalen Ränder A und B sind weiterhin aus der Ebene gehalten. Das Ebenbleiben des Querschnitts am vertikalen Rand D wird mittels des Befehls „Coupling“ (die Verschiebungen sind gekoppelt in Bezug auf den Referenzpunkt; die Verdrehungen aus der Stegebene können sich frei einstellen) garantiert. Die Normalspannung wird über ein Moment im Referenzpunkt aufgebracht. Die Querkraft wird mit einer Linienlast entlang des vertikalen Randes D eingeleitet.

System S6 - Var C

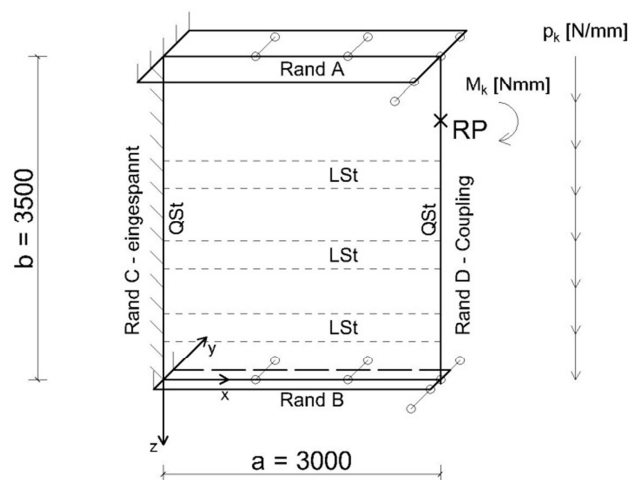


Abb. 3.7: System S6 Var C – Auflagersituation & Belastung

4 Numerische Traglastberechnungen

In den folgenden Kapiteln wird die numerische Traglastanalyse zur Ermittlung der Beultragfähigkeit mit der Software Abaqus [8] beschrieben. Die detaillierten Ergebnisse sind im Anhang C zu finden.

4.1 Lineare Analyse

In einem ersten Schritt wird die korrekte Modellierung und Lasteinleitung mithilfe einer linearen Analyse (LA) überprüft. Für die lineare Berechnung ist es ausreichend die halbe Fließspannung $\sigma = 177,5 \text{ N/mm}^2$ anzusetzen. In Abb. 4.1 werden die Spannungen in Längsrichtung über die Blechbreite an der Stelle $x = 0$ (siehe Abb. 4.2) dargestellt. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass bereits an der Lasteinleitungsstelle beinahe keine Störungen auftreten.

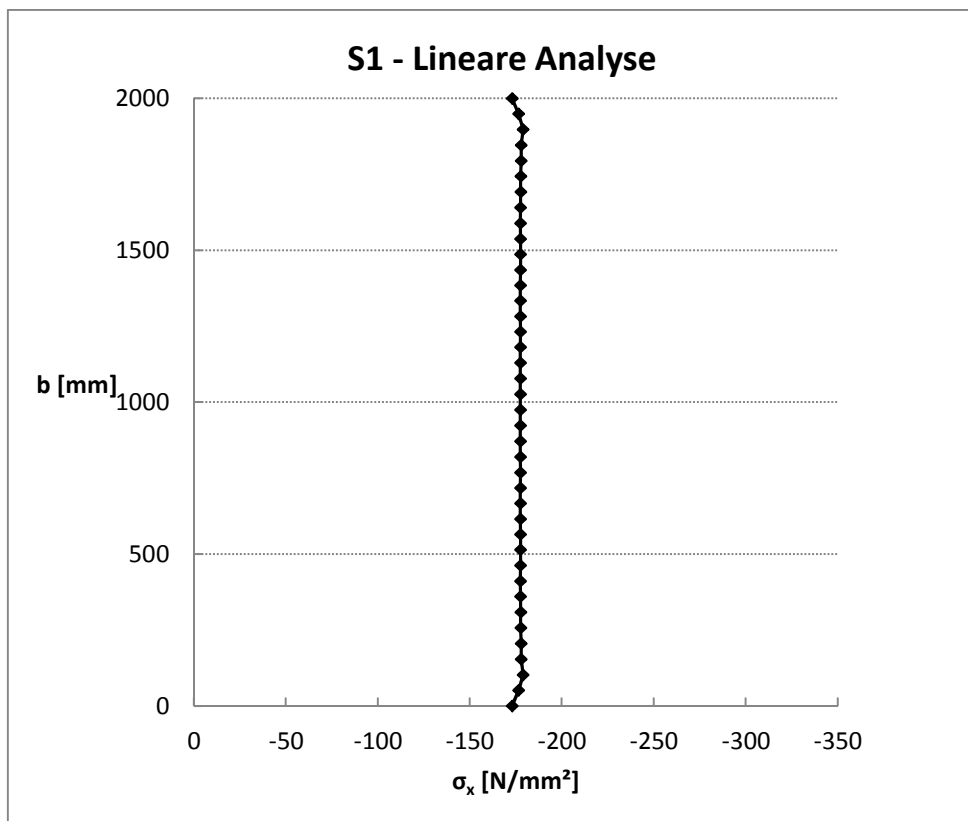


Abb. 4.1: System S1 Spannungen in Längsrichtung σ_x an der Stelle $x = 0$

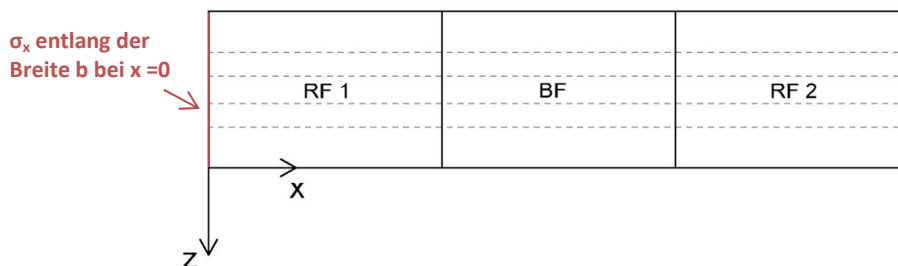


Abb. 4.2: Systemskizze

4.2 Lineare Beulanalyse

Um die globalen und lokalen Eigenformen zu ermitteln, wird eine lineare Beulanalyse (LBA) durchgeführt. Das Spannungsniveau $\sigma_{x,E}$ beträgt bei allen Systemen, bis auf jenes bei S6, Var-C, welches im jeweiligen Abschnitt genauer beschrieben wird, 10 N/mm^2 . Die Eigenformen werden anschließend als Ersatzimperfektionen für die nichtlineare Traglastberechnung angesetzt.

Die Größe des Eigenwerts entspricht dem Laststeigerungsfaktor α_{cr} zum Erreichen der elastischen Verzweigungslast. Wird dieser Faktor mit der einwirkenden Spannung multipliziert, ergibt sich daraus die kritische Beulspannung. [1]

$$\sigma_{cr,p} = \alpha_{cr} \cdot \sigma_{x,E} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad \text{Gl. (4.1)}$$

Der Beulwert $k_{\sigma,p}$ kann über die kritische Beulspannung und die Euler'sche Bezugsspannung zurückgerechnet werden.

$$k_{\sigma,p} = \sigma_{cr,p} / \sigma_E \text{ [-]} \quad \text{Gl. (4.2)}$$

Die Euler'sche Bezugsspannung wird nach folgender Formel lt. EN 1993-1-5 [1] berechnet:

$$\sigma_E = \frac{E \cdot \pi^2}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 = 190\,000 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad \text{Gl. (4.3)}$$

Beispielhaft wird hier die globale bzw. die lokale Eigenform in Abb. 4.3 und Abb. 4.4 für das System S6, Var-B, gezeigt.

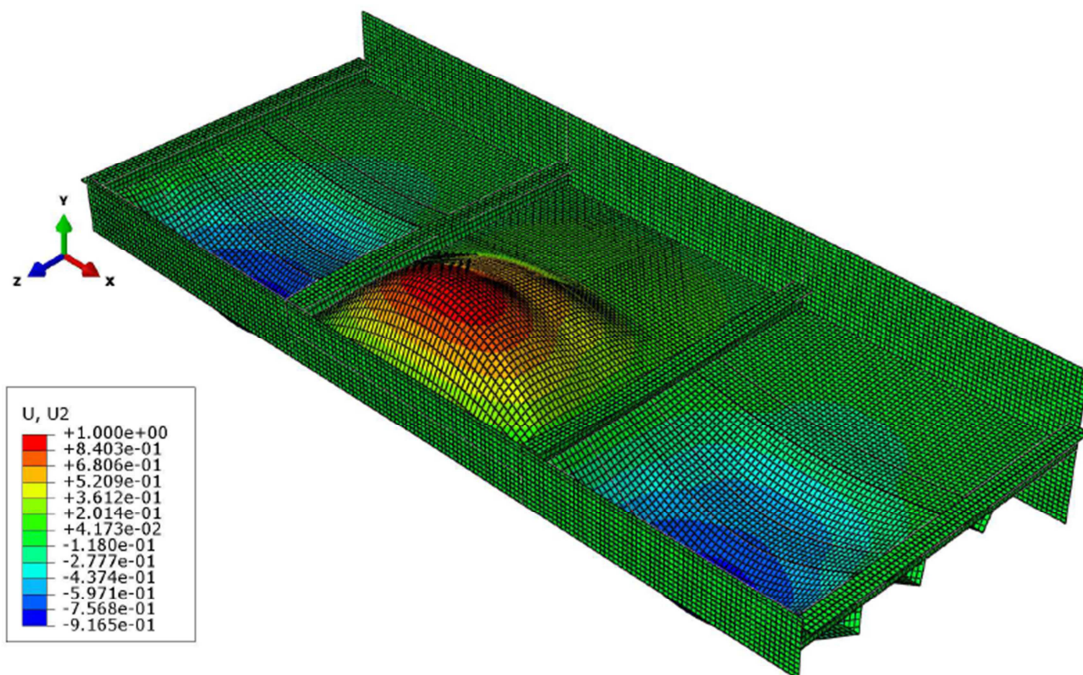


Abb. 4.3: System S6, Var-B, globale Eigenform ($\phi_{cr} = 57,438$)

Folgende Werte ergeben sich für das Gesamtfeld:

$$\sigma_{cr,p} = 57,438 \cdot 10 = 574,4 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{E,GF} = 190\,000 \cdot \left(\frac{12}{3500}\right)^2 = 2,2 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$k_{\sigma,p} = 574,38 / 2,23 = 257,57 \text{ [-]}$$

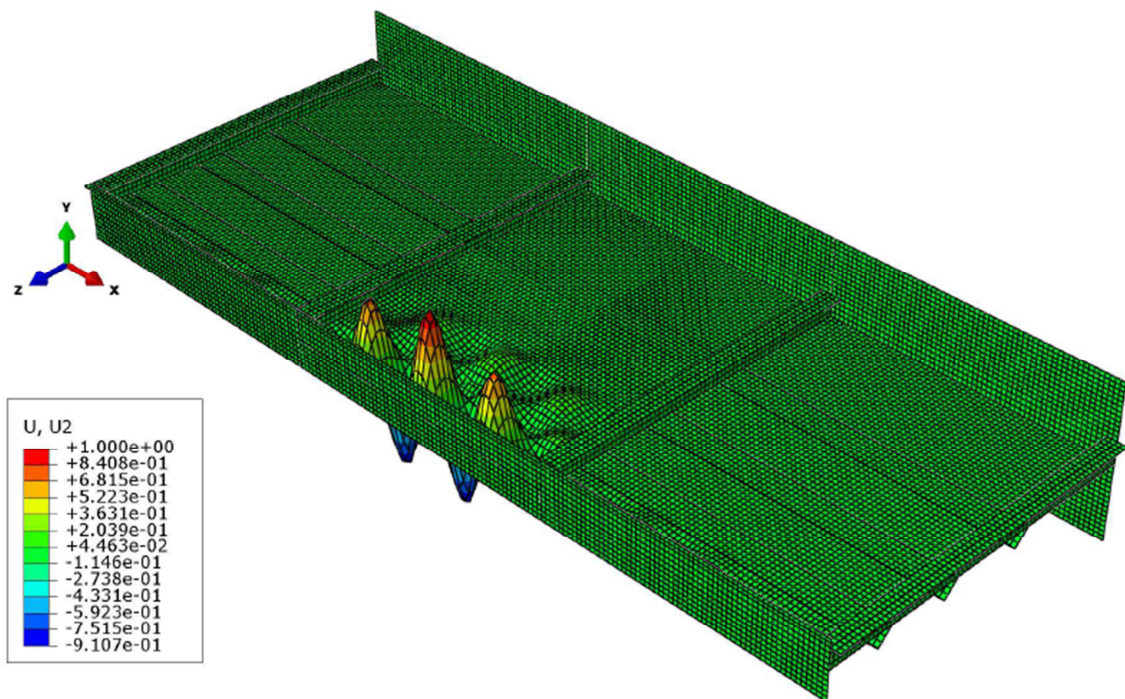


Abb. 4.4: System S6, Var-B, lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 79,302$)

Folgende Werte ergeben sich für das Einzelfeld 4:

$$\sigma_{cr,p} = 79,302 \cdot 10 = 793,0 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{E,EF} = 190\,000 \cdot \left(\frac{12}{424}\right)^2 = 152,2 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$k_{\sigma,p} = 793,02 / 152,19 = 5,21 \text{ [-]}$$

Nach EN 1993-1-5 [1] ist der Beulwert $k_{\sigma,p}^*$ niedriger und somit konservativer. Für den Erhalt des Abminderungsfaktors beim Einzelfeldbeulen wird der Beulwert nach Eurocode [1], mit Berücksichtigung des Normalspannungsgradienten am Einzelfeld, verwendet.

$$k_{\sigma,p}^* = 4,32 \text{ [-]}$$

4.2.1 Ansatz von Imperfektionen

Nach EN 1993-1-5 [1], Anhang C dürfen geometrische Ersatzimperfektionen für die FE-Berechnung verwendet werden, wie in Abb. 4.5 und Abb. 4.6 dargestellt. Für den globalen Imperfektionsansatz wird die 2. Zeile gewählt und für den lokalen die 3. Zeile. Jene Eigenformen, die den in Abb. 4.6 dargestellten Figuren am meisten ähneln, werden herangezogen. [12]

Tabelle C.2 — Geometrische Ersatzimperfektionen

Imperfektionsansatz	Bauteil	Form	Amplitude
global	Bauteil der Länge ℓ	Bogen	siehe EN 1993-1-1, Tabelle 5.1
global	Längssteife der Länge a	Bogen	$\min(a/400, b/400)$
lokal	Teilfeld oder Einzelfeld mit kurzer Länge a oder b	Beulform	$\min(a/200, b/200)$
lokal	Verdrehung von Steifen und Flanschen	Bogen	1/50

Abb. 4.5: Geometrische Ersatzimperfektionen nach EN 1993-1-5, Anhang C [1]

Die Eigenformen werden dementsprechend skaliert und bei der GMNIA als geometrische Ersatzimperfektionen angesetzt.

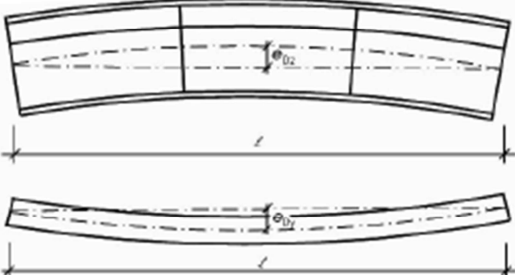
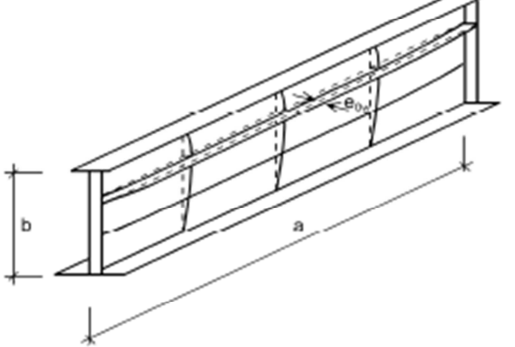
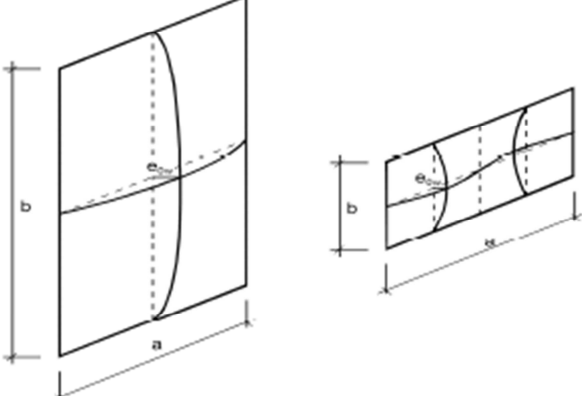
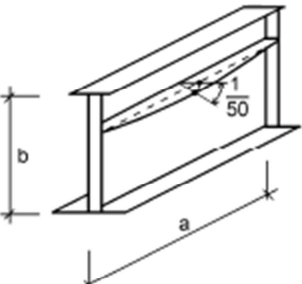
Imperfektionsansatz	Bauteil
global, Bauteil der Länge l	
global, Längssteife der Länge a	
lokal, Teilfeld oder Einzelfeld	
lokal, Verdrehung von Steifen oder Flanschen	

Bild C.1 — Modellierung geometrischer Ersatzimperfektionen

Abb. 4.6: Modellierung geometrischer Ersatzimperfektionen nach EN 1993-1-5, Anhang C [1]

4.2.2 Zusammenwirken von Imperfektionen

Nach EN 1993-1-5 [1] ist zwischen Leit- und Begleitimperfektionen zu unterscheiden. Die Begleitimperfektion kann auf 70% abgemindert werden. Werden nur Längsspannungen betrachtet, ist folgende Kombination nach [12] maßgebend:

$$-1,0 \cdot \text{globale Imperfektion} + 0,7 \cdot \text{lokale Imperfektion}$$

Das Minus bei der globalen Imperfektion bedeutet, dass die Amplitude im Beobachtungsfeld auf die Seite der Längssteifen gerichtet ist. Das stimmt mit dem Koordinatensystem überein. Mit diesem Ansatz erfahren die Längssteifen Zugspannungen und das Plattenelement Druckspannungen. Bei der lokalen Imperfektion heißt das Plus, dass die Eigenform so angesetzt ist, wie sie berechnet wurde.

Werden Längsspannungen in Kombination mit Schubspannungen angesetzt, gilt diese Kombination auch. Wird der Querschnitt nur durch Schubspannungen belastet, gibt es nur eine Leitimperfektion, infolge der Beuleigenform aus der Schubbeanspruchung.

Folgende Skalierfaktoren (SF) werden beim System S6, Var-B, angesetzt:

$$\text{Globaler SF} = -1,0 \cdot \frac{a}{400} = -1,0 \cdot \frac{3000}{400} = -7,5$$

$$\text{Lokaler SF} = 0,7 \cdot \frac{b_{loc}}{200} = 0,7 \cdot \frac{424}{200} = 1,48$$

4.3 GMNIA - Berechnung

Die Beultragfähigkeit wird mit einer geometrisch und materiell nichtlinearen Analyse mit geometrischen Ersatzimperfektionen (GMNIA) ermittelt. Die Eigenformen aus der LBA werden als skalierte Verschiebungen mit dem Befehl „*Imperfection“ in den Input-Files als Berechnungsgrundlage hinzugefügt. Werden Linienlasten aufgebracht, beträgt die maximale Randdruckspannung 355 N/mm². Der resultierende Laststeigerungsfaktor (LSF) ist damit gleichzeitig der Abminderungsfaktor ρ_c nach dem MRS-Verfahren und die Ausnutzung η nach dem MEQ-Verfahren. Wird eine Verdrehung oder eine Punktlast angesetzt, ist das aufnehmbare Moment M_{R2} am Referenzpunkt abzulesen und mit der zugehörigen elastischen Momententragfähigkeit $M_{el,R}$ zu vergleichen.

In Abb. 4.7 ist das System S6, Var-B, bei einer GMNIA-Berechnung, bei Erreichen der maximalen Tragfähigkeit, dargestellt. Es werden die Verschiebungen in y-Richtung abgebildet, wobei das Beobachtungsfeld die größten Verformungen aufweist. Da bei diesem System eine äußere Verdrehung als Belastung angesetzt wird, ist das aufnehmbare Moment am Referenzpunkt abzulesen. Dieses Moment ist gleich groß wie die elastische Momententragfähigkeit – somit ist die elastische Momententragfähigkeit des Querschnitts infolge Beulen nicht abzumindern.

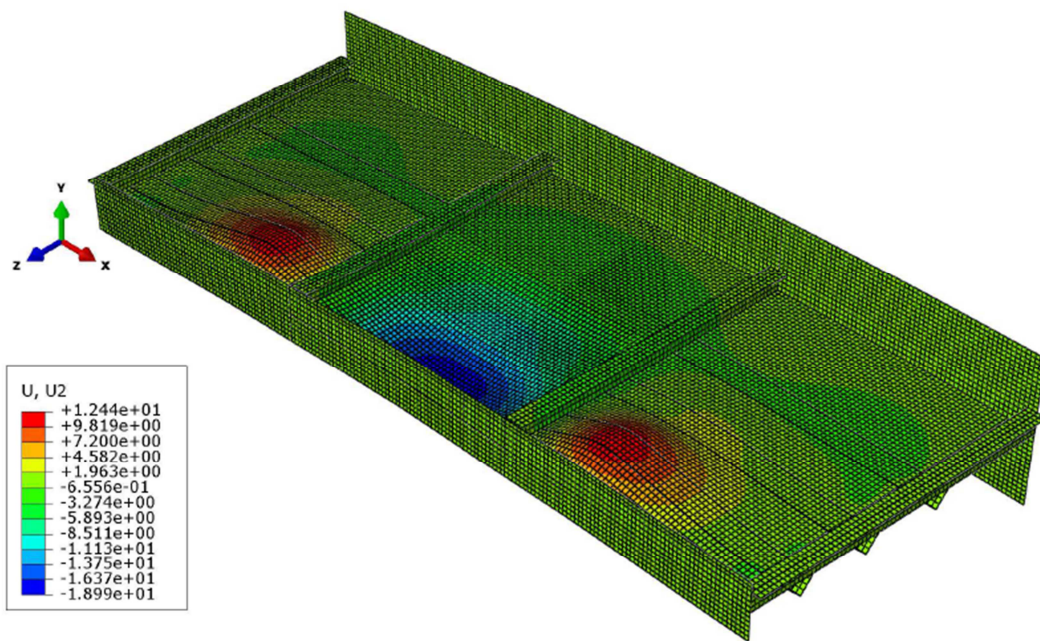


Abb. 4.7: System S6, Var-B, bei Erreichen der Tragfähigkeit

4.4 Vergleich der Beultragfähigkeit mit den Ergebnissen nach Eurocode [1]

In Tab. 4.1 sind die Beultragfähigkeiten der einzelnen Systeme nach der numerischen Traglastberechnung den ermittelten Werten nach EN 1993-1-5 [1] mit dem MEQ-Verfahren sowie mit dem MRS-Verfahren gegenübergestellt. Die Berechnungen nach Eurocode [1] sind im Anhang B zu finden. Es zeigt sich, dass die numerische Traglastanalyse mit der Berechnung nach dem MEQ-Verfahren beim System S6 sehr gut übereinstimmt und beim System S2 auch eine gute Näherung darstellt. Zudem bestätigt sich, dass das MRS-Verfahren konservativer ist als das MEQ-Verfahren.

Tab. 4.1: Übersicht der Ergebnisse nach der numerischen Traglastanalyse und EN 1993-1-5

System	GMNIA (LSF)	MEQ-Verfahren (η)	MRS-Verfahren (ρ_c)
S1	0,67	0,61	0,62
S2	0,86	0,78	0,72
S6, Var-A	0,87 ¹⁾	0,98	0,91
S6, Var-B	1,00 ²⁾	0,98	0,91
S6, Var-C	0,96 ³⁾	0,98	0,91

¹⁾ Das Ebenbleiben der Endquerschnitte ist bei Variante A nicht gewährleistet, daher die deutlich geringere Traglast.

²⁾ Bei Variante B wird nicht der LSF sondern das Verhältnis des aufgetragenen Moments (RM_2) zur elastischen Momententragfähigkeit ($M_{el,R}$) abgelesen.

³⁾ Die etwas geringere Traglast resultiert aufgrund der Modellierung eines Kragträgers. Bei Variante C kann sich das System am gelagerten Rand nicht so frei verformen wie bei Variante B.

Eine detaillierte Beschreibung des Beulversagens in Zusammenhang mit den Nachweiskonzepten nach Eurocode [1] erfolgt im nächsten Kapitel.

5 Dehnungsverläufe vor und nach dem Traglastmaximum

5.1 Erläuterung zur Vorgehensweise

Das MEQ-Verfahren beruht auf der Annahme, dass es zu einer Spannungsumlagerung von hochbeanspruchten zu weniger belasteten Querschnittsteilen kommt. Dieser Effekt erfolgt aber erst, wenn das beulgefährdete Element die Fließdehnung am Rand zu 100% erreicht. Infolgedessen wird der anliegende Querschnittsteil voll „aktiviert“ und erhöht somit die Beultragfähigkeit des gesamten Querschnitts. Wird die Fließdehnung nicht erreicht, könnte die Tragfähigkeit des Querschnitts nach dem MEQ-Verfahren überschätzt werden. [9]

In Abb. 5.1 ist das Prinzip der Fragestellung an einem hypothetischen Beispiel dargestellt. Der Punkt 1 beschreibt den Zustand beim Erreichen des Traglastmaximums und der Punkt 2 den Nachbeulzustand. Das Untergurtblech erreicht am Rand aufgrund von Beulversagen bei seinem Traglastmaximum nur 60% der Fließdehnung. In diesem Beispiel kommt es bei knickstabähnlichem Verhalten im Gurt zu einem Traglastabfall von 30%. Nachdem die Stege am unteren Rand die gleiche Dehnung aufweisen wie der Untergurt, können diese zum Zeitpunkt des Traglastmaximums des Gurtes hier nur 80% ihrer Tragfähigkeit ausnutzen. Die Auswirkungen auf die Gesamttragfähigkeit fallen aber eher gering aus. Angenommen der Unter- und Obergurt tragen jeweils 40% und die Stege jeweils 10% zur Momententragfähigkeit bei, so ergibt das lediglich eine Abminderung der Gesamttragfähigkeit von 4% ($= OG \cdot R_{Gurt} + UG \cdot R_{Gurt} + 2 \cdot Steg \cdot R_{Steg} = 2 \cdot 0,4 \cdot 1,0 + 2 \cdot 0,1 \cdot 0,8 = 0,96$).

Um diese Problematik zu untersuchen, werden die Dehnungen am Rand bis zum Erreichen der Traglast und darüber hinaus mit Hilfe des Riks-Algorithmus der Software Abaqus [8] betrachtet und mit der Versagensform in Bezug gesetzt. Bei der nichtlinearen Berechnung wird die Last schrittweise aufgebracht. Nachfolgend werden die Ergebnisse in Form von Diagrammen dargestellt und mit den Werten nach Eurocode [1] verglichen.

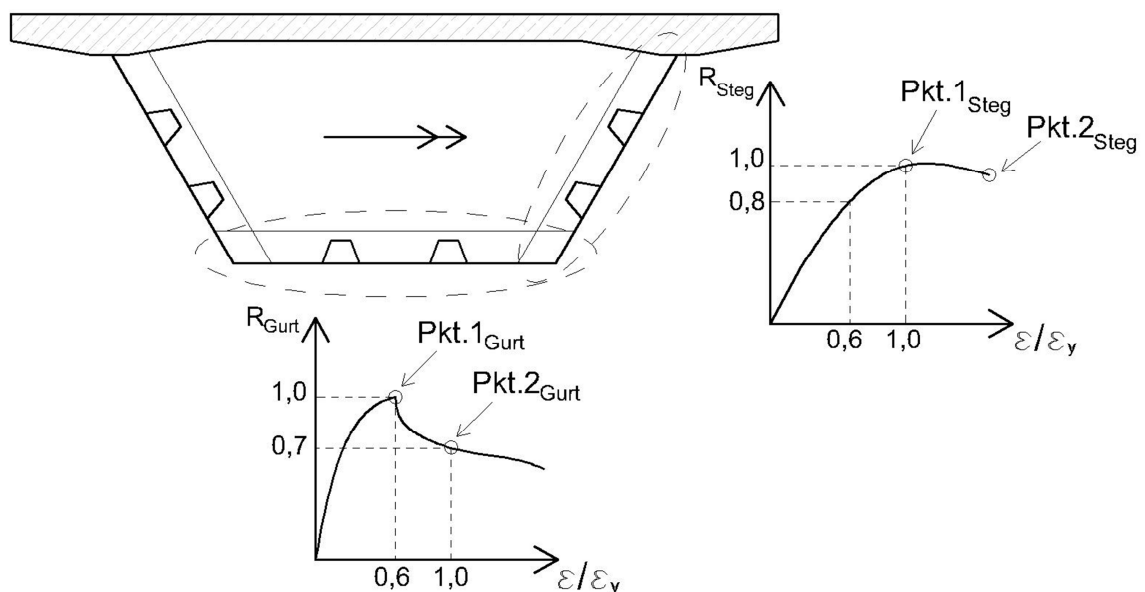


Abb. 5.1: Hypothetisches Beispiel der Tragfähigkeit in Bezug auf die Randdehnungen

5.1 Ermittlung der Dehnungen

Die nachfolgend ermittelten mittleren Dehnungen ergeben sich aus den Verschiebungen in Längsrichtung, bezogen auf die betrachtete Länge (Abb. 5.2). Die einzelnen Felder werden genauer betrachtet, da die Dehnungen über die gesamte Länge ϵ_{ges} nicht aussagekräftig sind, wie in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben wird.

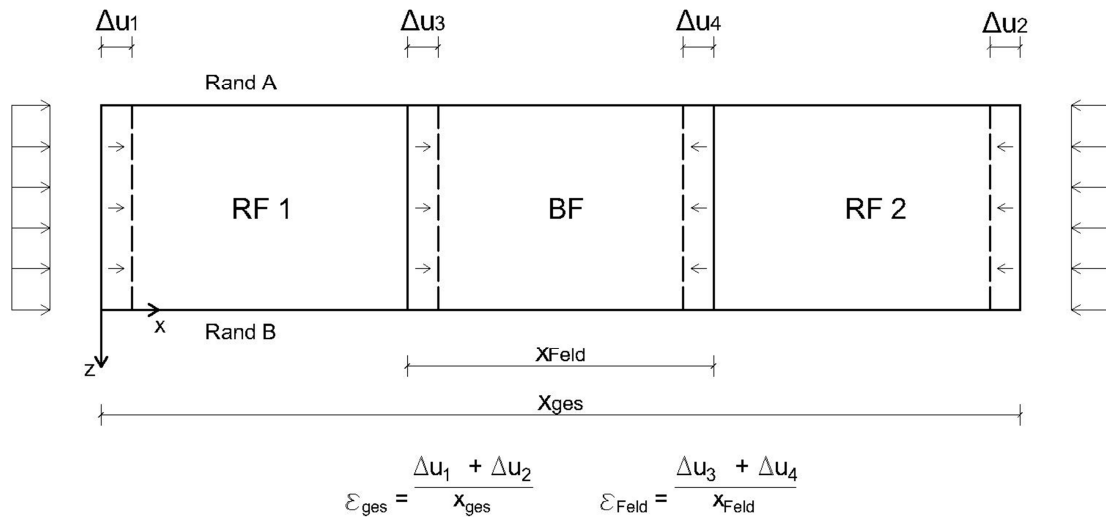


Abb. 5.2: Ermittlung der mittleren Dehnungen

System S1 und S2

Wie bereits in Kap. 3 beschrieben, wird bei den Systemen S1 und S2 nur das Untergurtblech betrachtet. In Wirklichkeit können, wie z. B. bei einem Kastenquerschnitt weitere Stegfelder an das Blech anschließen. Die Ränder der untersuchten Systeme müssen im Traglastzustand zumindest die Fließdehnung erreichen, um mögliche angrenzende Plattenelemente aktivieren zu können.

5.2 System S1

Abb. 5.3 zeigt die ermittelten mittleren Dehnungen sowie vergleichsweise die Dehnungen aus der numerischen Berechnung im Traglastzustand (Pkt. 1 in Abb. 5.1). In Abb. 5.4 sind die dazugehörigen Spannungen am unteren Rand B dargestellt. Die Dehnungen werden an den horizontalen Rändern A und B abgelesen. Rand A befindet sich bei $z = -2000$ (oberer Rand) und Rand B bei $z = 0$ (unterer Rand, siehe Abb. 5.2).

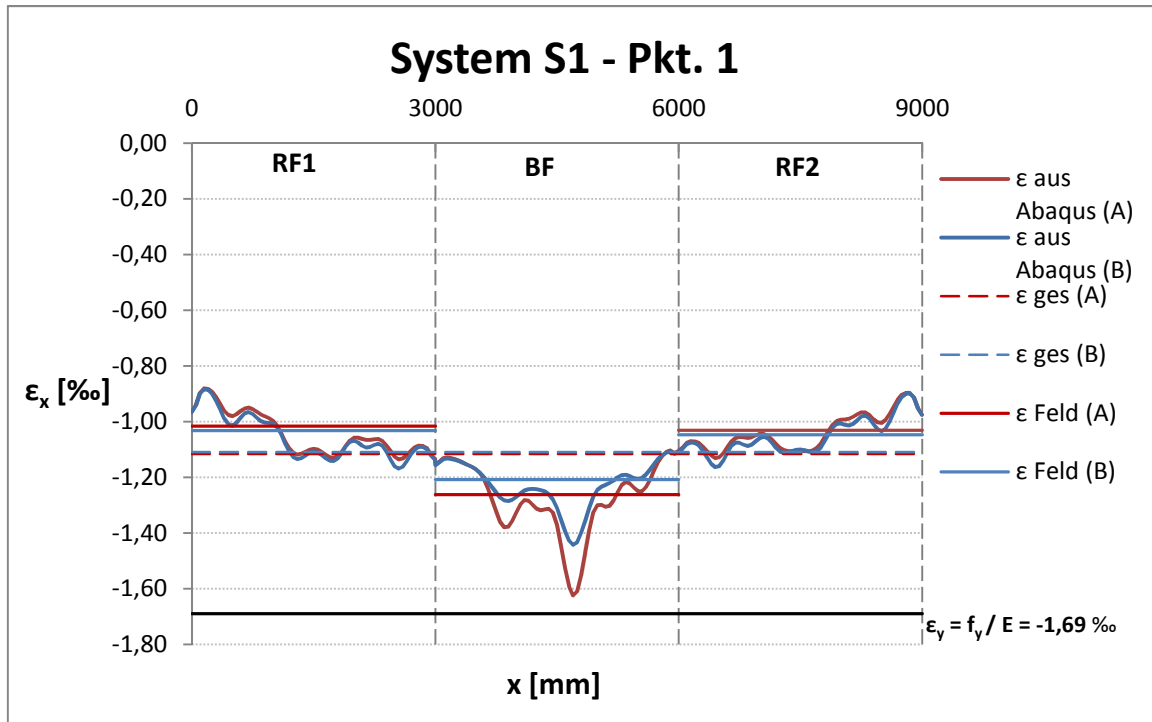


Abb. 5.3: S1 Dehnungen in Längsrichtung entlang der Ränder im Traglastzustand

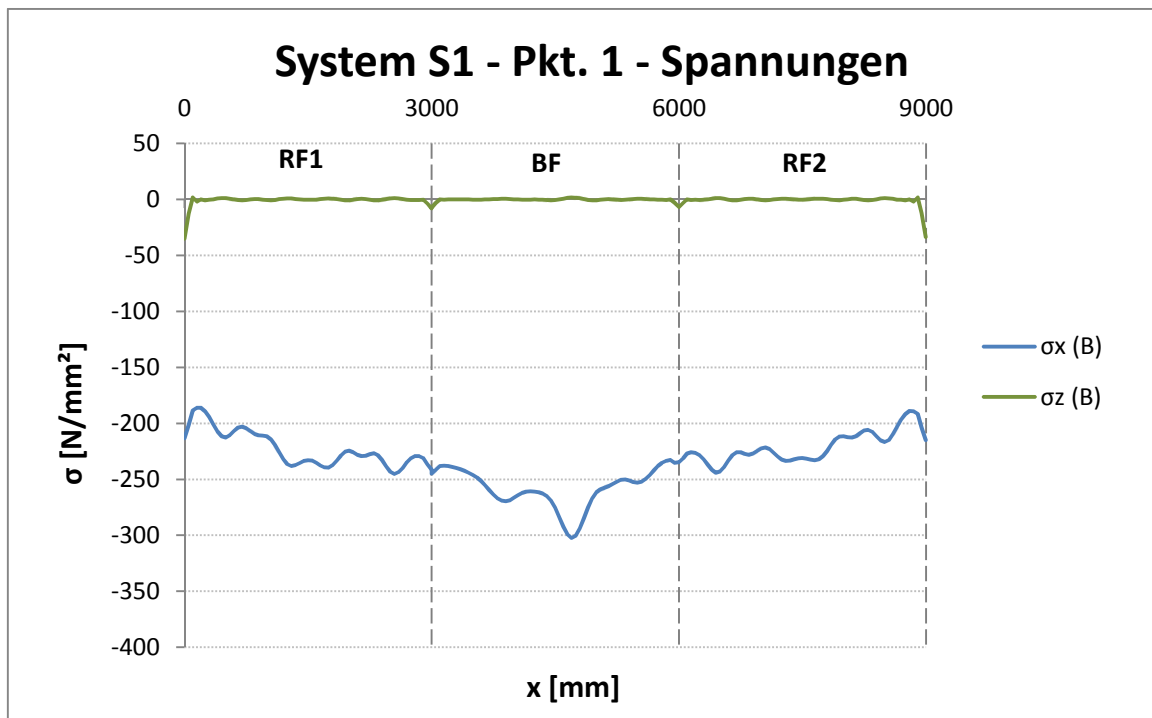


Abb. 5.4: S1 Spannungen σ_x und σ_z am Rand B im Traglastzustand

Abb. 5.5 zeigt die ermittelten mittleren Dehnungen sowie vergleichsweise die Dehnungen aus der numerischen Berechnung im Nachbeulzustand (Pkt. 2 in Abb. 5.1). In Abb. 5.6 sind die dazugehörigen Spannungen am unteren Rand B dargestellt.

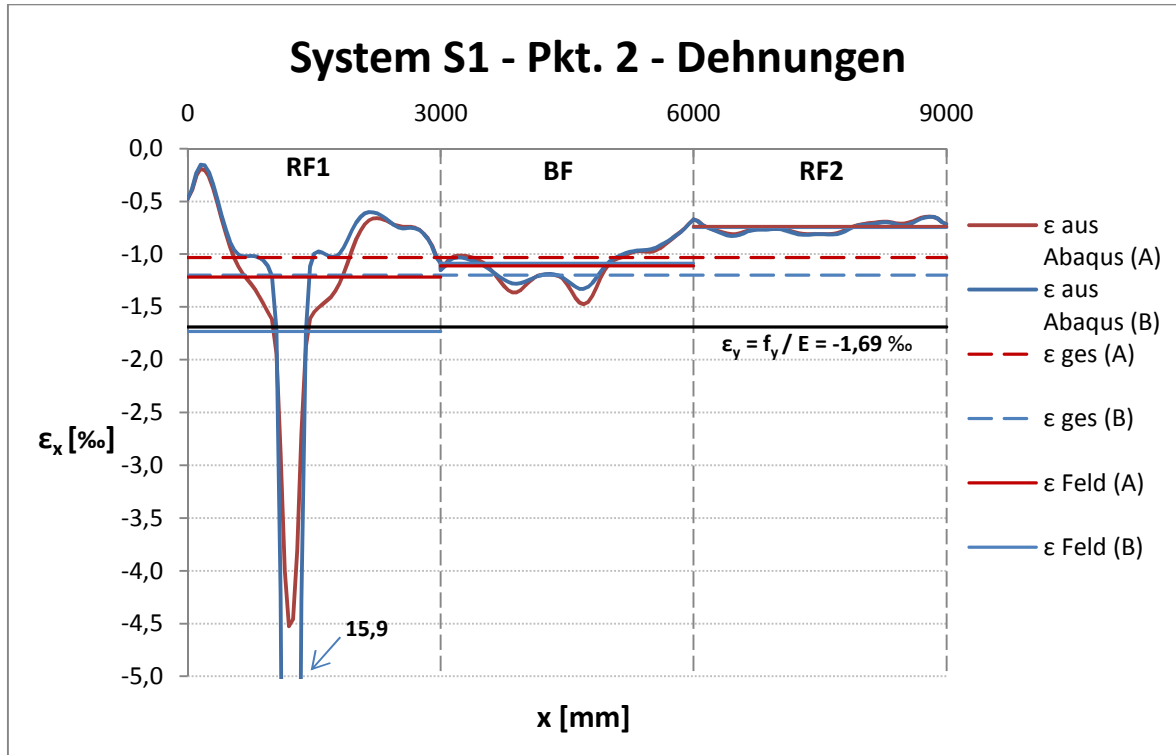


Abb. 5.5: System S1 Dehnungen in Längsrichtung entlang der Ränder im Nachbeulzustand

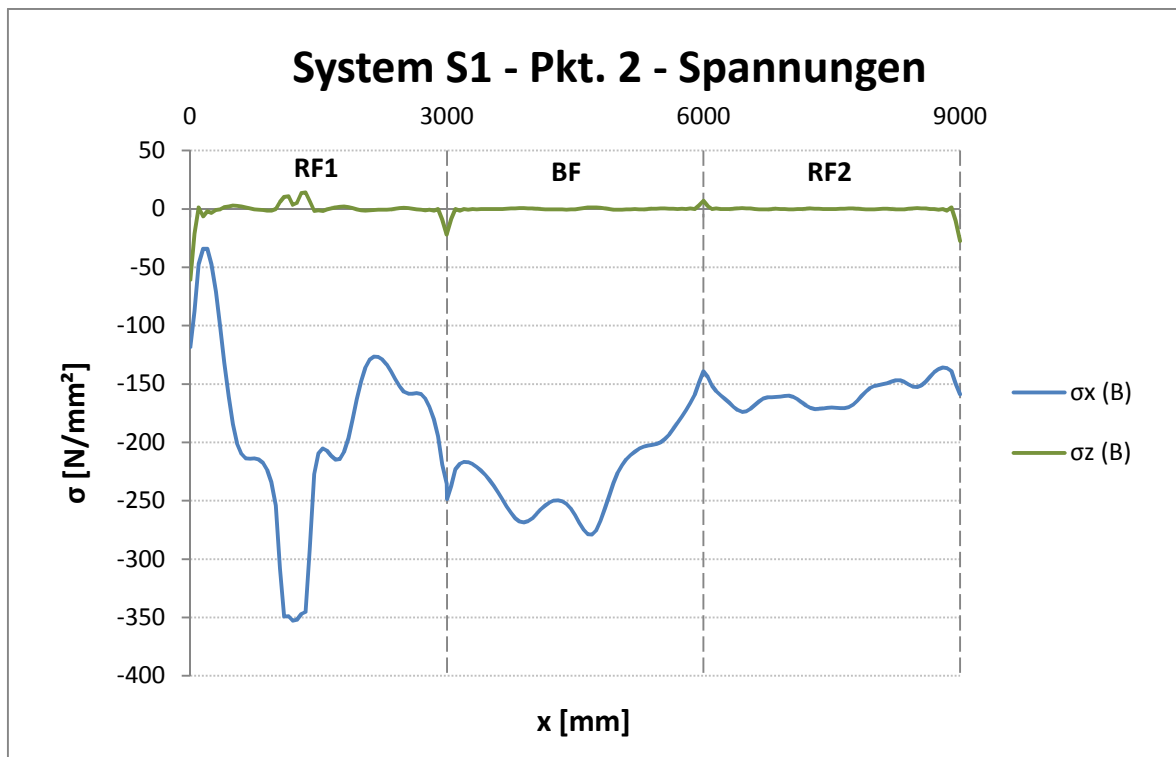


Abb. 5.6: System S1 Spannungen σ_x und σ_z am Rand B im Nachbeulzustand

Aus diesen Diagrammen ist ersichtlich, dass die ermittelte Dehnung über die gesamte Länge ϵ_{ges} nicht aussagekräftig ist. Für das System S1 wird die Beultragfähigkeit bei zunehmender Belastung nachfolgend in Bezug auf die Dehnungen im Randfeld 1 genauer betrachtet.

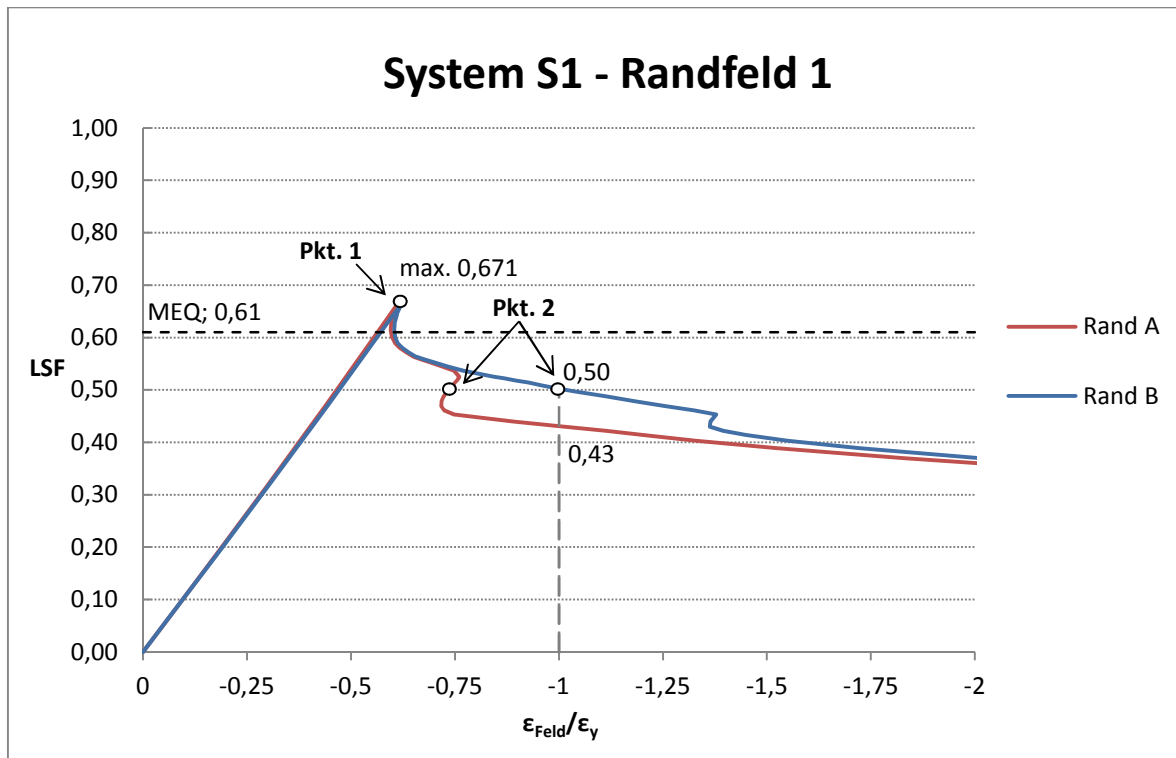


Abb. 5.7: System S1 Beultragfähigkeit in Abhängigkeit der aufgebrachtten mittleren Dehnung im Randfeld

Aus Abb. 5.7 ist zu erkennen, dass das Plattenelement an seinem Traglastmaximum bei beiden Rändern nur 60% der Fließdehnung erreicht. Zu diesem Zeitpunkt könnten angrenzende Bleche nicht vollständig aktiviert werden und zur Tragfähigkeit beitragen. Danach kommt es zu einem Traglastabfall. Wenn der Rand B die Fließdehnung erreicht hat, ist die Tragfähigkeit bereits um 25% geringer. Hier besteht die Gefahr, dass die Tragfähigkeit des Gesamtquerschnitts überschätzt wird.

Das System S1 versagt aufgrund knickstabähnlichen Verhaltens. Diese Versagensform ist einerseits aus den Verformungen aus der Ebene ersichtlich (Abb. 5.8) und andererseits aus den berechneten Werten nach EN 1993-1-5 [1]. Die detaillierte Berechnung ist im Anhang B, Kap. B.1.1, zu finden.

Bei einer Berechnung nach Eurocode [1] entsprechend des MEQ-Verfahrens beträgt der Abminderungsfaktor χ_c beträgt 0,587 und ist niedriger als jener für das plattenähnliche Verhalten ($\rho_p = 0,852$). Der Faktor ξ liegt bei 0,075. Dies spricht für ein nahezu reines knickstabähnliches Versagen.

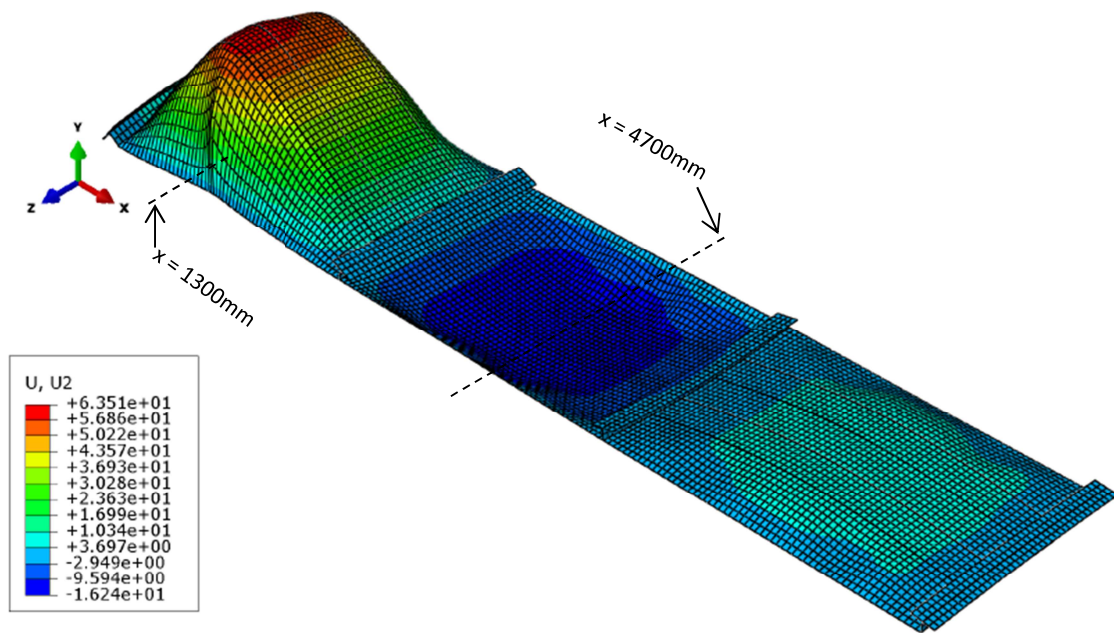


Abb. 5.8: System S1 Verschiebungen in y-Richtung– Nachbeulzustand (Pkt. 2 in Abb. 5.7)
 (Anm.: 20-facher Überhöhungsfaktor der Verformungen)

Nachfolgend sind die Spannungen in x-Richtung sowie die Verformungen aus der Ebene über die Breite des Plattenelements dargestellt. Die Werte werden an den jeweils maßgebenden Stellen abgelesen. Für das Beobachtungsfeld (BF) ist das bei $x = 4700 \text{ mm}$ und für das Randfeld 1 (RF1) bei $x = 1300 \text{ mm}$. Das Beobachtungsfeld weist im Nachbeulzustand eine größere Tragfähigkeit auf und wird nicht mehr näher betrachtet.

Im Traglastzustand ist der Einfluss der lokalen Eigenform im Beobachtungsfeld zu erkennen, siehe Abb. 5.9. Aufgrund der geometrischen Ersatzimperfectionen sind die Spannungen im Randfeld 1 kleiner als im Beobachtungsfeld. Im Nachbeulzustand lagern sich die Spannungen in das Randfeld RF1 um. Da sich das Plattenelement von den Längssteifen weg verformt, werden die Druckspannungen im Plattenelement geringer und in den Längssteifen höher. Die Zunahme der Verformung ist in Abb. 5.10 ersichtlich.

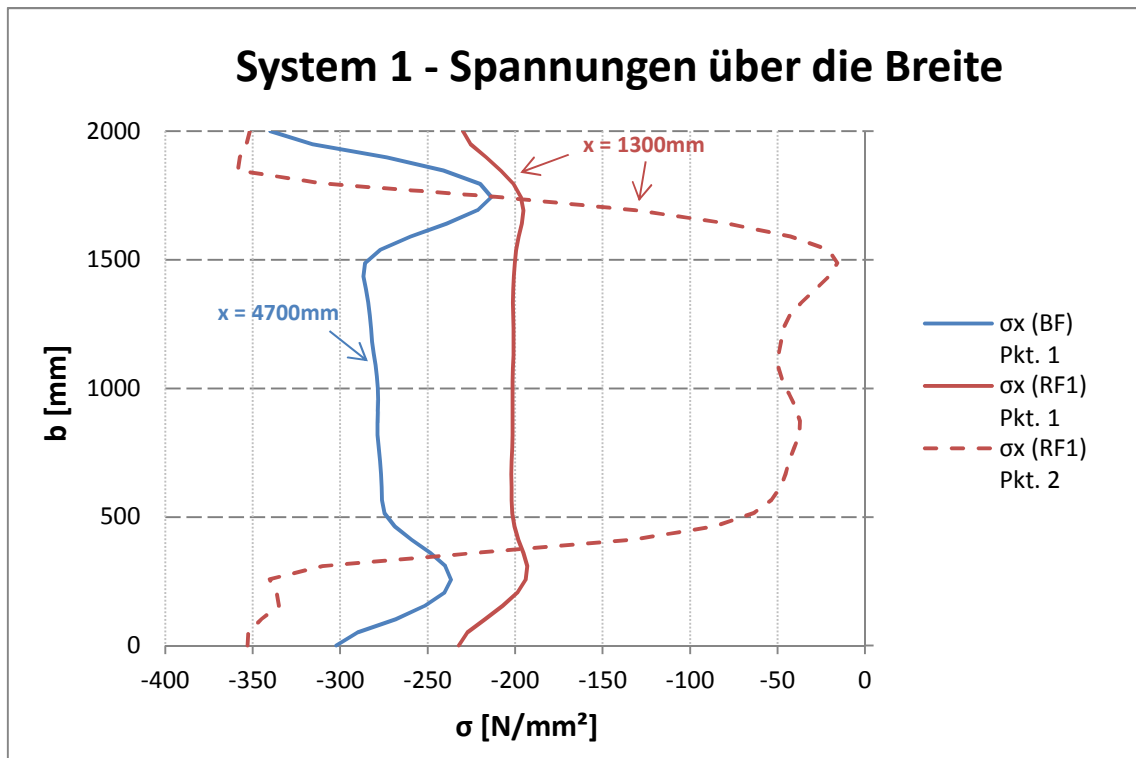


Abb. 5.9: System S1 Spannungen in x-Richtung über die Breite in der Mitte von Beobachtungs- und Randfeld im Traglastzustand (Pkt. 1) und im Nachbeulzustand (Pkt. 2)

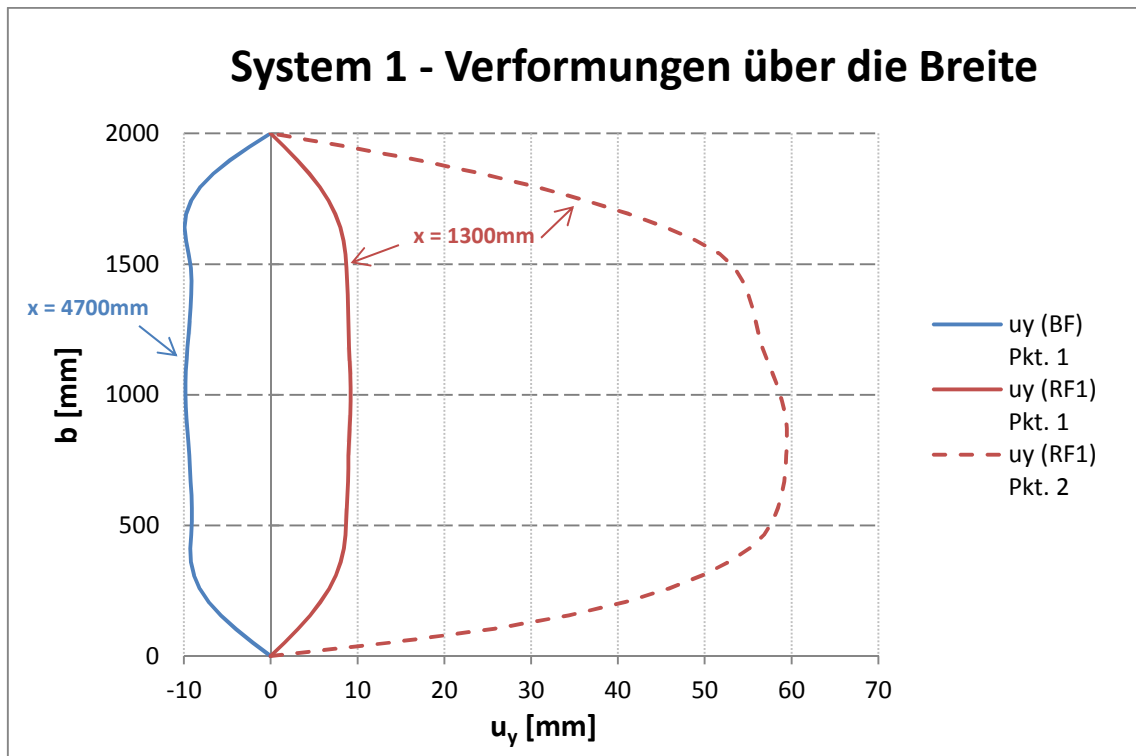


Abb. 5.10: System S1 Verformungen in y-Richtung über die Breite in der Mitte von Beobachtungs- und Randfeld im Traglastzustand (Pkt. 1) und im Nachbeulzustand (Pkt. 2)

5.3 System S2

Abb. 5.11 zeigt die ermittelten mittleren Dehnungen sowie vergleichsweise die Dehnungen aus der numerischen Berechnung im Traglastzustand (Pkt. 1 in Abb. 5.1). In Abb. 5.12 sind die dazugehörigen Spannungen am oberen Rand A dargestellt.

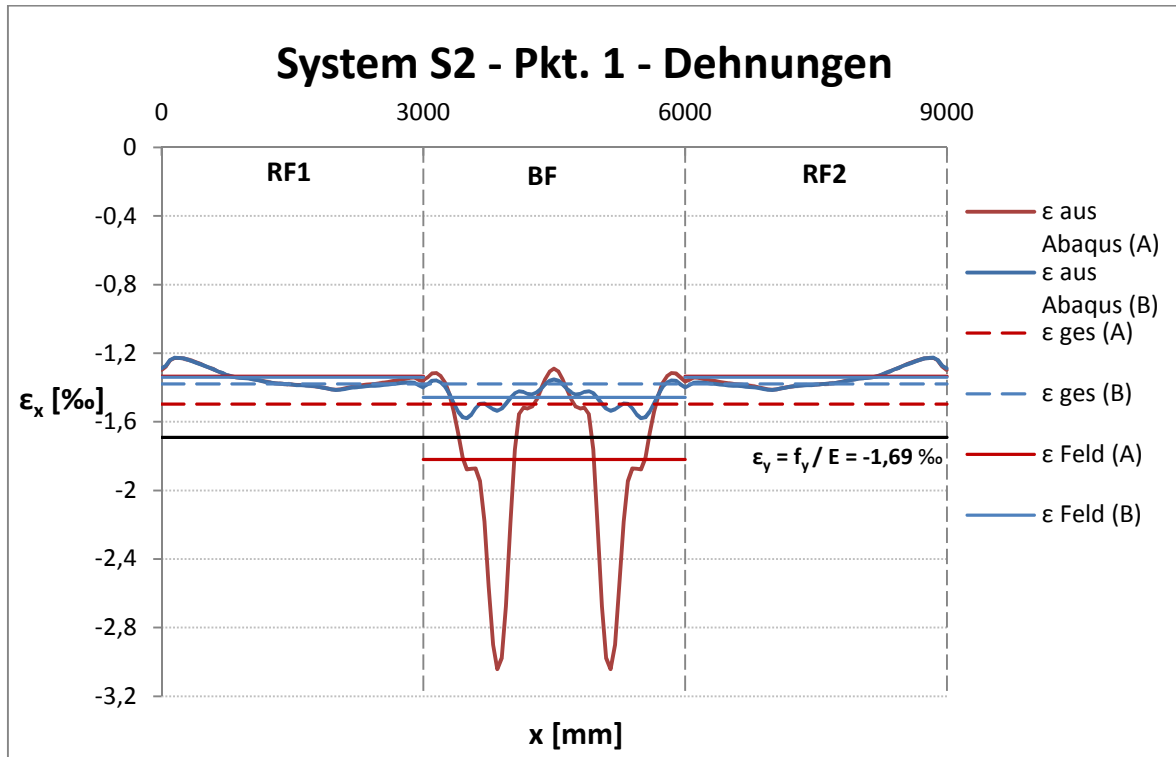


Abb. 5.11: System S2 Dehnungen in Längsrichtung entlang der Ränder im Traglastzustand

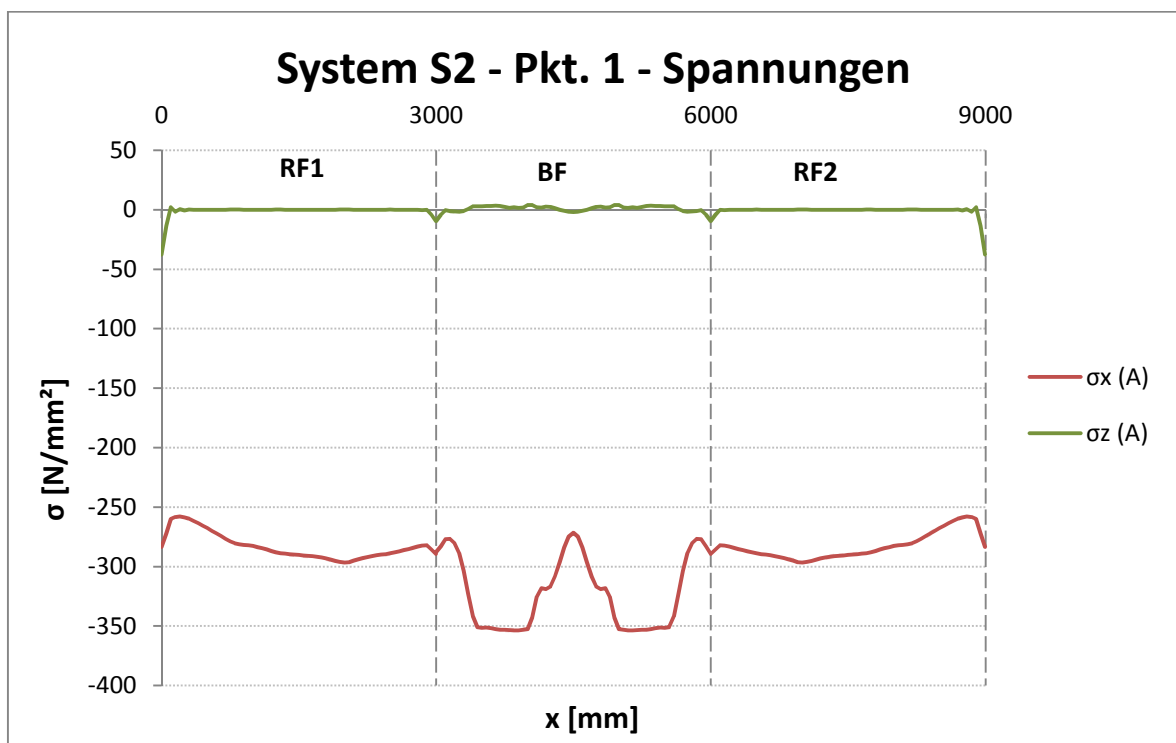


Abb. 5.12: System S2 Spannungen σ_x und σ_z am Rand A im Traglastzustand

Abb. 5.13 zeigt die ermittelten mittleren Dehnungen sowie vergleichsweise die Dehnungen aus der numerischen Berechnung im Nachbeulzustand (Pkt. 1 in Abb. 5.1). In Abb. 5.14 sind die dazugehörigen Spannungen am oberen Rand A dargestellt.

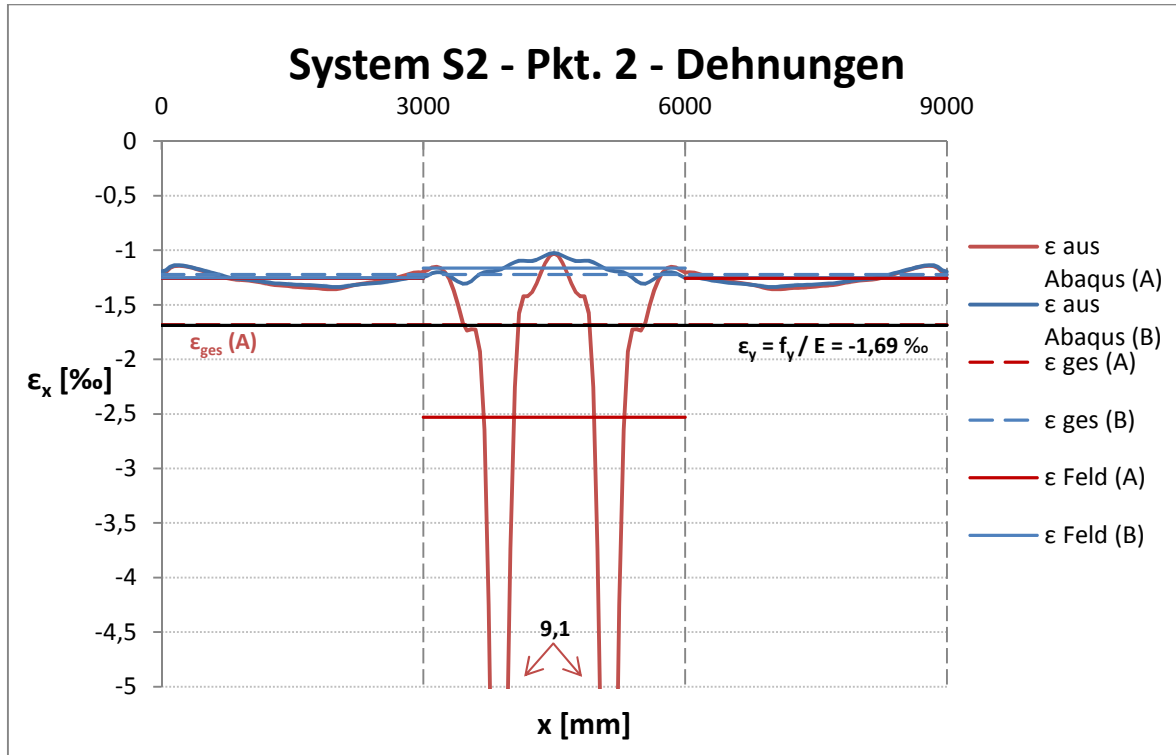


Abb. 5.13: System S2 Dehnungen in Längsrichtung entlang der Ränder im Nachbeulzustand

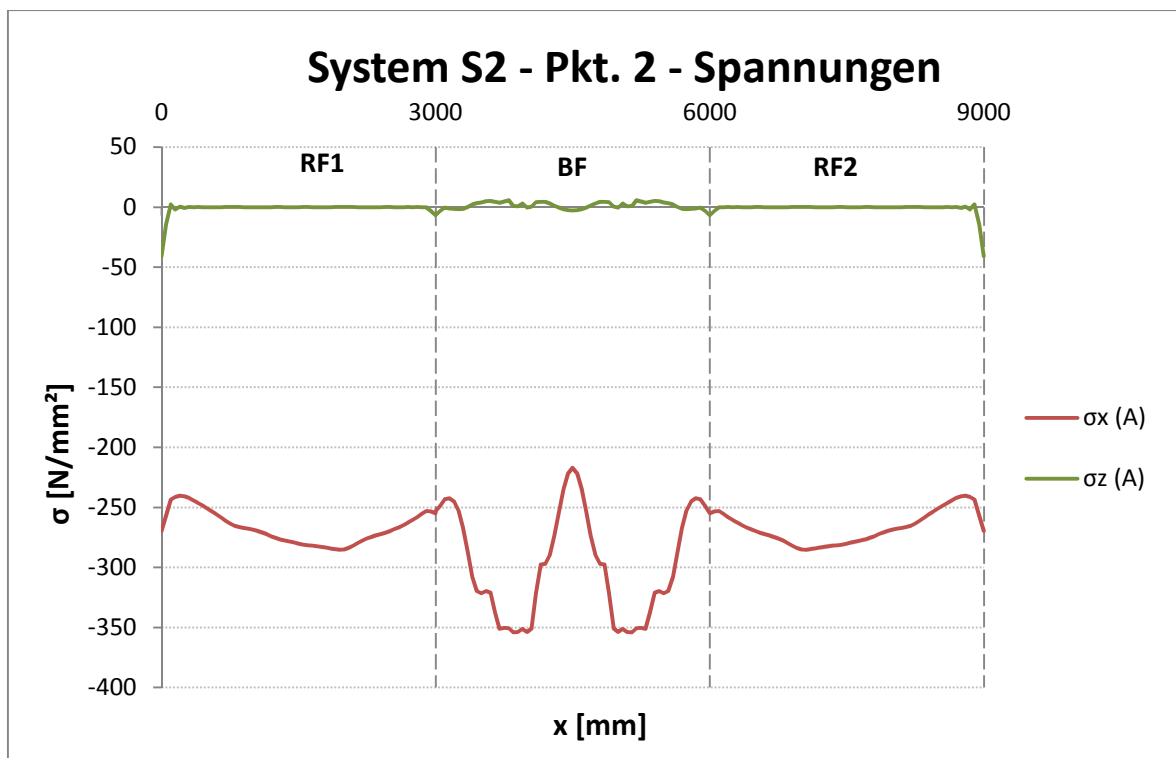


Abb. 5.14: System S2 Spannungen σ_x und σ_z am Rand A im Nachbeulzustand

Für das System S2 wird die Beultragfähigkeit bei Belastungssteigerung in Bezug auf die Dehnungen im Beobachtungsfeld genauer betrachtet, da hier eindeutig das Beulversagen stattfindet.

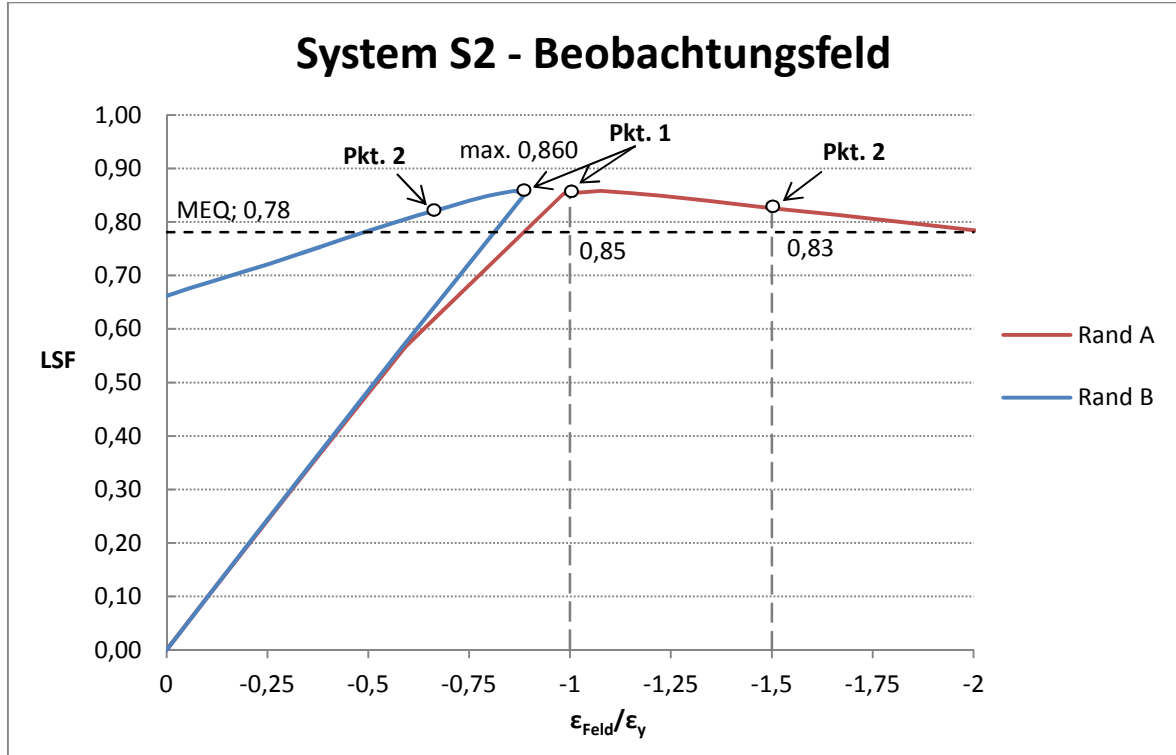


Abb. 5.15: System S2 Beultragfähigkeit in Abhängigkeit der aufgebrachtten mittleren Dehnung im Beobachtungsfeld

Im Traglastzustand hat das Plattenelement am oberen Rand A die Fließdehnung erreicht und auch im Nachbeulzustand kommt es nur zu einem geringen Abfall der Tragfähigkeit, wie in Abb. 5.15 dargestellt ist. Etwaige angrenzende Stegfelder könnten aktiviert werden und zur Tragfähigkeit beitragen. Am unteren Rand B wird ebenfalls die Fließdehnung erreicht. Bis zum Traglastmaximum werden beide Ränder gestaucht. Aufgrund der lokalen Eigenform (siehe Abb. C-8 in Anhang C), beult das Plattenelement nahe dem Rand A mehr aus als auf der anderen Seite. Der Rand A wird in weiterer Folge noch mehr gestaucht und der Rand B dehnt sich auseinander.

Das System S2 versagt größtenteils aufgrund Einzelfeldbeulens und teilweise aufgrund knickstabähnlichen Verhaltens. Das lokale Beulen ist in Abb. 5.16 gut zu erkennen. Beim Einzelfeld 1 und 3 beträgt der Abminderungsfaktor $\rho = 0,724$, welcher auch gleichzeitig den resultierenden Abminderungsfaktor ρ_c nach dem MRS-Verfahren darstellt. Die Beultragfähigkeit nach dem MEQ-Verfahren ist höher und liegt bei $\eta = N_{\text{eff}}/N_R = 0,78$ (siehe Anhang B, Kap. B.2.1). Nachdem die Einzelfelder zu beulen beginnen, können sich die Spannungen auf die Längssteifen bzw. die angrenzenden noch weniger belasteten Felder umlagern. Nachdem die elastische Knickspannung ($\sigma_{\text{cr,c}} = 1268 \text{ N/mm}^2$) größer ist als die elastische Plattenbeulspannung ($\sigma_{\text{cr,p}} = 1250 \text{ N/mm}^2$), kommt es entsprechend EN 1933-1-5 (vgl. Abb. 2.3) zu einem knickstabähnlichen Versagen. Die detaillierte Berechnung ist im Anhang B, Kap. B.2.1, zu finden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das MEQ-Verfahren nach EN 1993-1-5 [1] ein Beulversagen aufgrund Einzelfeldbeulens gut abdeckt.

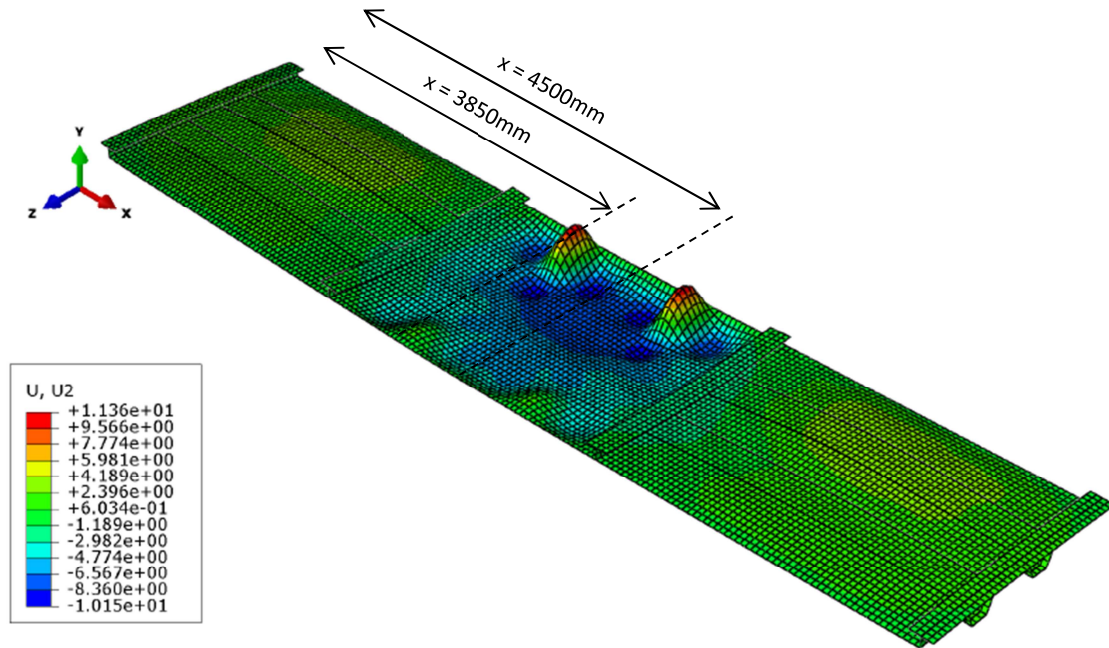


Abb. 5.16: System S2 Verschiebungen in y-Richtung im Nachbeulzustand (Pkt. 2 in Abb. 5.15)
 (Anm.: 20-facher Überhöhungsfaktor der Verformungen)

Nachfolgend sind die Spannungen in x-Richtung sowie die Verformungen aus der Ebene über die Breite des Plattenelements dargestellt. Die maßgebenden Werte liegen im Beobachtungsfeld (BF) bei $x = 3850$ mm. Zum Vergleich werden die Werte auch in der Beulfeldmitte bei $x = 4500$ mm abgelesen.

Das Einzelfeldbeulen ist an den Verformungen aus der Ebene deutlich erkennbar. Im Nachbeulzustand nehmen diese noch ein wenig zu. Zudem ist eine Spannungsumlagerung zu erkennen. An der Stelle $x = 3850$ mm werden die Druckspannungen in Richtung der Längssteifen bei Belastungssteigerung, siehe Abb. 5.17.

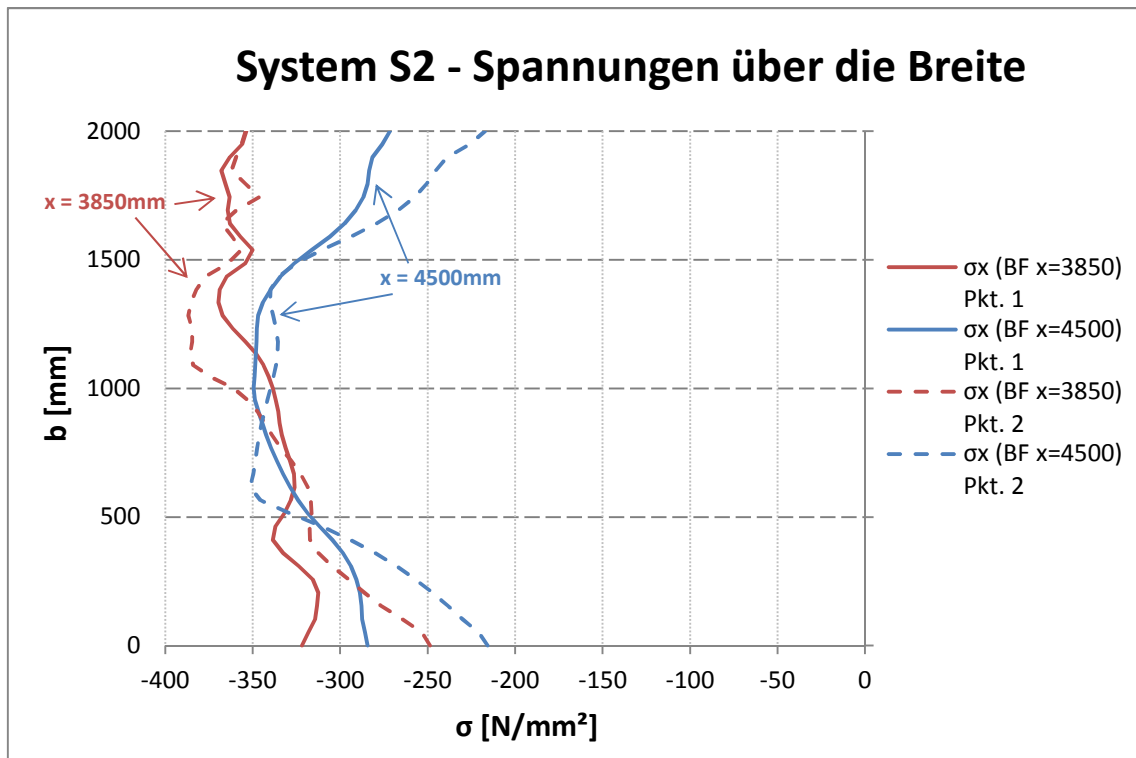


Abb. 5.17: S2 Spannungen in x-Richtung über die Breite im Beobachtungsfeld im Traglastzustand (Pkt. 1) und im Nachbeulzustand (Pkt. 2)

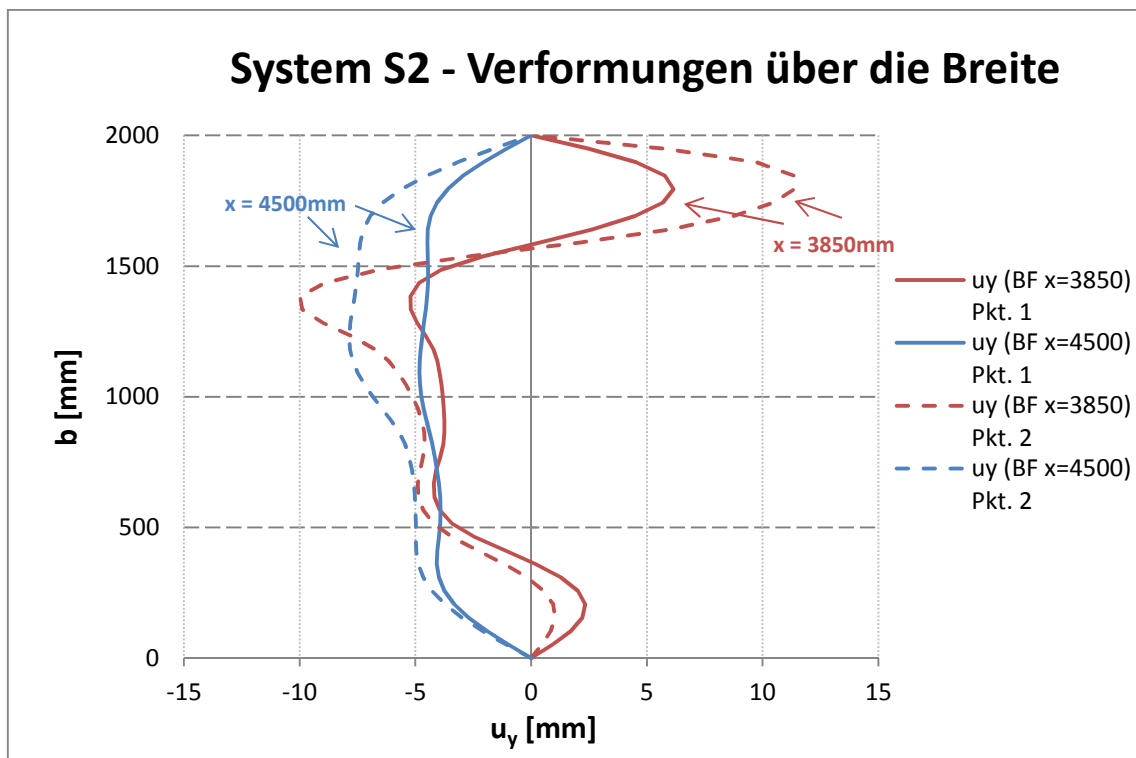


Abb. 5.18: S2 Verformungen über die Breite im Beobachtungsfeld im Traglastzustand (Pkt. 1) und im Nachbeulzustand (Pkt. 2)

5.4 System S6, Var-A

Beim System S6, Var-A, werden den vertikalen Rändern C und D keine zusätzlichen Randbedingungen zugewiesen. Das Ebenbleiben des Querschnitts wird damit nicht garantiert. Im Nachbeulzustand (Pkt. 2 in Abb. 5.1) verformen sich die Ränder nach innen, wie in Abb. 5.19 ersichtlich. Im Traglastzustand (Pkt. 1 in Abb. 5.1) ist zwar noch keine Einbuchtung erkennbar, aber die Beultragfähigkeit ist um 13,5% geringer als bei Var-B.

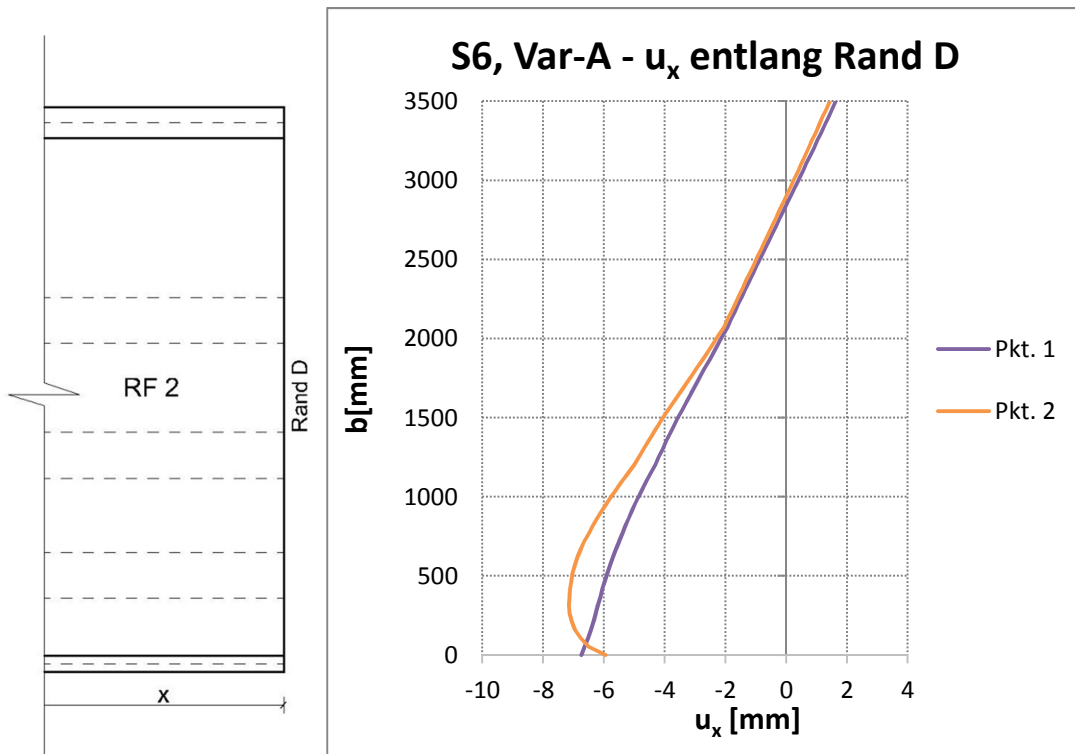


Abb. 5.19: System S6, Var-A, Verschiebungen entlang Rand D – Traglastzustand (Pkt. 1) und Nachbeulzustand (Pkt. 2)

Die ermittelten mittleren Dehnungen sowie vergleichsweise die Dehnungen aus der numerischen Berechnung im Traglastzustand (Pkt. 1 in Abb. 5.1) und im Nachbeulzustand (Pkt. 2 in Abb. 5.1) sind in den Abb. 5.20 und Abb. 5.21 dargestellt.

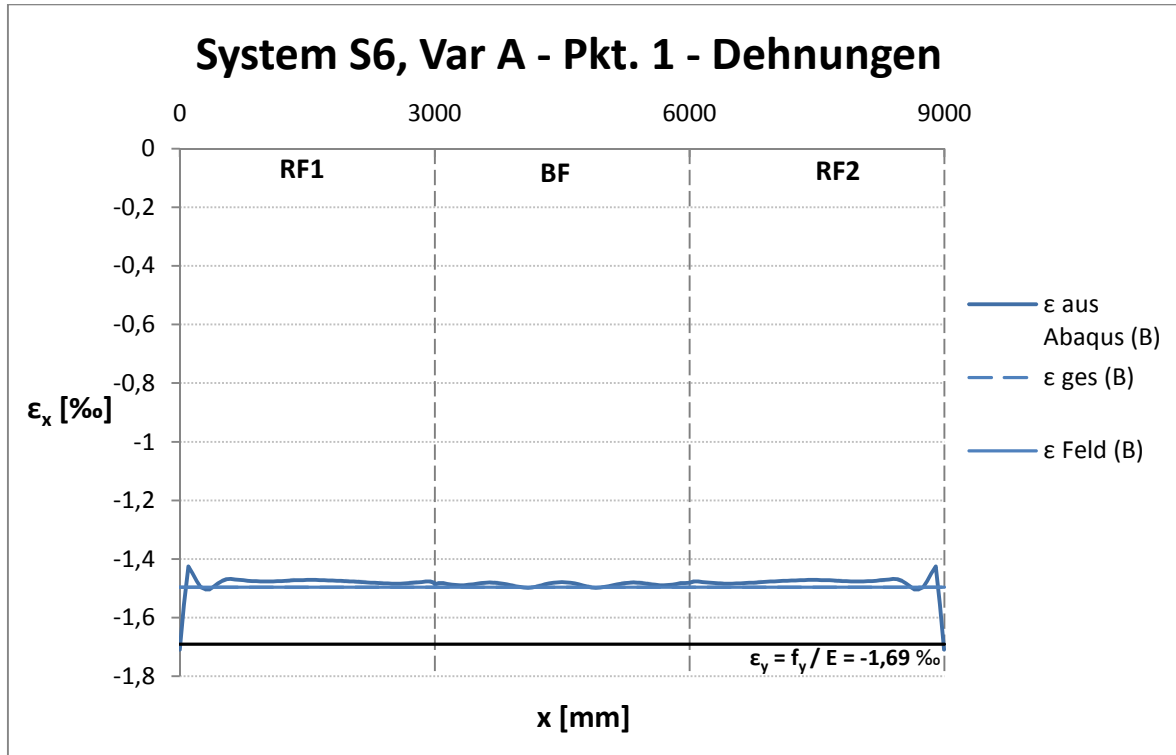


Abb. 5.20: System S6, Var-A, Dehnungen in Längsrichtung entlang Rand B im Traglastzustand

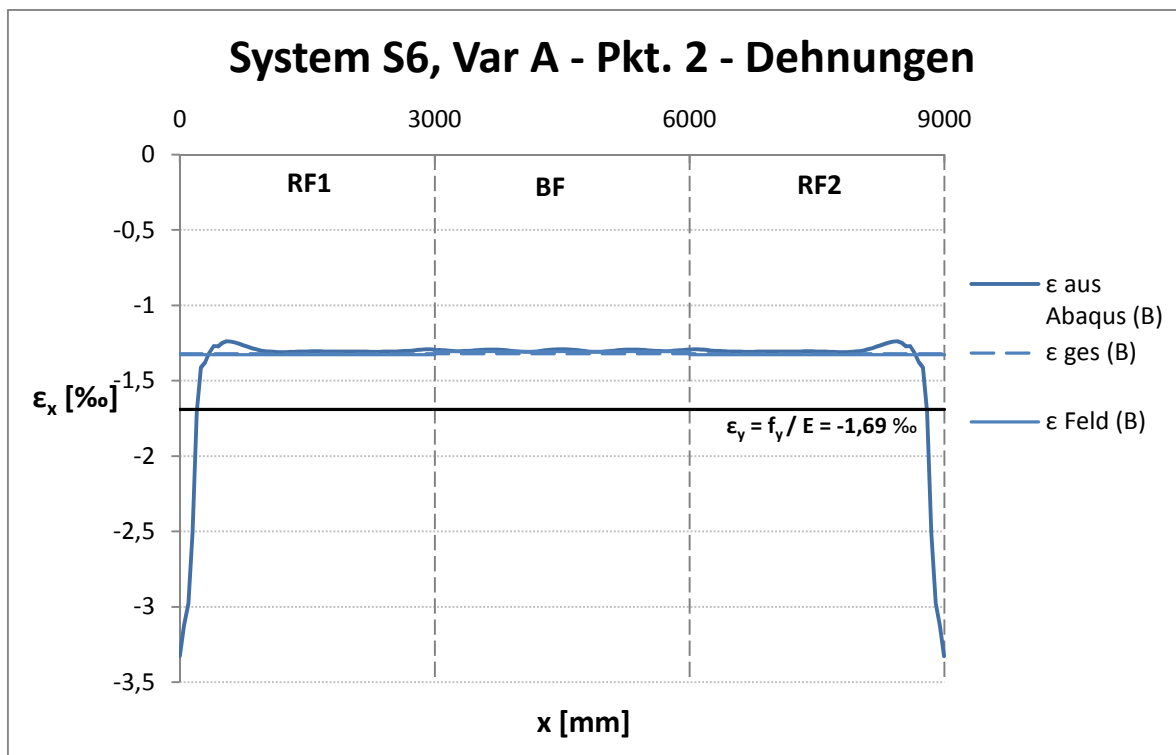


Abb. 5.21: System S6, Var-A, Dehnungen in Längsrichtung entlang Rand B im Nachbeulzustand

Für das System S6, Var-A, wird die Beultragfähigkeit bei Belastungssteigerung in Bezug auf die Dehnungen im Randfeld 1 genauer betrachtet. Da der untere Rand B die Fließdehnung nicht erreicht und die größeren Verformungen ein wenig vom Rand entfernt stattfinden, werden die Dehnungen in einem Abstand von 500 mm zum Rand auch dargestellt.

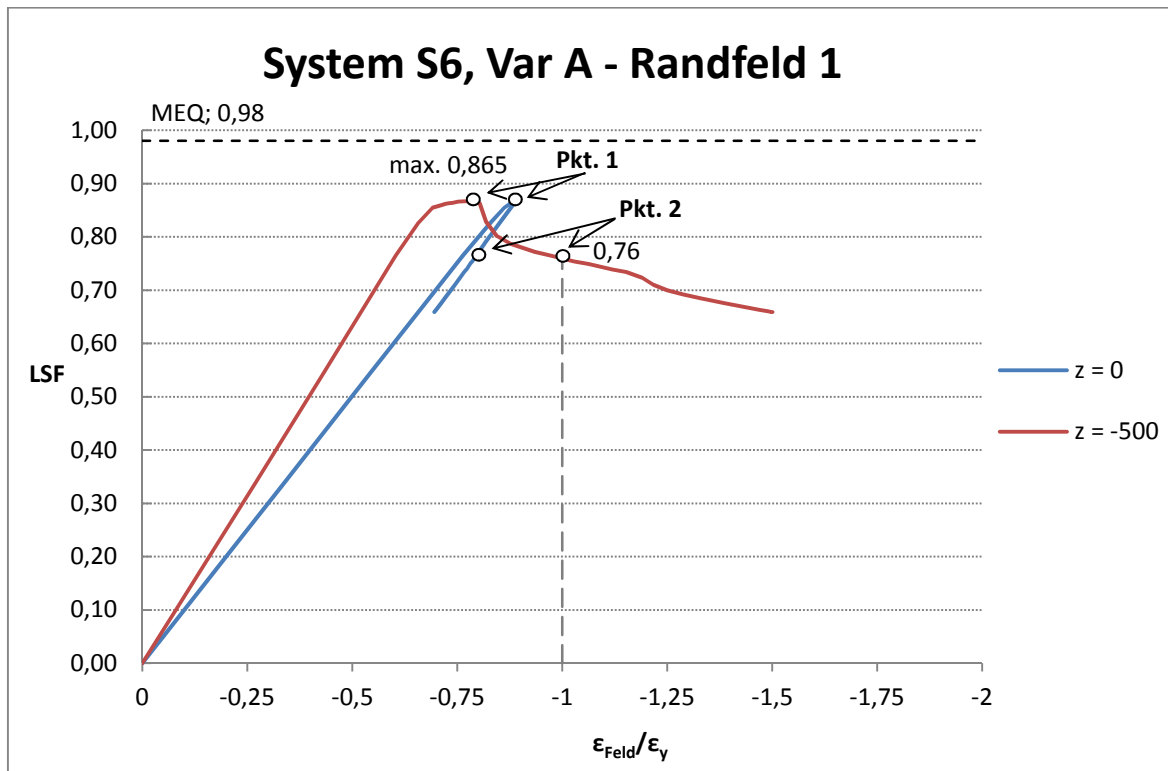


Abb. 5.22: System S6, Var-A, Beultragfähigkeit in Abhängigkeit der aufgebrauchten mittleren Dehnung im Randfeld

Die Fließdehnung wird am unteren Rand B während der gesamten Belastungssteigerung nicht erreicht. Der Untergurt kann somit nicht vollständig aktiviert werden. Die Beultragfähigkeit ist geringer als jene nach Eurocode [1] ermittelt. Die Randfelder versagen vor dem Beobachtungsfeld, da sich die Ränder nach innen verformen und lokale Spannungsspitzen auftreten. Auf die Versagensform und die dazugehörigen Parameter nach EN 1993-1-5 [1] wird im Kap. 5.5 näher eingegangen.

5.5 System S6, Var-B

Beim System S6, Var-B, werden die vertikalen Ränder C und D durch zusätzliche Randbedingungen bestimmt. Das Ebenbleiben des Querschnitts wird garantiert, siehe Abb. 5.23.

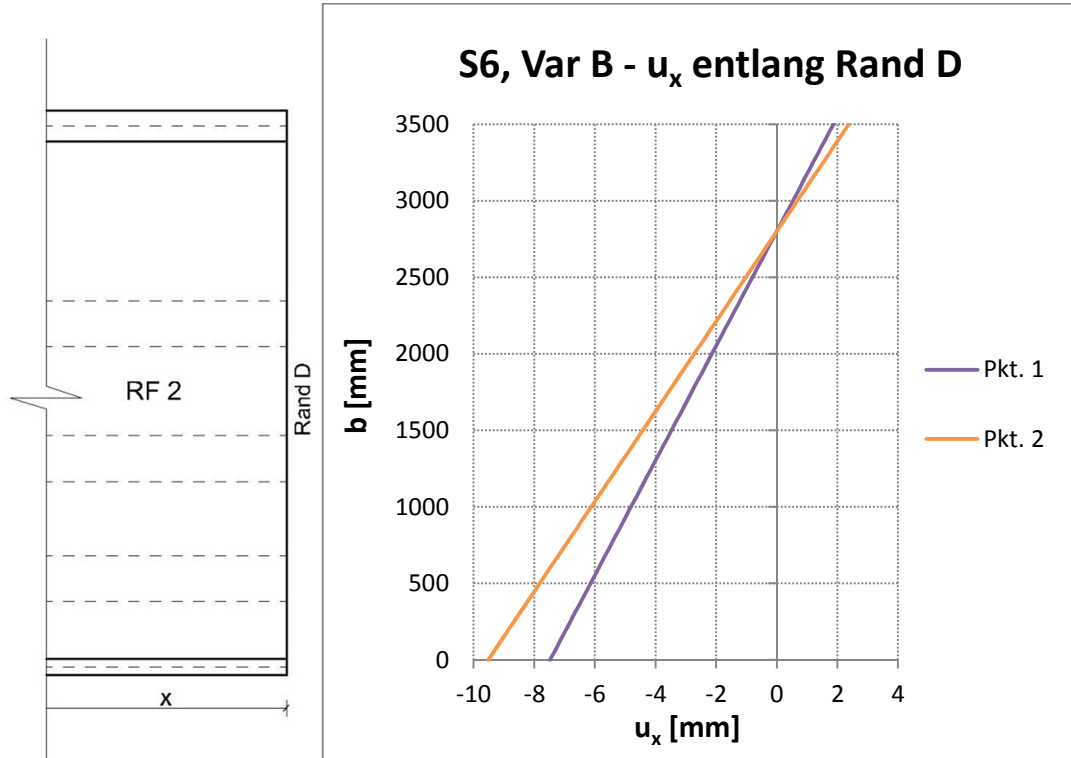


Abb. 5.23: System S6, Var-B, Verschiebungen entlang Rand D – Traglastzustand (Pkt. 1) und Nachbeulzustand (Pkt. 2)

Die ermittelten mittleren Dehnungen sowie vergleichsweise die Dehnungen aus der numerischen Berechnung für den Traglastzustand (Pkt. 1 in Abb. 5.1) und den Nachbeulzustand (Pkt. 2 in Abb. 5.1) sind in den Abb. 5.24 und Abb. 5.25 dargestellt.

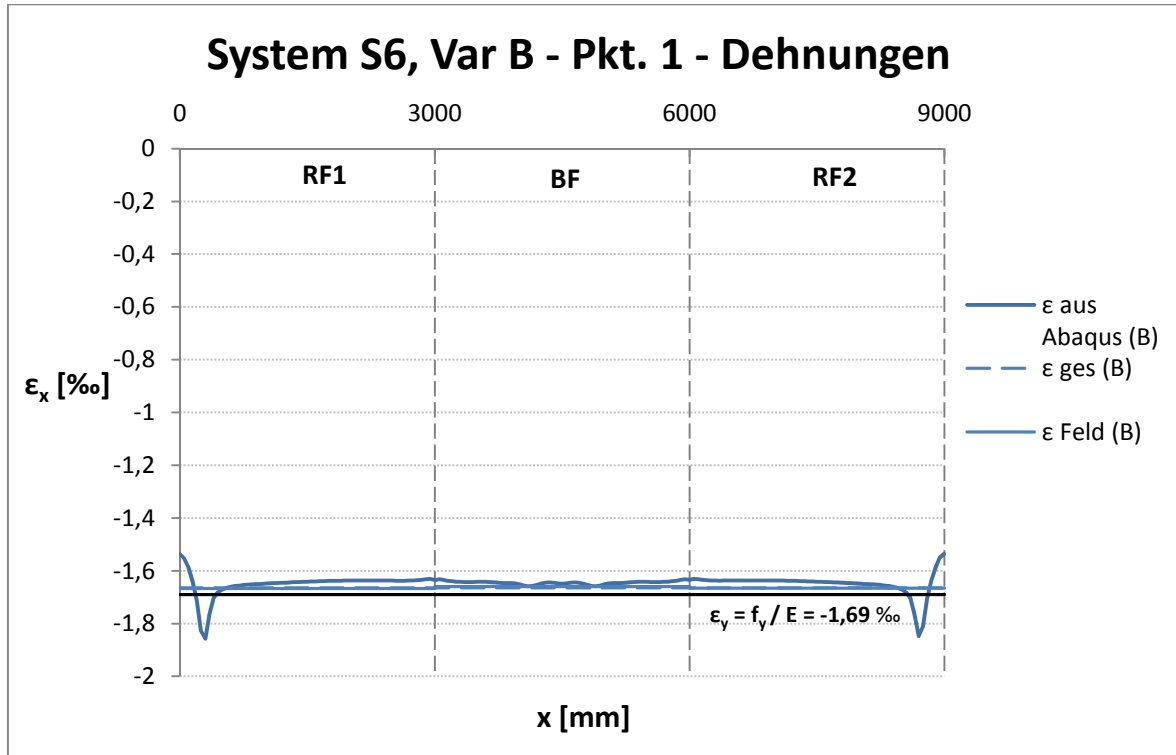


Abb. 5.24: System S6, Var-B, Dehnungen in Längsrichtung entlang Rand B im Traglastzustand

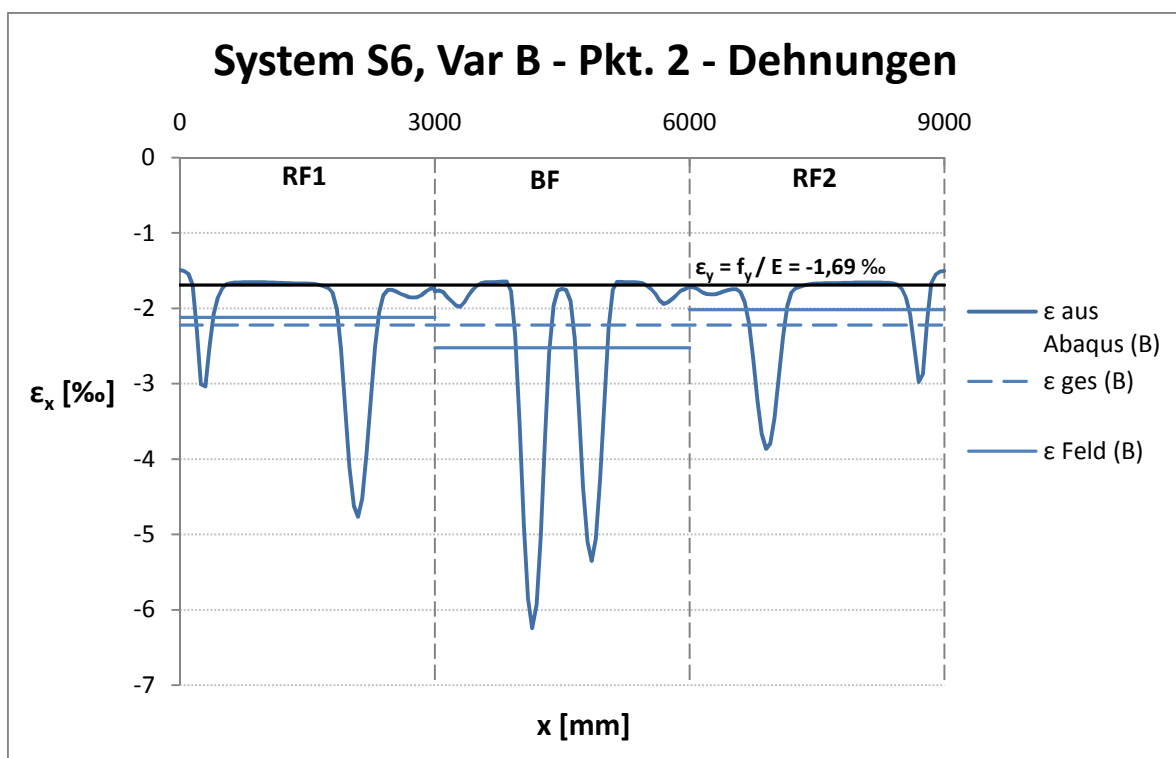


Abb. 5.25: System S6, Var-B, Dehnungen in Längsrichtung entlang Rand B im Nachbeulzustand

Für das System S6, Var-B, wird die Beultragfähigkeit bei zunehmender Belastung in Bezug auf die Dehnungen im Beobachtungsfeld genauer betrachtet, da hier das Beulversagen stattfindet.

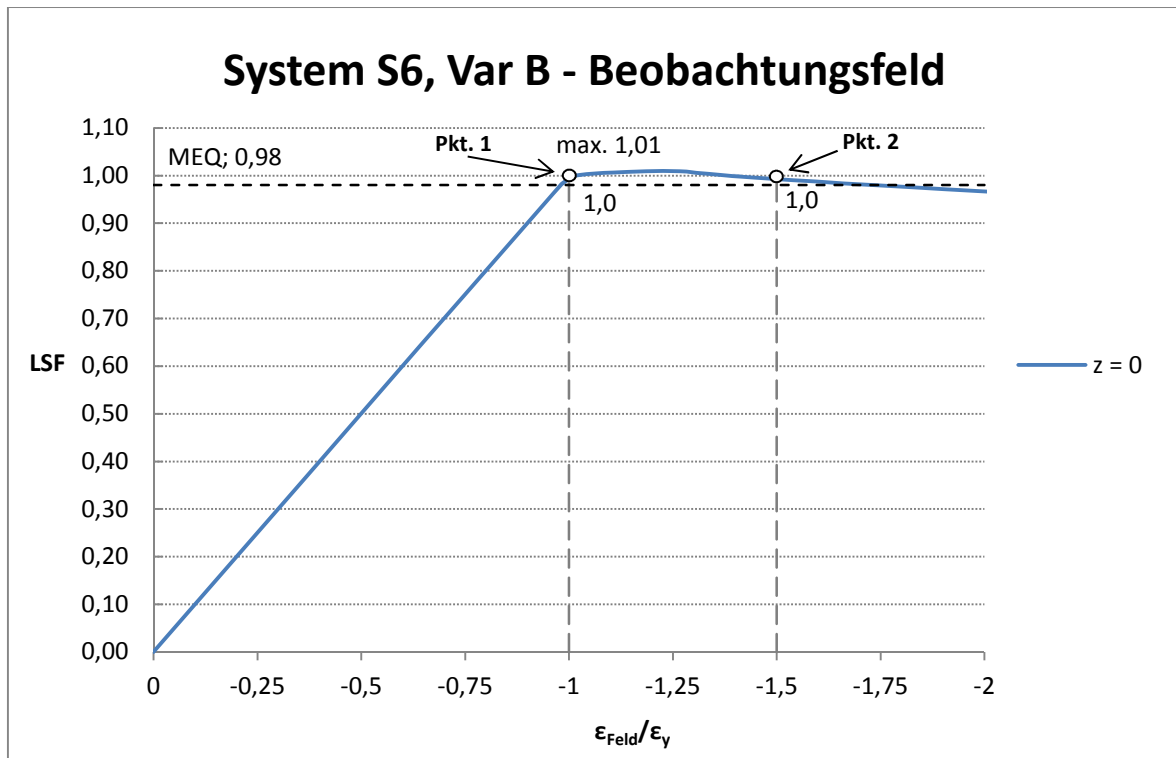


Abb. 5.26: System S6, Var-B, Beultragfähigkeit in Abhängigkeit der aufgebrachtten mittleren Dehnung im Beobachtungsfeld

Die Fließdehnung wird bereits im Traglastzustand erreicht. Der Untergurt kann vollständig aktiviert werden und die elastische Querschnittstragfähigkeit muss nach den Ergebnissen der numerischen Berechnung nicht abgemindert werden. Im Nachbeulzustand kommt es bis zur doppelten Fließdehnung zu keinem merklichen Abfall der Beultragfähigkeit.

Die Versagensform ist aus den Verformungen des Systems nicht deutlich erkennbar. Nach EN 1993-1-5 [1] beträgt die Beultragfähigkeit $\eta = M_{\text{eff}}/M_{\text{el,R}} = 0,98$ (siehe Anhang B, Kap. B.3.1) und der Faktor $\xi = 0,485$. Das spricht für eine Mischung aus knickstabähnlichem und plattenähnlichem Verhalten.

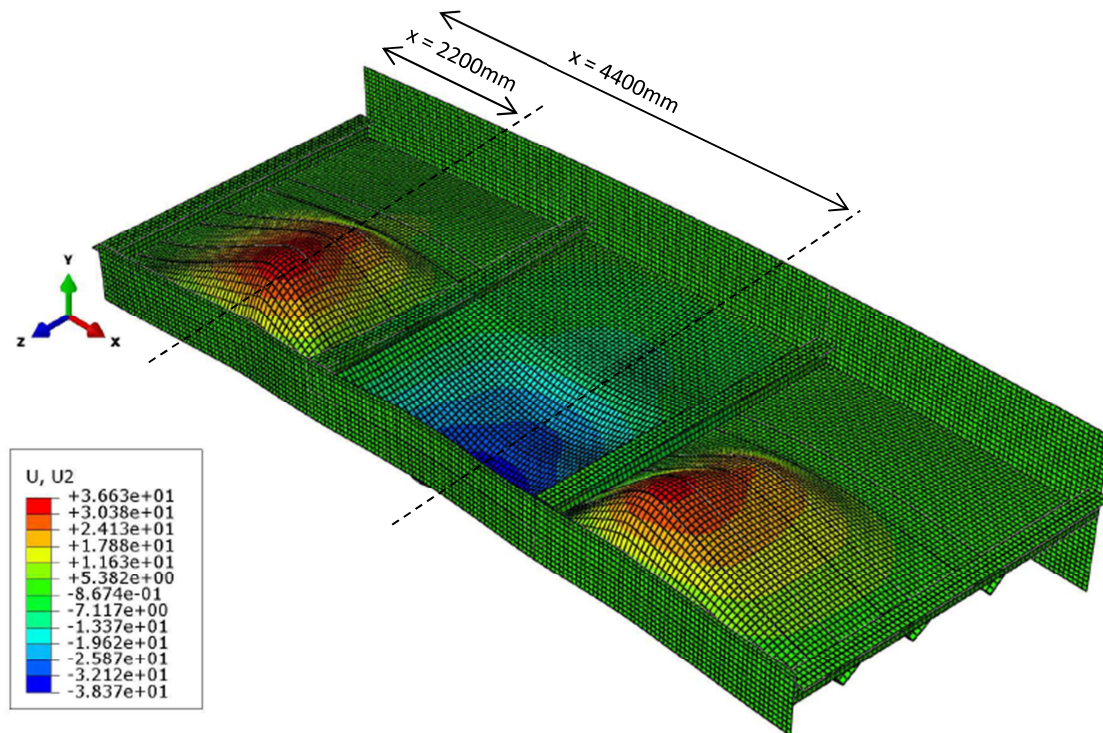


Abb. 5.27: System S6, Var-B, Verschiebungen in y-Richtung – Nachbeulzustand (Pkt. 2 in Abb. 5.26)
(Anm.: 20-facher Überhöhungsfaktor der Verformungen)

Nachfolgend sind die Spannungen in x-Richtung sowie die Verformungen aus der Ebene über die Breite des Plattenelements dargestellt. Die maßgebenden Werte liegen im Beobachtungsfeld (BF) bei $x = 4400$ mm. Zum Vergleich werden die Werte auch im Randfeld 1 bei $x = 2200$ mm abgelesen.

Im Traglastzustand sind die Spannungen sowie die Verformungen im Beobachtungsfeld und im Randfeld 1 nahezu identisch. Im Nachbeulzustand nehmen die Verformungen ausgehend von den angesetzten geometrischen Imperfektionen zu. Die Druckspannungen des Plattenelements werden im Beobachtungsfeld größer und im Randfeld 1, vor allem im Bereich der Längssteifen, kleiner. Die Längssteifen werden im Randfeld 1 gestaucht und nehmen die Druckspannungen auf.

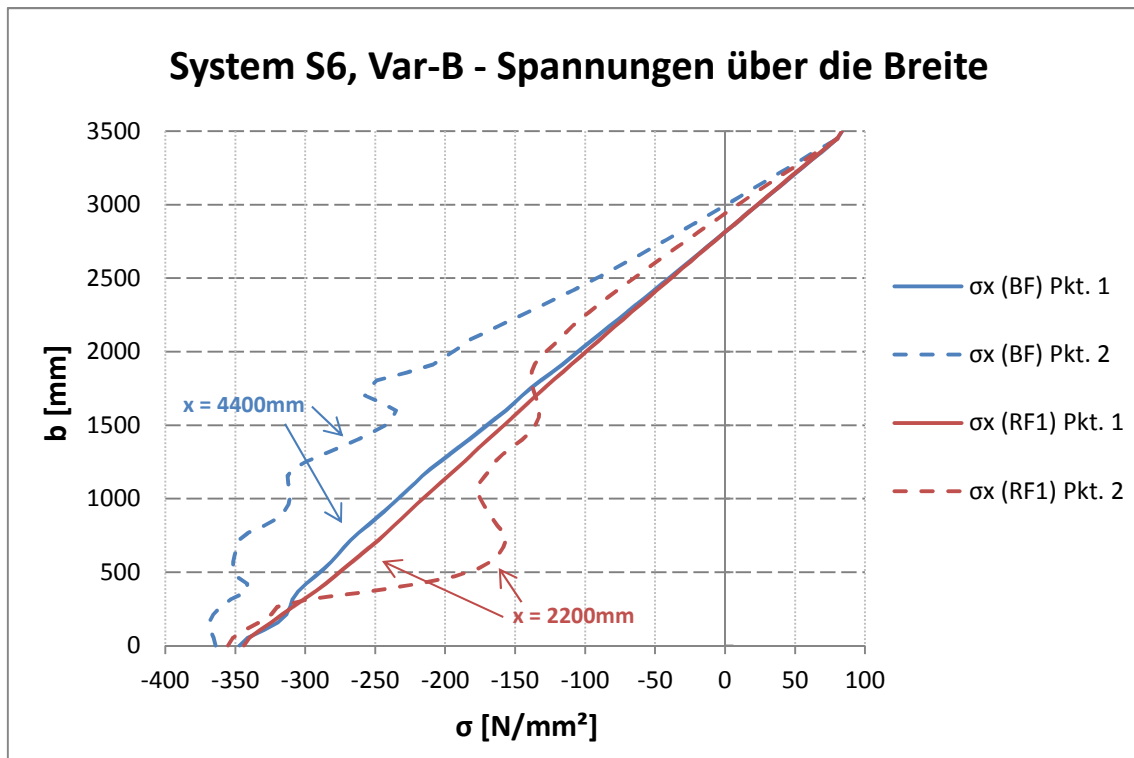


Abb. 5.28: System S6, Var-B, Spannungen in x-Richtung über die Breite in den Beulfeldmitten im Traglastzustand (Pkt. 1) und im Nachbeulzustand (Pkt. 2)

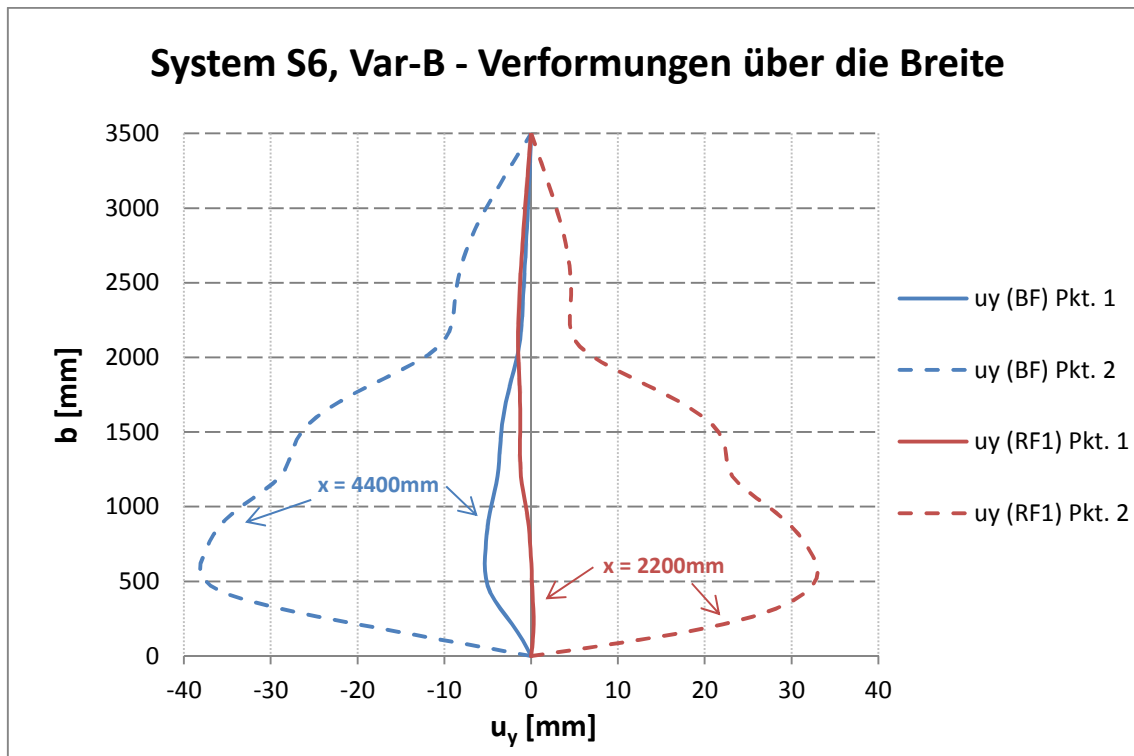


Abb. 5.29: System S6, Var-B, Verformungen über die Breite in den Beulfeldmitten im Traglastzustand (Pkt. 1) und im Nachbeulzustand (Pkt. 2)

5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die betrachteten Systeme weisen unterschiedliche Versagensformen auf:

- S1: knickstabähnliches Verhalten
- S2: lokales Beulen (mit anschließendem knickstabähnlichen Verhalten)
- S6: Mischung aus knickstabähnlichen und plattenartigen Verhalten

Das System S1 versagt aufgrund knickstabähnlichen Verhaltens. Dabei erreicht das Plattenelement an seinem Traglastmaximum bei beiden horizontalen Rändern nur eine mittlere Dehnung die 60% der Fließdehnung entspricht. Angrenzende Bleche können daher nicht vollständig aktiviert werden. Im Nachbeulzustand kommt es zu einem Traglastabfall. Wenn der untere Rand B die Fließdehnung erreicht hat, ist die Tragfähigkeit bereits um 25% geringer. Hier besteht die Gefahr, dass die Tragfähigkeit des Querschnitts überschätzt wird, da das MEQ-Verfahren nach EN 1993-1-5 [1] eine verminderte Spannungsumlagerung nicht berücksichtigt.

Das System S2 versagt größtenteils aufgrund Einzelfeldbeulens und teilweise aufgrund knickstabähnlichen Verhaltens. Die Beultragfähigkeit nach dem MEQ-Verfahren ist höher als nach dem MRS-Verfahren, da letzteres durch das lokale Beulen limitiert ist. Nachdem die Einzelfelder zu beulen beginnen, können sich die Spannungen auf die Längssteifen bzw. die angrenzenden noch weniger belasteten Felder umlagern und versagen schlussendlich durch knickstabähnlichen Verhaltens. Diesen Effekt berücksichtigt das MEQ-Verfahren. Im Traglastzustand wird die Fließdehnung an beiden horizontalen Rändern erreicht und im Nachbeulzustand kommt es nur zu einem geringen Abfall der Tragfähigkeit. Das MEQ-Verfahren deckt ein Beulversagen aufgrund lokalen Beulens gut ab.

Das System S6 versagt aufgrund einer Mischung aus knickstabähnlichem und plattenartigem Verhalten. Die Beultragfähigkeit nach dem MEQ-Verfahren ist höher als nach dem MRS-Verfahren, welches die „Mithilfe“ der Gurte nicht berücksichtigt. Die Fließdehnung wird im Traglastzustand erreicht und im Nachbeulzustand kommt es bis zum Erreichen der doppelten Fließdehnung zu keinem Abfall der Tragfähigkeit. Der anschließende Untergurt kann vollständig aktiviert werden und zur Beultragfähigkeit beitragen.

6 Interaktion zwischen Schub und Biegemoment

6.1 Berechnung nach EN 1993-1-5 [1], Abschnitt 7

Die Interaktion zwischen Schub und Biegemoment wird in der EN 1993-1-5 [1], Abschnitt 7 geregelt. Folgende Bedingung ist für die gemeinsame Wirkung einzuhalten:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \quad \text{mit} \quad \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \quad \text{Gl. (6.1)}$$

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \quad \text{Gl. (6.2)}$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \quad \text{Gl. (6.3)}$$

Ist die einwirkende Quer- bzw. Schubkraft kleiner als die Hälfte der Schubtragfähigkeit des alleinigen Steges (Index w für web) unter Berücksichtigung des Schubbeulens ($V_{bw,Rd}$), darf diese vernachlässigt werden.

Für dieses Interaktionskriterium entspricht der Wert $M_{pl,Rd}$ nicht der vollen plastischen Momententragfähigkeit, sondern jener Momententragfähigkeit, die mit der effektiven Querschnittsfläche der Flansche und der vollen Querschnittsfläche der Stege ermittelt wird. Der Wert $M_{f,Rd}$ entspricht jener Momententragfähigkeit, die nur mit den effektiven Querschnittsflächen der Flansche berechnet wird, wobei die kleinere effektive Fläche der Flansche mit der Streckgrenze und mit dem Abstand zwischen den Mittelebenen der Flansche multipliziert wird. Die Gleichung Gl. (6.1) ist grundsätzlich an jedem Querschnitt einzuhalten. Bei Innenstützen von Durchlaufträgern ist der Nachweis nur im Bereich außerhalb des Abstandes $h_w/2$ von der Stütze zu erbringen.

Die Werte $\bar{\eta}_1$ und $\bar{\eta}_3$ sollten nicht mit η_1 , welcher mit der effektiven Momententragfähigkeit ermittelt wird, und η_3 , welcher mit der erhöhten Schubtragfähigkeit $V_{b,Rd}$ (Erhöhung von $V_{bw,Rd}$, als Anteil des Steges, um den zusätzlichen Anteil der Flansche $V_{bf,Rd}$) ermittelt wird, verwechselt werden.

$$\eta_1 = \frac{M_{Ed}}{f_y \cdot W_{eff} / \gamma_{M0}} \quad \text{Gl. (6.4)}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \quad \text{Gl. (6.5)}$$

Im Zuge dieser Masterarbeit wird der Einfluss einer zusätzlichen Normalkraft auf die Tragfähigkeit nicht betrachtet und daher wird der entsprechende Nachweis nicht näher beschrieben.

Beim System S6 wird einerseits ein Interaktionsdiagramm, bei welchem die Normkurve nach Gl. (6.1) und Gl. (6.2) im Interaktionsbereich mit $M_{pl,R}$ ermittelt wird, und andererseits ein Interaktionsdiagramm, bei welchem die Normkurve nach Gl. (6.1 mod) und Gl. (6.2 mod) im Interaktionsbereich mit der elastischen Momententragfähigkeit $M_{el,R}$ ermittelt wird, erstellt. Beim Beispiel aus der Praxis wird der Interaktionsnachweis nur mit $M_{el,R}$ berechnet. Im entsprechenden Kapitel (Kap. 7.4) werden die getroffenen Annahmen genauer beschrieben.

6.2 Hintergrund der numerischen Berechnung

Anhand des Systems S6, Var-C, wird die Interaktion zwischen Schub und Biegemoment genauer betrachtet. Um ein Interaktionsdiagramm zu erstellen, werden verschiedene Belastungskombinationen berechnet. In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der Einwirkungen der gerechneten Einzellastfälle zu finden.

Tab. 6.1: Übersicht der Einwirkungen M + V

Lastfall	Biegemoment	Schub
	[%] ¹⁾	[%] ²⁾
Fall 1	100	0
Fall 2	0	100
Fall 3	25	100
Fall 4	50	100
Fall 5	75	100
Fall 6	100	100
Fall 7	100	75
Fall 8	100	50
Fall 9	100	25

¹⁾ Das Biegemoment wird auf die elastische Momententragfähigkeit $M_{el,R} = 93225,9$ kNm (siehe Kap B.3.1.) bezogen.

²⁾ Der Schub wird auf die elastische Schubtragfähigkeit $V_{el,R} = 8608,3$ kN ($V_{el,R} = A_w \cdot f_y / \sqrt{3}$ – mit A_w als Stegfläche ohne Steifen) bezogen.

Mithilfe einer linearen Beulanalyse werden die lokalen und globalen Eigenformen für den jeweiligen Lastfall ermittelt. Das Spannungsniveau der Referenzbelastung beträgt nicht mehr 10 N/mm², wie bei den vorher beschriebenen Systemen, sondern ist von Fall zu Fall unterschiedlich. In der Regel wurde die Bezugsbelastung an der elastischen Querschnittstragfähigkeit orientiert, unter Berücksichtigung der in Tab. 6.1 angegebenen Prozentsätze. Diese Bezugsbelastung wurde bei den linearen Beulanalysen auf 10% reduziert und dann als Referenzbelastung festgelegt (Details siehe Anhang C, Kap. C.5; berechnete Laststeigerungsfaktoren LSF beziehen sich auf dieses Lastniveau).

Mittels einer anschließenden GMNIA-Berechnung werden die aufgebrachten Lasten schrittweise gesteigert (Definition der jeweiligen Bezugslasten siehe Anhang C, Kap. C.5), bis der Traglastzustand erreicht wird. Mit dem resultierenden Laststeigerungsfaktor wird die Schub- bzw. Momententragfähigkeit ermittelt. Um den maßgebenden Laststeigerungsfaktor zu erhalten, werden die Traglastberechnungen mit verschiedenen Kombinationen von lokalen und globalen Imperfektionen durchgeführt. In der folgenden Tabelle (Tab. 6.2) sind die Leit- und Begleitimperfektionen zusammengefasst, wobei noch ergänzt wird aufgrund welcher Belastungsart sich die maßgebende lokale Eigenform ergibt.

Tab. 6.2: Übersicht der Leit- und Begleitimperfectionen

	Imperfektionen		
	global	lokal	
Fall 1	-1,0	+0,7	Biegemoment
Fall 2	-	+1,0	Schub
Fall 3-8	-1,0	+0,7	Schub
Fall 9	-1,0	+0,7	Biegemoment

Es besteht die Möglichkeit, dass der Querschnitt tatsächlich mehr Schub aufnehmen kann, als die berechnete elastische Schubtragfähigkeit $V_{el,R}$. Die Einwirkungen werden daher bis um das Zweifache der elastischen Querschnittstragfähigkeiten vergrößert, um sicherzustellen, dass die maximale Traglast erreicht wird.

Im Anhang C, Kapitel C.5, sind für alle Fälle die angesetzten Belastungen und die Ergebnisse der LBA- sowie GMNIA-Berechnung aufgelistet.

6.3 Ergebnisvergleich anhand eines Interaktionsdiagramms

Nachfolgend wird bei allen Tragfähigkeiten der Index d weggelassen, da mit $\gamma_m = 1,0$ gerechnet wurde. Die Ergebnisse nach der numerischen GMNIA-Berechnung werden mit jenen nach EN 1993-1-5 [1] anhand eines Interaktionsdiagramms verglichen. Die dabei verwendeten Werte beziehen sich auf die elastische Momenten- und Schubtragfähigkeit $M_{el,R}$ und $V_{el,R}$, ohne Berücksichtigung des Beulens. Die Belastung, in Form der Querkraft V und des Biegemoments M , wird an einem Kragträger aufgebracht, siehe Abb. 6.1. Die Querkraft ist konstant über die Länge, wobei das Moment gegen das Auflager hin immer größer wird.

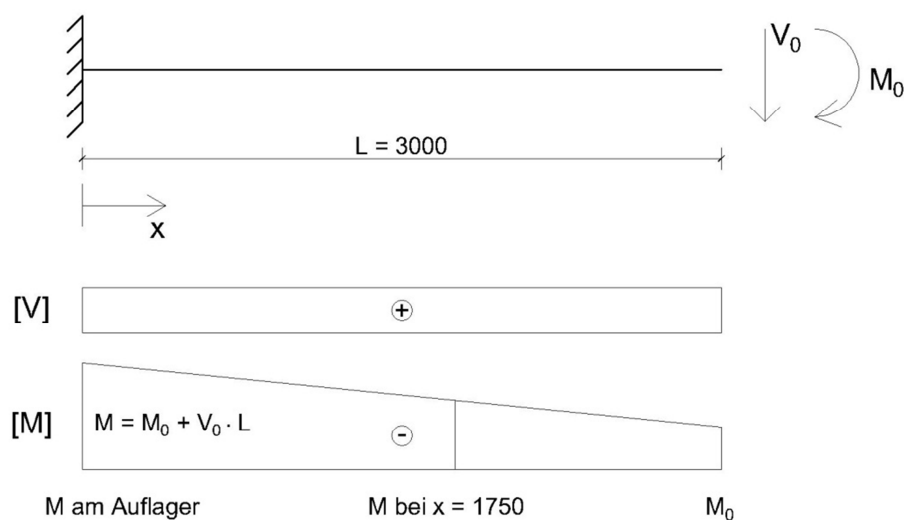


Abb. 6.1: Vereinfachte Darstellung der Belastung und Schnittgrößen

In der Abb. 6.3 sind die aufnehmbaren Schnittgrößen am Auflager, bei $x = 1750$ mm sowie am freien Trägerende dargestellt. Nachdem das Moment über die Länge des Systems nicht konstant ist, kann für das Gesamtfeld – im Vergleich zur Eurocodeinteraktion mit einem konstanten Momentenverlauf – die maximale Momententragfähigkeit nicht in gleicher Form bestimmt werden. Nach EN 1993-1-5 [1] ist der Interaktionsnachweis an Innenstützen von Durchlaufträgern bei Vorhandensein einer Quersteife nur im Bereich außerhalb des Abstandes $h_w/2$ von der Stütze zu erfüllen. Um die Ergebnisse aus der numerischen Berechnung mit den Werten nach Eurocode [1] vergleichen zu können, werden die Schnittgrößen bei $x = 1750$ mm abgelesen.

Ist die einwirkende Querkraft größer als $50\% V_{bw,R}$, ist das Interaktionskriterium nach Gl. (6.1) anzuwenden. So lange das einwirkende Moment kleiner ist als $M_{f,R}$ wird angenommen, dass allein die Flansche das Moment abtragen und der Steg die Querkraft aufnimmt. In der Praxis wird der Beitrag der Flansche zur Erhöhung der Schubtragfähigkeit, unter Berücksichtigung des Schubbeulens, meist vernachlässigt. Zudem soll nach dem nationalen Anhang, ÖNORM B 1993-2 [5], der Beitrag der Flansche an der Schubbeanspruchbarkeit nicht berücksichtigt werden. Die resultierende Schubtragfähigkeit $V_{b,R}$ ist die Summe aus dem Beitrag des Steges $V_{bw,R}$ und der Flansche $V_{bf,R}$.

6.3.1 Interaktionsdiagramm – Variante I

Bei dieser Variante I wird der Interaktionsnachweis mit der plastischen Momententragfähigkeit $M_{pl,R}$ nach EN 1993-1-5 [1], Abschnitt 7 ermittelt. Dies entspricht unmittelbar der Interaktionsformel Gl. (6.1) und Gl. (6.2). Zu beachten ist jedoch, dass die Ergebnisdarstellung in Abb. 6.2 auf beiden Achsen weiterhin den Bezug auf die elastischen Querschnittstragfähigkeiten aufweist.

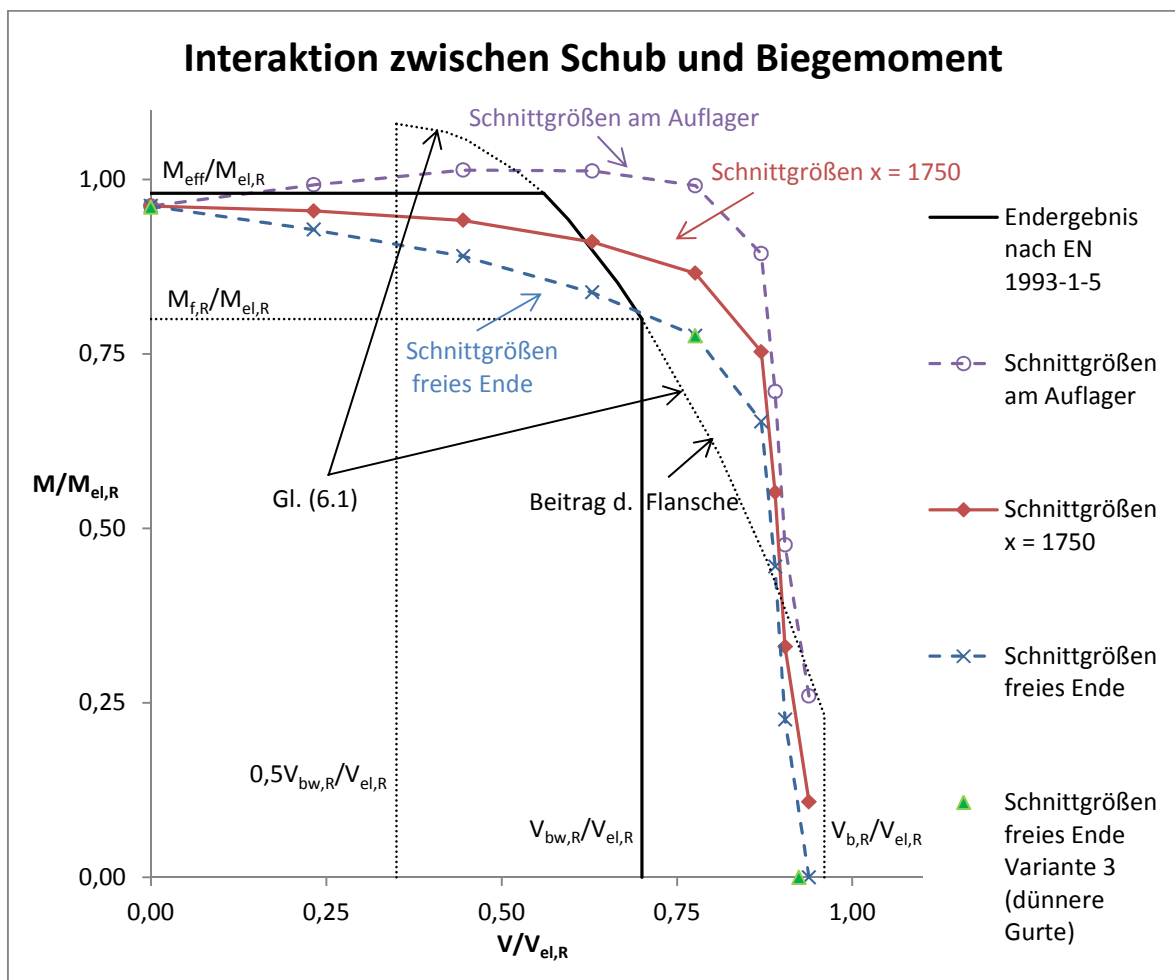


Abb. 6.2: Interaktionsdiagramm System S6, Var-C – Variante I

Wird die Tragfähigkeitskurve an der Stelle $x = 1750$ mm mit der Normkurve verglichen, ist im Bereich $V < V_{bw,R}$ die numerisch ermittelte Momententragfähigkeit um 2% geringer als jene nach EN 1993-1-5 [1]. Die Momententragfähigkeit, resultierend aus der Interaktionsformel nach Gl. (6.1), ist bei geringer Querkräftenbeanspruchung (punktierter Linie in Abb. 6.2) um ca. 10% höher als M_{eff} , da nach dieser Gleichung die plastische Momententragfähigkeit $M_{pl,R}$ mit der vollen Stegfläche angesetzt werden darf. Dies ist jedoch baupraktisch nicht ausnutzbar, da M_{eff} als obere Grenze gilt. Im Bereich $V > V_{bw,R}$ ist die Berechnung nach Eurocode [1] sehr konservativ. Die Momenten- sowie Schubtragfähigkeit ist nach der numerischen Berechnung größer. Ist die Schubbelastung sehr hoch und die Momentenbelastung gering, nähert sich die numerische Berechnung der Normkurve an, wenn die Schubtragfähigkeit der Flansche bei letzterer mitberücksichtigt wird.

6.3.2 Interaktionsdiagramm - Variante II

Im Gegensatz zu Variante I wird nun in der Interaktionsbedingung nach Gl. (6.1) und Gl. (6.2) mit der elastischen Momententragsfähigkeit $M_{el,R}$ gerechnet, entsprechend Gl. (6.1 mod) und Gl. (6.2 mod).

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,R}}{M_{el,R}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \text{ mit } \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,R}}{M_{el,R}} \quad \text{Gl. (6.1 mod)}$$

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_E}{M_{el,R}} \quad \text{Gl. (6.2 mod)}$$

Damit ändern sich nur die Ergebnisse nach EN 1993-1-5 [1] gegenüber Abb. 6.2, wogegen alle Traglastergebnisse infolge der unveränderten Auftragsart (Bezug auf elastische Querschnittstragsfähigkeiten) unverändert bleiben.

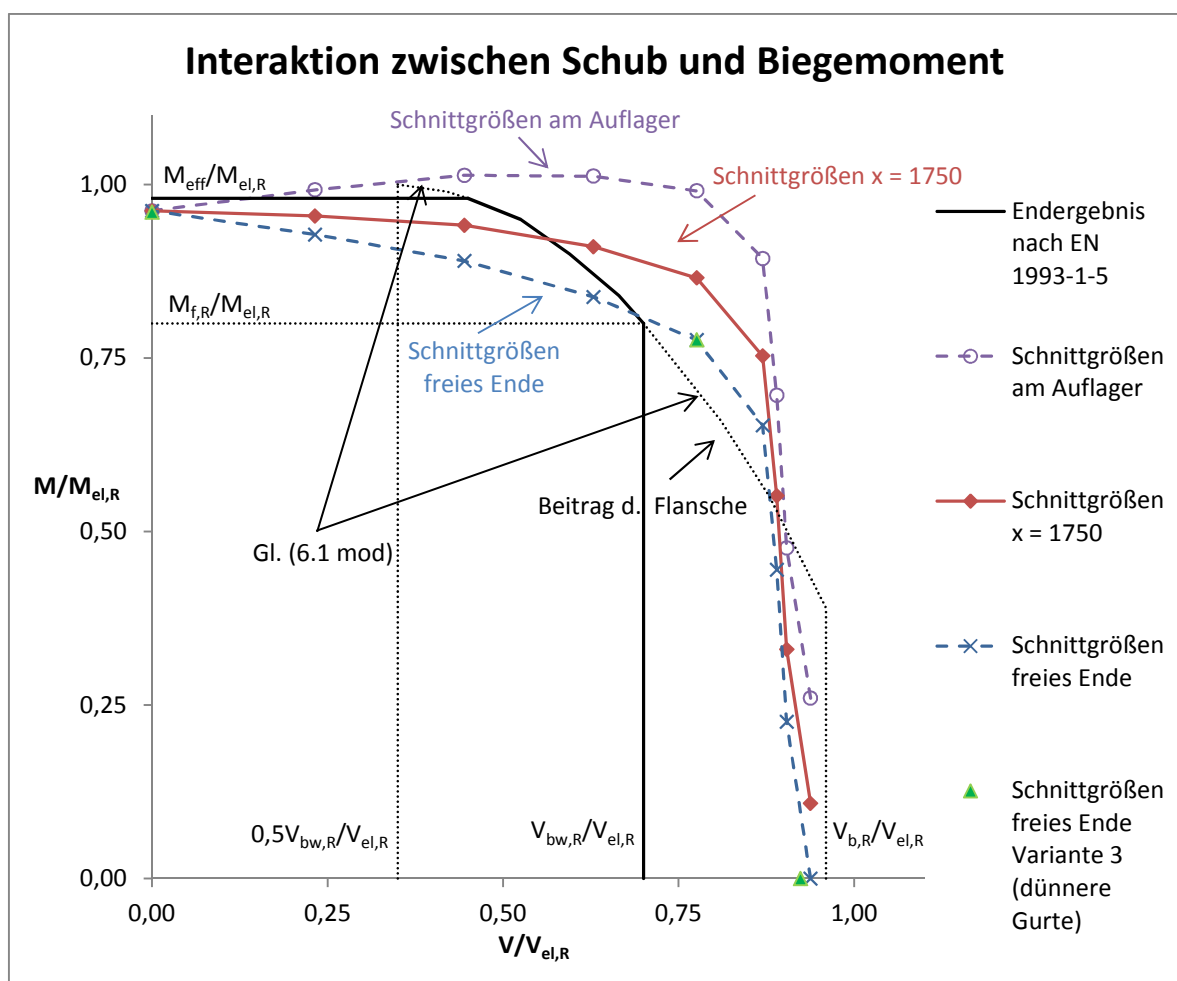


Abb. 6.3: Interaktionsdiagramm System S6, Var-C – Variante II

Bei dieser Variante II stimmt die Berechnung nach Eurocode [1] grundsätzlich besser mit der numerischen Berechnung überein, als bei Variante I. Die Normkurve ist im Interaktionsbereich nicht mehr so steil und nähert sich den numerisch ermittelten Kurven an. Bis auf den Bereich $V < 0,55 V_{el,R}$, wo die Momententragsfähigkeit lediglich um 2% kleiner ist als M_{eff} , liegt die Berechnung nach EN 1993-1-5 [1] durchgehend auf der sicheren Seite. Wird nur der Steg für die Schubtragsfähigkeit herangezogen, sind die Ergebnisse nach [1] sehr konservativ. Wird der Beitrag der Flansche zur Schubtragsfähigkeit mitberücksichtigt, nähert sich die numerische Berechnung den Werten nach Eurocode [1] an.

Die Gurte sind bei diesem System S6 sehr dick gewählt (100 bzw. 200 mm). Ob dieser Umstand einen relevanten Einfluss auf die Querschnittstragfähigkeit hat, wird auch überprüft (Überschätzung des Anteiles der Flansche an der Schubtragfähigkeit). Die Lastfälle 1, 2 und 6 werden auch mit dünneren Gurten berechnet, wobei die Fläche der Gurte gleich groß bleibt und sich somit der Schwerpunkt und die Spannungsverteilung nicht ändern.

Die Variante 1 ist der bisherig betrachtete Querschnitt. Bei der Variante 2 wird die Dicke des Druckgurts von 100 mm auf 62 mm und die Dicke des Zuggurts von 200 mm auf 125 mm verkleinert. Bei der Variante 3 ist der Zuggurt nur mehr 60 mm dick. Eine Übersicht der Abmessungen ist in der folgenden Tabelle zu finden.

Tab. 6.3: Abmessungen der betrachteten Varianten

		Variante 1	Variante 2	Variante 3
Druckgurt	b [mm]	600	968	968
	t [mm]	100	62	62
	c/t	3,00	7,81	7,81
Zuggurt	b [mm]	1590	2544	5300
	t [mm]	200	125	60
	c/t	3,75	10,20	44,17

Wie in Abb. 6.2, Abb. 6.3 und Tab. 6.4 ersichtlich, hat die Dicke der Gurte keinen bedeutenden Einfluss auf die Tragfähigkeit. Der größte Unterschied ist bei Variante 3 zu finden und dort ist die Schubtragfähigkeit im Fall 2 um nur 1,5 % geringer als bei Variante 1.

Tab. 6.4: Übersicht der Laststeigerungsfaktoren LSF für die Varianten 1, 2 und 3

	Variante 1		Variante 2		Variante 3	
	M/M _{el,R}	V/V _{el,R}	M/M _{el,R}	V/V _{el,R}	M/M _{el,R}	V/V _{el,R}
Fall 1	0,962	-	0,960	-	0,960	-
Fall 2	-	0,938	-	0,930	-	0,924
Fall 6	0,776	0,776	0,776	0,776	0,776	0,776

7 Praxisbeispiel

7.1 Anlageverhältnisse

Zum Abschluss dieser Masterarbeit wird die Interaktion von Schub und Biegemoment an einem Beispiel aus der Praxis untersucht. Der Hauptträger des Objekts L40 auf der A10 Tauernautobahn wird der Berechnung zugrunde gelegt. Es handelt sich dabei um einen Verbundquerschnitt, wobei nur die Tragfähigkeit des Stahlträgers näher betrachtet wird. Die Abmessungen sowie die gegebene Spannungsverteilung sind in der Abb. 7.1 dargestellt. Die Dicke der dreiecksförmigen Längssteifen wird von 5 mm auf 6 mm erhöht, um lokales Beulen der Steifen auszuschließen. Die Teilfeldlänge wird von 1500 mm auf 3000 mm vergrößert, um die Beulgefährdung zu erhöhen. Eine Stahlgüte von S355 wird angenommen.

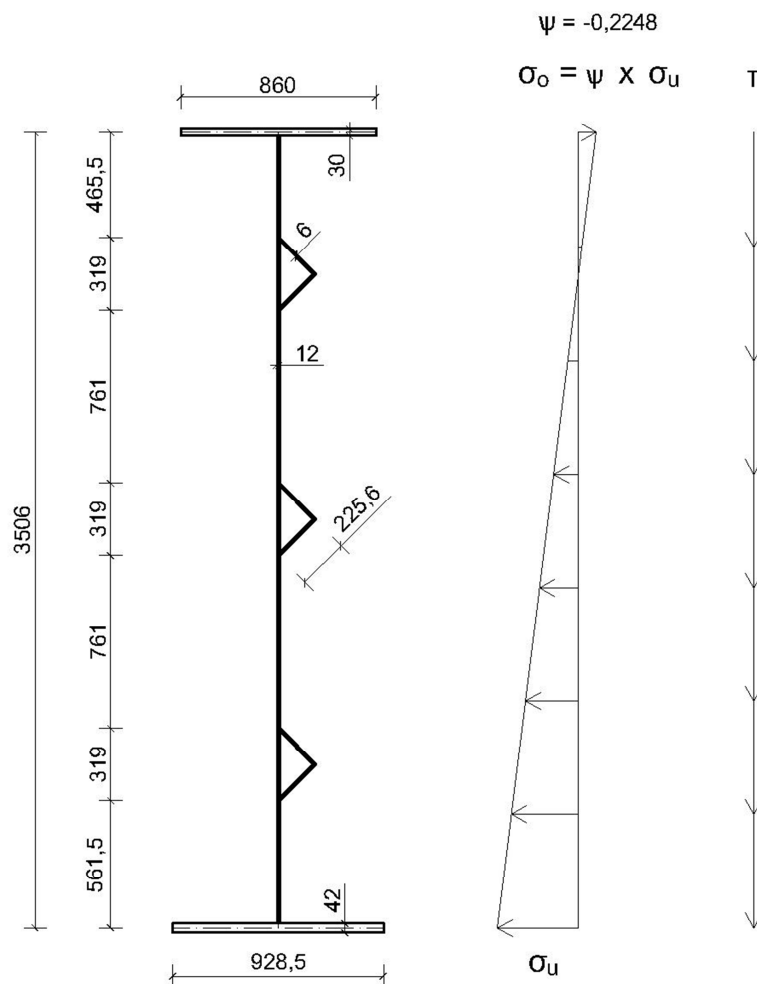


Abb. 7.1: Abmessungen und Spannungsverteilung des Praxisbeispiels

Der Untergurt hat eine Breite von 940 mm und eine Dicke von 30 mm. Auf diesen Untergurt wird eine Lamelle mit einer Breite von 900 mm und einer Dicke von 12 mm geschraubt. Für die weitere Berechnung wird vereinfacht eine mittlere Breite von 928,5 mm und eine Dicke von 42 mm angesetzt. Durch die zusätzliche Lamelle ist der Untergurt der QS-Klasse 3 zuzuordnen:

$$c/t = 10,8 < 14\varepsilon = 11,4$$

7.2 Hintergrund der numerischen Berechnung

Die FE-Modellierung (siehe Kap.3.2.3) sowie die Ermittlung der Laststeigerungsfaktoren (siehe Kap. 6.2) erfolgen analog zum System S6, Var-C, an einem Kragträger, wobei die Gurte anstatt gelenkig nun starr mit dem Steg verbunden sind. Zudem wird das System ohne Quersteifen am freien Trägerende modelliert, wobei durch die Randbedingung „Coupling“ die Endquerschnitte eben bleiben und daher quasi wie Querschnitte mit Quersteifen wirken. Wird der gesamte Verbundquerschnitt samt Betonplatte betrachtet, treten keine Normkräfte auf, wenn der Spannungsnullpunkt durch den Schwerpunkt des Verbundquerschnitts geht. Um eine Spannungsverteilung von $\psi = -0,2248$ beim Stahlträger zu erreichen, gleichwertig zur Spannungsverteilung am Verbundquerschnitt, muss zusätzlich zu dem Moment am Trägerende eine Normkraft angesetzt werden. Im Anhang C, Kapitel C.6 sind für alle Lastfälle die angesetzten Belastungen und die Ergebnisse der LBA- sowie GMNIA-Berechnung aufgelistet.

7.3 Problematik der zutreffenden Spannungsverteilung

Am freien Ende des Kragträgers ist die Spannungsverteilung konstant bei $\psi = -0,2248$. Um die Ergebnisse aus der numerischen Berechnung mit jenen nach Eurocode [1] vergleichen zu können, werden die Schnittgrößen bei $x = 1750$ mm abgelesen. Nachdem die einwirkende Querkraft V das Biegemoment zur Einspannstelle hin erhöht, die Spannung aus der Normalkraft N hingegen konstant bleibt, ändert sich von Lastfall zu Lastfall die Spannungsverteilung bei $x = 1750$ mm, wie in der folgenden Abbildung (Abb. 7.2) schematisch dargestellt ist. In der numerischen Berechnung verschiebt sich somit der Spannungsnullpunkt entlang des Kragträgers, da nur der Stahlträger modelliert wurde. Wird der gesamte Verbundquerschnitt betrachtet, verschiebt sich der Spannungsnullpunkt hingegen nicht.

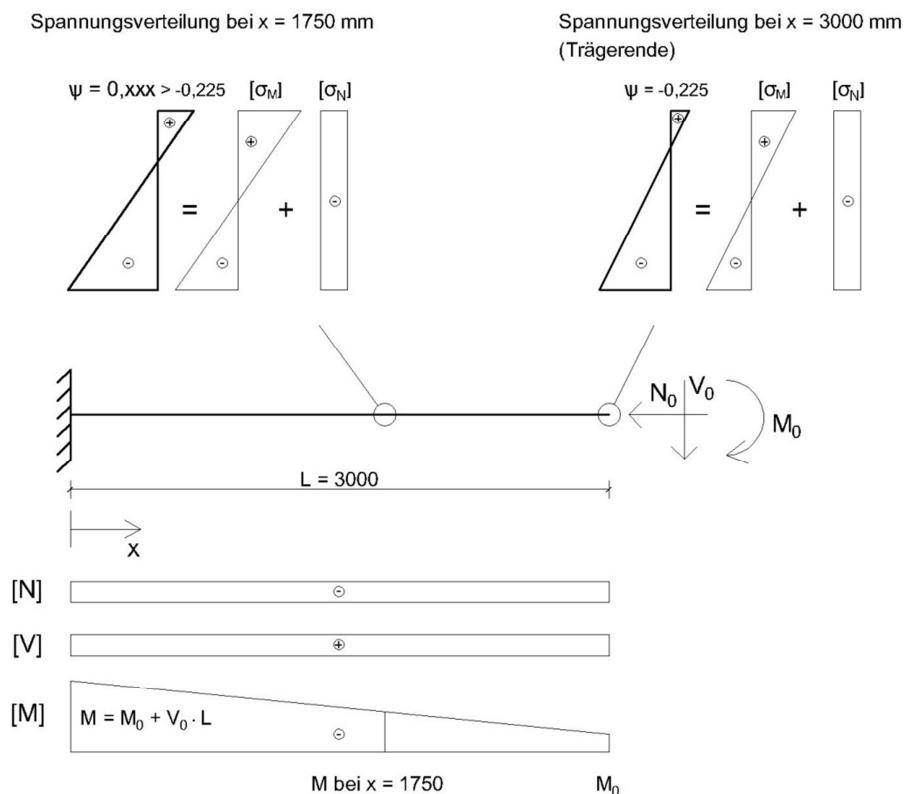


Abb. 7.2: Schematische Darstellung der Spannungsverteilungen und Schnittkraftverläufe

Für jeden Lastfall wird mit der zugehörigen Spannungsverteilung bei $x = 1750$ mm die elastische sowie die effektive Momententragfähigkeit berechnet. Der Interaktionsnachweis wird ebenfalls mit der elastischen Momententragfähigkeit $M_{el,R}$ des Stahlträgers und nicht mit $M_{pl,R}$ des Verbundquerschnitts (Gl. (6.1 mod) und Gl. (6.2 mod)), durchgeführt. Für die Ermittlung der kritischen Plattenbeulspannung nach EN 1993-1-5 [1] wird die Größe des globalen Eigenwertes (Beulspannung σ_{cr}), ohne Einfluss der Querkraft, benötigt. Infolgedessen werden für alle Lastfälle nochmals lineare Beulanalysen, ohne Querkraft V_0 , durchgeführt. Die Beanspruchungen durch Moment und Normalkraft werden dabei so angesetzt, dass sich die „veränderte“ Spannungsverteilung – entsprechend dem Belastungsansatz in der GMNIA-Berechnung – an der Stelle $x = 1750$ mm ergibt. Die Berechnungsergebnisse nach [1] sind im Anhang B, Kap. B.4 zu finden.

7.4 Ergebnisvergleich anhand eines Interaktionsdiagramms

Treten nur Normalspannungen auf, stimmt die numerische Berechnung gut mit der Berechnung nach Eurocode [1] überein. Wirken zusätzliche Schubkräfte auf den Querschnitt, nimmt die Beultragfähigkeit schnell ab. Schon bei $V_a < 0,5 V_{a,bw,R}$ hat die Querkraft einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss. Im Bereich von hohen Schubspannungen nähert sich die numerische Berechnung der Normkurve an. Erst ab einer Momentenhöhe $M_a/M_{a,el,R} \geq 0,5$ hat das Moment einen Einfluss auf die Tragfähigkeit. Die Schubtragfähigkeit nach der numerischen Berechnung liegt ein wenig unter jener nach Eurocode [1].

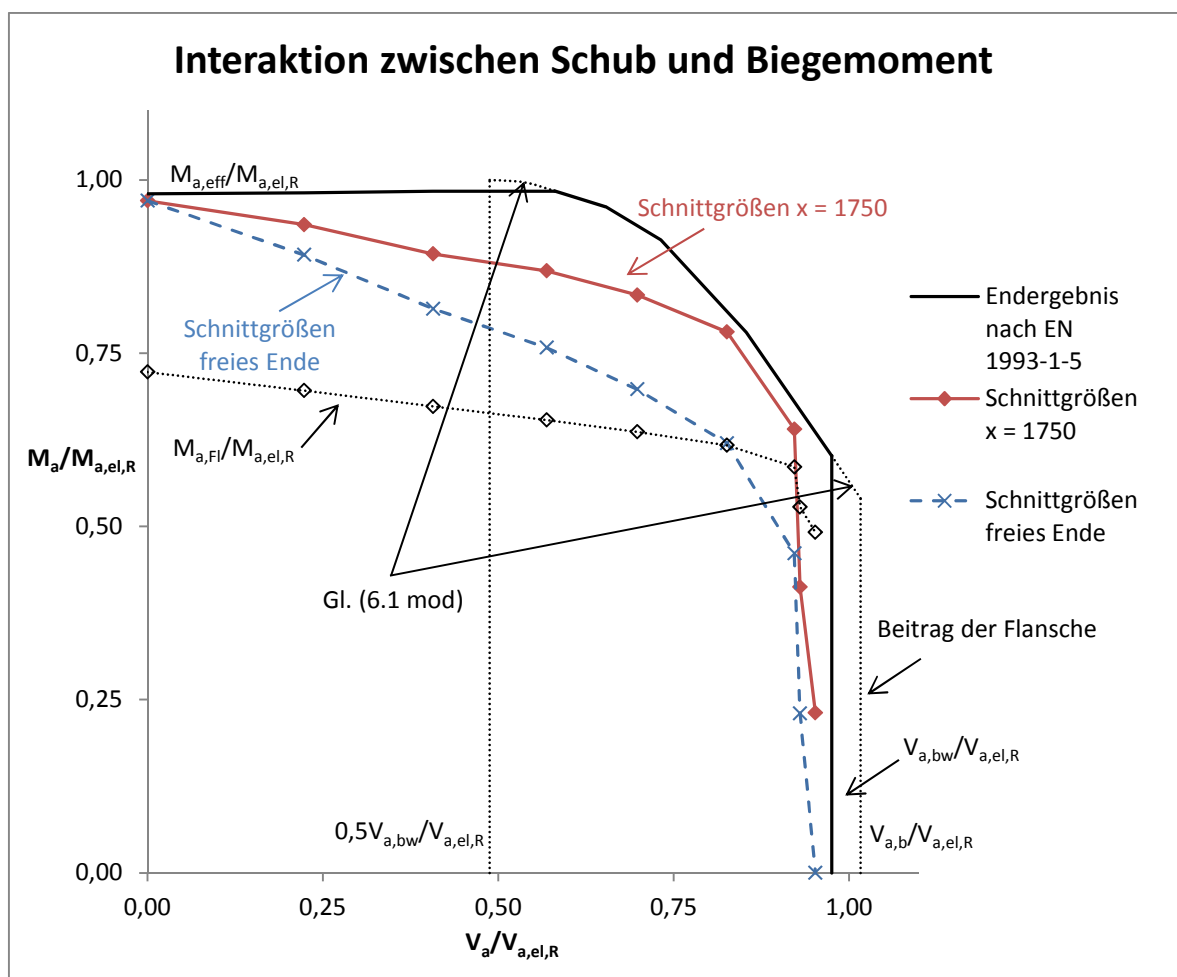


Abb. 7.3: Interaktionsdiagramm Praxisbeispiel

In der folgenden Tabelle (Tab. 7.1) ist eine Übersicht der ermittelten Momenten- und Schubtragfähigkeiten sowie der Spannungen an der Stelle $x = 1750$ mm auf Basis der durchgeführten GMNIA-Berechnungen zu finden. Zudem ist für jeden Lastfall (Anm.: Druckspannungen negativ) der Spannungsanteil, welcher sich aus der Normalkraftbeanspruchung ergibt, an der gesamten Spannung am unteren Stegblechrand aufgelistet.

 Tab. 7.1: Übersicht der Tragfähigkeit und Spannungen an der Stelle $x = 1750$ mm

Lastfall	$M_{a,x=1750}/M_{a,eI,R}$	$V_a/V_{a,eI,R}$	$\sigma_{ges,oben}$ [N/mm ²]	$\sigma_{ges,unten}$ [N/mm ²]	ψ	Anteil σ_N an $\sigma_{ges,unten}$	N_a/N_{pl}
Fall1	0,97	0,00	77,4	-344,4	-0,2248	45,49%	0,44
Fall2	0,23	0,95	82,0	-65,8	-1,2462	0,00%	0,00
Fall3	0,41	0,93	99,1	-146,4	-0,6767	25,38%	0,11
Fall4	0,64	0,92	116,2	-227,4	-0,5111	32,75%	0,21
Fall5	0,78	0,83	120,5	-277,1	-0,4349	36,14%	0,28
Fall6	0,83	0,70	115,8	-296,0	-0,3912	38,08%	0,32
Fall7	0,87	0,57	109,5	-308,4	-0,3549	39,70%	0,34
Fall8	0,89	0,41	100,0	-317,1	-0,3154	41,46%	0,37
Fall9	0,94	0,22	90,4	-332,1	-0,2722	43,38%	0,41

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der folgenden Tabelle (Tab. 8.1) sind die Ergebnisse der numerischen FE-Traglastanalyse sowie Berechnungen nach EN 1993-1-5 [1] mit ihren jeweiligen Versagensformen zusammengefasst.

Tab. 8.1: Übersicht der Ergebnisse der numerischen FE-Traglastanalyse sowie Berechnungen nach EN 1993-1-5 [1]

System	GMNIA (LSF)	MEQ-Verfahren (η)	MRS-Verfahren (ρ_c)	Versagensform	Verminderte Spannungsumlagerung
S1	0,67	0,61	0,62	Knickstabähnliches Verhalten	ja
S2	0,86	0,78	0,72	Lokales Beulen	nein
S6, Var-B	1,00 ¹⁾	0,98	0,91	Mischung aus knickstabähnlichen und plattenartigen Verhalten	nein
Praxisbsp. (Fall 1)	0,97	0,98	0,78	Mischung aus knickstabähnlichen und plattenartigen Verhalten	nein

¹⁾ Bei System S6, Var-B, wird nicht der LSF sondern das Verhältnis $RM2/M_{eI,R}$ abgelesen, siehe Anhang C, Kap. C.4.

Versagt der Querschnitt aufgrund reinen knickstabähnlichen Verhaltens, wie bei System S1, kommt es zu einer verminderten Spannungsumlagerung. Im Traglastzustand wird an den Rändern die Fließdehnung nicht erreicht. Angrenzende Stahlbleche können nicht vollständig aktiviert werden (Erreichen der Fließgrenze). Es besteht die Gefahr, dass die Tragfähigkeit des gesamten Querschnitts überschätzt wird, so die Fließgrenze in den anschließenden Blechen vorausgesetzt wird (MEQ-Verfahren). Kommt es zu einem Beulversagen aufgrund lokalen Beulens, oder einer Mischung aus knickstabähnlichen und plattenartigen Verhalten, wird die Fließdehnung am Rand des Beulfeldes erreicht.

Die Ergebnisse nach dem MEQ-Verfahren stimmen dann gut mit jenen nach der numerischen Berechnung überein. Die Problematik der verminderten Spannungsumlagerung bei knickstabähnlichen Verhalten sollte noch bei weiteren Systemen untersucht werden.

Bei gleichzeitigem Auftreten von Schub und Biegemoment ergeben sich die folgenden Erkenntnisse. Die Schubtragfähigkeit wird beim System S6 nach Eurocode [1] bei weitem unterschätzt, wenn die Gurte nicht mitberücksichtigt werden, da diese eine ungewöhnlich große Fläche aufweisen. Beim Beispiel aus der Praxis haben die Gurte einen weitaus geringeren Anteil an der Schubtragfähigkeit. Im Bereich hoher Schubspannungen nähert sich die numerische Berechnung bei beiden Systemen der Normkurve an. Ist die Beanspruchung durch ein Biegemoment nahe an der Tragfähigkeitsgrenze und treten dazu Schubspannungen auf, nimmt die Beultragfähigkeit beim Beispiel aus der Praxis schnell ab. Schon bei $V_a < 0,5 V_{a,bw,R}$ hat die Querkraft einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss. Beim System S6 ist der Effekt nicht in diesem Ausmaß, aber auch erkennbar.

Beim Praxisbeispiel wurde im Zuge der FE-Berechnungen die Normalkraft gleichzeitig mit dem Biegemoment gesteigert. Weiterführend könnte die Normalkraft konstant gehalten werden, während sich nur das Biegemoment erhöht. Dadurch könnten verschiedene Interaktionsdiagramme mit unterschiedlich hohem Anteil an Normalkraft erstellt und verglichen werden.

Zudem könnte beim Praxisbeispiel die Geometrie der Gurte so gewählt werden, dass sich aus einer reinen Biegemomentenbeanspruchung das gewünschte Spannungsverhältnis einstellt. Dadurch würde in der numerischen Berechnung die Belastung durch eine Normalkraft wegfallen und die Problematik der unterschiedlichen Spannungsgradienten wäre nicht gegeben. Das resultierende Interaktionsdiagramm könnte analog zu jenem bei System S6, Var-C, erstellt werden.

9 Literaturverzeichnis

- [1] ÖNORM EN 1993-1-5: Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile, 15.06.2016
- [2] ÖNORM B 1993-1-5: Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile, Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1993-1-5, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen, 01.05.2008
- [3] ÖNORM B 4300-3: Stahlbau – Plattenbeulen – Bedingungen für die gemeinsame Anwendung von DIN 18800 Teil 3 und ÖNORM B 4300-1, 01.04.1994
- [4] DIN 18800-3: Stahlbauten – Teil 3: Stabilitätsfälle – Plattenbeulen (Gilt in Verbindung mit DIN 18800-1 (2008-11)), November 2008
- [5] ÖNORM B 1993-2: Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken - Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1993-2, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen, 01.03.2008
- [6] ÖNORM B 1994-2: Eurocode 4 – Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Teil 2: Allgemeine Bemessungsregeln und Anwendungsregeln für Brücken – Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1994-2, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen, 01.05.2008
- [7] ÖNORM EN 1993-1-1: Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil-1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, 15.10.2014
- [8] *Dassault Systèmes Simulia Corp.*, Softwarepaket Abaqus Version 6.14-5, 2015
- [9] *Braun B., Kuhlmann U.*: „Bemessung und Konstruktion von aus Blechen zusammengesetzten Bauteilen nach DIN EN 1993-1-5“, in: Stahlbau Kalender 2009, Ernst & Sohn, Januar 2009
- [10] *Timmers R., Lener G., Sinur F., Kövesdi B., Chacón R.*: „Stabilitätsnachweise nach EN 1993-1-5 – Theorie und Beispiele“, in: Stahlbau Kalender 2015, Ernst & Sohn, Februar 2015
- [11] *Unterweger H., Kettler M.*: „Plattenbeulen nach Eurocode 1993-1-5 und Vergleich mit den (alten) nationalen Normen DIN bzw. ÖNORM“, Beitrag zum 35. Stahlbauseminar, Hochschule Biberach, Februar 2013
- [12] *Gänsluckner G.*: „Beultragfähigkeit längsausgesteifter Biegeträger“ Diplomarbeit, Institut für Stahlbau, TU Graz, November 2009
- [13] *Klöppel K., Scheer J.*: „Beulwerte ausgesteifter Rechteckplatten“, Band 1, Ernst & Sohn, 1960
- [14] *Unterweger H.*: Stahlbau Skriptum zur Lehrveranstaltung „Stahlbau“, Institut für Stahlbau, TU Graz, 2014

Anhang A

A Abmessungen der untersuchten Systeme

A.1 System S1 & S2

In der folgenden Abbildung sind die Abmessungen des System S1 bzw. S2 dargestellt. Das System S1 bzw. S2 hat eine Teilfeldlänge a von 3000 mm und eine Breite b von 2000 mm und weist somit ein Seitenverhältnis von $\alpha = a/b = 1,5$ auf. Die Dicke des Plattenelements beträgt 10 mm.

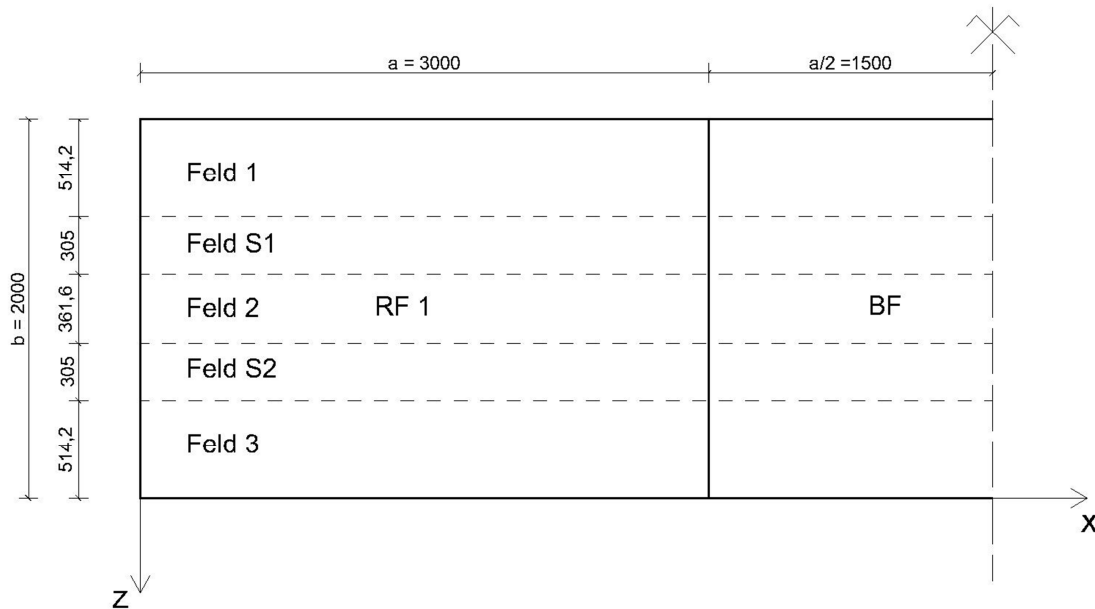


Abb. A-1: S1 & S2 Abmessungen (halbes System)

A.2 System S6

In der folgenden Abbildung sind die Abmessungen des System S6 dargestellt. Das System S6 weist eine Teilfeldlänge a von 3000 mm und eine Breite b von 3500 mm auf. Das Seitenverhältnis α beträgt 0,86. Die Dicke des Steges beträgt 12 mm.

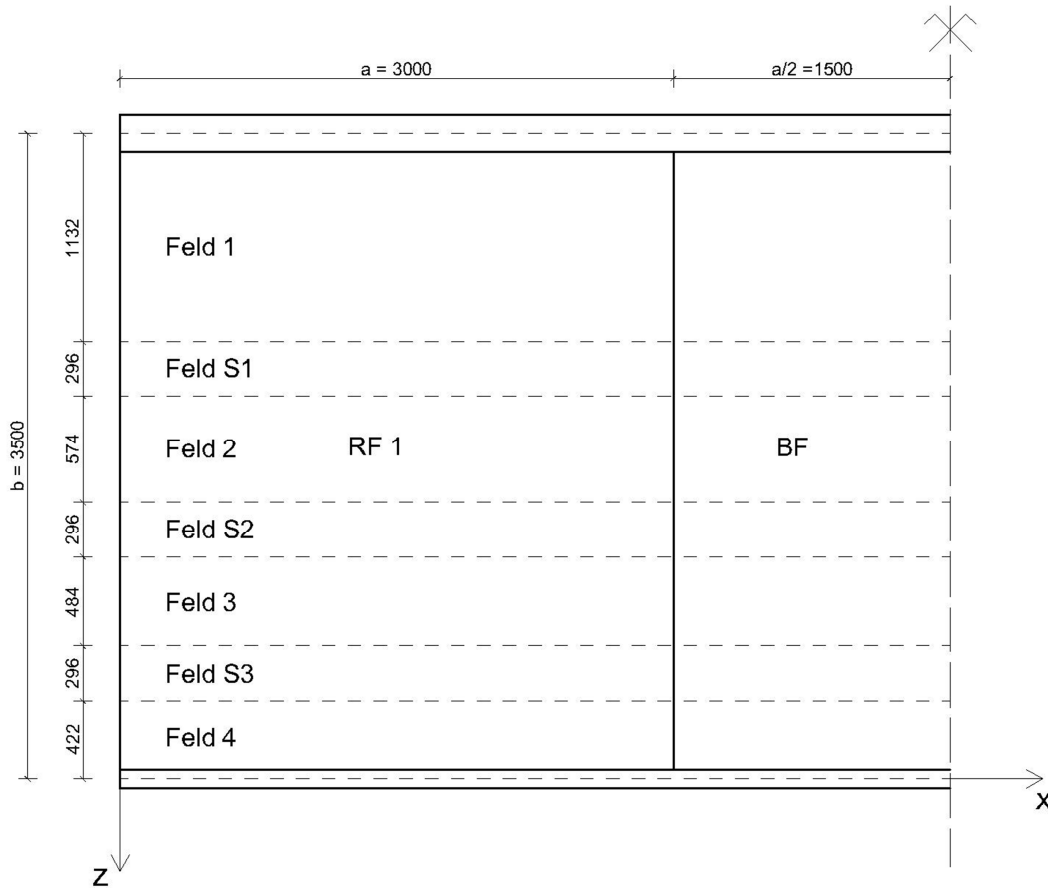


Abb. A - A-2: S6 Abmessungen (halbes System)

Anm.: Die betrachteten Systeme S1, S2 und S6 entsprechen direkt den in der Diplomarbeit von Herrn Gänsluckner [12] in anderem Zusammenhang untersuchten Systemen. Daher wurde auch dieselbe Bezeichnung übernommen, wobei die Systeme S3 bis S5 in dieser Arbeit nicht weiter untersucht wurden.

A.3 Längssteifen

In der folgenden Abbildung sind die Abmessungen der Längssteifen der Systeme S1, S2 und S6 zu erkennen. Die Systeme S1 und S2 weisen trapezförmige Längssteifen mit einer Höhe von 100 bzw. 200 mm auf. Die Dicke beträgt 8 mm. Die Längssteifen beim System S6 sind dreiecksförmig, haben eine Höhe von 148 mm und eine Dicke von 6 mm.

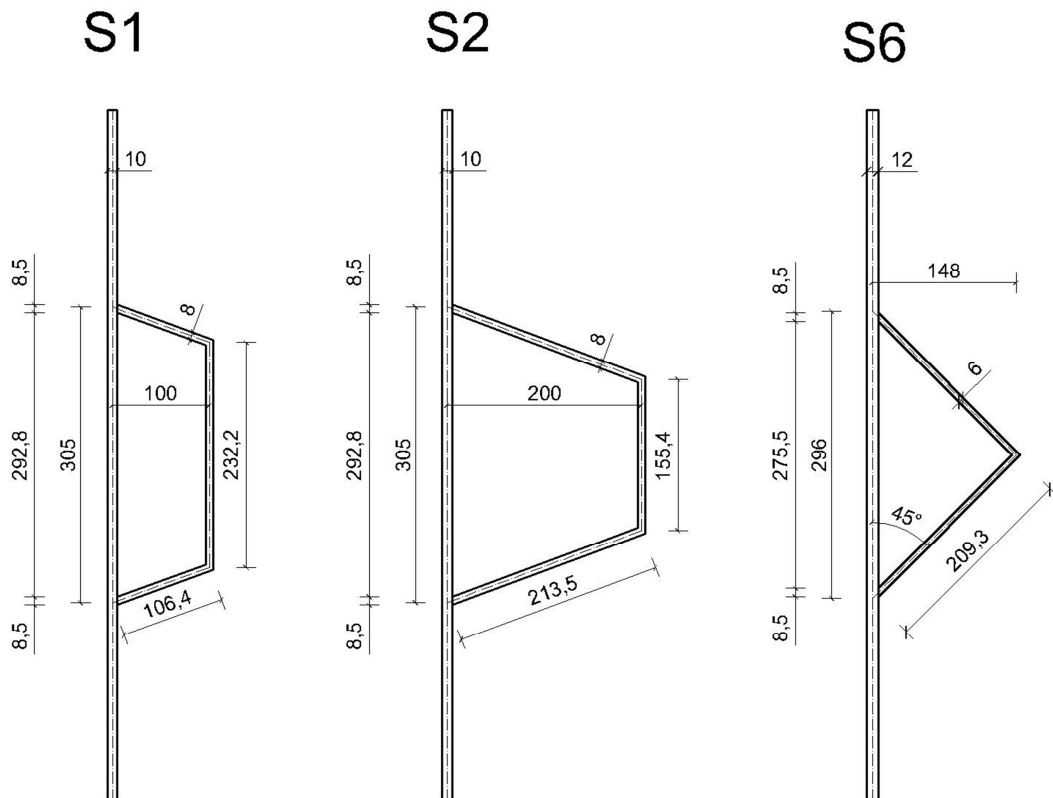


Abb. A-3: S1, S2 und S6 Abmessungen der Längssteifen

A.4 Quersteifen

In der folgenden Abbildung sind die Abmessungen der Quersteifen für die Systeme S1, S2 und S6 dargestellt.

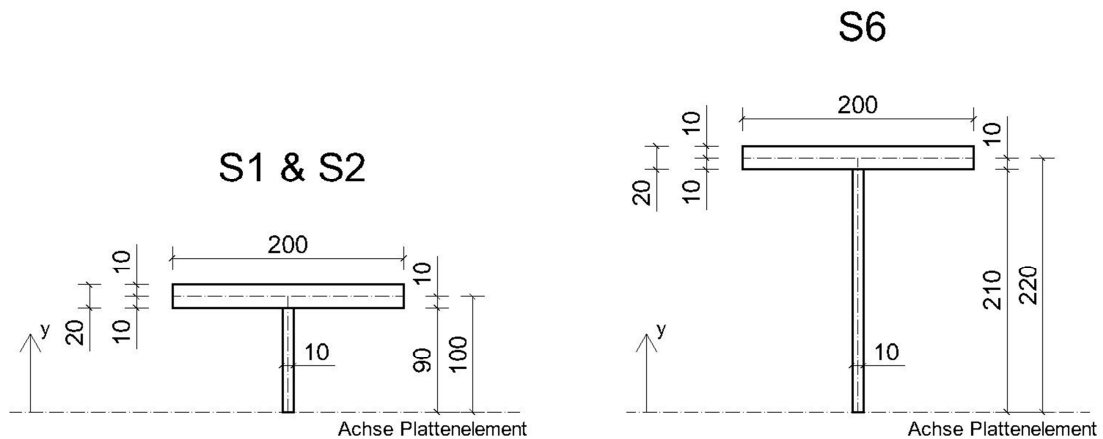


Abb. A-4: S1,S2 und S6 Abmessungen der Quersteifen

A.5 Gurte

In der folgenden Abbildung sind die Abmessungen des Ober- bzw. Untergurtes des Systems S6 zu finden. Die Geometrie der Gurte ist so gewählt, dass die angestrebte Spannungsverteilung ($\psi = -0,25$) durch eine alleinige Momentenbeanspruchung entsteht.

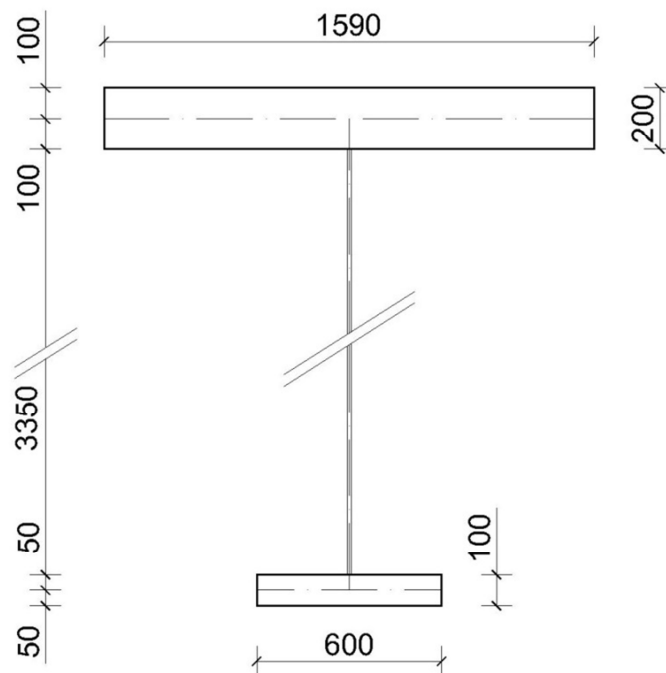


Abb. A-5: S6 Abmessungen des Ober- und Untergurtes

Anhang B

B Berechnungen nach EN 1993-1-5 [1]

Anhand des Systems S6 werden die Gleichungen der Nachweisverfahren beschrieben. Bei den anderen Systemen sind die Ergebnisse in Tabellen zusammengefasst.

B.1 System S1

B.1.1 Berechnungen nach dem MEQ-Verfahren

Ermittlung der Normalkrafttragfähigkeit:

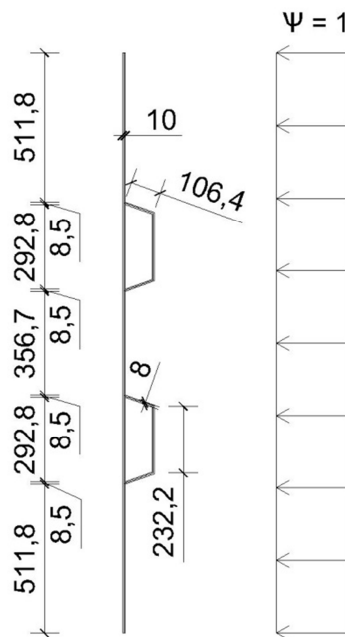


Abb. B-1: S1 – Abmessungen

In der folgenden Tabelle sind die QS-Werte des Systems S1 zu finden.

Tab. B-1: S1 QS-Werte

QS	b	h	A
	[mm]	[mm]	[mm ²]
Plattenelement	10,0	2000,0	20000,0
LS 1-1	8,0	106,4	851,2
LS 1-2	8,0	232,2	1857,6
LS 1-3	8,0	106,4	851,2
LS 2-1	8,0	106,4	851,2
LS 2-2	8,0	232,2	1857,6
LS 2-3	8,0	106,4	851,2
Summe			27120,0

$$N_R = A \cdot f_y = 27120 \cdot 355 = 9627600 \text{ N} \cong 9627,6 \text{ kN}$$

Einzelteilbeulen:

In Abb. A-1 sind die entsprechenden Felder dargestellt.

Tab. B-2: S1 Übersicht der Ergebnisse für Einzelteilbeulen

	ψ	\bar{b} [mm]	t [mm]	$k_{\sigma, \rho}^*$	$\bar{\lambda}_p$	ρ
Feld 1	1,0	511,8	10	4,0	1,107	0,724
Feld S1	1,0	292,8	10	4,0	0,634	1,0
Feld 2	1,0	356,7	10	4,0	0,772	0,926
Feld S2	1,0	292,8	10	4,0	0,634	1,0
Feld 3	1,0	511,8	10	4,0	1,107	0,724

Die Längssteifen sind nicht beulgefährdet:

$$c/t = 232,2/8 = 29,03 \leq 38\varepsilon = 30,93 \rightarrow \text{Klasse 2}$$

Ermittlung der wirksamen Breiten der Einzelfelder:

Tab. B-3: S1 wirksame Breiten Feld 1 und S1

Feld 1			Feld S1		
b_1	511,8	[mm]	b_{S1}	292,8	[mm]
ρ_1	0,724	[-]	ρ_{S1}	1,0	[-]
$b_{1,eff}$	370,3	[mm]	$b_{S1,eff}$	292,8	[mm]
ψ_1	1,0	[-]	ψ_{S1}	1,0	[-]
$b_{1,edge,eff}$	185,2	[mm]	$b_{S1,sup,eff}$	146,4	[mm]
$b_{1,inf,eff}$	185,2	[mm]	$b_{S1,inf,eff}$	146,4	[mm]

Tab. B-4: S1 wirksame Breiten Feld 2

Feld 2		
b_2	356,7	[mm]
ρ_2	0,926	[-]
$b_{2,eff}$	330,4	[mm]
ψ_2	1,0	[-]
$b_{2,sup,eff}$	165,2	[mm]
$b_{2,inf,eff}$	165,2	[mm]

Die Felder S2 und 3 sind analog zu den Feldern S1 und 1.

Plattenartiges Verhalten:

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse für das plattenartige Verhalten zusammengefasst.

Tab. B-5: S1 Übersicht der Ergebnisse für plattenartiges Verhalten

A_c	23416,7	[mm ²]
$A_{c,eff,loc}$	20323,4	[mm ²]
$\beta_{A,c}$	0,868	[-]
α_{cr}	39,72	[-]
$\sigma_{cr,p}$	397,2	[N/mm ²]
$\bar{\lambda}_p$	0,881	[-]
ρ_p	0,852	[-]

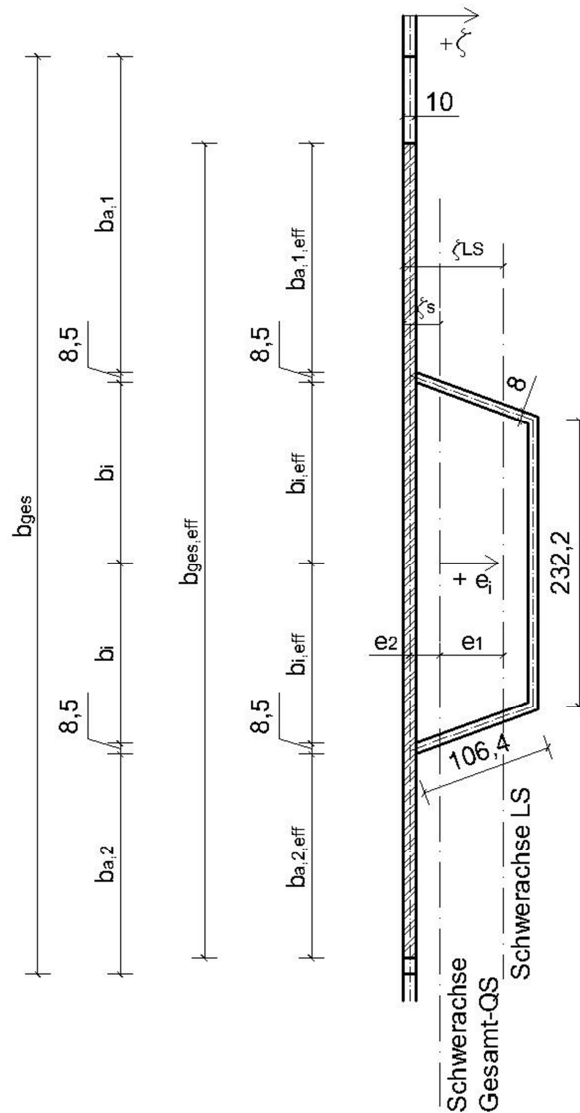
Knickstabähnliches Verhalten:


Abb. B-2: S1 Längssteife – wirksame Breiten

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse für das knickstabähnlich Verhalten zu finden.

Tab. A - B-6: S1 mitwirkende Stegbreite

b_1	511,8	[mm]
$b_{a,1}$	255,9	[mm]
b_2	356,7	[mm]
$b_{a,2}$	178,4	[mm]
b_i	146,4	[mm]
b_{ges}	744,1	[mm]

Tab. B-7: S1 QS-Werte Längssteife

QS	A	ζ	A x ζ	e_i	I	A x e_i^2	I_{ges}
	[mm ²]	[mm]	[mm ³]	[mm]	[mm ⁴]	[mm ⁴]	[mm ⁴]
LS 1-1	851,2	55,0	46816,0	25,4	709096,4	548108,4	1257204,8
LS 1-2	1857,6	105,0	195048,0	75,4	9907,2	10553937,4	10563844,6
LS 1-3	851,2	55,0	46816,0	25,4	709096,4	548108,4	1257204,8
mitw. Steg	7440,5	5,0	37202,5	-24,6	62004,2	4511605,9	4573610,0
Summe	11000,5		325882,5		1490104,1	16161760,1	17651864,2

Tab. B-8: S1 Übersicht der Ergebnisse für knickstabähnliches Verhalten

ζ_s	29,6	[mm]
$\sigma_{cr,S1}$	369,5	[N/mm ²]
$\sigma_{cr,c}$	369,5	[N/mm ²]
$\bar{\lambda}_c$	0,942	[-]
e_1	51,5	[mm]
e_2	24,6	[mm]
i	40,1	[mm ²]
α_e	0,456	[-]
ϕ	1,113	
χ_c	0,587	[-]

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

 Tab. B-9: S1 resultierender Abminderungsfaktor ρ_c

ξ	0,075	[-]
ρ_c	0,625	[-]

Ermittlung der effektiven Normalkrafttragfähigkeit:

Tab. B-10: S1 effektive Normalkrafttragfähigkeit

$A_{c,eff}$	16400	[mm ²]
N_{eff}	5822014	[N]
η	0,605	[-]

B.1.2 Berechnungen nach dem MRS-Verfahren

Einzelfeldbeulen:

Die Abminderungsfaktoren für das lokale Beulen sind gleich groß wie nach dem MEQ-Verfahren.

Plattenartiges Verhalten:

Tab. B-11: S1 Übersicht der Ergebnisse für plattenartiges Verhalten

$\alpha_{ult,k}$	35,5	[-]
α_{cr}	39,72	[-]
$\sigma_{cr,p}$	397,2	[N/mm ²]
$\bar{\lambda}_p$	0,945	[-]
ρ_p	0,812	[-]

Knickstabähnliches Verhalten:

Tab. B-12: S1 Übersicht der Ergebnisse für knickstabähnliches Verhalten

$\bar{\lambda}_p$	0,945	[-]
α_e	0,456	[-]
ϕ	1,117	[-]
χ_c	0,584	[-]

Anm.: Beim MRS-Verfahren wird, im Gegensatz zum MEQ-Verfahren, dieselbe Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ verwendet wie beim plattenartigen Verhalten.

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

Tab. B-13: S1 resultierender Abminderungsfaktor ρ_c

ξ	0,075	[-]
ρ_c	0,617	[-]
$\rho_{c,loc}$	0,724	[-]

B.2 System S2

B.2.1 Berechnungen nach dem MEQ-Verfahren

Ermittlung der Normalkrafttragfähigkeit:

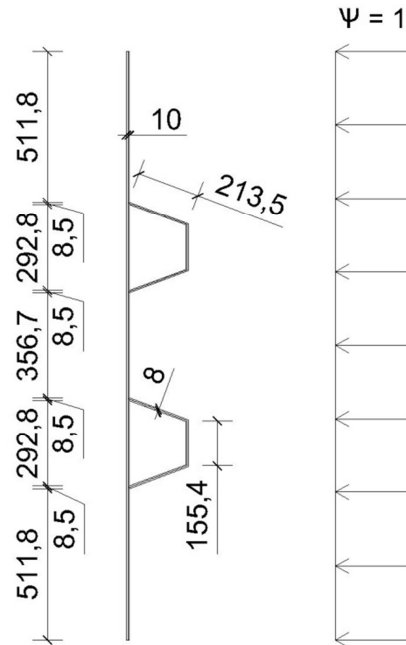


Abb. B-3: S2 Abmessungen

Tab. B-14: S2 QS-Werte

QS	b	h	A
	[mm]	[mm]	[mm ²]
Plattenelement	10,0	2000,0	20000,0
LS 1-1	8,0	213,5	1708,0
LS 1-2	8,0	155,4	1243,2
LS 1-3	8,0	213,5	1708,0
LS 2-1	8,0	213,5	1708,0
LS 2-2	8,0	155,4	1243,2
LS 2-3	8,0	213,5	1708,0
Summe			29318,4

$$N_R = A \cdot f_y = 29318,4 \cdot 355 = 10408032 \text{ N} \cong 10408,0 \text{ kN}$$

Einzelfeldbeulen & wirksame Breiten der Einzelfelder:

Die Berechnungsergebnisse des lokalen Beulens und der wirksamen Breiten der Einzelfelder sind identisch mit jenen aus System S1 (siehe B.1.1).

Plattenartiges Verhalten:

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse für das plattenartige Verhalten zusammengefasst.

Tab. B-15: S2 Übersicht der Ergebnisse für plattenartiges Verhalten

A_c	29318,4	[mm ²]
$A_{c,eff,loc}$	22521,8	[mm ²]
$\beta_{A,c}$	0,879	[-]
α_{cr}	121,49	[-]
$\sigma_{cr,p}$	1214,9	[N/mm ²]
$\bar{\lambda}_p$	0,507	[-]
ρ_p	1,0	[-]

Knickstabähnliches Verhalten:

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse für das knickstabähnlich Verhalten zu finden.

Tab. B-16: S2 mitwirkende Stegbreite

b_1	511,8	[mm]
$b_{a,1}$	255,9	[mm]
b_2	356,7	[mm]
$b_{a,2}$	178,4	[mm]
b_i	146,4	[mm]
b_{ges}	744,1	[mm]

Tab. B-17: S2 QS-Werte Längssteife

QS	A	ζ	$A \times \zeta$	e_i	I	$A \times e_i^2$	I_{ges}
	[mm ²]	[mm]	[mm ³]	[mm]	[mm ⁴]	[mm ⁴]	[mm ⁴]
LS 1-1	1708,0	105,0	179340,0	51,2	5728936,5	4480677,7	10209614,2
LS 1-2	1243,2	205,0	254856,0	151,2	6630,4	28428344,7	28434975,1
LS 1-3	1708,0	105,0	179340,0	51,2	5728936,5	4480677,7	10209614,2
mitw. Steg	7440,5	5,0	37202,5	-48,8	62004,2	17705581,4	17767585,5
Summe	12099,7		650738,5				66621789,0

Tab. B-18: S2 Übersicht der Ergebnisse für knickstabähnliches Verhalten

ζ_s	53,8	[mm]
$\sigma_{cr,SI}$	1268,0	[N/mm ²]
$\sigma_{cr,c}$	1268,0	[N/mm ²]
$\bar{\lambda}_c$	0,511	[-]
e_1	77,9	[mm]
e_2	48,8	[mm]
i	74,2	[mm ²]
α_e	0,435	[-]
ϕ	0,698	
χ_c	0,852	[-]

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten:

 Tab. B-19: S2 resultierender Abminderungsfaktor ρ_c

ξ	0,0	[-]
ρ_c	0,852	[-]

Ermittlung der effektiven Normalkrafttragfähigkeit:

Tab. B-20: S2 effektive Normalkrafttragfähigkeit

$A_{c,eff}$	22897,1	[mm ²]
N_{eff}	8128484	[N]
η	0,781	[-]

B.2.2 Berechnungen nach dem MRS-Verfahren

Einzelfeldbeulen:

Die Abminderungsfaktoren für das lokale Beulen sind gleich groß wie nach dem MEQ-Verfahren.

Plattenartiges Verhalten:

Tab. B-21: S2 Übersicht der Ergebnisse für plattenartiges Verhalten

$\alpha_{ult,k}$	35,5	[-]
α_{cr}	121,49	[-]
$\sigma_{cr,p}$	1214,9	[N/mm ²]
$\bar{\lambda}_p$	0,541	[-]
ρ_p	1,0	[-]

Knickstabähnliches Verhalten:

Tab. B-22: S2 Übersicht der Ergebnisse für knickstabähnliches Verhalten

$\bar{\lambda}_p$	0,541	[-]
α_e	0,4534	[-]
ϕ	0,720	[-]
χ_c	0,836	[-]

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

Tab. B-23: S2 resultierender Abminderungsfaktor ρ_c

ξ	0,0	[-]
ρ_c	0,836	[-]
$\rho_{c,loc}$	0,724	[-]

Bei diesem System ist nach dem MRS-Verfahren der Abminderungsfaktor für das lokale Beulen maßgebend.

B.3 System S6

B.3.1 Berechnungen nach dem MEQ-Verfahren

Ermittlung der elastischen Momententragfähigkeit:

In der folgenden Abbildung ist der Querschnitt zur Ermittlung der QS-Werte dargestellt.

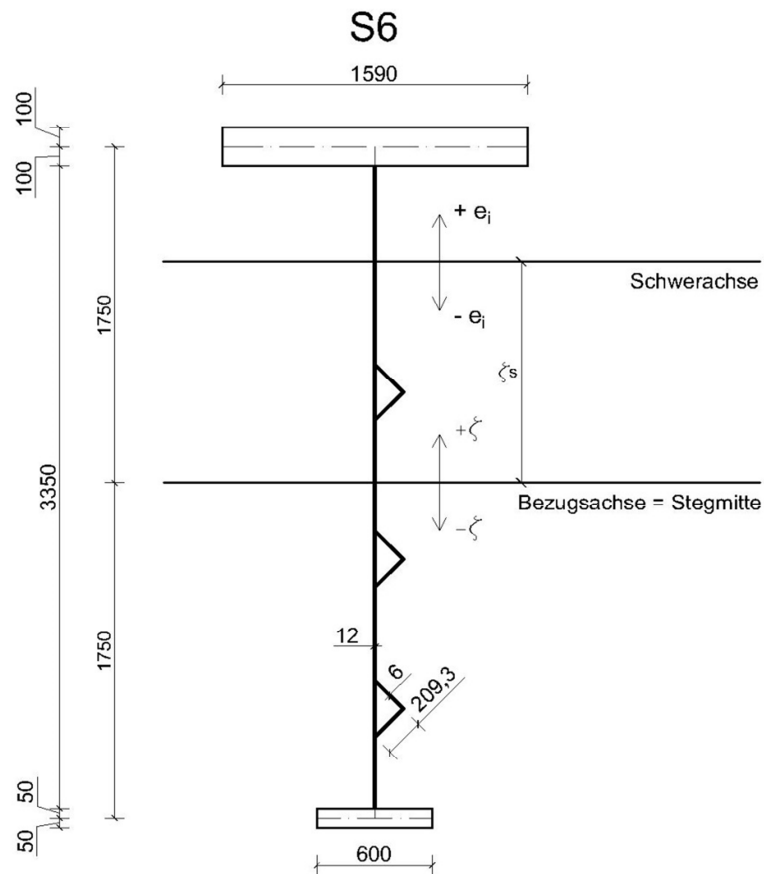


Abb. B-4: System S6 Skizze zur Ermittlung der QS-Werte

In der folgenden Tabelle sind die dazugehörigen Querschnittswerte zu finden.

$$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$\zeta_s = \frac{\sum (A_i \cdot \zeta_i)}{\sum A_i} = 1049,5 \text{ mm}$$

$$z_{\max} = 1750 + 1049,5 = 2799,5 \text{ mm (Gurtmitte)}$$

$$W_{el} = \frac{I_{ges}}{z_{\max}} = 262608173,7 \text{ mm}^3$$

$$M_{el,R} = f_y \cdot W_{el} = 93225901667 \text{ Nmm} \cong 93225,9 \text{ kNm}$$

Tab. B-24: System S6 QS-Werte

QS	b [mm]	h [mm]	A [mm ²]	ζ [mm]	A x ζ [mm ³]	e _i [mm]	I [mm ⁴]	A x e _i ² [mm ⁴]	I _{ges} [mm ⁴]
Obergurt	1590,0	200,0	318000,0	1750,0	556500000	700,5	1060000000,0	156027724802,0	157087724802,0
Steg	12,0	3500,0	42000,0	0,0	0	-1049,5	42875000000,0	46263869816,9	89138869816,9
LS 1-1	6,0	209,3	1255,8	544,0	683155,2	-505,5	2292174,6	320937507,5	323229682,1
LS 1-2	6,0	209,3	1255,8	396,0	497296,8	-653,5	2292174,6	536359870,8	538652045,4
LS 2-1	6,0	209,3	1255,8	-326,0	-409390,8	-1375,5	2292174,6	2376089882,2	2378382056,8
LS 2-2	6,0	209,3	1255,8	-474,0	-595249,2	-1523,5	2292174,6	2914905861,5	2917198036,1
LS 3-1	6,0	209,3	1255,8	-1106,0	-1388914,8	-2155,5	2292174,6	5834854887,1	5837147061,7
LS 3-2	6,0	209,3	1255,8	-1254,0	-1574773,2	-2303,5	2292174,6	6663609970,4	6665902145,0
Untergurt	600,0	100,0	60000,0	-1750,0	-105000000	-2799,5	50000000,0	470243291832,3	470293291832,3
Summe			427534,8		448712124		43998753047,5		735180397478,3

Einzelfeldbeulen:

Für jedes Einzelfeld wird ein Abminderungsfaktor ρ berechnet.

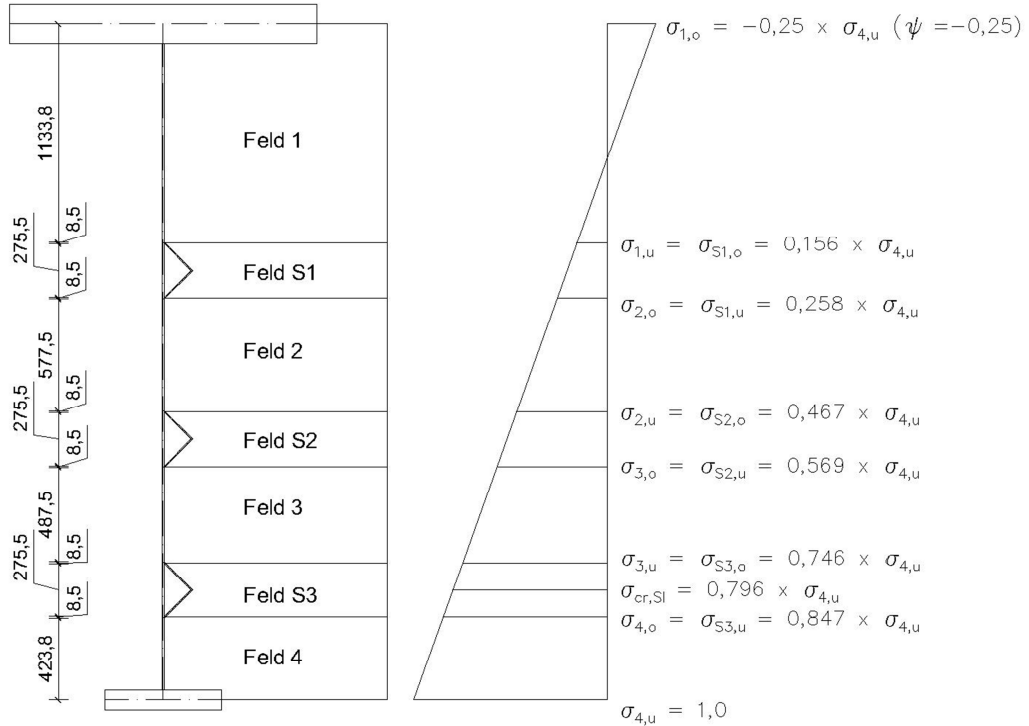


Abb. B-5: System S6 Spannungsverteilung

Der Beulwert $k_{\sigma, \rho}^*$ wird für zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile abhängig von der Spannungsverteilung nach EN 1993-1-5 [1] Tab 4.1 bestimmt.

Tabelle 4.1 — Zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

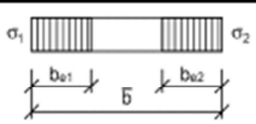
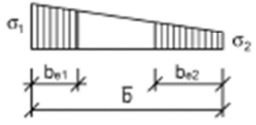
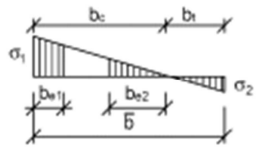
Spannungsverteilung (Druck positiv)		Wirksame Breite b_{eff}				
		$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$				
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$				
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$				
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi \geq -3$ (AE)
Beulwert k_{σ}	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29 \psi + 9,78 \psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Abb. B-6: Zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile nach EN 1993-1-5 [1]

Nach EN 1993-1-5 [1] darf für die Berechnung von $\bar{\lambda}_p$ anstatt der Fließgrenze die größte Randspannung der einzelnen Felder angesetzt werden. Dies erfolgt indirekt durch den modifizierten ε -Wert.

$$\varepsilon_{Feld,i} = \sqrt{\frac{235}{f_y} \cdot \frac{\sigma_{4,u}}{\max \sigma_{Feld,i}}} \quad \text{Gl. (B-1)}$$

Feld 1:

$$\varepsilon_1 = \sqrt{\frac{235}{355} \cdot \frac{1}{0,156}} = 2,060$$

Tab. B-25: System S6 ε -Werte

	ε
Feld 1	2,060
Feld S1	1,602
Feld 2	1,191
Feld S2	1,079
Feld 3	0,942
Feld S3	0,884
Feld 4	0,814

Feld 1:

$$\psi_1 = -1,603 \quad [-]$$

$$b_1 = 1134 \text{ mm}$$

$$t = 12 \text{ mm}$$

$$k_{\sigma, \rho}^* = 5,98 \cdot (1 - \psi)^2 = 40,51 \quad [-]$$

Der Abminderungsfaktor ρ für beidseitig gestützte Querschnittsteile wird nach den folgenden Gleichungen nach EN 1993-1-5 [1] ermittelt:

$$\rho = 1,0 \quad \text{für} \quad \bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \quad \text{Gl. (B-2)}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{für} \quad \bar{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \quad \text{Gl. (B-3)}$$

$$\text{mit } \bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sqrt{k_{\sigma, \rho}^*}} \quad \text{Gl. (B-4)}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{1134/12}{28,4 \cdot 2,060 \cdot \sqrt{40,51}} = 0,254 \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot (-1,603)} = 0,916$$

$$\rho = 1,0$$

Tab. B-26: System S6 Abminderungsfaktoren Einzelfeldbeulen

	ψ	\bar{b} [mm]	t [mm]	$k_{\sigma, p}^*$	$\bar{\lambda}_p$	ρ
Feld 1	-1,603	1133,8	12	40,510	0,227	1,0
Feld S1	0,605	275,5	12	4,956	0,227	1,0
Feld 2	0,552	577,5	12	5,117	0,629	1,0
Feld S2	0,821	275,5	12	4,383	0,358	1,0
Feld 3	0,763	487,5	12	4,524	0,714	0,995
Feld S3	0,881	275,5	12	4,247	0,444	1,0
Feld 4	0,847	423,8	12	4,323	0,735	0,969

Die Längssteifen sind nicht beulgefährdet:

$$c/t = 209,3/6 = 34,9 \leq \frac{42 \varepsilon}{0,67 + 0,33\psi} = 34,9 \rightarrow \text{Klasse 3}$$

Der Untergurt ist ebenso nicht beulgefährdet:

$$c/t = 300/100 = 3 \leq 9 \varepsilon = 7,3 \rightarrow \text{Klasse 1}$$

Ermittlung der wirksamen Breiten der Einzelfelder:

Die wirksamen Breiten werden, wie in Abb. B-7 dargestellt, ermittelt. In der folgenden Abbildung sind die Bezeichnungen der wirksamen Breiten der einzelnen Felder ersichtlich.

Nachfolgend werden die Berechnungsformeln für alle Felder aufgeführt, obwohl nur bei Feld 3 und 4 eine sehr geringfügige Reduktion vorliegt.

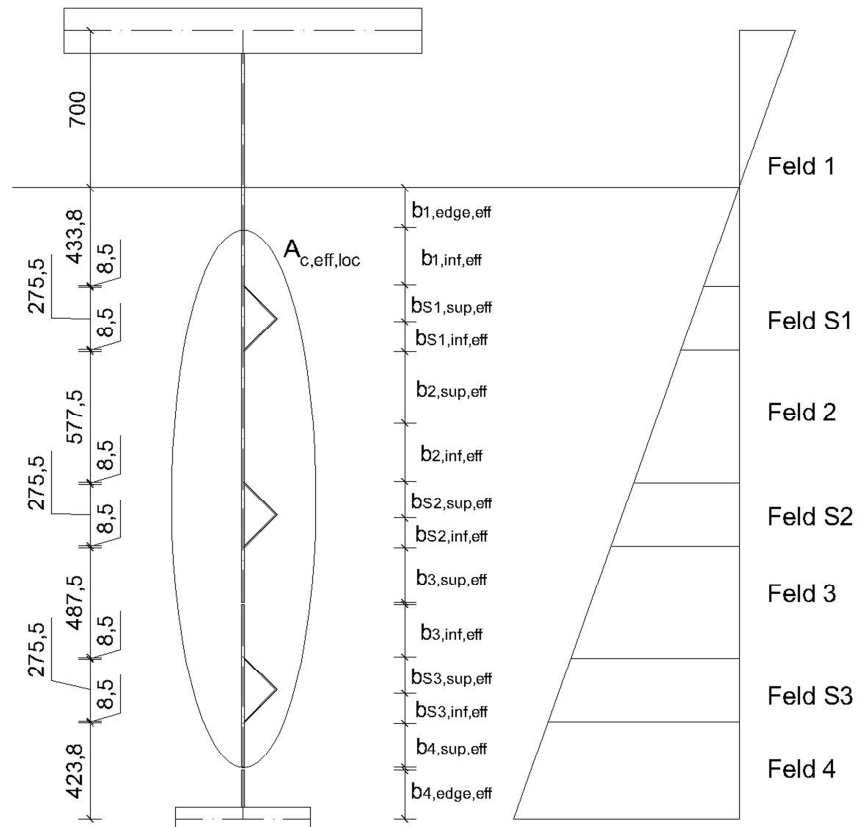


Abb. B-7: System S6 wirksame Breiten

Feld 1:

$$b_1 = 1133,8 \text{ mm}$$

$$b_c = 433,8 \text{ mm} \quad b_t = 700 \text{ mm}$$

$$\rho = 1,0$$

$$b_{\text{eff}} = b_c \cdot \rho = 433,8 \text{ mm}$$

$$\psi_1 = -1,603$$

$$b_{1,\text{edge,eff}} = b_c \cdot 0,4 = 173,5 \text{ mm}$$

$$b_{1,\text{inf,eff}} = b_c \cdot 0,6 = 260,3 \text{ mm}$$

Tab. B-27: System S6 wirksame Breiten Feld S1 & 2

Feld S1			Feld 2		
b_{S1}	275,5	[mm]	b_2	577,5	[mm]
ρ_{S1}	1,0	[-]	ρ_2	1,0	[-]
$b_{S1,eff}$	275,5	[mm]	$b_{2,eff}$	577,5	[mm]
ψ_{S1}	0,605	[-]	ψ_2	0,552	[-]
$b_{S1,sup,eff}$	125,4	[mm]	$b_{2,sup,eff}$	259,7	[mm]
$b_{S1,inf,eff}$	150,1	[mm]	$b_{2,inf,eff}$	317,8	[mm]

Tab. B-28: System S6 wirksame Breiten Feld S2 & 3

Feld S2			Feld 3		
b_{S2}	275,5	[mm]	b_3	487,5	[mm]
ρ_{S2}	1,0	[-]	ρ_3	0,995	[-]
$b_{S2,eff}$	275,5	[mm]	$b_{3,eff}$	484,9	[mm]
ψ_{S2}	0,821	[-]	ψ_3	0,763	[-]
$b_{S2,sup,eff}$	131,8	[mm]	$b_{3,sup,eff}$	228,9	[mm]
$b_{S2,inf,eff}$	143,7	[mm]	$b_{3,inf,eff}$	256,0	[mm]

Tab. B-29: System S6 wirksame Breiten Feld S3 & 4

Feld S3			Feld 4		
b_{S3}	275,5	[mm]	b_4	423,8	[mm]
ρ_{S3}	1,0	[-]	ρ_4	0,969	[-]
$b_{S3,eff}$	275,5	[mm]	$b_{4,eff}$	410,57	[mm]
ψ_{S3}	0,881	[-]	ψ_4	0,847	[-]
$b_{S3,sup,eff}$	133,8	[mm]	$b_{4,sup,eff}$	197,7	[mm]
$b_{S3,inf,eff}$	141,7	[mm]	$b_{4,edge,eff}$	212,9	[mm]

Plattenartiges Verhalten:

Der Schlankheitsgrad für plattenartiges Verhalten $\bar{\lambda}_p$ wird nach EN 1993-1-5 [1] nach der folgenden Gleichung bestimmt:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} \cdot f_y}{\sigma_{cr,p}}} \quad \text{Gl. (B-5)}$$

$$\text{mit } \beta_{A,c} = \frac{A_{c,eff,loc}}{A_c} \quad \text{Gl. (B-6)}$$

$$\text{mit } A_{c,eff,loc} = A_{sl,eff} + \sum \rho_{loc} \cdot b_{c,loc} \cdot t \quad \text{Gl. (B-7)}$$

Bei der Bruttoquerschnittsfläche A_c werden die gestützten Randbleche b_{edge} nicht berücksichtigt.

$$A_c = A_{sl} + (b_c - b_{1,edge} - b_{4,edge}) \cdot t \quad \text{Gl. (B-8)}$$

Die kritische Plattenbeulspannung wird über den Laststeigerungsfaktor α_{cr} zum Erreichen der elastischen Verzweigungslast ermittelt:

$$\sigma_{cr,p} = \alpha_{cr} \cdot \sigma_{x,E} [N/mm^2] \quad \text{Gl. (B-9)}$$

Für dieses System ergibt das folgende Werte:

$$A_c = 7534,8 + (2800 - 173,5 - 212,9) \cdot 12 = 36498,4 \text{ mm}^2$$

$$A_{c,eff,loc} = 7534,8 + (260,28 + 125,36 + 150,14 + 259,69 + 317,81 + 131,84 + 143,66 + 228,87 + 256,02 + 133,76 + 141,74 + 197,72 + 6 \cdot 8,5) \cdot 12 = 36309,4 \text{ mm}^2$$

$$\beta_{A,c} = 36309,4/36498,4 = 0,995$$

$$\alpha_{cr} = 57,438 \text{ (siehe Tab. C-10)}$$

$$\sigma_{cr,p} = 57,438 \cdot 10 = 574,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{0,9948 \cdot 355}{574,38}} = 0,784 \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot (-0,25)} = 0,814$$

$$\rho_p = 1,0$$

Knickstabähnliches Verhalten:

Die am höchsten belastete Längssteife wird betrachtet. Für das System S6 ist die Längssteife zwischen Feld 3 und 4 maßgebend.

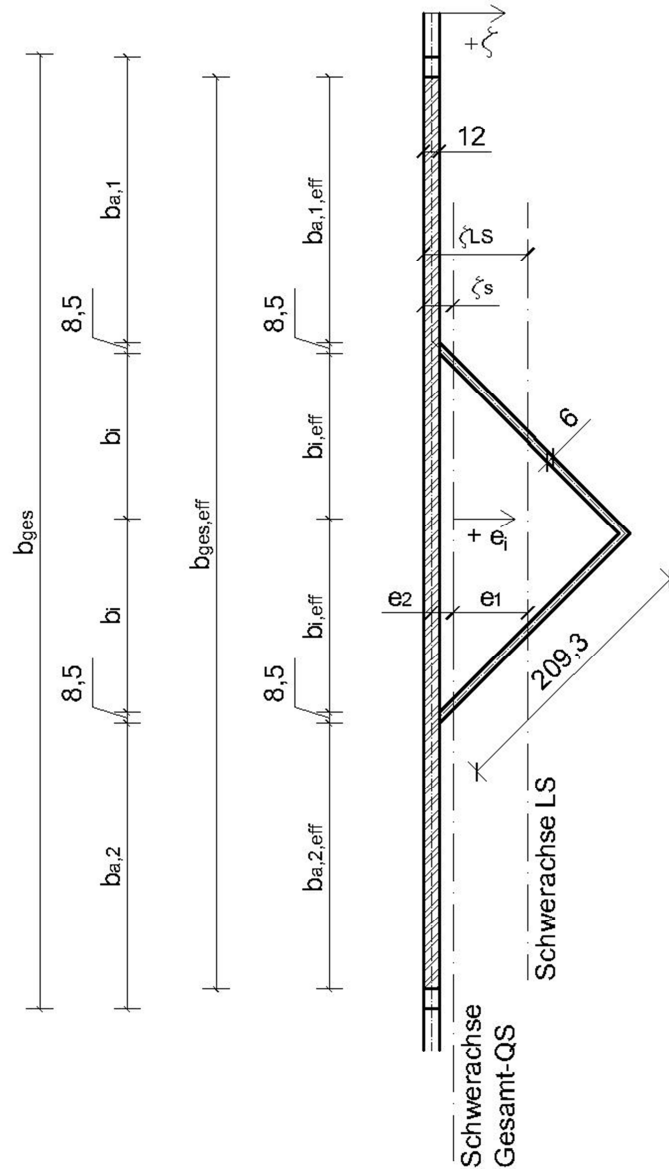


Abb. B-8: S6 Längssteife – wirksame Breiten

Die mitwirkende Breite für den Steg wird nach EN 1993-1-5, Anhang A Bild A.1 [1] berechnet und ergibt sich zu:

$$b_3 = 487,5 \text{ mm} \quad \psi = 0,763$$

$$b_{a,1} = \frac{(3-\psi_3)}{(5-\psi_3)} \cdot b_3 = \frac{(3-0,763)}{(5-0,763)} \cdot 487,5 = 257,4 \text{ mm}$$

$$b_4 = 423,8 \text{ mm} \quad \psi = 0,847$$

$$b_{a,2} = \frac{2}{(5-\psi_4)} \cdot b_4 = \frac{2}{(5-0,847)} \cdot 423,8 = 204,1 \text{ mm}$$

$$b_i = b_{s3} / 2 = 275,5 / 2 = 137,8 \text{ mm}$$

$$b_{ges} = b_{a,1} + b_{a,2} + 2 \cdot b_i + 2 \cdot 8,5 = 257,4 + 204,1 + 2 \cdot 137,8 + 2 \cdot 8,5 = 754,0 \text{ mm}$$

Tab. B-30: Längssteife – Querschnittswerte

QS	A	ζ	A x ζ	e_i	I	A x e_i^2	I_{ges}
	[mm ²]	[mm]	[mm ³]	[mm]	[mm ⁴]	[mm ⁴]	[mm ⁴]
LS 3-1	1255,8	80,0	100464,0	57,9	2292174,6	4213097,7	6505272,3
LS 3-2	1255,8	80,0	100464,0	57,9	2292174,6	4213097,7	6505272,3
mitw. Steg	9047,9	6,0	54287,4	-16,1	108574,9	2339019,9	2447594,7
Summe	11559,5		255215,4				15458139,4

$$\zeta_s = \frac{\sum (A_i \cdot \zeta_i)}{\sum A_i} = 22,1 \text{ mm}$$

Bei einem ausgesteiften Blechfeld wird $\sigma_{cr,c}$ mit Hilfe der Knickspannung $\sigma_{cr,sl}$ an der höchstbelasteten Längssteife nach folgender Gleichung nach EN 1993-1-5 [1] berechnet:

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 E I_{sl,1}}{A_{sl,1} a^2} \quad \text{Gl. (B-10)}$$

Dabei ist $I_{sl,1}$ das Flächenträgheitsmoment unter Ansatz der Bruttoquerschnittsfläche der als Ersatzdruckstab betrachteten Steife und der angrenzenden mittragenden Blechstreifen bezogen auf Knicken senkrecht zur Blechebene und $A_{sl,1}$ die Bruttoquerschnittsfläche des Ersatzdruckstabes, die sich aus der Steife und den angrenzenden mittragenden Blechstreifen zusammensetzt. Die kritische Knickspannung $\sigma_{cr,c}$ wird extrapoliert. [1]

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 210000 \cdot 15458139,4}{11559,5 \cdot 3000^2} = 308,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{cr,c} = \frac{308,0}{0,796} = 386,9 \text{ N/mm}^2$$

Der Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_c$ wird bei ausgesteiften Blechfeldern wie folgt bestimmt:

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad \text{Gl. (B-11)}$$

$$\text{mit } \beta_{A,c} = \frac{A_{sl,1,eff}}{A_{sl,1}} \quad \text{Gl. (B-12)}$$

$$\text{mit } A_{sl,1,eff} = A_{LS3-1} + A_{LS3-2} + b_{ges,eff} \cdot t_w \quad \text{Gl. (B-13)}$$

$$\text{mit } b_{ges,eff} = b_{a,1,eff} + b_{a,2,eff} + b_{i,eff} \cdot 2 + 8,5 \cdot 2 \quad \text{Gl. (B-14)}$$

$$b_{ges,eff} = 256,02 + 197,72 + 137,75 \cdot 2 + 8,5 \cdot 2 = 746,4 \text{ mm}$$

$$A_{sl,1,eff} = 1255,8 + 1255,8 + 746,42 \cdot 12 = 11466,5 \text{ mm}^2$$

$$\beta_{A,c} = \frac{11466,45}{1155,9} = 0,992$$

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{0,9919 \cdot 355}{386,88}} = 0,954$$

Der Abminderungsfaktor χ_c ist nach EN 1993-1-1, 6.3.1.2 [7] zu bestimmen, wobei der Imperfektionswert α bei ausgesteiften Blechfeldern durch α_e ersetzt wird.

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e} \quad \text{Gl. (B-15)}$$

$$\text{mit } i = \sqrt{\frac{I_{St,1}}{A_{St,1}}} \quad \text{Gl. (B-16)}$$

mit $e = \max(e_1; e_2)$ siehe Abb. B-8

mit $\alpha = 0,34$ (Kurve b für Hohlsteifenquerschnitte) bzw.

$\alpha = 0,49$ (Kurve c für offene Steifenquerschnitte)

$$i = \sqrt{\frac{15458139,4}{1155,9}} = 36,57 \text{ mm}^2$$

$$e = \max(57,92; 16,02) = 57,92 \text{ mm}$$

$$\alpha_e = 0,34 + \frac{0,09}{36,57/57,92} = 0,4826$$

$$\chi_c = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_c^2}} \quad \text{Gl. (B-17)}$$

$$\text{mit } \phi = 0,5 \cdot [1,0 + \alpha_e \cdot (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2] \quad \text{Gl. (B-18)}$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1,0 + 0,4826 \cdot (0,954 - 0,2) + 0,954^2] = 1,137$$

$$\chi_c = \frac{1}{1,137 + \sqrt{1,137^2 - 0,954^2}} = \mathbf{0,570}$$

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

Der endgültige Abminderungsfaktor ρ_c wird nach der folgenden Gleichung bestimmt [1]:

$$\rho_c = (\rho_p - \chi_c) \cdot \xi \cdot (2 - \xi) + \chi_c \quad \text{Gl. (B-19)}$$

$$\text{mit } \xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1; 0 \leq \xi \leq 1 \quad \text{Gl. (B-20)}$$

$$\xi = \frac{574,4}{386,9} - 1 = 0,485$$

$$\rho_c = (1,0 - 0,5696) \cdot 0,485 \cdot (2 - 0,485) + 0,5696 = \mathbf{0,886}$$

Berechnung des maximalen Trägheitsmomentes unter Berücksichtigung des Beulens

Im Bereich von $A_{c,eff,loc}$ darf die Dicke des Steges und der Längssteifen zur Vereinfachung gleichmäßig abgemindert werden.

$$t_{w,red} = 12 \cdot 0,886 = 10,6 \text{ mm}$$

$$t_{LS,red} = 6 \cdot 0,886 = 5,3 \text{ mm}$$

Tab. B-31: S6 effektive QS-Werte

QS	b	h	A_{eff}	ζ	$A_{eff} \times \zeta$	e_i	I	$A_{eff} \times e_i^2$	$I_{ges,eff}$
	[mm]	[mm]	[mm ²]	[mm]	[mm ³]	[mm]	[mm ⁴]	[mm ⁴]	[mm ⁴]
Obergurt	1590,0	200,0	318000,0	1750,0	556500000,0	685,9	10600000000,0	149589426441,7	150649426441,7
Steg ($A_{c,eff,loc}$)	10,6	2397,8	25484,1	-324,2	-8261948,9	-1388,3	12209790908,5	49120159838,5	61329950747,0
Steg oben (Zugzone+ $b_{1,edge,eff}$)	12,0	873,5	10482,2	1313,3	13765801,7	249,1	666528246,6	650495363,2	1317023609,7
Steg unten ($b_{1,edge,eff}$)	12,0	212,8	2554,2	-1643,6	-4198011,7	-2707,7	9642703,4	18726677039,5	18736319742,9
LS 1-1	5,3	209,3	1112,2	544,0	605058,9	-520,1	2030139,8	300909235,9	302939375,7
LS 1-2	5,3	209,3	1112,2	396,0	440447,3	-668,1	2030139,8	496513181,1	498543320,9
LS 2-1	5,3	209,3	1112,2	-326,0	-362590,4	-1390,1	2030139,8	2149386039,7	2151416179,6
LS 2-2	5,3	209,3	1112,2	-474,0	-527202,0	-1538,1	2030139,8	2631414180,7	2633444320,5
LS 3-1	5,3	209,3	1112,2	-1106,0	-1230138,1	-2170,1	2030139,8	5238094739,5	5240124879,3
LS 3-2	5,3	209,3	1112,2	-1254,0	-1394749,7	-2318,1	2030139,8	5976916986,9	5978947126,7
Untergurt	600,0	100,0	60000,0	-1750,0	-105000000,0	-2814,1	50000000,0	475162282611,2	475212282611,2
Summe			423194,0		450336666,9		14008142697,5	710042275657,8	724050418355,3

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_{c,eff,loc} + \Sigma b_{edge,eff} \cdot t = 36795,0 \text{ mm}^2$$

$$\zeta_s = \frac{\Sigma (A_{eff,i} \cdot \zeta_i)}{\Sigma A_{eff,i}} = 1064,1 \text{ mm}$$

$$z_{max} = 2814,1 \text{ mm}$$

$$W_{eff} = \frac{I_{ges,eff}}{z_{max}} = 257290324,1 \text{ mm}^3$$

$$M_{eff} = f_y \cdot W_{eff} = 91338065054 \text{ Nmm} \cong 91338,1 \text{ kNm}$$

$$\eta = \frac{M_{eff}}{M_{el,R}} = \mathbf{0,98}$$

Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit unter Berücksichtigung des Schubbeulens nach [1]:

$$V_{b,R} = V_{bw,R} + V_{bf,R} \leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \quad \text{Gl. (B-21)}$$

Beitrag des Steges:

$$V_{bw,R} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \quad \text{Gl. (B-22)}$$

Der Abminderungsfaktor χ_w wird nach EN 1993-1-5 [1], Abschnitt 5.3 Tabelle 1 berechnet:

Tabelle 1 – Beitrag des Steges χ_w zur Schubbeanspruchbarkeit

	Starre Auflagersteife	Verformbare Auflagersteife
$\bar{\lambda}_w < 0,83 / \eta$	η	η
$0,83 / \eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37 / (0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$

Abb. B-9: Beitrag des Steges χ_w zur Schubbeanspruchbarkeit nach EN 1993-1-5 [1]

Die Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_w$ wird nach der folgenden Gleichung bestimmt:

$$\bar{\lambda}_w = 0,76 \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr}}} \quad \text{Gl. (B-23)}$$

mit $\tau_{cr} = \alpha_{cr} \cdot \tau_{Ed}$ (aus der Abaqus-Berechnung)

$$\alpha_{cr} = 7,101$$

$$\tau_{Ed} = 20,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{cr} = 7,101 \cdot 20,5 = 145,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_w = 0,76 \sqrt{\frac{355}{145,57}} = 1,187$$

$$\chi_w = \frac{0,83}{1,187} = 0,70 \text{ (konservative Annahme)}$$

$$V_{bw,R} = \frac{0,7 \cdot 355 \cdot 3500 \cdot 12}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 6025804,8 \text{ N}$$

Beitrag der Flansche:

$$V_{bf,R} = \frac{b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{yf}}{c \cdot \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right) \quad \text{Gl. (B-24)}$$

$$\text{mit } c = a \left(0,25 + \frac{1,6 \cdot b_f \cdot t_f^2 \cdot f_{yf}}{t \cdot h_w^2 \cdot f_{yw}} \right) \quad \text{Gl. (B-25)}$$

$$c = 3000 \left(0,25 + \frac{1,6 \cdot 600 \cdot 100^2 \cdot 355}{t \cdot 3500^2 \cdot 355} \right) = 945,918$$

Für $M_{Ed} = 0$:

$$V_{bf,R} = \frac{600 \cdot 100^2 \cdot 355}{945,918} = 2251780,81 \text{ N}$$

$$V_{b,R} = 6025804,8 + 2251780,8 = 8277585,6 \text{ N} \leq 8608292,5 \text{ N (mit } \eta = 1,0)$$

$$V_{bw,R} / V_{el,R} = 0,70$$

$$V_{b,R} / V_{el,R} = 0,96$$

B.3.2 Berechnungen nach dem MRS-Verfahren

Einzelfeldbeulen

Die Abminderungsfaktoren für lokales Beulen sind gleich groß wie nach dem MEQ-Verfahren.

Plattenartiges Verhalten:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} \quad \text{Gl. (B-26)}$$

$$\text{mit } \alpha_{ult,k} = \frac{f_y}{\sigma_{x,Ed}} \quad \text{Gl. (B-27)}$$

$$\alpha_{ult,k} = \frac{355}{10} = 35,5$$

$$\alpha_{cr} = 57,438$$

$$\sigma_{cr,p} = 57,438 \cdot 10 = 574,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{35,5}{57,438}} = 0,786 \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot (-0,25)} = 0,814$$

$$\rho_p = 1,0$$

Knickstabähnliches Verhalten:

Im Gegensatz zum MEQ-Verfahren wird hier der Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ für knickstabähnliches Verhalten verwendet.

$$\alpha_e = 0,4826$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1,0 + 0,4826 \cdot (0,786 - 0,2) + 0,786^2] = 0,950$$

$$\chi_c = \frac{1}{0,950 + \sqrt{0,950^2 - 0,786^2}} = 0,674$$

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

$$\xi = \frac{574,4}{386,9} - 1 = 0,485$$

$$\rho_c = (1,0 - 0,674) \cdot 0,485 \cdot (2 - 0,485) + 0,674 = 0,913$$

$$(\rho_{c,loc} = 0,969)$$

B.4 Praxisbeispiel

B.4.1 Berechnungen nach dem MEQ-Verfahren

Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit unter Berücksichtigung des Schubbeulens:

Tab. B-32: Übersicht der Ergebnisse zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit

$V_{a,el,R}$	8623049,6	[N]
b	3506	[mm]
α_{cr}	13,817	[-]
τ_E	20,5	[N/mm ²]
τ_{cr}	283,2	[N/mm ²]
λ_w	0,85	[-]
χ_w	0,98	[-]
$V_{a,bw,R}$	8411917,7	[N]
$V_{a,bw,R} / V_{a,el,R}$	0,976	[-]
c	775,19	[-]
$V_{a,bf,R}$	354456,4	[N]
$V_{a,b,R}$	8766374,1	[N]
$V_{a,b,R} / V_{a,el,R}$	1,02	[-]

Ermittlung der Momententragfähigkeit:

Für den Fall 1 werden alle Teilergebnisse zur Ermittlung der Momententragfähigkeit aufgelistet. Die Spannungsverteilung ist konstant über die Länge des Systems. Für die weiteren Fälle wird die effektive Momententragfähigkeit mit der Spannungsverteilung an der Stelle $x = 1750$ mm berechnet, siehe Kap. B.4.1.2. Es werden nur mehr die wichtigsten Teilergebnisse der Berechnung nach Eurocode [1] angeführt.

B.4.1.1 Lastfall 1

Ermittlung der elastischen Momententragfähigkeit:

Für Lastfall 1 liegt keine V-Belastung vor, sodass im maßgebenden Querschnitt ($x = 1750 \text{ mm}$) gilt: $M = M_0$ und $N = N_0$. Aus dem Wertepaar M_0 & N_0 wird am Querschnitt die untersuchte Spannungsverteilung (siehe Abb. B-10) erreicht. Geht man davon aus, dass am gedrückten Untergurt $\sigma_{ges,u} = f_y$ ist, kann nun das alleinige Biegemoment M_0 rückgerechnet werden, dass nun auch die elastische Biegetragfähigkeit $M_{a,el,R}$ darstellt.

In der folgenden Abbildung sind der Querschnitt zur Ermittlung der QS-Werte und die dazugehörige Spannungsverteilung dargestellt.

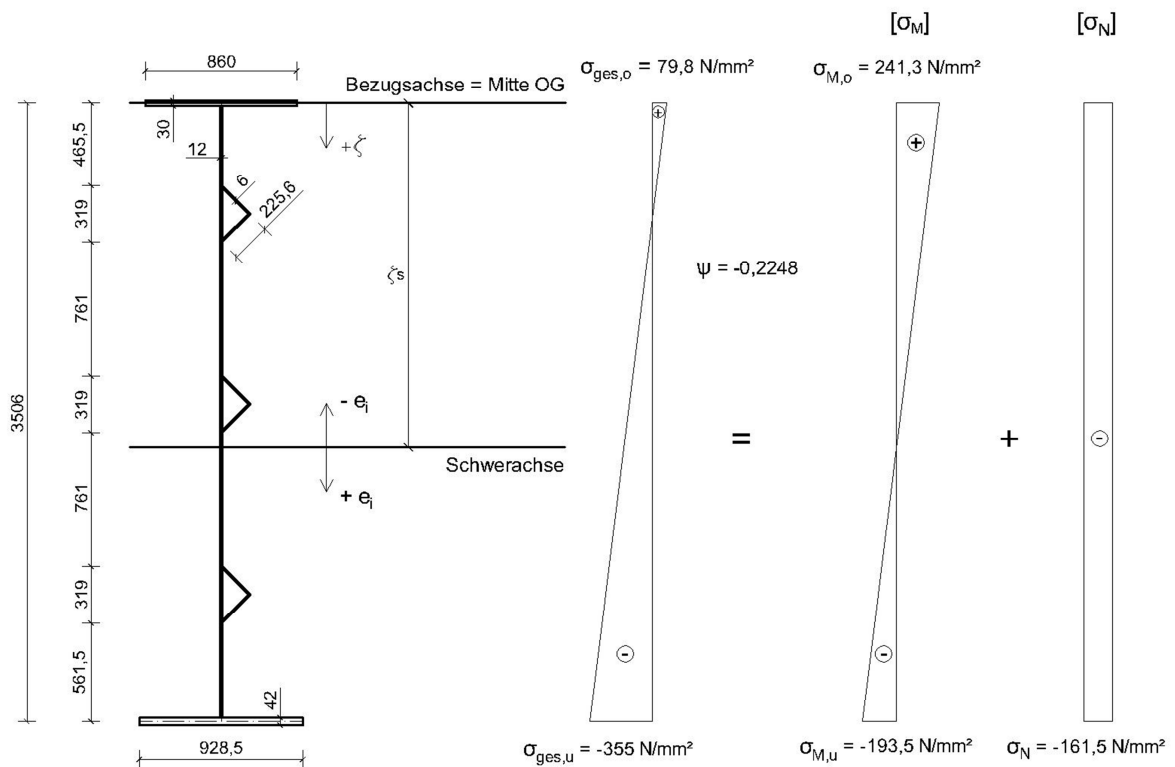


Abb. B-10: Abmessungen

$$\zeta_s = \frac{\sum (A_i \cdot \zeta_i)}{\sum A_i} = 1950,8 \text{ mm}$$

$$z_{max} = 1950,8 \text{ mm (Gurtmitte)}$$

$$W_{a,el} = \frac{I_{ges}}{z_{max}} = 125143638,9 \text{ mm}^3$$

Aus den Spannungsverläufen in Abb. B-10 zeigt sich, dass zufolge M_0 folgende Randspannungen vorliegen:

$$\sigma_{M,o} = 241,3 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{M,u} = -193,5 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{a,el,R} = \sigma_{max} \cdot W_{el} = 30199662942 \text{ Nmm} \triangleq 30199,7 \text{ kNm}$$

In der folgenden Tabelle sind die dazugehörigen Querschnittswerte zu finden.

Tab. B-33: QS-Werte Praxisbeispiel

QS	b [mm]	h [mm]	A [mm ²]	ζ [mm]	A x ζ [mm ³]	e _i [mm]	I [mm ⁴]	A x e _i ² [mm ⁴]	I _{ges} [mm ⁴]
Obergurt	860,0	30,0	25800,0	0,0	0,0	-1950,8	1935000,0	98184455346,5	98186390346,5
Steg	12,0	3506,0	42072,0	1753,0	73752216,0	-197,8	43095878216,0	1645968146,0	44741846362,0
LS 1-1	6,0	225,6	1353,6	545,3	738050,4	-1405,5	2870498,3	2674111576,8	2676982075,1
LS 1-2	6,0	225,6	1353,6	704,8	953949,6	-1246,0	2870498,3	21016356648,1	2104506146,4
LS 2-1	6,0	225,6	1353,6	1625,3	2199938,4	-325,5	2870498,3	1434534443,3	146323941,6
LS 2-2	6,0	225,6	1353,6	1784,8	2415837,6	-166,0	2870498,3	37319786,6	40190284,9
LS 3-1	6,0	225,6	1353,6	2705,3	3661826,4	754,5	2870498,3	770473389,8	773343888,1
LS 3-2	6,0	225,6	1353,6	2864,8	3877725,6	914,0	2870498,3	1130682005,1	1133552503,4
Untergurt	928,5	42,0	38997,0	3506,0	136723482,0	1555,2	5732559,0	94320650002,3	94326382561,3
Summe			114990,6		224323026,0		43120768764,8		244129518109,3

Einzelfeldbeulen:

Tab. B-34: Übersicht der Ergebnisse für Einzelfeldbeulen

	ψ	\bar{b} [mm]	t [mm]	$k_{\sigma, \rho}^*$	$\bar{\lambda}_p$	ρ
Feld 1	-	465,5	12	-(Zug)	-	1,0
Feld S1	-1,265	319	12	30,687	0,046	1,0
Feld 2	0,156	761	12	6,802	0,591	1,0
Feld S2	0,738	319	12	4,587	0,351	1,0
Feld 3	0,617	761	12	4,919	1,029	0,784
Feld S3	0,861	319	12	4,292	0,498	1,0
Feld 4	0,804	561,5	12	4,423	0,963	0,813

Ermittlung der wirksamen Breiten der Einzelfelder:

Das Feld 1 wird nur durch Zugspannungen beansprucht.

Tab. B-35: Wirksame Breiten Feld S1 und 2

Feld S1			Feld 2		
b_{S1}	141	[mm]	b_2	761	[mm]
ρ_{S1}	1,0	[-]	ρ_2	1,0	[-]
$b_{S1,eff}$	141	[mm]	$b_{2,eff}$	761	[mm]
ψ_{S1}	-0,790	[-]	ψ_2	0,156	[-]
$b_{S1,edge,eff}$	56,4	[mm]	$b_{2,sup,eff}$	314,2	[mm]
$b_{S1,inf,eff}$	84,6	[mm]	$b_{2,inf,eff}$	446,8	[mm]

Tab. B-36: Wirksame Breiten Feld S2 und 3

Feld S2			Feld 3		
b_{S2}	319	[mm]	b_3	761	[mm]
ρ_{S2}	1,0	[-]	ρ_3	0,784	[-]
$b_{S2,eff}$	319	[mm]	$b_{3,eff}$	596,4	[mm]
ψ_{S2}	0,738	[-]	ψ_3	0,617	[-]
$b_{S2,sup,eff}$	149,7	[mm]	$b_{3,sup,eff}$	272,1	[mm]
$b_{S2,inf,eff}$	169,3	[mm]	$b_{3,inf,eff}$	324,3	[mm]

Tab. B-37: Wirksame Breiten Feld S3 und 4

Feld S3			Feld 4		
b_{S3}	319	[mm]	b_4	561,5	[mm]
ρ_{S3}	1,0	[-]	ρ_4	0,813	[-]
$b_{S3,eff}$	319	[mm]	$b_{4,eff}$	456,4	[mm]
ψ_{S3}	0,861	[-]	ψ_4	0,804	[-]
$b_{S3,sup,eff}$	154,1	[mm]	$b_{4,sup,eff}$	217,6	[mm]
$b_{S3,inf,eff}$	164,9	[mm]	$b_{4,edge,eff}$	238,9	[mm]

Plattenartiges Verhalten:

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse für das plattenartige Verhalten zusammengefasst.

Tab. B-38: Übersicht der Ergebnisse für plattenartiges Verhalten

A_c	38928,3	[mm ²]
$A_{c,eff,loc}$	35692,2	[mm ²]
$\beta_{A,c}$	0,917	[-]
α_{cr}	16,578	[-]
$\sigma_{x,E}$	35,5	[N/mm ²]
$\sigma_{cr,p}$	588,5	[N/mm ²]
$\bar{\lambda}_p$	0,744	[-]
ρ_p	1,0	[-]

Knickstabähnliches Verhalten:

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse für das knickstabähnlich Verhalten zu finden.

Tab. B-39: Mitwirkende Stegbreite

b_3	761	[mm]
$b_{a,1}$	413,8	[mm]
b_4	561,5	[mm]
$b_{a,2}$	267,6	[mm]
b_i	159,5	[mm]
b_{ges}	1017,4	[mm]

Tab. B-40: QS-Werte Längssteife

QS	A	ζ	A x ζ	e_i	I	A x e_i^2	I_{ges}
	[mm ²]	[mm]	[mm ³]	[mm]	[mm ⁴]	[mm ⁴]	[mm ⁴]
LS 4-1	1353,6	85,8	116071,2	65,3	2870498,3	5767531,7	8638030,0
LS 4-2	1353,6	85,8	116071,2	65,3	2870498,3	5767531,7	8638030,0
mitw.Steg	12208,6	6,0	73251,4	-14,5	146502,9	2557852,3	2704355,2
Summe	14915,8		305393,8				19980415,2

Tab. B-41: Übersicht der Ergebnisse für knickstabähnliches Verhalten

ζ_s	20,47	[mm]
$\sigma_{cr,SI}$	308,5	[N/mm ²]
$\sigma_{cr,c}$	412,4	[N/mm ²]
$\bar{\lambda}_c$	0,867	[-]
e_1	65,3	[mm]
e_2	14,5	[mm]
i	36,6	[mm ²]
α_e	0,50	[-]
ϕ	1,043	[-]
χ_c	0,616	[-]

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

 Tab. B-42: Resultierender Abminderungsfaktor ρ_c

ξ	0,427	[-]
ρ_c	0,874	[-]

Berechnung des maximalen Trägheitsmomentes unter Berücksichtigung des Beulens

Ein gleichbleibender Abstand von 1950,8 mm zum Schwerpunkt wird angenommen.

Tab. B-43: Effektive Momententragfähigkeit

$A_{c,eff}$	34738,4	[mm ²]
$W_{a,eff}$	122622287,6	[mm ³]
$M_{a,eff}$	29591,21	[kNm]
$\eta = M_{a,eff}/M_{a,el,R}$	0,980	[-]

In der folgenden Tabelle sind die dazugehörigen Querschnittswerte zu finden.

Tab. B-44: Effektive QS-Werte

QS	b [mm]	h [mm]	A [mm ²]	ζ [mm]	A x ζ [mm ³]	e _i [mm]	I [mm ⁴]	A x e _i ² [mm ⁴]	I _{ges} [mm ⁴]
Obergurt	860,0	30,0	25800,0	0,0	0,0	-1934,7	1935000,0	96566637297,4	96568572297,4
Steg A _{c,eff,loc,1}	10,5	1436,7	15068,6	1418,3	21371289,8	-516,4	2592071256,5	4018096244,2	6610167500,8
Steg A _{c,eff,loc,2}	10,5	860,8	9028,2	2731,7	24661959,5	797,0	557486426,4	5734851779,8	6292338206,2
Steg oben (Zugzone+b _{s1,edge,eff})	12,0	699,9	8398,8	350,0	2939160,1	-1584,7	342853021,0	21091842214,3	21434695235,3
Steg unten (b _{4,edge,eff})	12,0	238,9	2866,5	3386,6	9707603,2	1451,9	13630752,5	6042608907,4	6056239659,8
LS 1-1	5,2	225,6	1183,0	545,3	645057,5	-1389,4	2508821,0	2283815016,3	2286323837,3
LS 1-2	5,2	225,6	1183,0	704,8	833753,8	-1229,9	2508821,0	1789560582,5	1792069403,5
LS 2-1	5,2	225,6	1183,0	1625,3	1922750,4	-309,4	2508821,0	113255559,0	115764380,0
LS 2-2	5,2	225,6	1183,0	1784,8	2111446,7	-149,9	2508821,0	26585166,7	29093987,7
LS 3-1	5,2	225,6	1183,0	2705,3	3200443,3	770,6	2508821,0	702512808,9	705021629,9
LS 3-2	5,2	225,6	1183,0	2864,8	3389139,6	930,1	2508821,0	1023426458,0	1025935279,0
Untergurt	928,5	42,0	38997,0	3506,0	136723482,0	1571,3	5732559,0	96288378455,7	96294111014,7
Summe			107257,4		207506085,8		3528761941,6	235681570490,1	239210332431,6

B.4.1.2 Lastfall 2 – Lastfall 9

Elastische Momententragsfähigkeit:

Für die Lastfälle 2 bis 9 liegen nun auch Querkräfte vor, sodass im 1. Schritt die Schnittkräfte N und M im Querschnitt $x = 1750$ mm ermittelt wurden (vgl. Tab. B-45). Das Wertepaar N und M wurde gesteigert bis wieder am Untergurt die Fließgrenze f_y erreicht wurde. Danach konnte der Spannungsanteil infolge N alleine abgezogen werden, sodass sich die alleinigen Randspannungen infolge M ergaben ($\sigma_{M,i}$ in Tab. B-45). Daraus konnten wieder die entsprechenden elastischen Momententragsfähigkeiten $M_{a,el,R}$ ermittelt werden.

Tab. B-45: Übersicht der Spannungen und der elastischen Momententragsfähigkeit an der Stelle $x = 1750$ mm

Lastfall	$M_{x=1750}$ [kNm]	$N_{x=1750}$ [kN]	ψ [-]	$\sigma_{M,o}$ [N/mm ²]	$\sigma_{M,u}$ [N/mm ²]	$M_{a,el,R}$ [kNm]
Fall 2	10261,43	-	-1,2470	355,0	-284,7	44425,99
Fall 3	17045,72	4318,3	-0,6767	330,3	-264,9	41338,70
Fall 4	23860,11	8562,3	-0,5111	297,7	-238,7	37255,26
Fall 5	27611,99	11506,1	-0,4349	282,7	-226,7	35376,86
Fall 6	28602,98	12964,2	-0,3912	274,1	-219,8	34299,37
Fall 7	29019,10	14078,5	-0,3549	266,9	-214,1	33404,59
Fall 8	28969,50	15118,7	-0,3154	259,2	-207,8	32430,97
Fall 9	29341,77	16567,4	-0,2722	250,6	-201,0	31362,25

Einzelfeldbeulen:

Die Felder 1, S1, 2, S2 und S3 müssen in keinen der Fälle aufgrund lokalen Beulens abgemindert werden.

Tab. B-46: Übersicht der Ergebnisse für Einzelfeldbeulen

Lastfall	Feld 3		Feld 4	
	ψ [-]	ρ [-]	ψ [-]	ρ [-]
Fall 2	-0,120	1,0	0,640	0,851
Fall 3	0,371	0,905	0,731	0,829
Fall 4	0,472	0,853	0,758	0,823
Fall 5	0,513	0,833	0,770	0,820
Fall 6	0,536	0,822	0,777	0,819
Fall 7	0,555	0,813	0,783	0,817
Fall 8	0,575	0,803	0,789	0,816
Fall 9	0,593	0,794	0,796	0,815

Plattenartiges Verhalten:

Tab. B-47: Übersicht der Ergebnisse für plattenartiges Verhalten

Lastfall	α_{cr} [-]	$\sigma_{x,E}$ [N/mm ²]	$\sigma_{cr,p}$ [N/mm ²]	$\bar{\lambda}_p$ [-]	ρ_p [-]
Fall 2	24,412	28,5	695,0	0,697	1,0
Fall 3	18,960	35,5	673,1	0,701	1,0
Fall 4	18,036	35,5	640,3	0,714	1,0
Fall 5	17,697	35,5	628,2	0,719	1,0
Fall 6	17,451	35,5	619,5	0,723	1,0
Fall 7	17,275	35,5	613,3	0,726	1,0
Fall 8	17,069	35,5	606,0	0,730	1,0
Fall 9	17,097	35,5	606,9	0,733	1,0

Knickstabähnliches Verhalten:

Tab. B-48: Übersicht der Ergebnisse für knickstabähnliches Verhalten

Lastfall	$\sigma_{cr,SI}$ [N/mm ²]	$\sigma_{cr,c}$ [N/mm ²]	$\bar{\lambda}_c$ [-]	ϕ [-]	χ_c [-]
Fall 2	301,8	561,0	0,762	0,932	0,681
Fall 3	305,6	466,6	0,836	1,009	0,636
Fall 4	306,8	445,3	0,847	1,021	0,629
Fall 5	307,3	435,8	0,852	1,027	0,625
Fall 6	307,5	430,7	0,855	1,030	0,624
Fall 7	307,8	426,8	0,858	1,033	0,622
Fall 8	308,0	422,5	0,861	1,036	0,621
Fall 9	308,2	417,6	0,864	1,039	0,618

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten:

 Tab. B-49: Übersicht der resultierenden Abminderungsfaktoren ρ_c

Lastfall	ξ [-]	ρ_c [-]
Fall 2	0,239	0,815
Fall 3	0,442	0,887
Fall 4	0,438	0,883
Fall 5	0,441	0,883
Fall 6	0,438	0,881
Fall 7	0,437	0,880
Fall 8	0,434	0,879
Fall 9	0,453	0,886

Berechnung des maximalen Trägheitsmomentes unter Berücksichtigung des Beulens:

 Tab. B-50: Übersicht der effektiven Momententragsfähigkeit an der Stelle $x = 1750$ mm

Lastfall	$A_{c,eff}$ [mm ²]	$M_{a,eff}$ [kNm]	$\eta = M_{a,eff}/M_{a,el,R}$ [-]
Fall 2	22241,6	43659,68	0,983
Fall 3	28067,3	40736,36	0,985
Fall 4	30058,5	36678,68	0,985
Fall 5	31263,4	34817,23	0,984
Fall 6	31960,4	33744,27	0,984
Fall 7	32599,3	32854,08	0,984
Fall 8	33330,1	31884,42	0,983
Fall 9	34071,1	30783,58	0,982

B.4.2 Berechnungen nach dem MRS-Verfahren

B.4.2.1 Lastfall 1 – Lastfall 9

Einzelfeldbeulen:

Die Abminderungsfaktoren für das lokale Beulen sind gleich groß wie nach dem MEQ-Verfahren.

Plattenartiges Verhalten:

Tab. B-51: Übersicht der Ergebnisse für plattenartiges Verhalten

Lastfall	α_{cr} [-]	$\sigma_{x,E}$ [N/mm ²]	$\sigma_{cr,p}$ [N/mm ²]	$\bar{\lambda}_p$ [-]	ρ_p [-]
Fall 1	16,578	35,5	588,5	0,777	1,0
Fall 2	24,412	28,5	695,0	0,640	1,0
Fall 3	18,960	35,5	673,1	0,726	1,0
Fall 4	18,036	35,5	640,3	0,745	1,0
Fall 5	17,697	35,5	628,2	0,752	1,0
Fall 6	17,451	35,5	619,5	0,757	1,0
Fall 7	17,275	35,5	613,3	0,761	1,0
Fall 8	17,069	35,5	606,0	0,765	1,0
Fall 9	17,097	35,5	606,9	0,765	1,0

Knickstabähnliches Verhalten:

Tab. B-52: Übersicht der Ergebnisse für knickstabähnliches Verhalten

Lastfall	$\bar{\lambda}_p$ [-]	ϕ [-]	χ_c [-]
Fall 1	0,777	0,946	0,673
Fall 2	0,640	0,816	0,757
Fall 3	0,726	0,896	0,704
Fall 4	0,745	0,914	0,693
Fall 5	0,752	0,921	0,689
Fall 6	0,757	0,926	0,685
Fall 7	0,761	0,930	0,683
Fall 8	0,765	0,934	0,680
Fall 9	0,765	0,934	0,680

Interaktion zwischen plattenartigem und knickstabähnlichem Verhalten

 Tab. B-53: Übersicht der resultierenden Abminderungsfaktoren ρ_c

Lastfall	ξ [-]	ρ_c [-]	ρ_c (lokal) [-]
Fall 1	0,427	0,893	0,784
Fall 2	0,239	0,859	0,851
Fall 3	0,442	0,908	0,829
Fall 4	0,438	0,903	0,823
Fall 5	0,441	0,903	0,820
Fall 6	0,438	0,901	0,819
Fall 7	0,437	0,899	0,813
Fall 8	0,434	0,898	0,803
Fall 9	0,453	0,905	0,794

Anhang C

C Ergebnisse der numerischen Traglastberechnung

C.1 System S1

C.1.1 Belastung

Die konstante Belastung erfolgt in x-Richtung mittels Linienlasten, welche auf das Plattenelement und die Längssteifen aufgebracht werden. Eine Übersicht der angesetzten Lasten ist in Tab. C-1 zu finden.

Tab. C-1: Übersicht der Belastungsansätze (Referenzlastniveau)

	Spannungsniveau [N/mm ²]	Schalenelement	Linienlast [N/mm]
LA	177,5	Plattenelement	1775
		Längssteifen	1420
LBA	10	Plattenelement	100
		Längssteifen	80
GMNIA	355	Plattenelement	3550
		Längssteifen	2480

C.1.2 Lineare Analyse

Im Zuge der linearen Analyse wird die korrekte Modellierung und Lasteinleitung überprüft. Für die lineare Berechnung ist es ausreichend die halbe Fließspannung $\sigma = 177,5 \text{ N/mm}^2$ anzusetzen. In Abb. C-1 werden die Spannungen in Längsrichtung dargestellt.

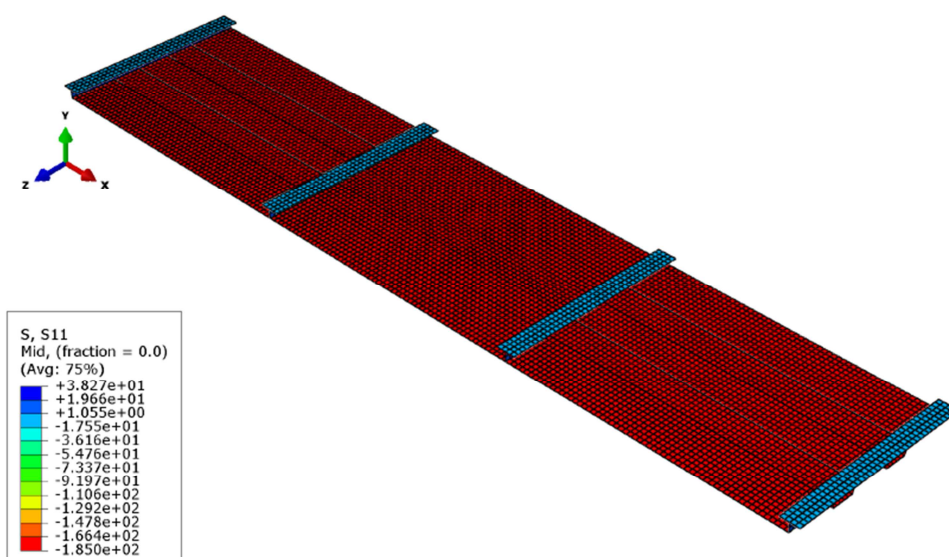


Abb. C-1: S1 – Lineare Analyse – Spannungen in Längsrichtung

An der Lasteinleitungsstelle treten beinahe keine Störungen auf, wie bereits im Kapitel 4.1 gezeigt wurde.

In Feldmitte (siehe Abb. C-3) ist die Spannung in Längsrichtung konstant über die Breite, wie in Abb. C-2 zu erkennen ist.

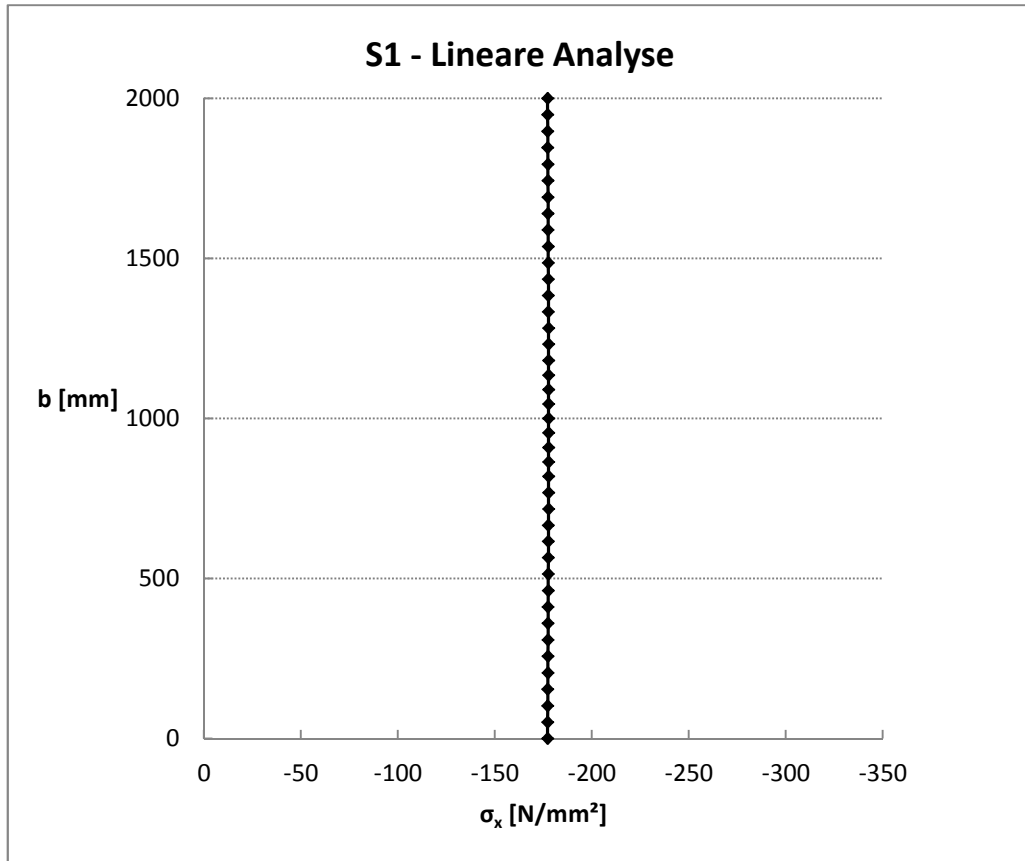


Abb. C-2: S1 Spannungen in Längsrichtung σ_x an der Stelle $x = 4500$

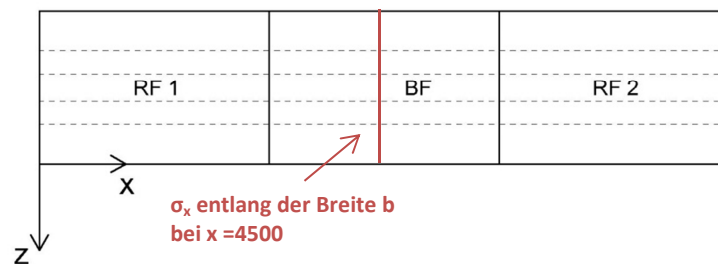


Abb. C-3: Systemskizze

C.1.3 LBA-Berechnung

Die lokalen und globalen Eigenformen werden auf einem Spannungsniveau von 10 N/mm² ermittelt. Der Überhöhungsfaktor der Verformungen in den Abbildungen aus der LBA beträgt 350.

Die Eigenwerte der linearen Beulanalyse werden in Tab. C-2 zusammengefasst. Die Eigenformen werden in Abb. C-4 und Abb. C-5 dargestellt.

Tab. C-2: Eigenwerte S1

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform
5	36,804	lokal
25	39,720	global

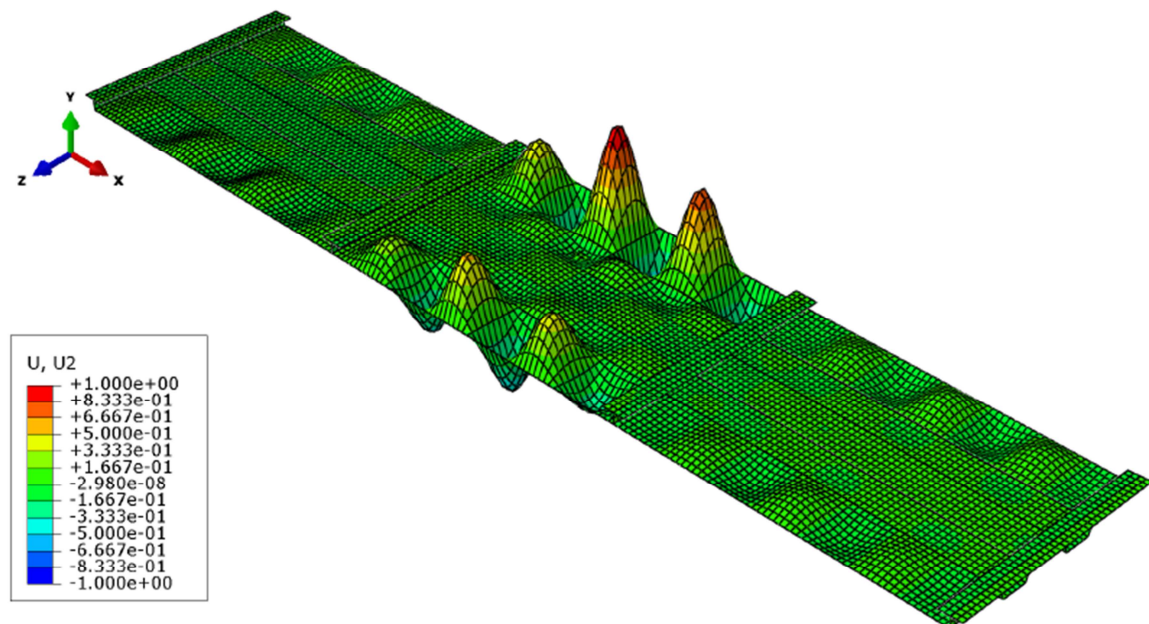


Abb. C-4: S1 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 36,804$)

Die Einzelfelder 1 bzw. 3 werden für das Einzelfeldbeulen maßgebend, da sie breiter sind als Einzelfeld 2.

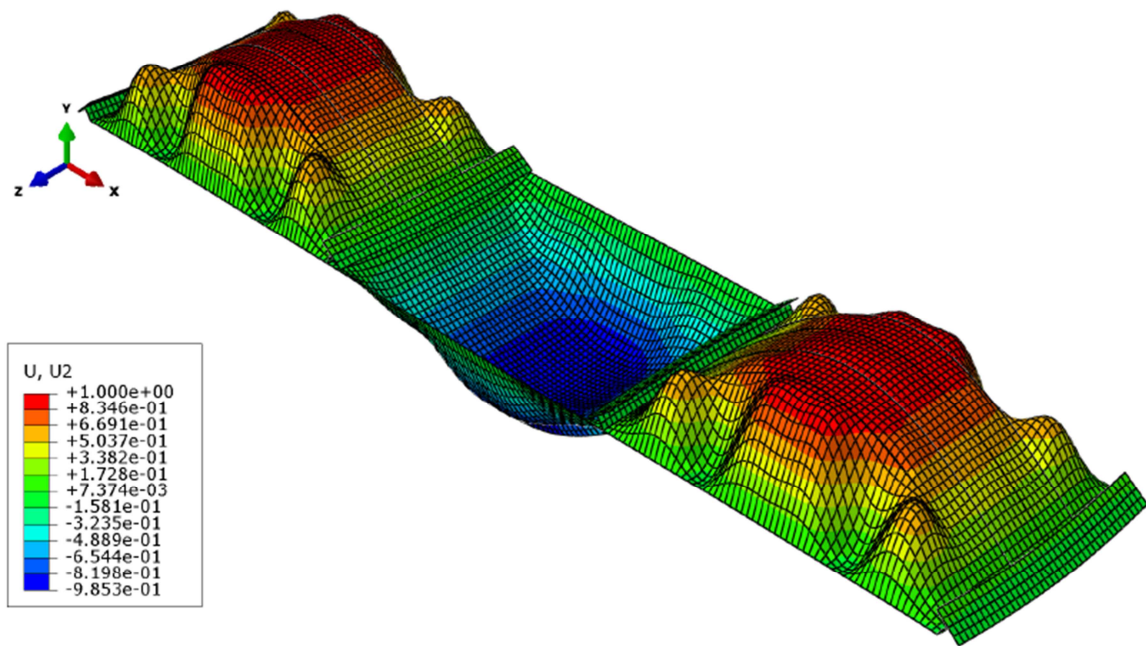
Die folgende kritische Beulspannung berechnet sich aus dem Eigenwert und dem Spannungsniveau:

$$\sigma_{cr,p} = 36,804 \cdot 10 = 368,0 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Der Beulwert $k_{\sigma,p}^*$ ergibt nach EN 1993-1-5 [1] 4,00 (bei einer allseits gelenkigen Lagerung und konstanter Belastung $\psi = 1$). Der aus der FE-Berechnung resultierende Beulwert ist höher als jener nach Eurocode [1], weil die Längssteifen eine gewisse Einspannung darstellen.

$$\sigma_{E,EF} = 190\,000 \cdot \left(\frac{10}{512}\right)^2 = 72,5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$k_{\sigma,p} = \frac{368,04}{72,48} = 5,08 \text{ [-]}$$


 Abb. C-5: S1 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 39,720$)

Für das Gesamtfeld ergeben sich folgende Werte:

$$\sigma_{cr,p} = 39,720 \cdot 10 = 397,2 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{E,GF} = 190\,000 \cdot \left(\frac{10}{2000}\right)^2 = 4,8 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$k_{\sigma,p} = 397,20 / 4,75 = 83,62 \text{ [-]}$$

Die globale Eigenform wird als Leitimperfektion und die lokale Eigenform als Begleitimperfektion angesetzt. Der globale Skalierfaktor (SF) ergibt sich zu -5,0 (beim Befehl im Input-File wird jedoch der positive Wert, also 5,0 verwendet, weil die Amplitude der globalen Eigenform im Beobachtungsfeld schon in die richtige Richtung – hin zu den Längssteifen – zeigt).

$$SF = -1,0 \cdot \frac{2000}{400} = -5,0$$

Der lokale Skalierfaktor errechnet sich zu:

$$SF = 0,7 \cdot \frac{512}{200} = 1,8$$

Tab. C-3: S1 - Übersicht der Imperfektionen

Nr.	Imperfektion	Eigenform	SF
5	+0,7	lokal	1,8
25	-1,0	global	-5,0

C.1.4 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt folgenden Laststeigerungsfaktor:

$$LSF = 0,67$$

Die Abb. C-6 zeigt die Verschiebungen aus der Ebene im Traglastzustand. Die maximale Verformung ist im Beobachtungsfeld zu finden.

Der Überhöhungsfaktor der Verformungen in den Abbildungen aus der GMNIA beträgt 20.

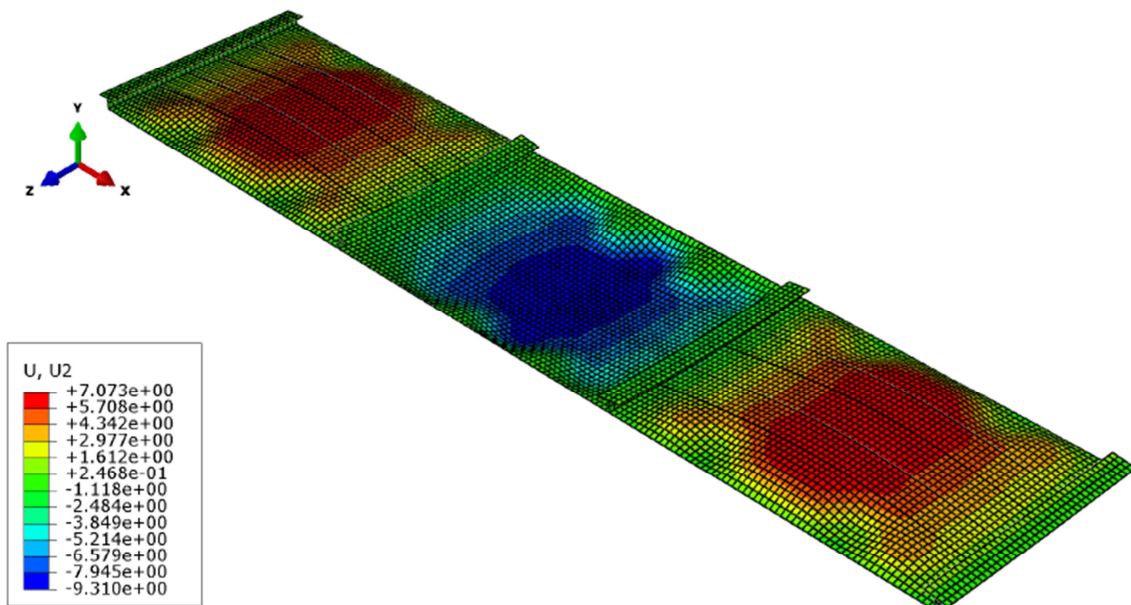


Abb. C-6: S1 – Traglastzustand - Verschiebung in y-Richtung

In Abb. C-7 sind die Spannungen in Längsrichtung im Traglastzustand zu finden. Zur übersichtlicheren Darstellung ist nur das Plattenelement ohne Längs- und Quersteifen zu sehen. Die maximale Druckspannung befindet sich am Rand im Beobachtungsfeld.

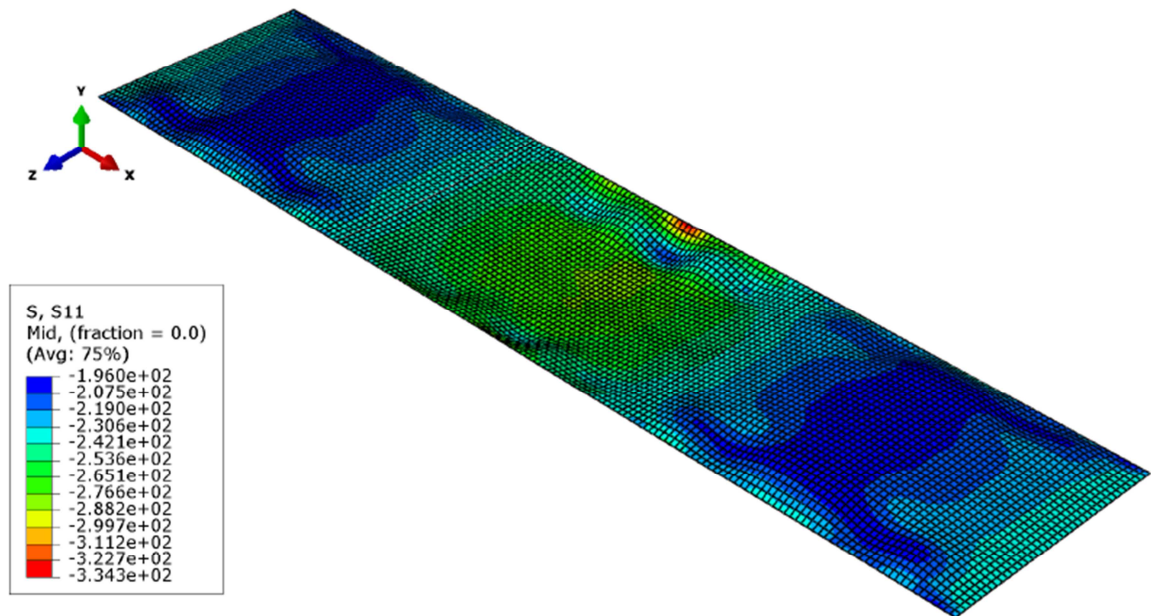


Abb. C-7: S1 – Traglastzustand - Spannungen im Plattenelement in Längsrichtung

C.2 System S2

C.2.1 Belastung

Die Belastung erfolgt beim System S2 analog zum System S1. Die Übersicht ist in Tab. C-1 zu finden.

C.2.2 Lineare Analyse

Da sich das System S2 nur in der Höhe der Längssteifen zu dem System S1 unterscheidet, ist keine lineare Analyse notwendig.

C.2.3 LBA-Berechnung

Die Eigenwerte der linearen Beulanalyse werden in Tab. C-4 zusammengefasst. Die Eigenformen werden in Abb. C-8 und Abb. C-9 dargestellt.

Tab. C-4: Eigenwerte S2

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform
19	38,971	lokal
183	121,490	global

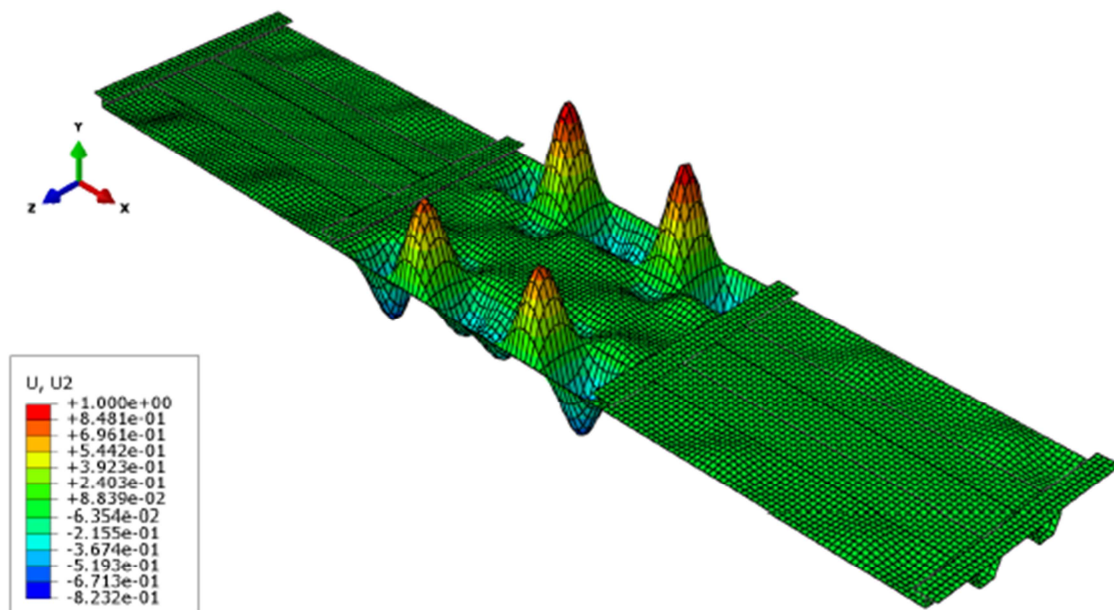


Abb. C-8: S2 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 38,971$)

Die Einzelfelder 1 bzw. 3 werden für das Einzelfeldbeulen maßgebend, da sie breiter sind als Einzelfeld 2.

Die folgende kritische Beulspannung berechnet sich aus dem Eigenwert und dem Spannungsniveau:

$$\sigma_{cr,p} = 38,971 \cdot 10 = 389,7 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Der Beulwert $k_{\sigma,p}^*$ beträgt nach EN 1993-1-5 [1] 4,00. Der aus der FE-Berechnung resultierende Beulwert ergibt sich zu 5,38.

$$\sigma_{E,EF} = 190\,000 \cdot \left(\frac{10}{512}\right)^2 = 72,5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$k_{\sigma,p} = 389,71 / 72,48 = 5,38 \text{ [-]}$$

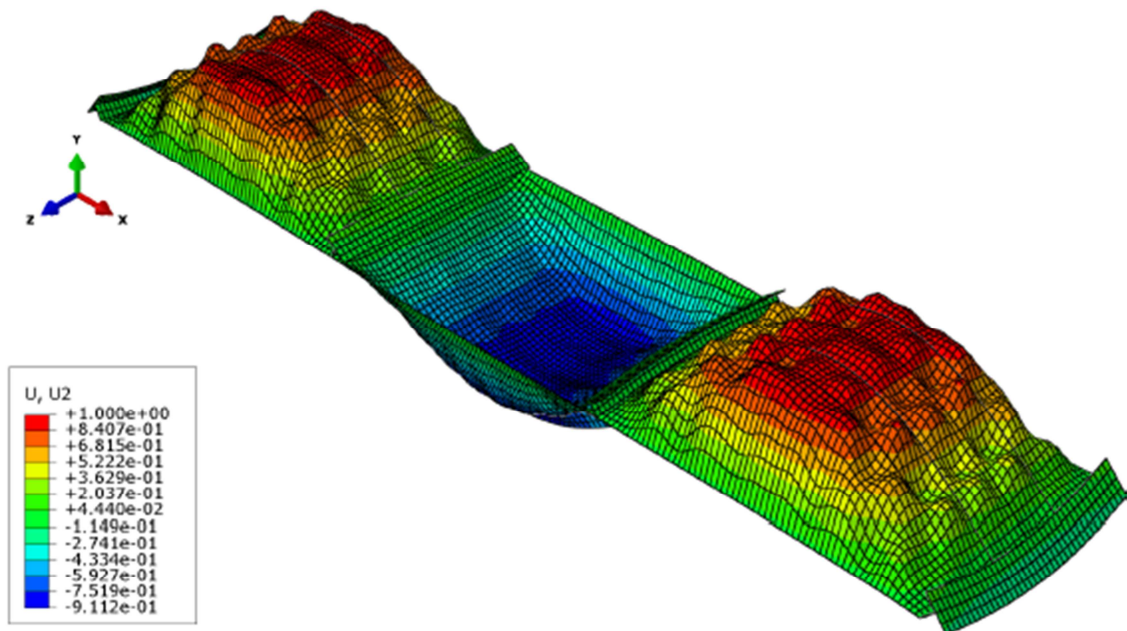


Abb. C-9: S2 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 121,490$)

Für das Gesamtfeld ergeben sich folgende Werte:

$$\sigma_{cr,p} = 121,49 \cdot 10 = 1214,9 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{E,GF} = 190\,000 \cdot \left(\frac{10}{2000}\right)^2 = 4,8 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$k_{\sigma,p} = 1214,9 / 4,75 = 255,77 \text{ [-]}$$

Die globale Eigenform wird als Leitimperfektion und die lokale Eigenform als Begleitimperfektion angesetzt. Der globale Skalierfaktor (SF) ergibt sich zu -5,0 (beim Befehl im Input-File wird jedoch der positive Wert, also 5,0 verwendet, weil die Amplitude der globalen Eigenform im Beobachtungsfeld schon in die richtige Richtung – hin zu den Längssteifen – zeigt).

$$SF = -1,0 \cdot \frac{2000}{400} = -5,0$$

Der lokale Skalierfaktor errechnet sich zu:

$$SF = 0,7 \cdot \frac{512}{200} = 1,8$$

Tab. C-5: S2 - Übersicht der Imperfektionen

Nr.	Imperfektion	Eigenform	SF
19	+0,7	lokal	1,8
183	-1,0	global	-5,0

C.2.4 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt folgenden Laststeigerungsfaktor:

$$LSF = 0,86$$

Die Abb. C-10 zeigt die Verschiebungen aus der Ebene im Traglastzustand. Die maximale Verformung ist im Beobachtungsfeld zu finden.

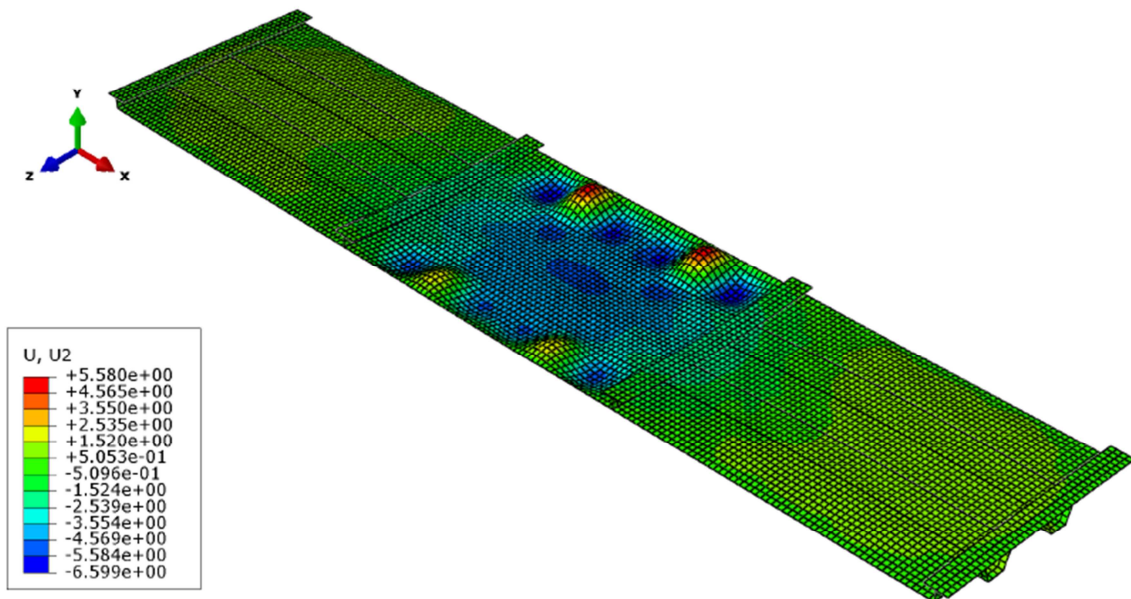


Abb. C-10: S2 – Traglastzustand - Verschiebung in y-Richtung

In Abb. C-11 sind die Spannungen in Längsrichtung im Traglastzustand zu finden. Zur übersichtlicheren Darstellung ist nur das Plattenelement ohne Längs- und Quersteifen zu sehen. Die maximale Druckspannungen befinden sich am im Beobachtungsfeld.

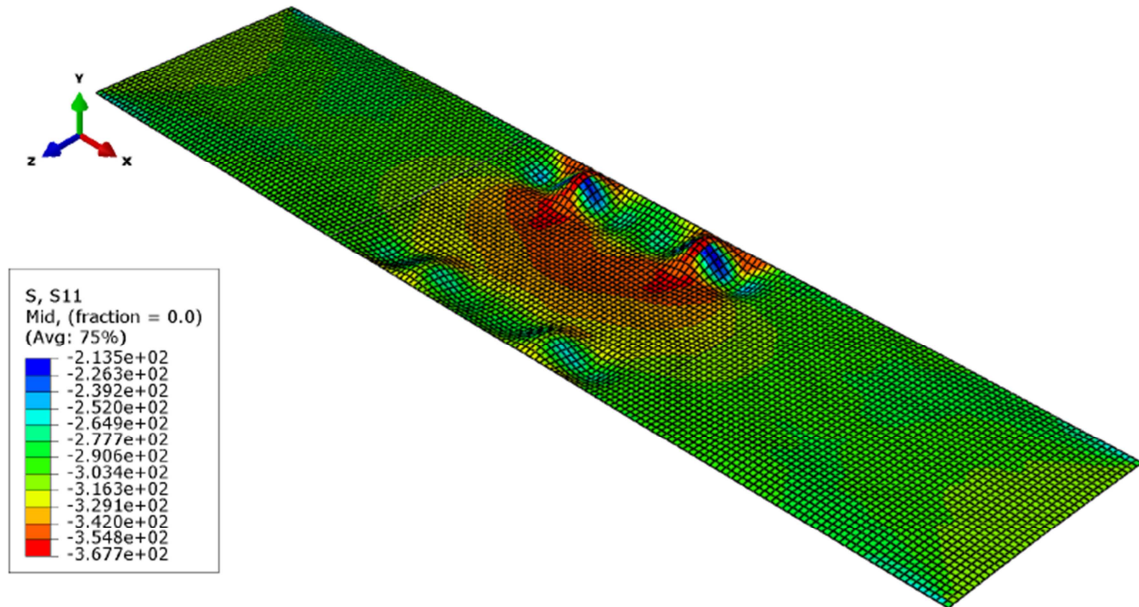


Abb. C-11: S2 – Traglastzustand - Spannungen im Plattenelement in Längsrichtung

C.3 System S6, Var-A

C.3.1 Belastung

Die Belastung erfolgt in x-Richtung mittels Linienlasten, welche auf den Steg, die Längssteifen, die Ober- und Untergurte aufgebracht werden. Eine reine Momentenbeanspruchung mit einer Spannungsverteilung von $\psi = \sigma_o / \sigma_u = -0,25$ wird betrachtet. Der Spannungsnullpunkt geht durch den Schwerpunkt des Querschnitts, welcher bei $z = -2800$ liegt. Der Obergurt liegt auf der Zugseite und der Untergurt auf der Druckseite. Die Lasten werden über eine lineare Funktion in Abhängigkeit von z aufgebracht:

$$f(z) = 1 + \frac{z}{2800} ; \text{ mit } z = 0 \text{ bis } -3500$$

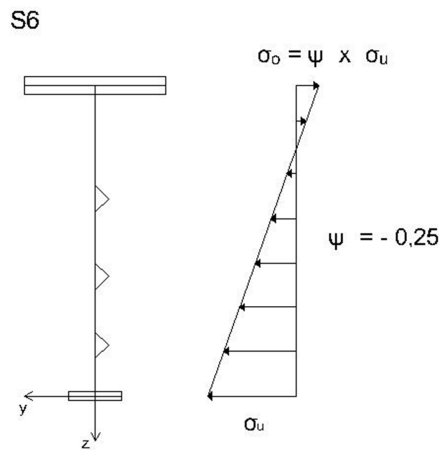


Abb. C-12: S6 - Spannungsverteilung

Eine Übersicht der angesetzten Lasten ist in Tab. C-6 zu finden.

Tab. C-6: Übersicht der Belastungsansätze (Referenzlastniveau)

	Spannungsniveau [N/mm ²]	Schalenelement	Linienlast [N/mm]
LA	$\sigma_o = 44,4$ $\sigma_u = -177,5$	Steg	2130
		Längssteifen	1065
		Untergurt	17750
		Obergurt	35500
LBA	$\sigma_o = 2,5$ $\sigma_u = -10$	Steg	120
		Längssteifen	60
		Untergurt	1000
		Obergurt	2000
GMNIA	$\sigma_o = 88,8$ $\sigma_u = -355$	Steg	4260
		Längssteifen	2130
		Untergurt	35500
		Obergurt	71000

C.3.2 Lineare Analyse

In Abb. C-13 sind die Spannungen in Längsrichtung zu sehen. Zur übersichtlicheren Darstellung ist nur das Stegblech ohne Längs- und Quersteifen sowie ohne Unter- und Obergurte zu sehen.

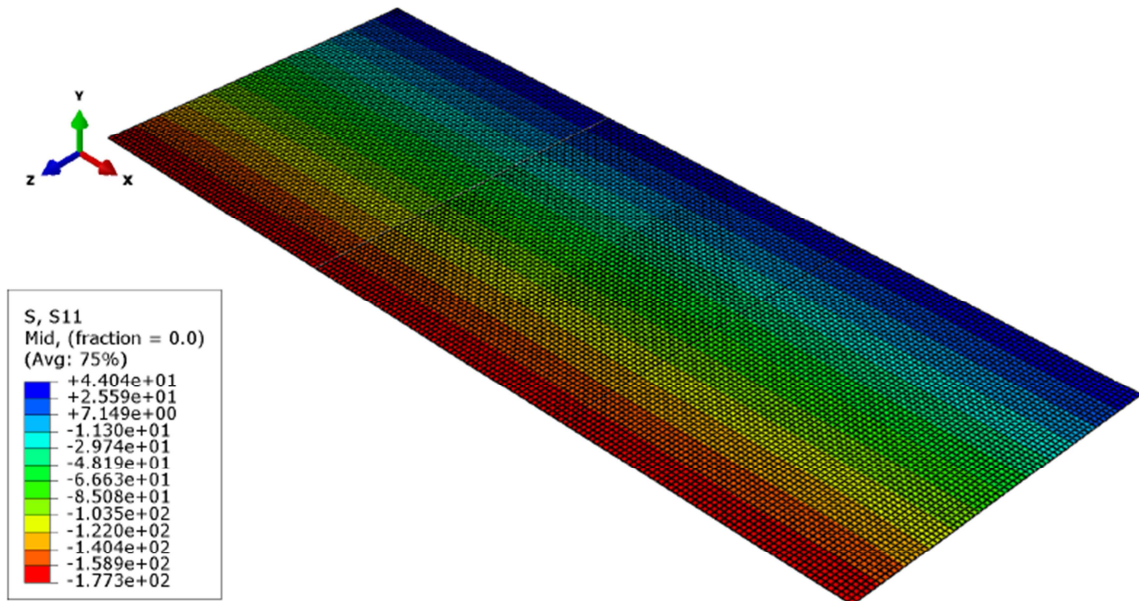


Abb. C-13: S6 Var-A – Lineare Analyse – Spannungen in Längsrichtung

C.3.3 LBA-Berechnung

Die Eigenwerte der linearen Beulanalyse werden in Tab. C-7 zusammengefasst. Die Eigenformen werden in Abb. C-14 und Abb. C-15 dargestellt.

Tab. C-7: Eigenwerte S6 Var-A

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform
1	54,690	global
10	79,106	lokal

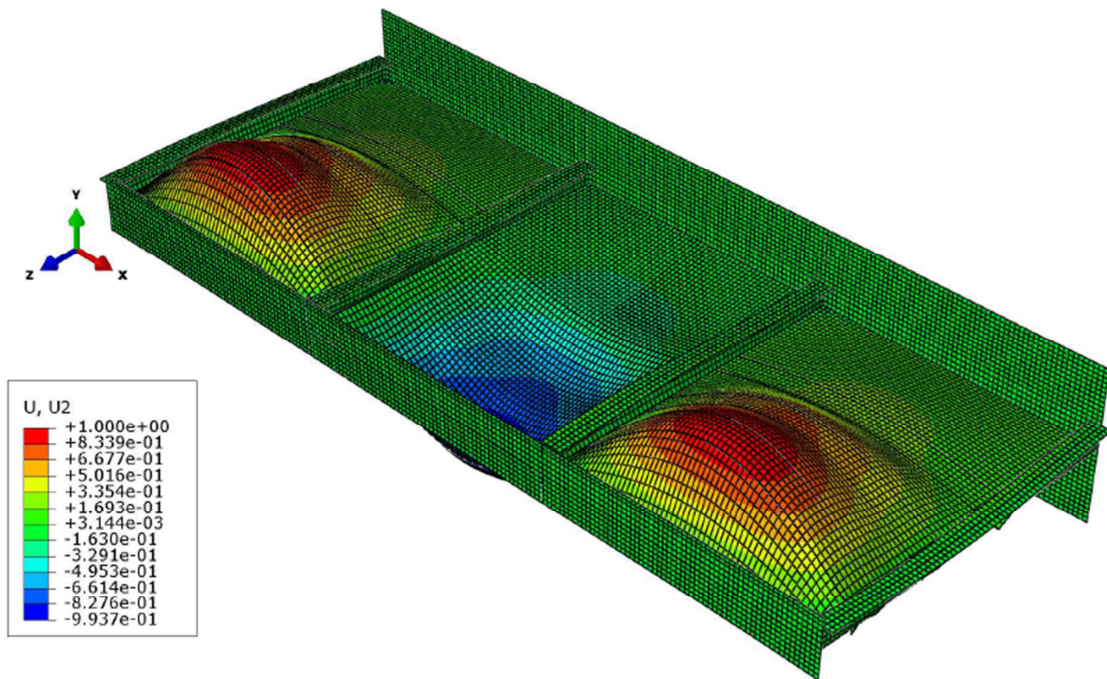


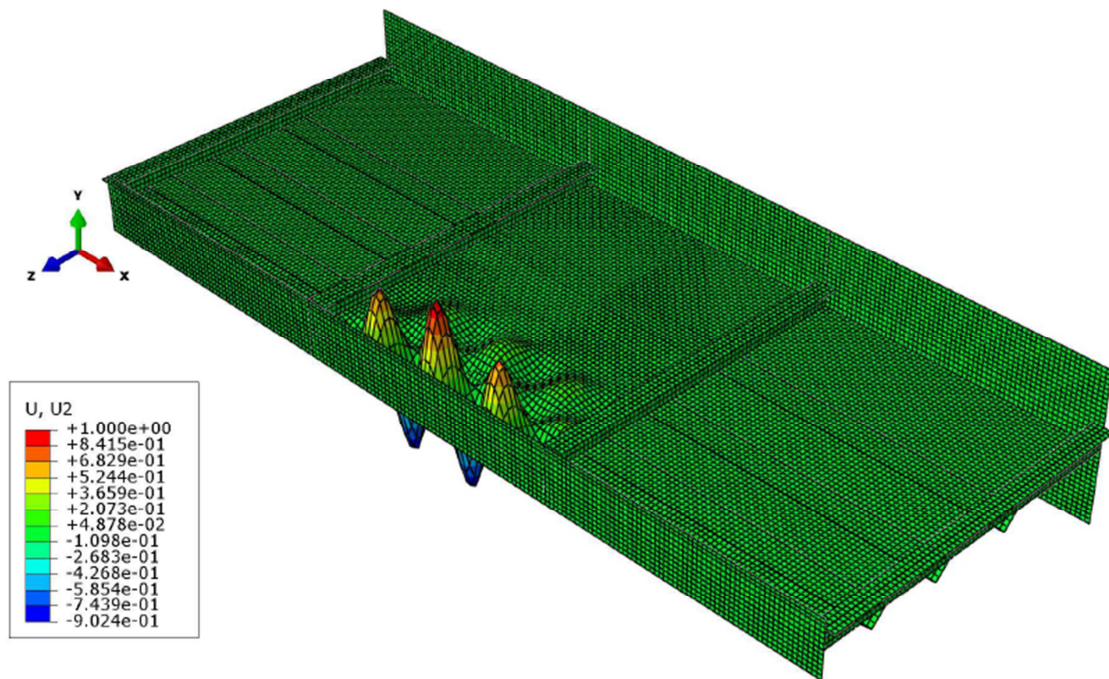
Abb. C-14: S6 Var-A globale Eigenform ($\phi_{cr} = 54,690$)

Folgende Werte ergeben sich für das Gesamtfeld:

$$\sigma_{cr,p} = 54,690 \cdot 10 = 546,9 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{E,GF} = 190\,000 \cdot \left(\frac{12}{3500}\right)^2 = 2,2 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$k_{\sigma,p} = 546,9 / 2,23 = 245,25 \text{ [-]}$$


 Abb. C-15: S6 Var-A lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 79,106$)

Das Einzelfeld 4 wird für das Einzelfeldbeulen maßgebend, da hier die Druckspannungen am größten sind.

Folgende Werte ergeben sich für das Einzelfeld 4:

$$\sigma_{cr,p} = 79,106 \cdot 10 = 791,1 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{E,EF} = 190\,000 \cdot \left(\frac{12}{424}\right)^2 = 152,2 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$k_{\sigma,p} = 791,06 / 152,19 = 5,20 \text{ [-]}$$

Nach EN 1993-1-5 [1] ist der Beulwert $k_{\sigma,p}^*$ niedriger und somit konservativer. Für den Erhalt des Abminderungsfaktors beim Einzelfeldbeulen wird dieser Beulwert verwendet.

$$k_{\sigma,p}^* = 4,32 \text{ [-]}$$

Die Imperfektionen werden wie folgt angesetzt:

$$\text{Globaler SF} = -1,0 \cdot \frac{3000}{400} = -7,5$$

Der globale SF wird beim Befehl im Input-File mit 7,5 angesetzt, weil die Amplitude der globalen Eigenform im Beobachtungsfeld schon in die richtige Richtung – hin zu den Längssteifen – zeigt.

$$\text{Lokaler SF} = 0,7 \cdot \frac{424}{200} = 1,48$$

Tab. C-8: S6 Var-A Übersicht der Imperfektionen

Nr.	Imperfektion	Eigenform	SF
1	-1,0	global	-7,5
10	+0,7	lokal	1,48

C.3.4 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt folgenden Laststeigerungsfaktor:

$$\text{LSF} = 0,87$$

Die Abb. A - C-16 zeigt die Verschiebungen aus der Ebene im Traglastzustand. Die maximale Verformung ist in den Randfeldern zu finden.

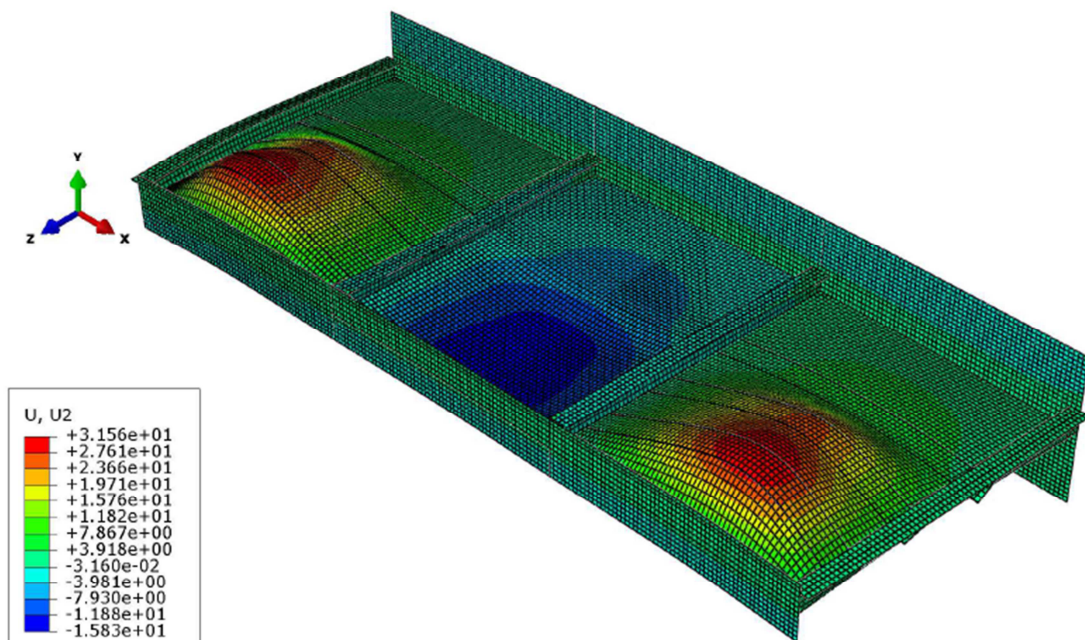


Abb. A - C-16: S6 Var-A – Traglastzustand - Verschiebung in y-Richtung

In Abb. A - C-17 sind die Spannungen in Längsrichtung im Traglastzustand zu finden. Zur übersichtlicheren Darstellung ist nur das Stegblech ohne Längs- und Quersteifen sowie ohne Unter- und Obergurte zu sehen. Die maximale Druckspannungen befinden sich entlang des Randes zum Untergurt hin.

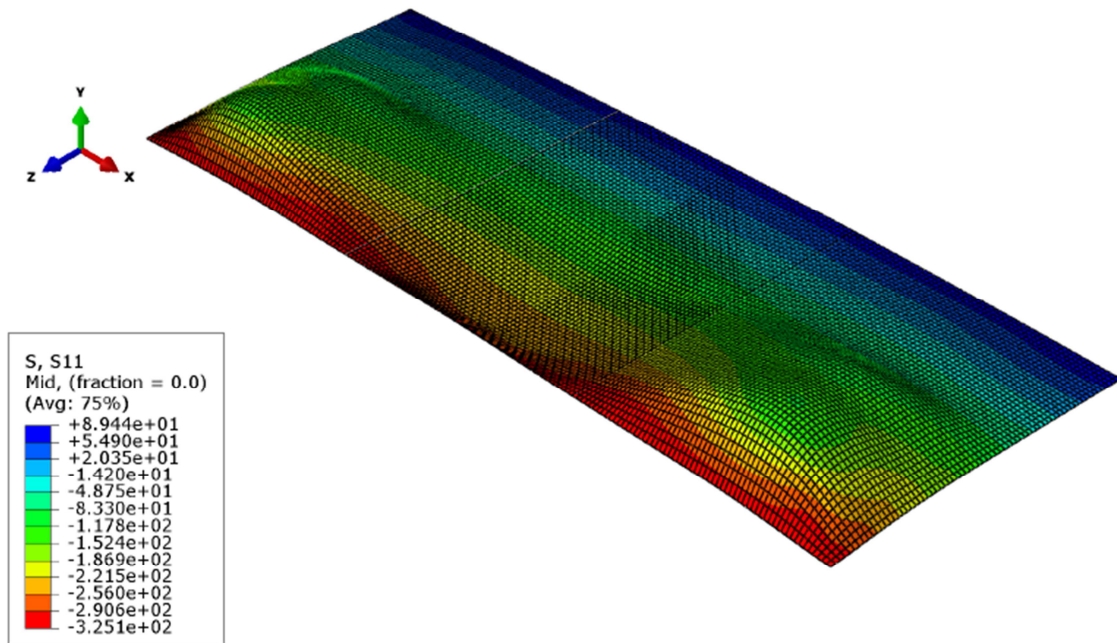


Abb. A - C-17: S6 Var-A – Traglastzustand - Spannungen im Stegblech in Längsrichtung

C.4 System S6, Var-B

C.4.1 Belastung

Beim System S6, Var-B erfolgt die Belastung, wegen der starren Kopplung der vertikalen Ränder, über Knotenverdrehungen der Referenzpunkte. Über die bereits bekannten Verschiebungen in x-Richtung ergibt sich die Größe der Verdrehung, wobei diese nur für die lineare Beulanalyse von Bedeutung ist (hier muss ein bestimmtes Spannungsniveau erzielt werden). Im Zuge der GMNIA-Berechnung wird eine weitaus größere Verdrehung als notwendig aufgebracht. Das Moment um die y-Achse (RM2) wird über die Belastungszeit am Referenzpunkt abgelesen und das maximale auftretende Moment entspricht der Momententragfähigkeit. Eine Übersicht der Belastungsansätze ist in Tab. C-9 zu finden.

Tab. C-9: Übersicht der Belastungsansätze (Referenzlastniveau)

	Spannungsniveau	Knotenverdrehung
	[N/mm ²]	[rad]
LA	$\sigma_o = 44,4$ $\sigma_u = -177,5$	0,00136
LBA	$\sigma_o = 2,5$ $\sigma_u = -10$	0,0000764
GMNIA	- -	0,005 (mehr als 2x höher)

C.4.2 Lineare Analyse

In Abb. C-18 sind die Spannungen in Längsrichtung zu sehen. Zur übersichtlicheren Darstellung ist nur das Stegblech ohne Längs- und Quersteifen sowie ohne Unter- und Obergurte zu sehen.

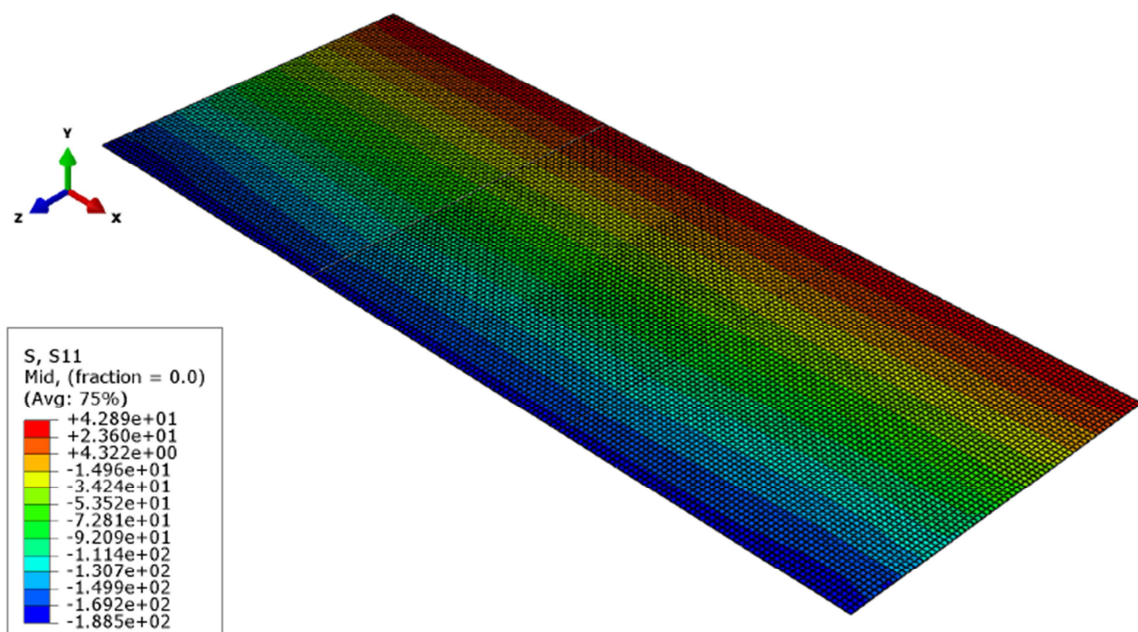


Abb. C-18: S6 Var-B – Lineare Analyse – Spannungen in Längsrichtung

C.4.3 LBA-Berechnung

Die Eigenwerte der linearen Beulanalyse werden in Tab. C-10 zusammengefasst. Die Eigenformen werden in Abb. C-19 und Abb. C-20 dargestellt.

Tab. C-10: Eigenwerte S6 Var-B

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform
1	57,438	global
8	79,302	lokal

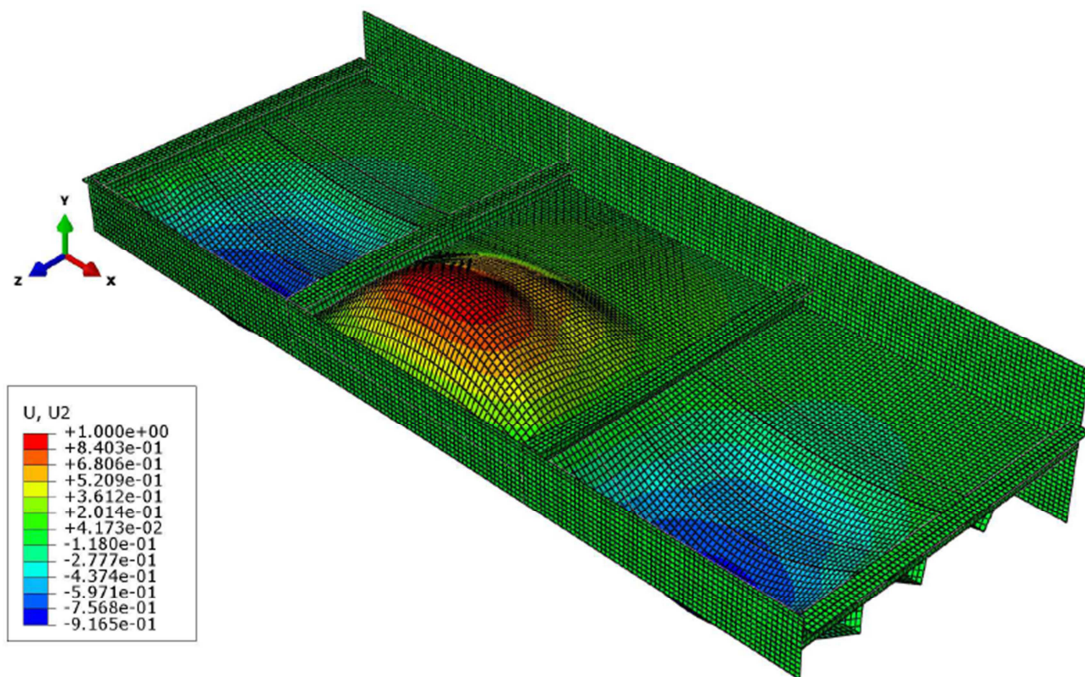


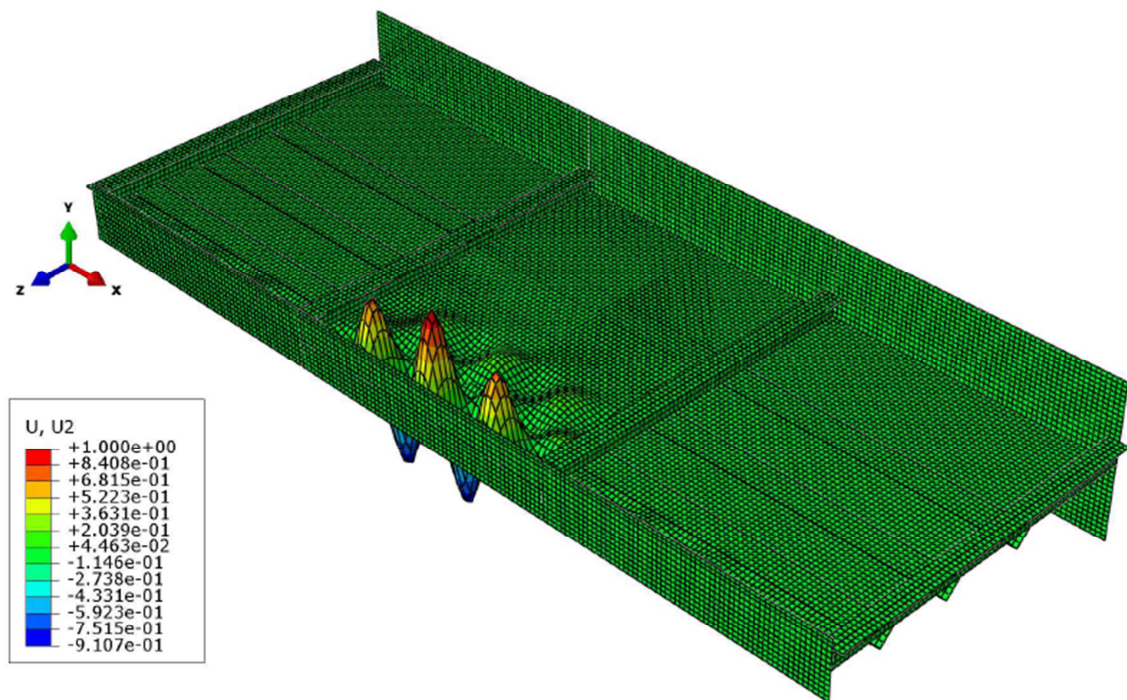
Abb. C-19: S6 Var-B globale Eigenform ($\phi_{cr} = 57,438$)

Folgende Werte ergeben sich für das Gesamtfeld:

$$\sigma_{cr,p} = 57,438 \cdot 10 = 574,4 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{E,GF} = 190\,000 \cdot \left(\frac{12}{3500}\right)^2 = 2,2 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$k_{\sigma,p} = 574,38 / 2,23 = 257,57 \text{ [-]}$$


 Abb. C-20: S6 Var-B lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 79,302$)

Folgende Werte ergeben sich für das Einzelfeld 4:

$$\sigma_{cr,p} = 79,302 \cdot 10 = 793,0 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_{E,EF} = 190\,000 \cdot \left(\frac{12}{424}\right)^2 = 152,2 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$k_{\sigma,p} = \frac{793,02}{152,19} = 5,21 \text{ [-]}$$

$$k_{\sigma,p}^* = 4,32 \text{ [-]}$$

Die Imperfektionen werden wie folgt angesetzt:

$$\text{Globaler SF} = -1,0 \cdot \frac{3000}{400} = -7,5$$

$$\text{Lokaler SF} = 0,7 \cdot \frac{424}{200} = 1,48$$

Tab. C-11: S6 Var-B Übersicht der Imperfektionen

Nr.	Imperfektion	Eigenform	SF
1	-1,0	global	-7,5
8	+0,7	lokal	1,48

C.4.4 GMNIA-Berechnung

Bei Variante B wird nicht der LSF sondern das Verhältnis des aufgetragenen Moments ($RM2$) zur elastischen Momententragfähigkeit ($M_{el,R}$) abgelesen. Die numerische Traglastanalyse ergibt folgendes maximal mögliches Verhältnis:

$$RM2/M_{el,R} = 1,00$$

Die Abb. C-21 zeigt die Verschiebungen aus der Ebene im Traglastzustand. Die maximale Verformung ist im Beobachtungsfeld zu finden.

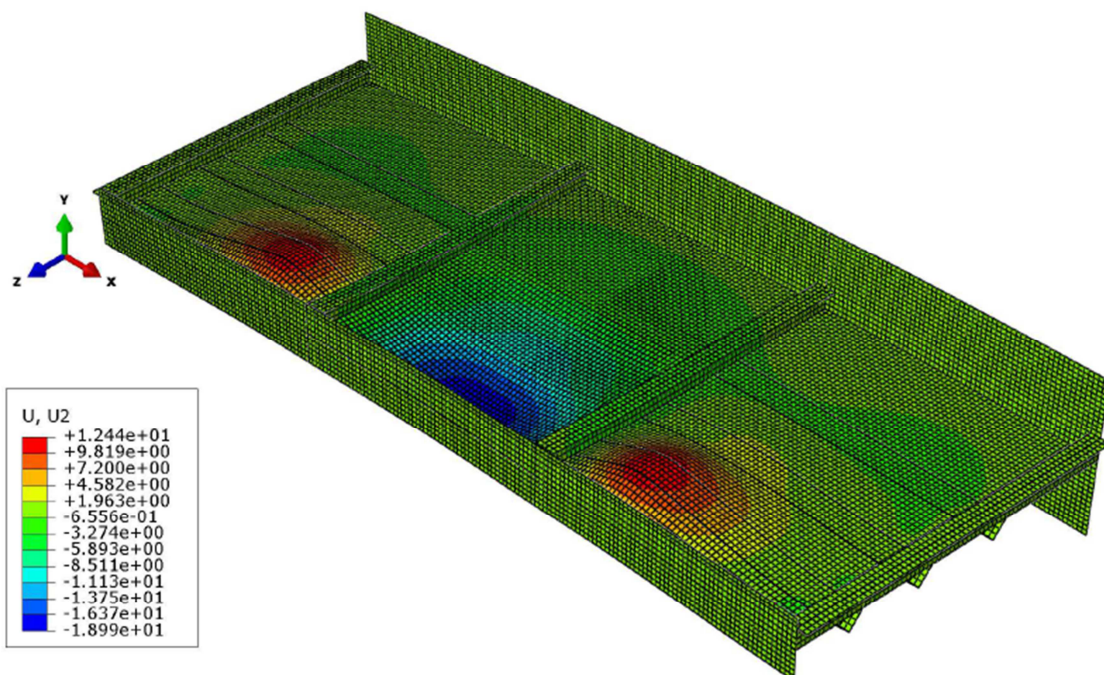


Abb. C-21: S6 Var-B bei Erreichen der Tragfähigkeit

In Abb. C-22 sind die Spannungen in Längsrichtung im Traglastzustand zu finden. Zur übersichtlicheren Darstellung ist nur das Stegblech ohne Längs- und Quersteifen sowie ohne Unter- und Obergurte zu sehen. Die maximale Druckspannungen befinden sich entlang des Randes zum Untergurt hin.

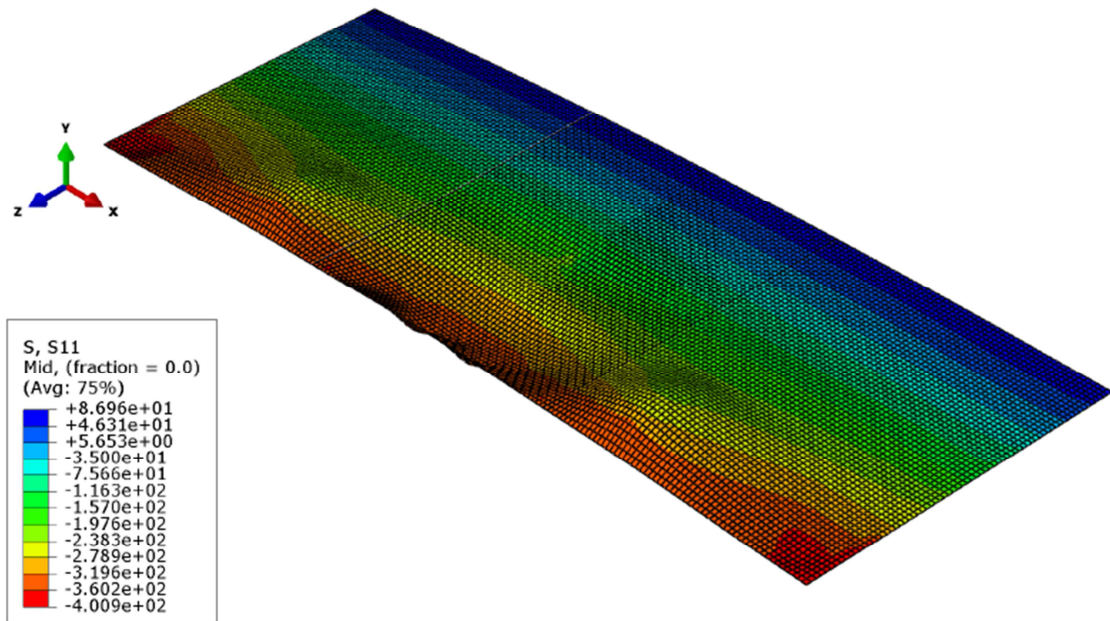


Abb. C-22: S6 Var-B – Traglastzustand - Spannungen im Stegblech in Längsrichtung

C.5 System S6, Var-C

Auf den folgenden Seiten sind die Eingabeparameter sowie die Ergebnisse der numerischen Berechnung zu finden. Der Skalierfaktor der Abbildungen aus der LBA beträgt 350 und aus der GMNIA 10.

C.5.1 Lastfall 1 – 100% M + 0% V

C.5.1.1 Belastung

Das Biegemoment wird als Einzelmoment am Referenzpunkt, wegen der starren Kopplung am vertikalen Rand, und der Schub wird als Linienlast entlang des Steges aufgebracht. In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-12: S6 Var-C Fall 1 Referenzbelastungen

	M	V
	[Nmm]	[N/mm]
LBA	9,32E+09 (10%)	-
GMNIA	1,86E+11 (200%)	-

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.5.1.2 LBA-Berechnung

Die Eigenwerte werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tab. C-13: S6 Var-C Fall 1 Eigenwerte

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform
1	17,162	global
2	21,111	lokal

Die Imperfektionen werden wie folgt angesetzt:

$$\text{Globaler SF} = -1,0 \cdot \frac{3000}{400} = -7,5$$

$$\text{Lokaler SF} = 0,7 \cdot \frac{424}{200} = 1,48$$

Tab. C-14: S6 Var-C Fall1 Übersicht der Imperfektionen

Nr.	Imperfektion	Eigenform	SF
1	-1,0	global	-7,5
2	+0,7	lokal	1,48

Die globale und lokale Eigenform wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

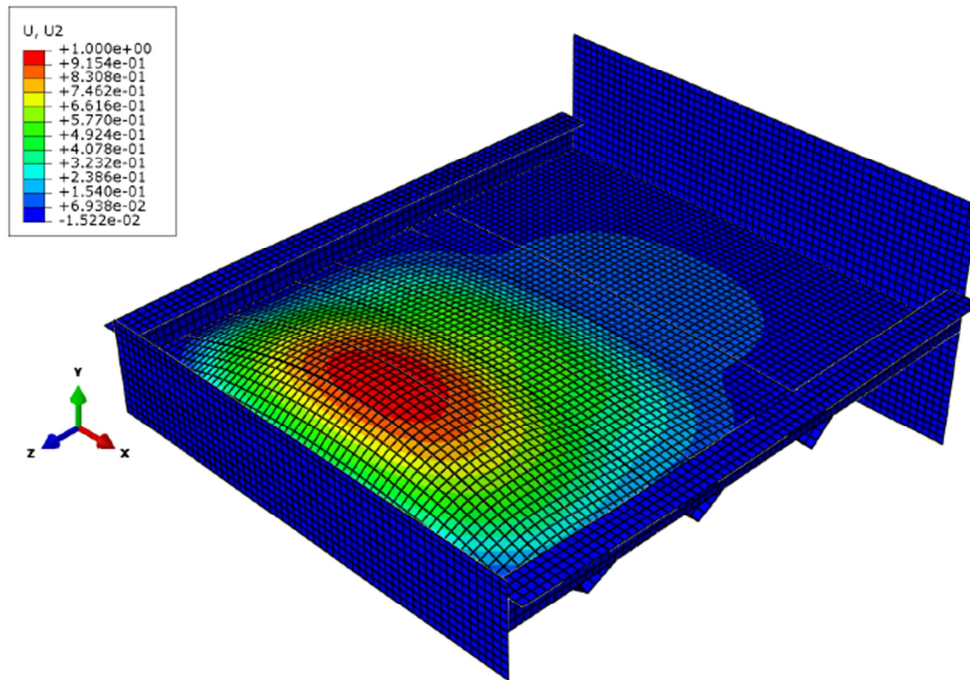


Abb. C-23: S6 Var-C Fall 1 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 17,162$)

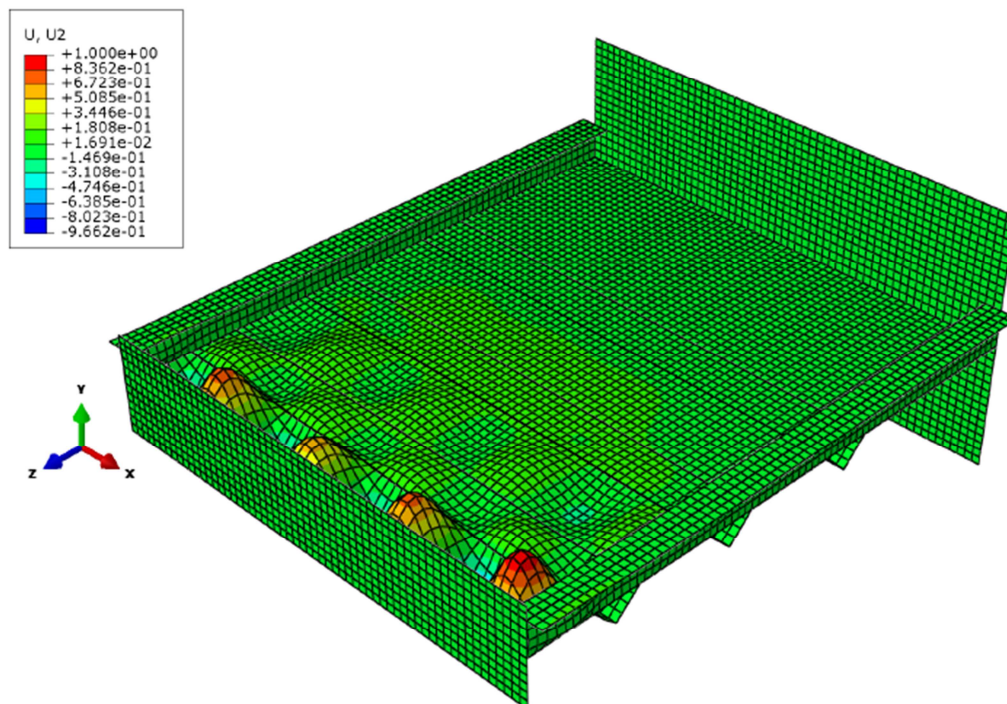


Abb. C-24: S6 Var-C Fall 1 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 21,111$)

C.5.1.3 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,481. Bezogen auf die angesetzte Last, kann der Querschnitt 96% der elastischen Momententragfähigkeit aufnehmen.

$$M_u = 8,97E+10 \text{ Nmm} \cong \mathbf{0,96} M_{el,R}$$

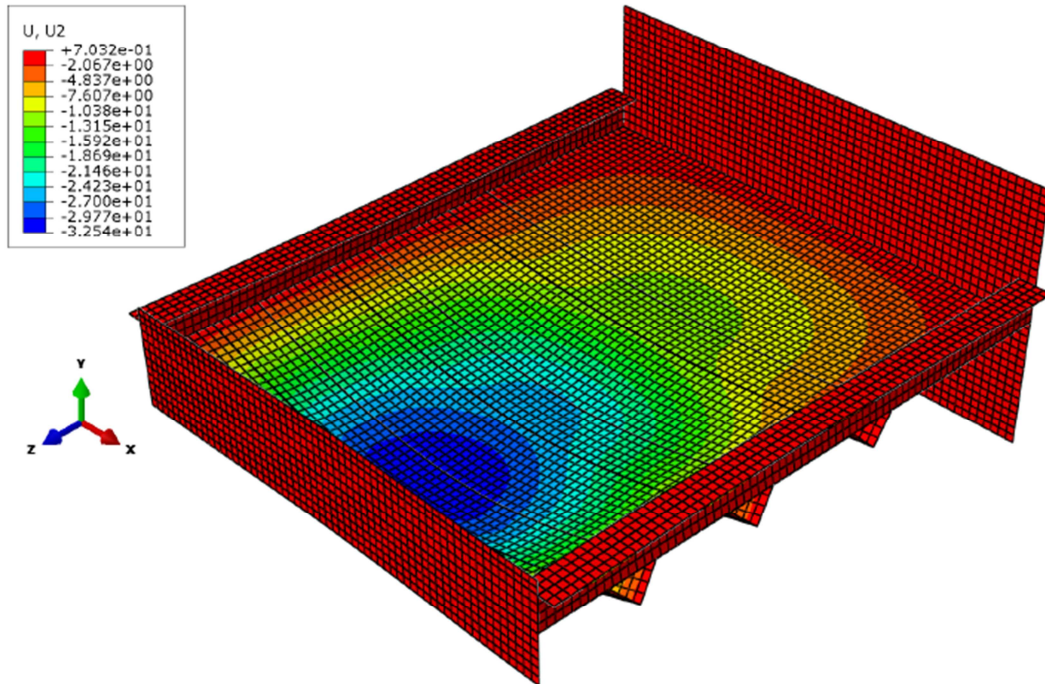


Abb. C-25: S6 Var-C Fall 1 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

C.5.2 Lastfall 2 – 0% M + 100% V

C.5.2.1 Belastung

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-15: S6 Var-C Fall 2 Referenzbelastungen

	M	V
	[Nmm]	[N/mm]
LBA	-	246 (10%)
GMNIA	-	4919 (200%)

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.5.2.2 LBA-Berechnung

In der folgenden Tabelle ist der Eigenwert mit dem zugehörigen Skalierfaktor ersichtlich.

Tab. C-16: S6 Var-C Fall 2 Eigenwert & Imperfektion

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform	Imperfektion	SF
1	7,101	lokal (Schub)	1,0	5,66

$$\text{Lokaler SF (Schub)} = 1,0 \cdot \frac{1132}{200} = 5,66$$

Das Schubbeulen wird in der folgenden Abbildung dargestellt.

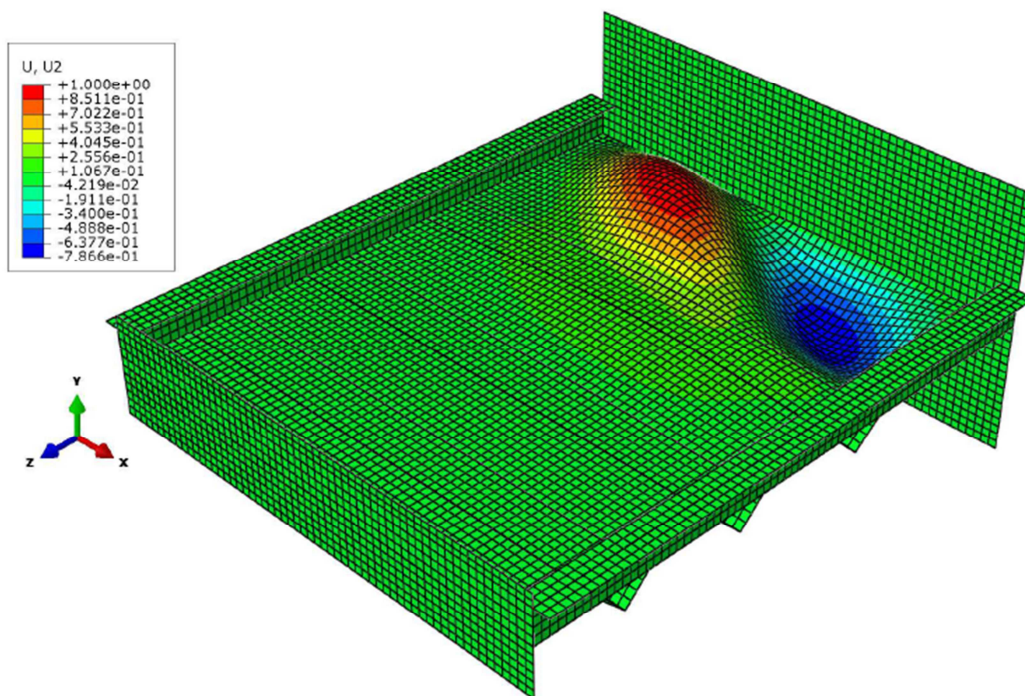


Abb. C-26: S6 Var-C Fall 2 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 7,101$)

C.5.2.3 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,469. Bezogen auf die angesetzte Last, kann der Querschnitt 94% der elastischen Schubtragfähigkeit aufnehmen.

$$V_u = 8,07E+6 \text{ Nmm} \triangleq \mathbf{0,94} V_{el,R}$$

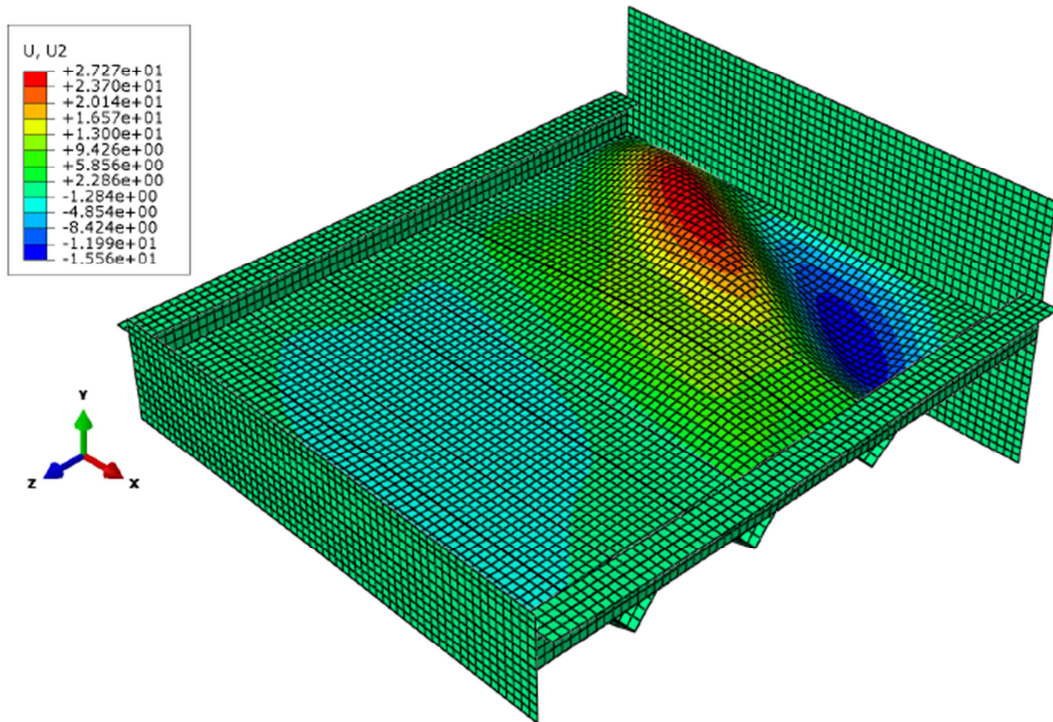


Abb. C-27: S6 Var-C Fall 2 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

C.5.3 Lastfall 3 – 25% M + 100% V

C.5.3.1 Belastung

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-17: S6 Var-C Fall 3 Referenzbelastungen

	M	V
	[Nmm]	[N/mm]
LBA	2,33E+09 (2,5%)	246 (10%)
GMNIA	4,66E+10 (50%)	4919 (200%)

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.5.3.2 LBA-Berechnung

In der folgenden Tabelle sind die Eigenwerte mit den zugehörigen Skalierfaktoren ersichtlich.

Tab. C-18: S6 Var-C Fall 3 Eigenwerte & Imperfektionen

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform	Imperfektion	SF
1	7,010	lokal (Schub)	0,7	3,962
13	18,240	global	-1,0	-7,5

Die globale und lokale Eigenform wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

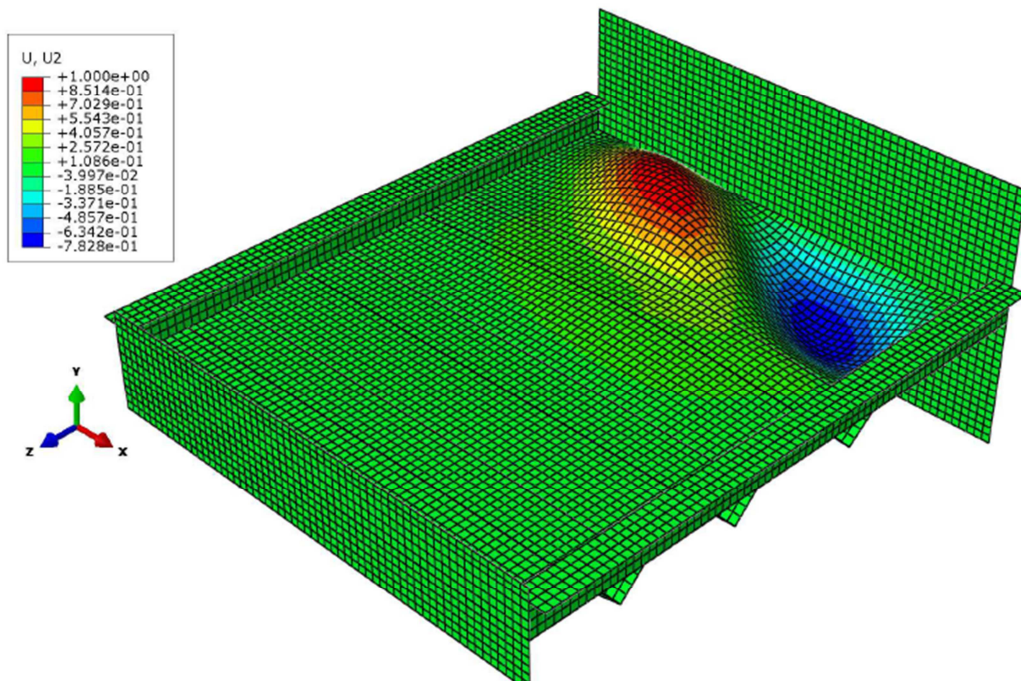


Abb. C-28: S6 Var-C Fall 3 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 7,010$)

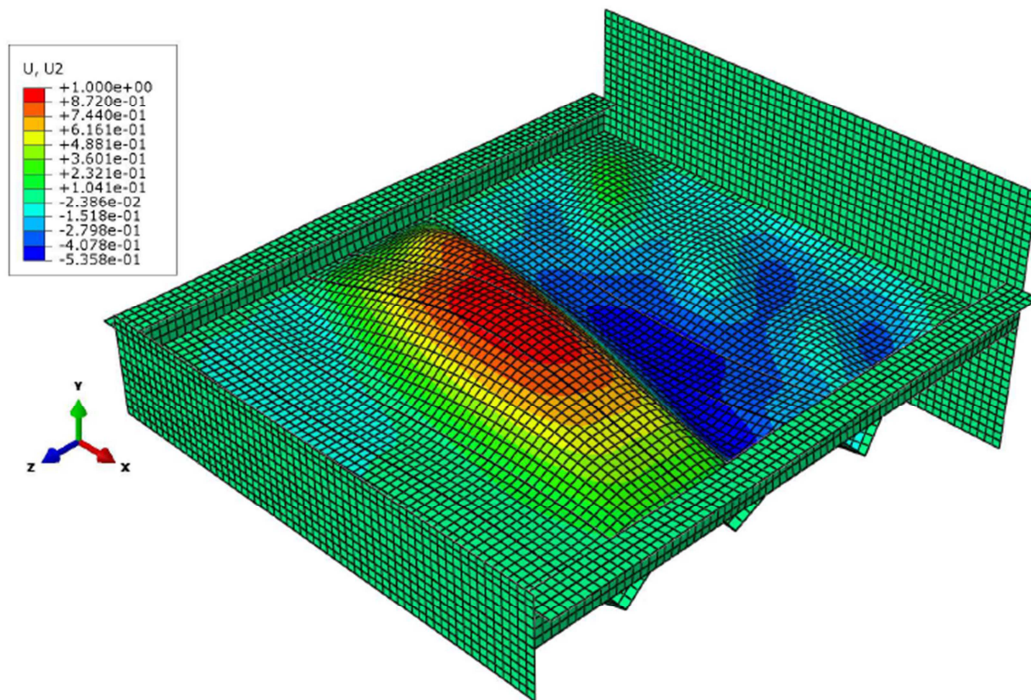


Abb. C-29: S6 Var-C Fall 3 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 18,240$)

C.5.3.3 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,452.

$$M_u = 2,11E+10 \text{ Nmm} \cong \mathbf{0,23} M_{el,R}$$

$$V_u = 7,78E+6 \text{ Nmm} \cong \mathbf{0,90} V_{el,R}$$

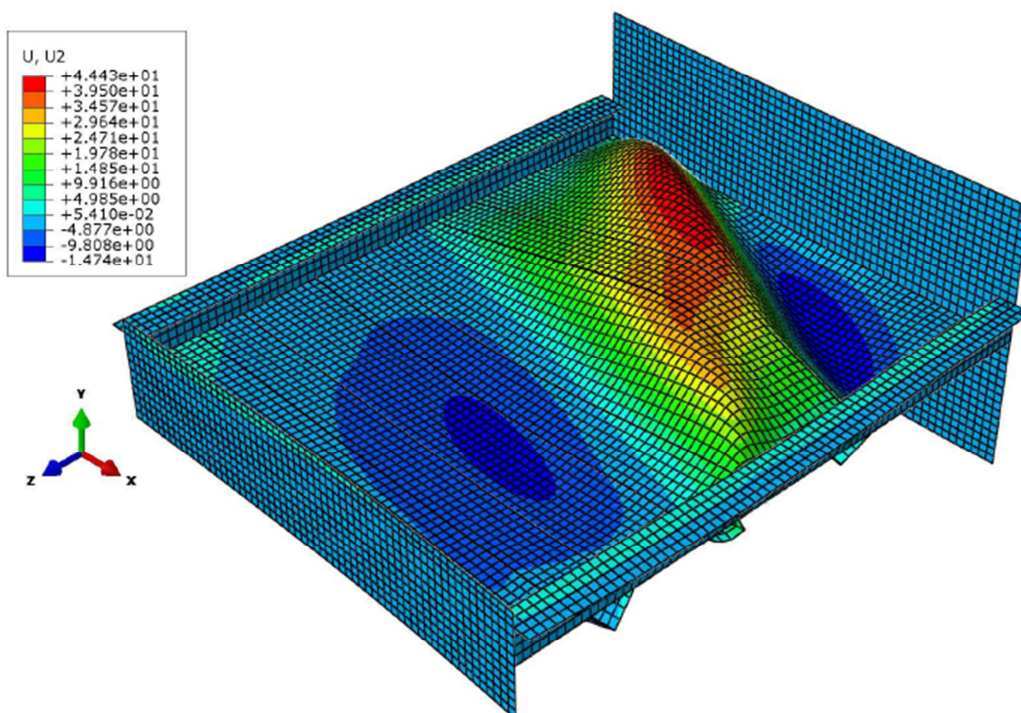


Abb. C-30: : S6 Var-C Fall 3 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

C.5.4 Lastfall 4 – 50% M + 100% V

C.5.4.1 Belastung

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-19: S6 Var-C Fall 4 Referenzbelastungen

	M	V
	[Nmm]	[N/mm]
LBA	4,66E+09 (5%)	246 (10%)
GMNIA	9,32E+10 (100%)	4919 (200%)

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.5.4.2 LBA-Berechnung

In der folgenden Tabelle sind die Eigenwerte mit den zugehörigen Skalierfaktoren ersichtlich.

Tab. C-20: S6 Var-C Fall 4 Eigenwerte & Imperfektionen

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform	Imperfektion	SF
1	6,915	lokal (Schub)	0,7	3,962
13	16,365	global	-1,0	-7,5

Die globale und lokale Eigenform wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

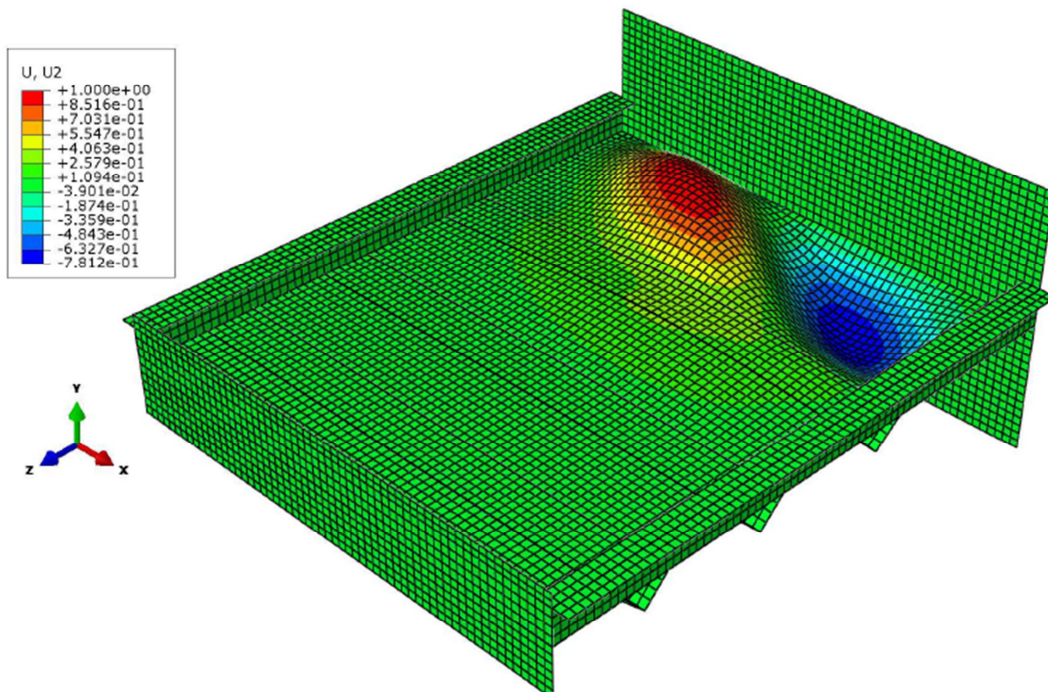


Abb. C-31: S6 Var-C Fall 4 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 6,915$)

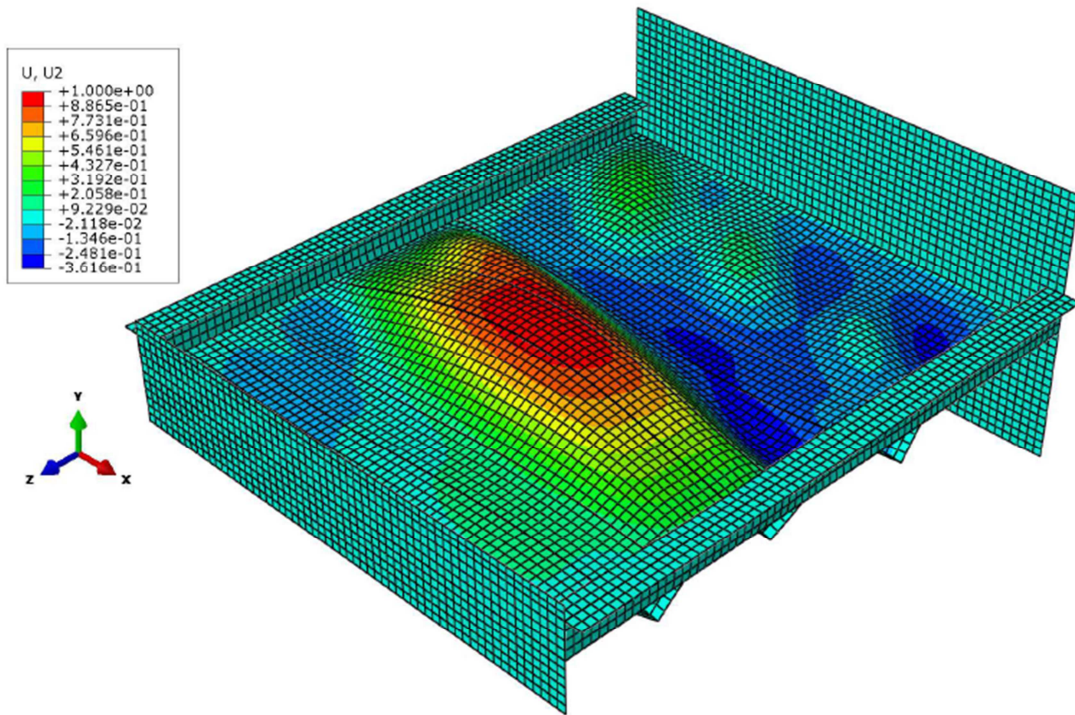


Abb. C-32: S6 Var-C Fall 4 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 16,365$)

C.5.4.3 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,445.

$$M_u = 4,15E+10 \text{ Nmm} \cong \mathbf{0,45} M_{el,R}$$

$$V_u = 7,66E+6 \text{ Nmm} \cong \mathbf{0,89} V_{el,R}$$

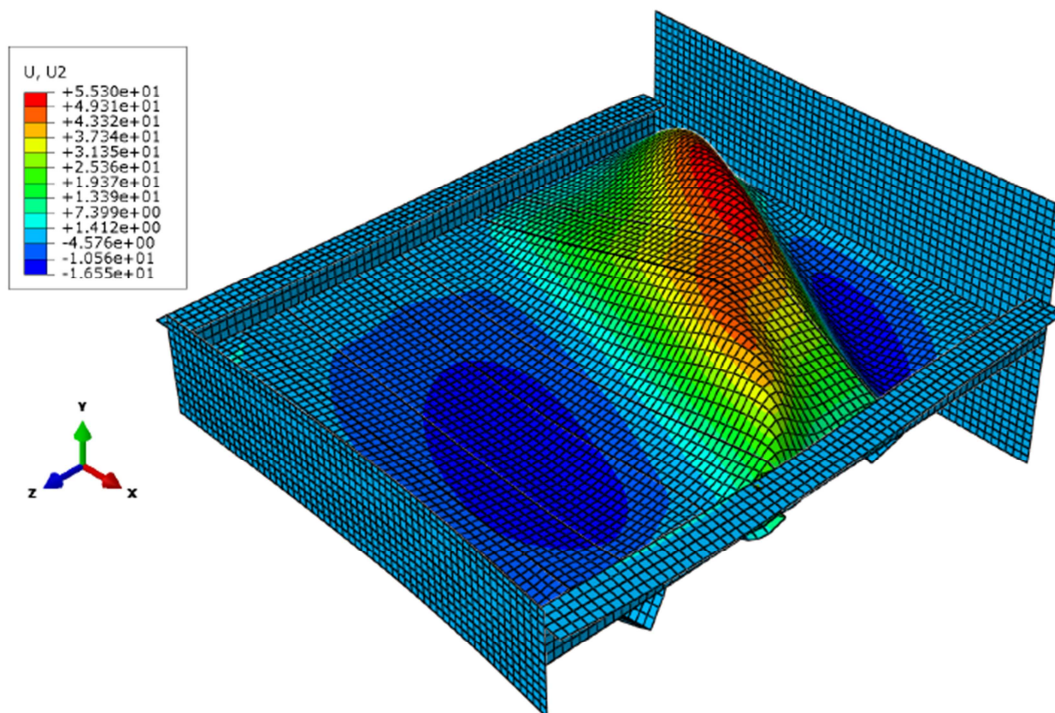


Abb. C-33: S6 Var-C Fall 4 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

C.5.5 Lastfall 5 – 75% M + 100% V

C.5.5.1 Belastung

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-21: S6 Var-C Fall 5 Referenzbelastungen

	M	V
	[Nmm]	[N/mm]
LBA	6,99E+09 (7,5%)	246 (10%)
GMNIA	1,40E+11 (150%)	4919 (200%)

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.5.5.2 LBA-Berechnung

In der folgenden Tabelle sind die Eigenwerte mit den zugehörigen Skalierfaktoren ersichtlich.

Tab. C-22: S6 Var-C Fall 5 Eigenwerte & Imperfektionen

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform	Imperfektion	SF
1	6,819	lokal (Schub)	0,7	3,962
10	14,020	global	-1,0	-7,5

Die globale und lokale Eigenform wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

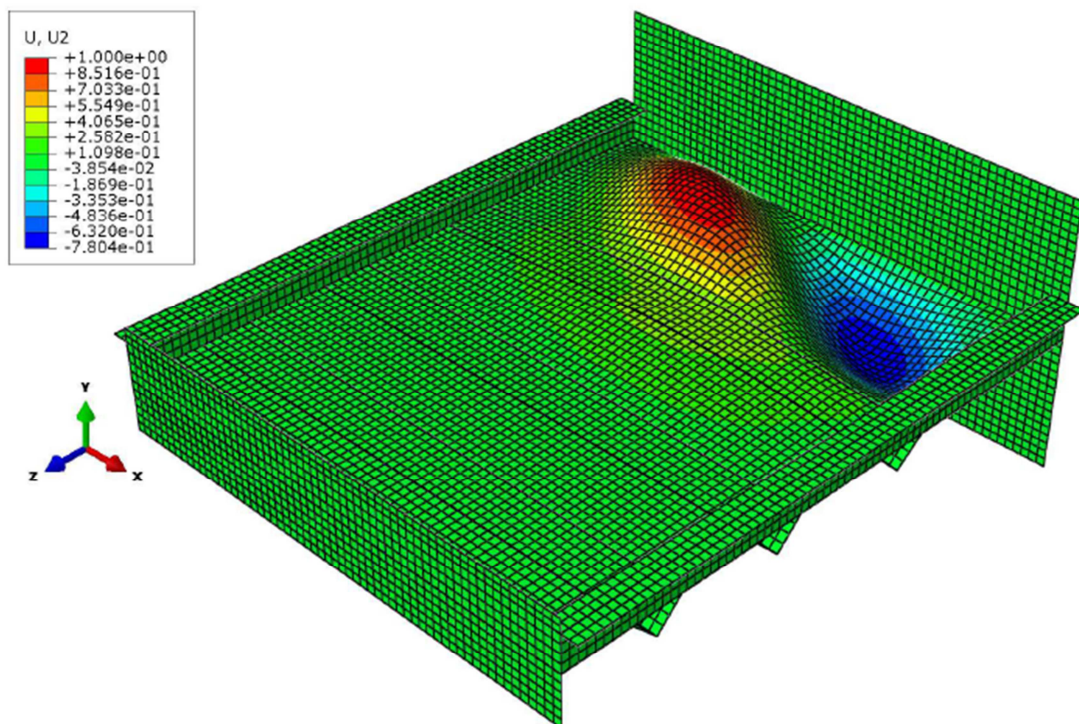


Abb. C-34: S6 Var-C Fall 5 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 6,819$)

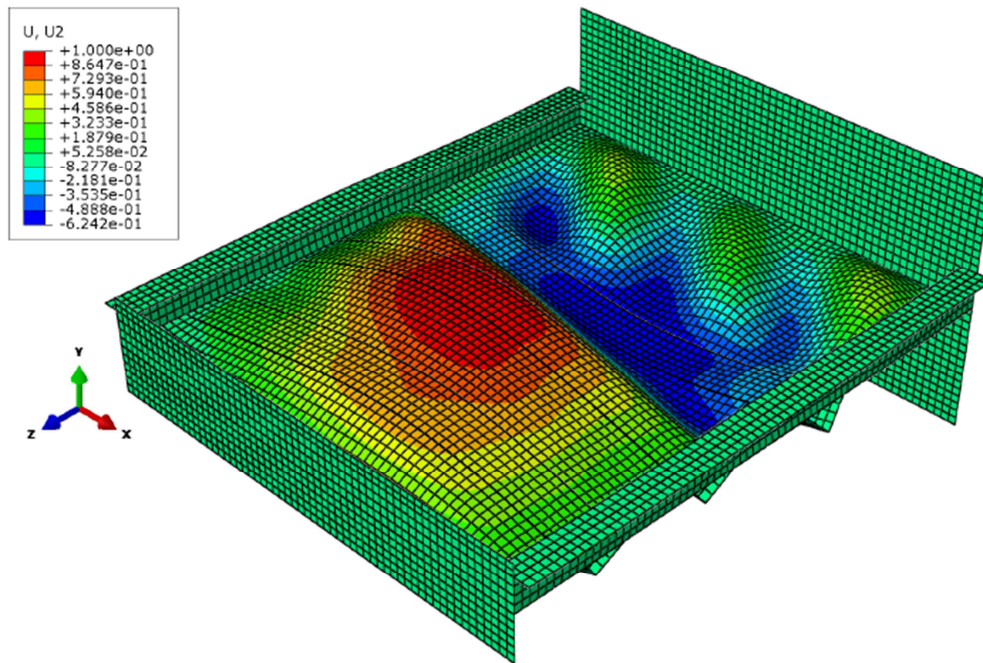


Abb. C-35: S6 Var-C Fall 5 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 14,020$)

C.5.5.3 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,435.

$$M_u = 6,08E+10 \text{ Nmm} \cong \mathbf{0,65} M_{el,R}$$

$$V_u = 7,49E+6 \text{ Nmm} \cong \mathbf{0,87} V_{el,R}$$

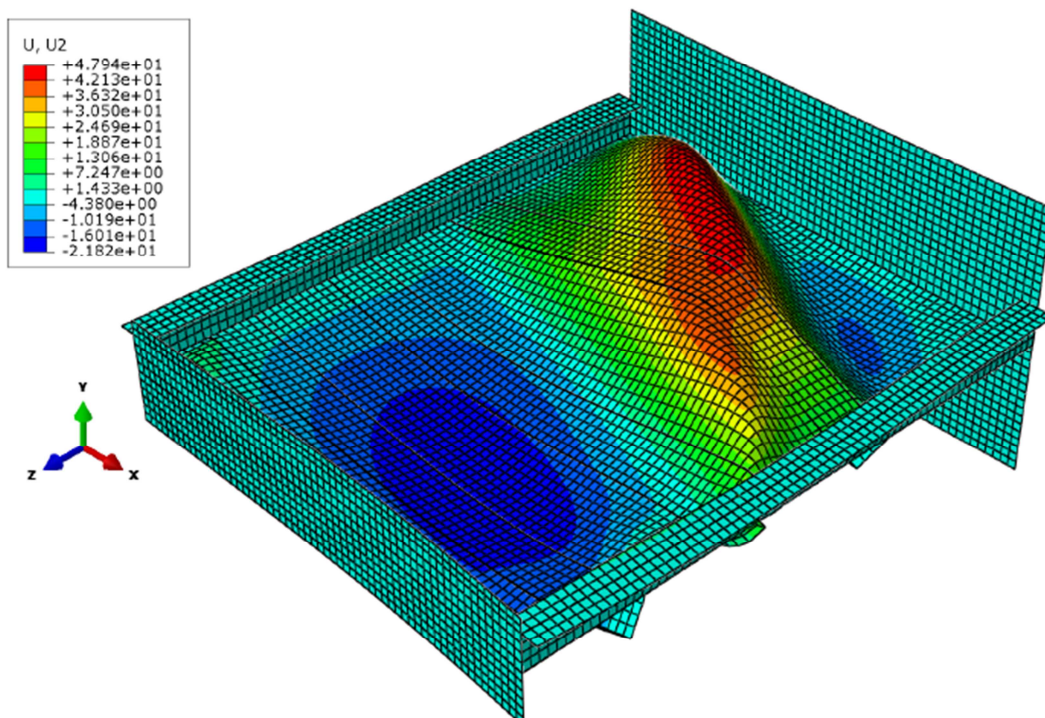


Abb. C-36: S6 Var-C Fall 5 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

C.5.6 Lastfall 6 – 100% M + 100% V

C.5.6.1 Belastung

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-23: S6 Var-C Fall 6 Referenzbelastungen

	M	V
	[Nmm]	[N/mm]
LBA	9,32E+09 (10%)	246 (10%)
GMNIA	1,86E+11 (200%)	4919 (200%)

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.5.6.2 LBA-Berechnung

In der folgenden Tabelle sind die Eigenwerte mit den zugehörigen Skalierfaktoren ersichtlich.

Tab. C-24: S6 Var-C Fall 6 Eigenwerte & Imperfektionen

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform	Imperfektion	SF
1	6,721	lokal (Schub)	0,7	3,962
9	12,340	global	-1,0	-7,5

Die globale und lokale Eigenform wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

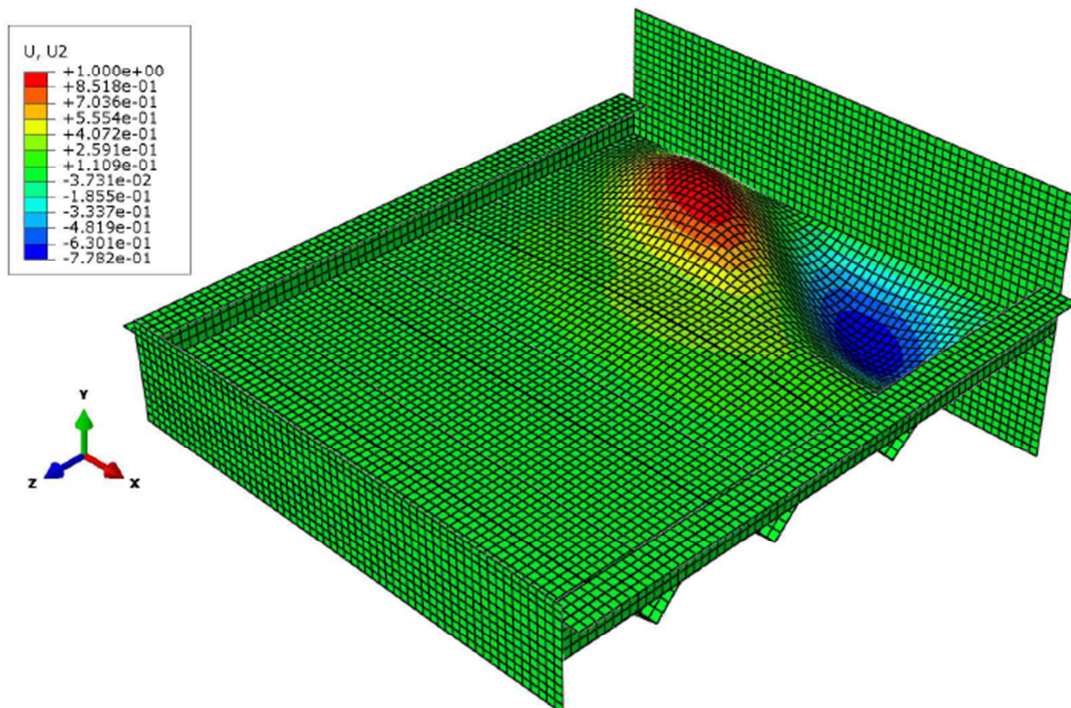
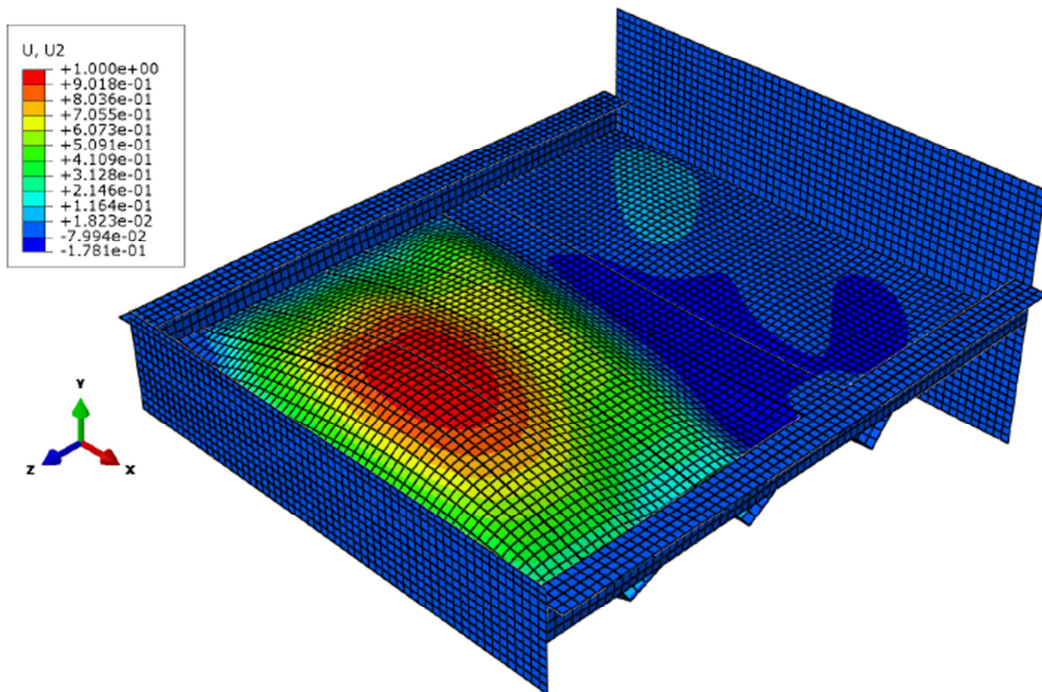


Abb. C-37: S6 Var-C Fall 6 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 6,721$)


 Abb. C-38: S6 Var-C Fall 6 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 12,340$)

C.5.6.3 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,388.

$$M_u = 7,23E+10 \text{ Nmm} \cong \mathbf{0,78} M_{el,R}$$

$$V_u = 6,68E+6 \text{ Nmm} \cong \mathbf{0,78} V_{el,R}$$

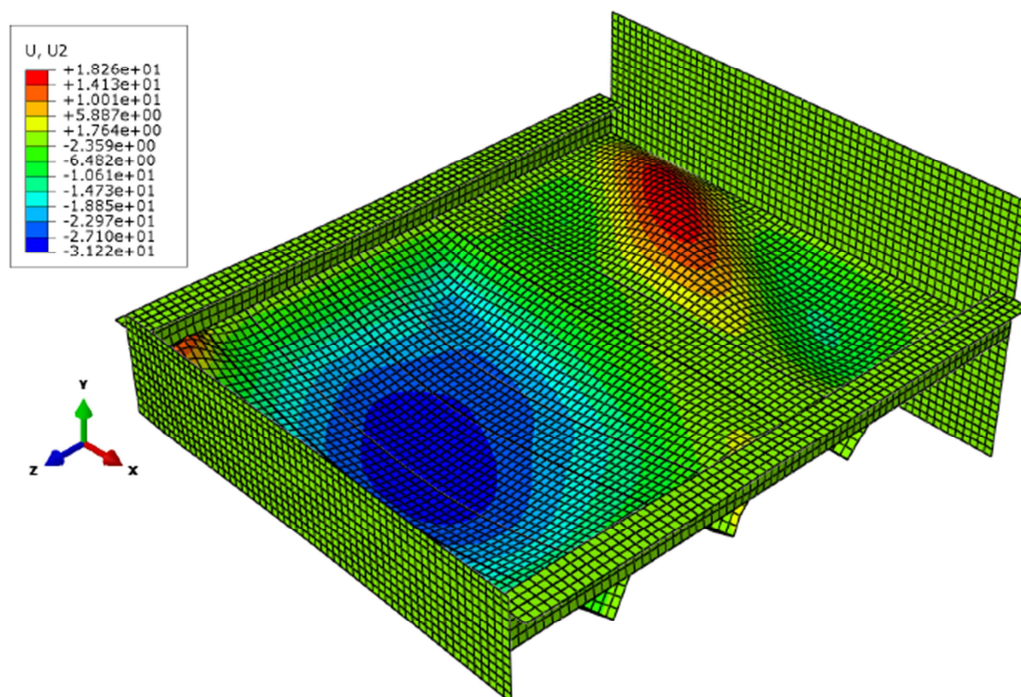


Abb. C-39: S6 Var-C Fall 6 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

C.5.7 Lastfall 7 – 100% M + 75% V

C.5.7.1 Belastung

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-25: S6 Var-C Fall 7 Referenzbelastungen

	M	V
	[Nmm]	[N/mm]
LBA	9,32E+09 (10%)	184,5 (7,5%)
GMNIA	1,86E+11 (200%)	3689,3 (150%)

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.5.7.2 LBA-Berechnung

In der folgenden Tabelle sind die Eigenwerte mit den zugehörigen Skalierfaktoren ersichtlich.

Tab. C-26: S6 Var-C Fall 7 Eigenwerte & Imperfektionen

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform	Imperfektion	SF
1	8,783	lokal (Schub)	0,7	3,962
8	13,686	global	-1,0	-7,5

Die globale und lokale Eigenform wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

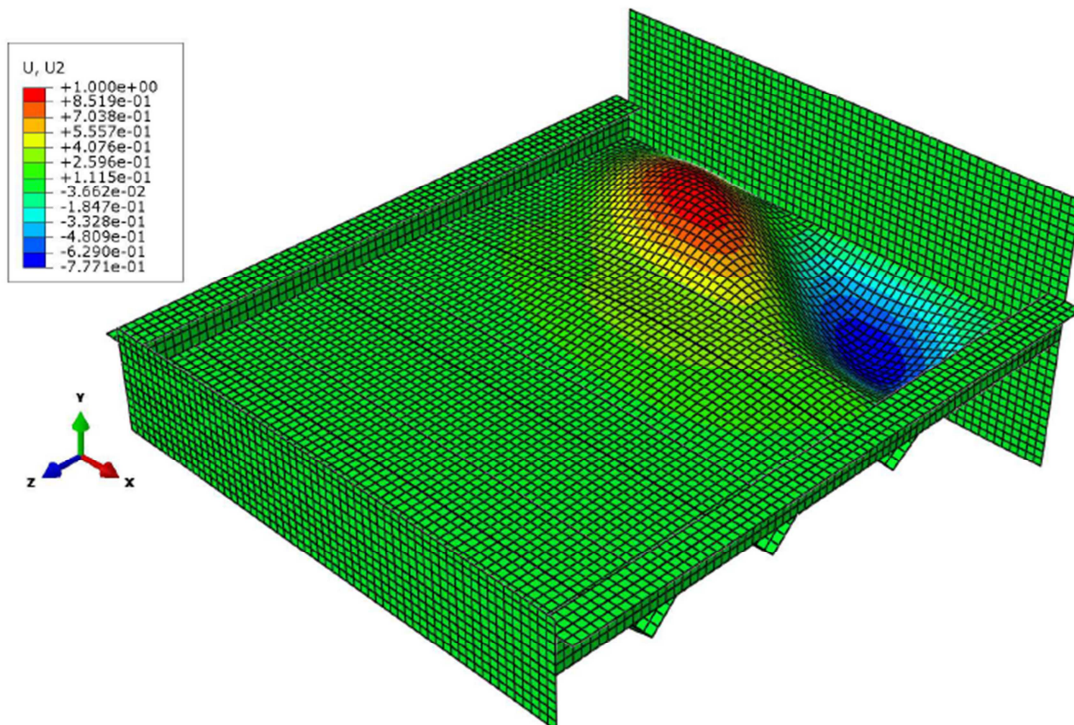


Abb. C-40: S6 Var-C Fall 7 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 8,783$)

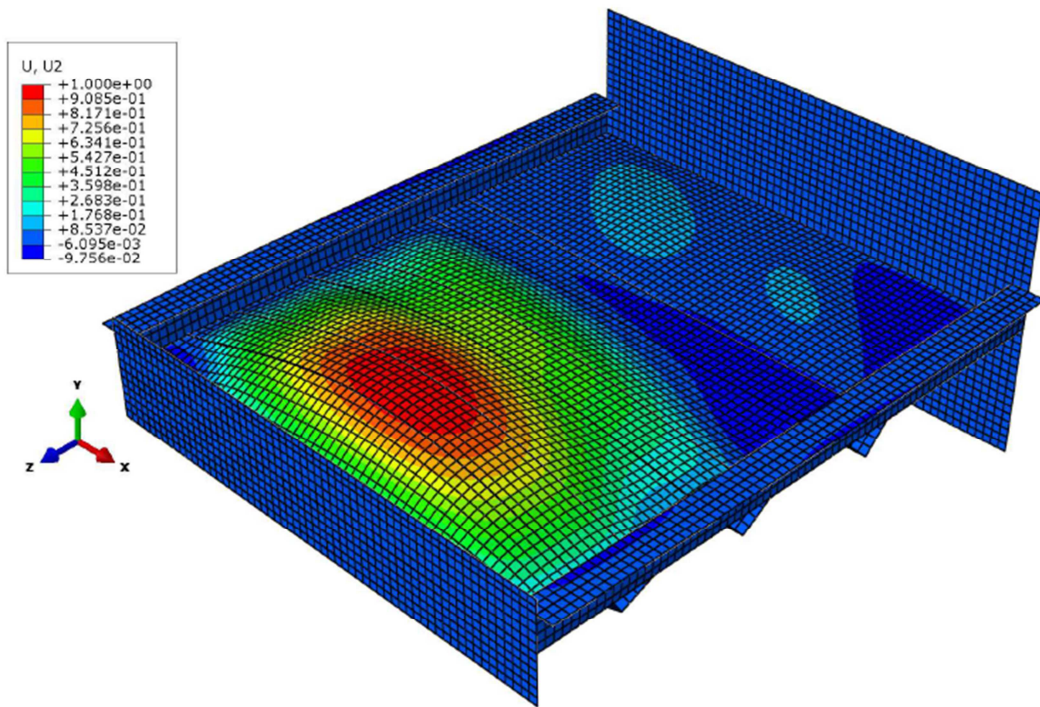


Abb. C-41: S6 Var-C Fall 7 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 13,686$)

C.5.7.3 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,419.

$$M_u = 7,81E+10 \text{ Nmm} \cong \mathbf{0,84} M_{el,R}$$

$$V_u = 5,41E+6 \text{ Nmm} \cong \mathbf{0,63} V_{el,R}$$

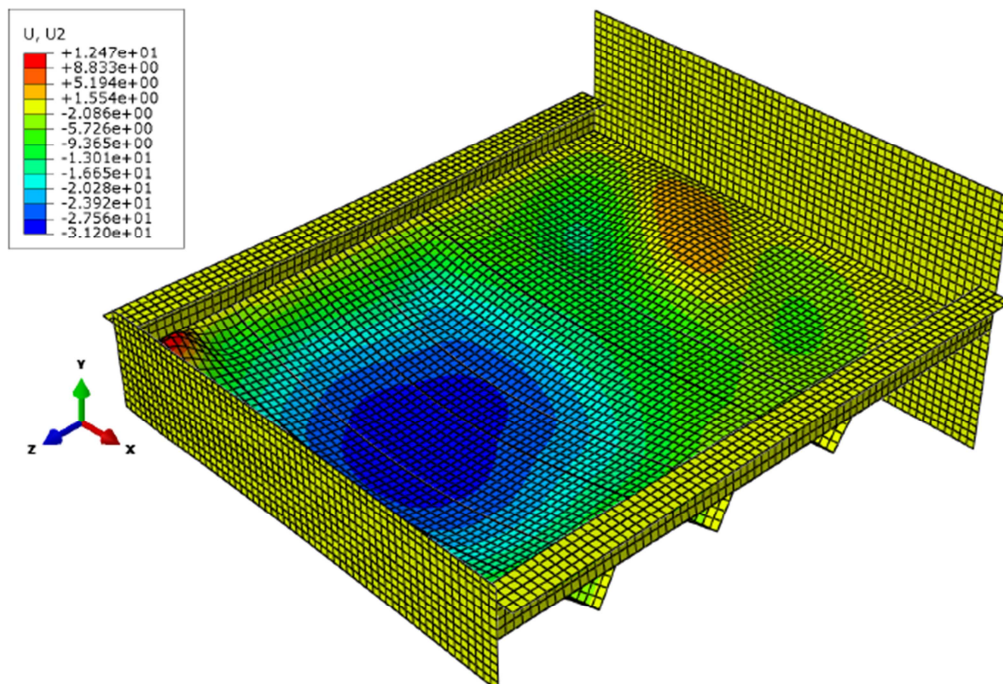


Abb. C-42: S6 Var-C Fall 7 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

C.5.8 Lastfall 8 – 100% M + 50% V

C.5.8.1 Belastung

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-27: S6 Var-C Fall 8 Referenzbelastungen

	M	V
	[Nmm]	[N/mm]
LBA	9,32E+09 (10%)	123 (5%)
GMNIA	1,86E+11 (200%)	2459,5 (100%)

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.5.8.2 LBA-Berechnung

In der folgenden Tabelle sind die Eigenwerte mit den zugehörigen Skalierfaktoren ersichtlich.

Tab. C-28: S6 Var-C Fall 8 Eigenwerte & Imperfektionen

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform	Imperfektion	SF
1	12,624	lokal (Schub)	0,7	3,962
3	15,051	global	-1,0	-7,5

Die globale und lokale Eigenform wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

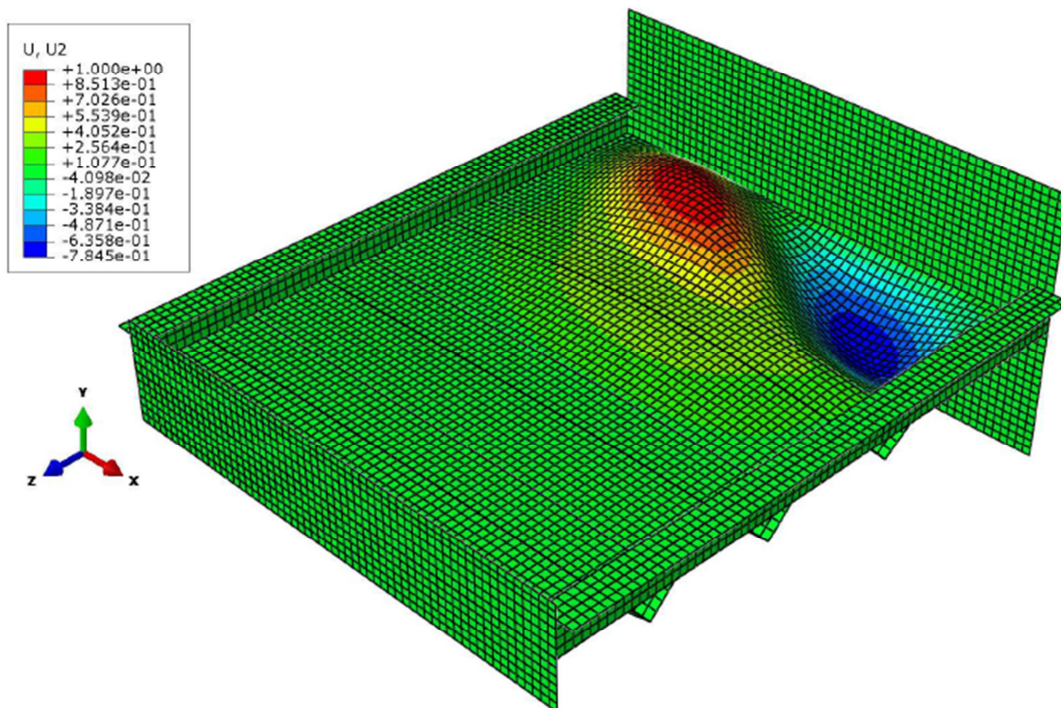


Abb. C-43: S6 Var-C Fall 8 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 12,624$)

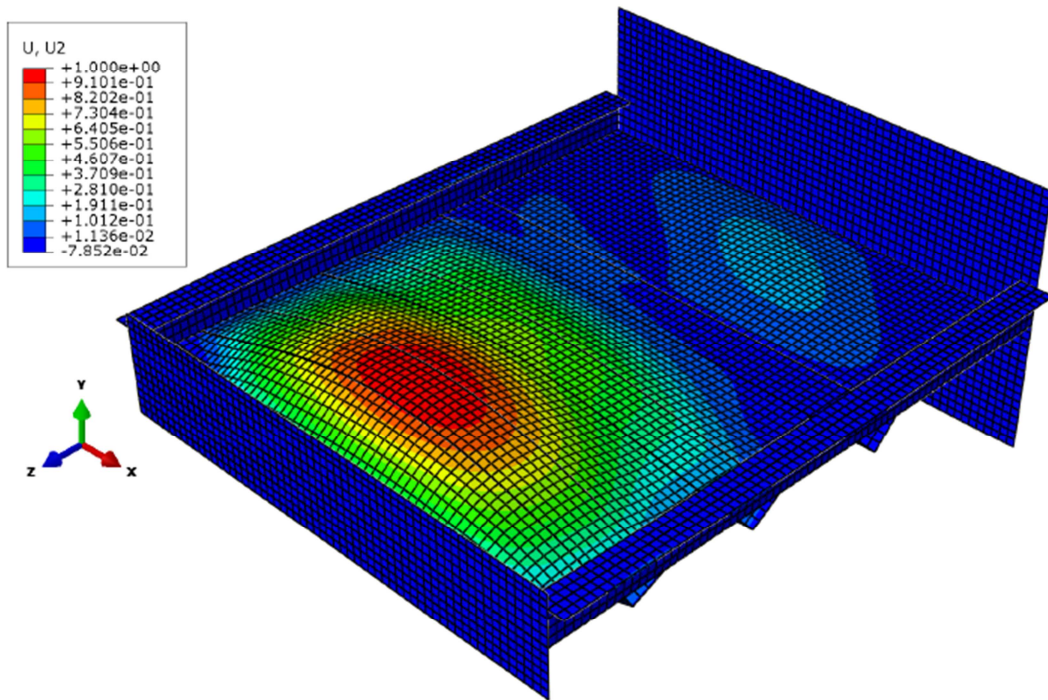


Abb. C-44: S6 Var-C Fall 8 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 15,051$)

C.5.8.3 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,445.

$$M_u = 8,30E+10 \text{ Nmm} \cong \mathbf{0,89} M_{el,R}$$

$$V_u = 3,83E+6 \text{ Nmm} \cong \mathbf{0,45} V_{el,R}$$

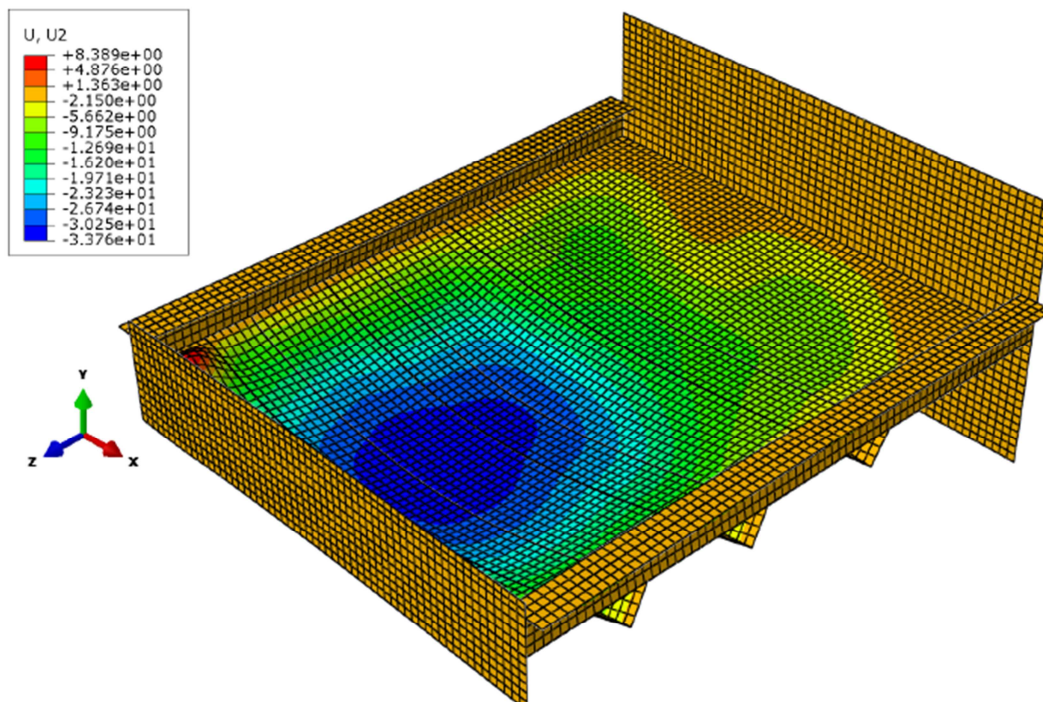


Abb. C-45: S6 Var-C Fall 8 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

C.5.9 Lastfall 9 – 100% M + 25% V

C.5.9.1 Belastung

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-29: S6 Var-C Fall 9 Referenzbelastungen

	M	V
	[Nmm]	[N/mm]
LBA	9,32E+09 (10%)	61,5 (2,5%)
GMNIA	1,86E+11 (200%)	1229,8 (50%)

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.5.9.2 LBA-Berechnung

In der folgenden Tabelle sind die Eigenwerte mit den zugehörigen Skalierfaktoren ersichtlich.

Tab. C-30: S6 Var-C Fall 9 Eigenwerte & Imperfektionen

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform	Imperfektion	SF
1	16,275	global	-1,0	-7,5
2	19,685	lokal	0,7	1,48

Die globale und lokale Eigenform wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

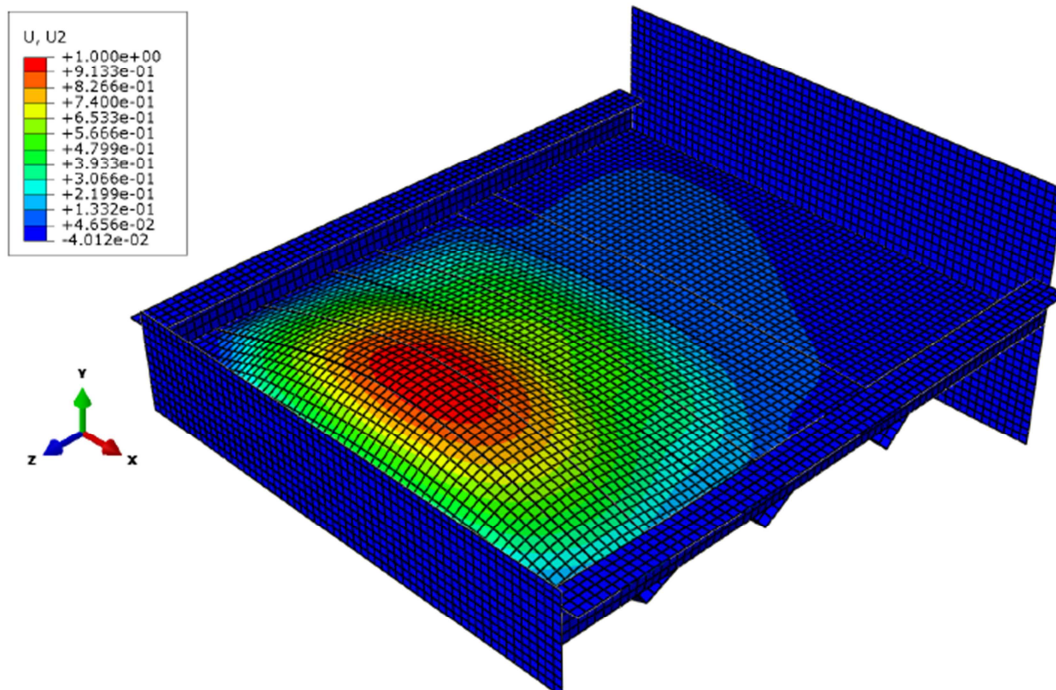


Abb. C-46: S6 Var-C Fall 9 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 16,275$)

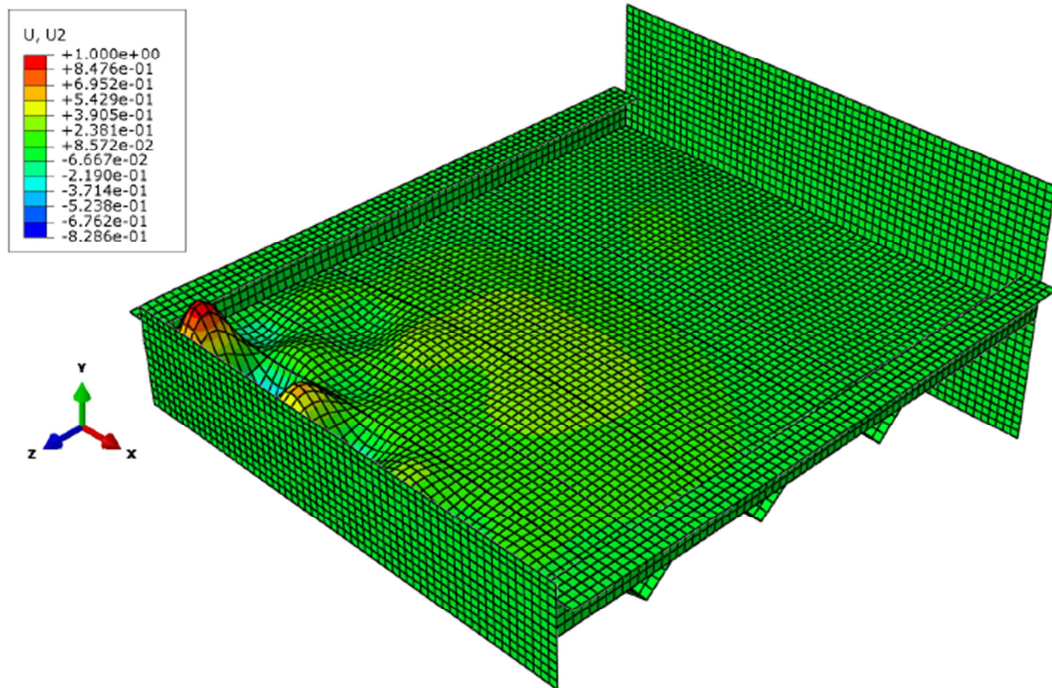


Abb. C-47: S6 Var-C Fall 9 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 19,685$)

C.5.9.3 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,464.

$$M_u = 8,65E+10 \text{ Nmm} \cong \mathbf{0,93} M_{el,R}$$

$$V_u = 2,00E+6 \text{ Nmm} \cong \mathbf{0,23} V_{el,R}$$

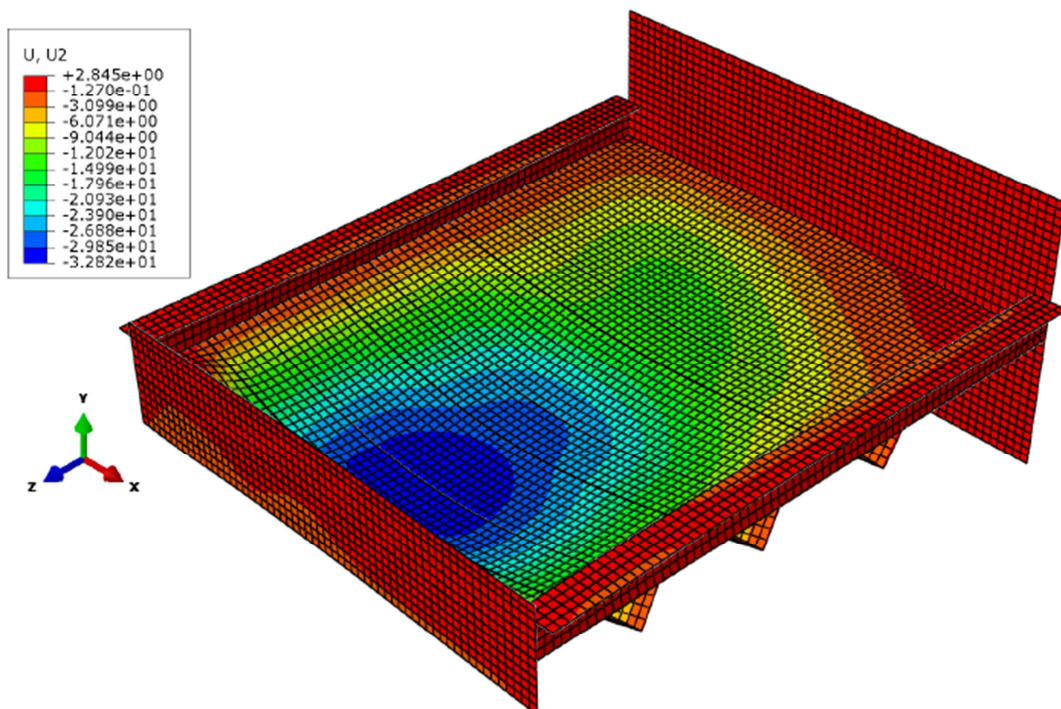


Abb. C-48: S6 Var-C Fall 9 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

C.6 Praxisbeispiel

Auf den folgenden Seiten sind die Eingabeparameter sowie die Ergebnisse der numerischen Berechnung zu finden. Der Überhöhungsfaktor der Verformungen in den Abbildungen aus der LBA beträgt 350 und aus der GMNIA 10.

C.6.1 Lastfall 1 – 100% M&N + 0% V

C.6.1.1 Belastung

Das Biegemoment wird als Einzelkraft am Referenzpunkt, der Schub wird als Linienlast entlang des Steges und die Normalkraft wird auf den gesamten Querschnitt in Form von Linienlasten aufgebracht. In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-31: Referenzbelastungen Fall 1

	M	V	N			
	RP	Steg	LSt	OG	UG	Steg
	[Nmm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]
LBA	3,02E+09 (10%)	-	96,9	484,6	678,4	193,8
GMNIA	6,04E+10 (200%)	-	1938,2	9691,2	13567,7	3876,5

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.6.1.2 LBA-Berechnung

In der folgenden Tabelle sind die Eigenwerte mit den zugehörigen Skalierfaktoren ersichtlich.

Tab. C-32: Eigenwerte & Imperfektionen Fall 1

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform	Imperfektion	SF
3	12,569	lokal	0,7	2,664
9	16,578	global	-1,0	-7,5

Die globale und lokale Eigenform wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

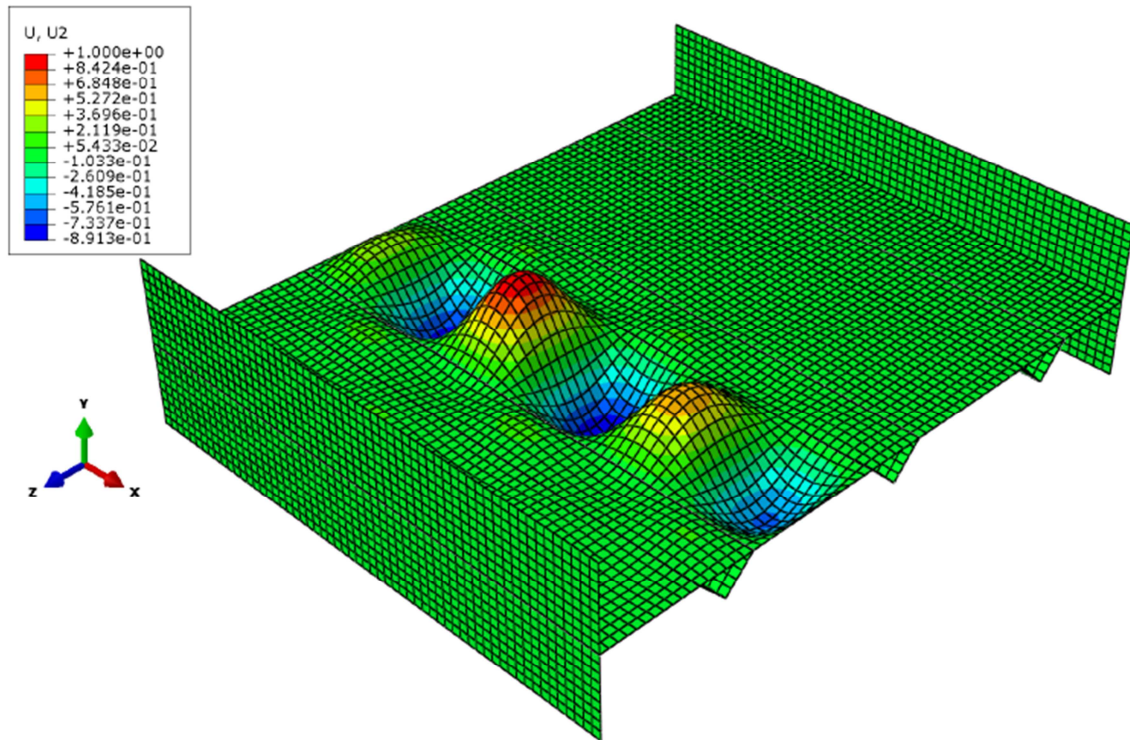


Abb. C-49: Fall 1 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 12,569$)

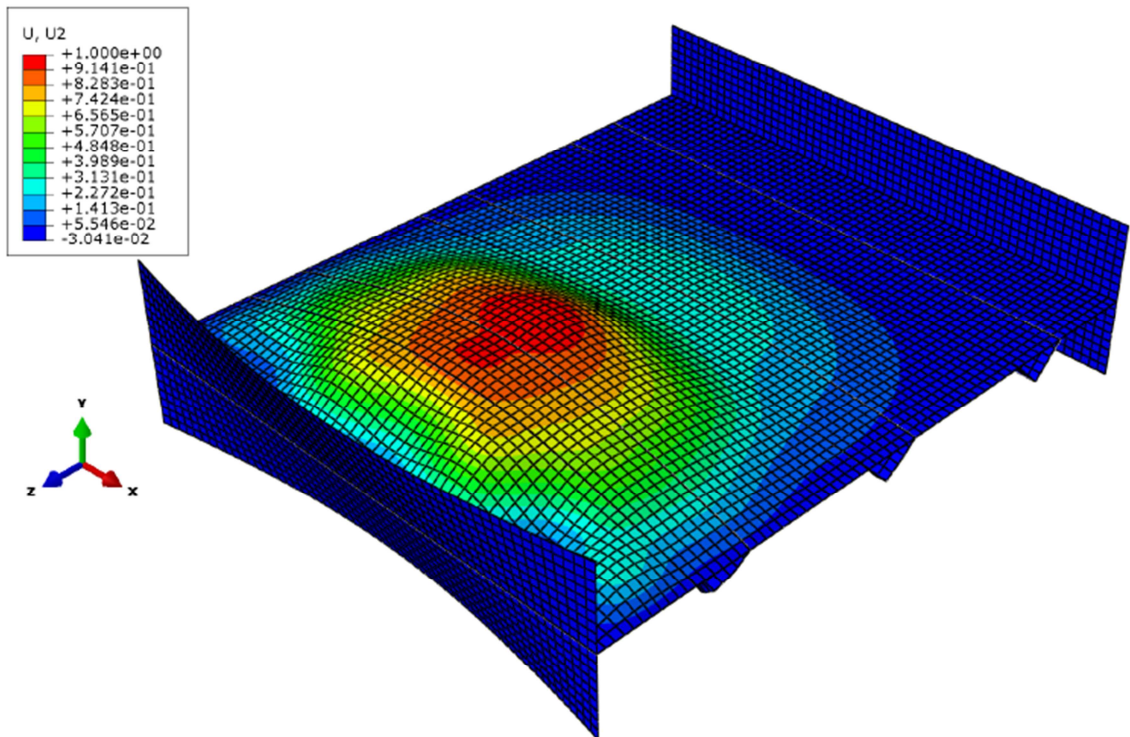


Abb. C-50: Fall 1 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 16,578$)

C.6.1.3 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,485.

$$M_u = 2,93E+10 \text{ Nmm}$$

$$N_u = 18016083,3 \text{ N}$$

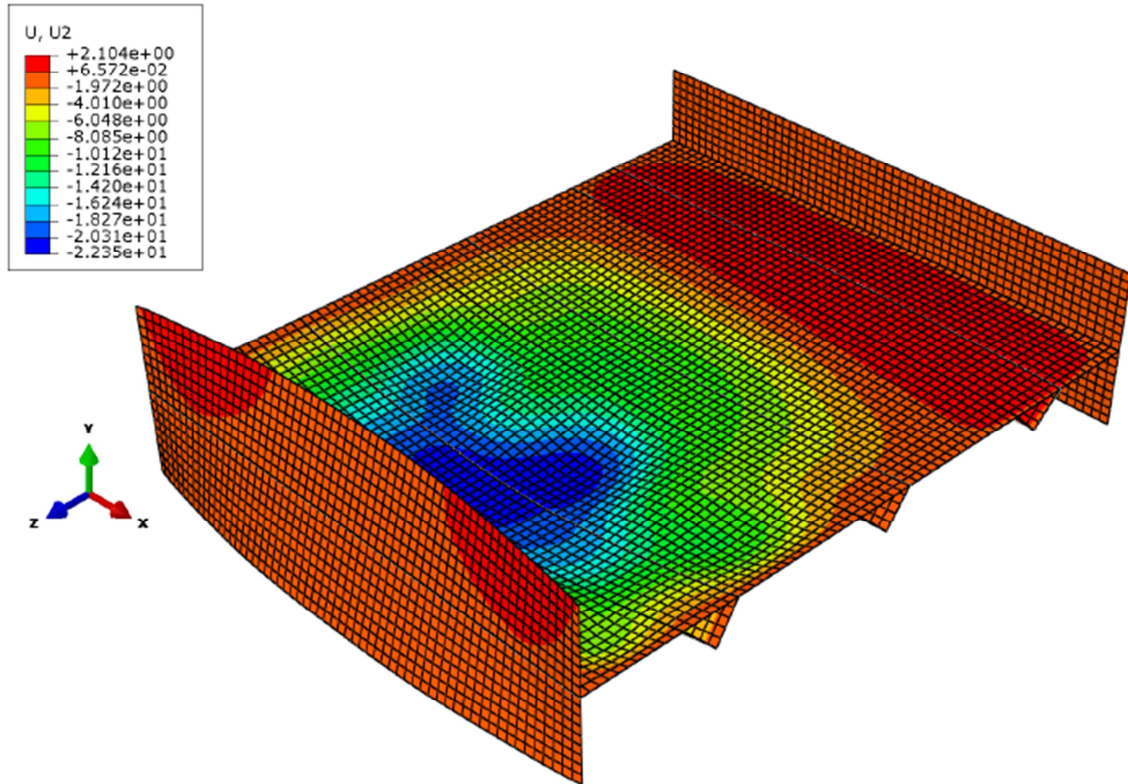


Abb. C-51: Fall 1 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

C.6.2 Lastfall 2 – 0% M&N + 100% V

C.6.2.1 Belastung

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-33: Referenzbelastungen Fall 2

	M	V	N			
	RP	Steg	LSt	OG	UG	Steg
	[Nmm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]
LBA	-	246,0 (10%)	-	-	-	-
GMNIA	-	4919,0 (200%)	-	-	-	-

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.6.2.2 LBA-Berechnung

In der folgenden Tabelle sind die Eigenwerte mit den zugehörigen Skalierfaktoren ersichtlich.

Tab. C-34: Eigenwerte & Imperfektionen Fall 2

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform	Imperfektion	SF
2	13,817	global (Schub)	1	7,5

Das Schubbeulen wird in der folgenden Abbildung dargestellt.

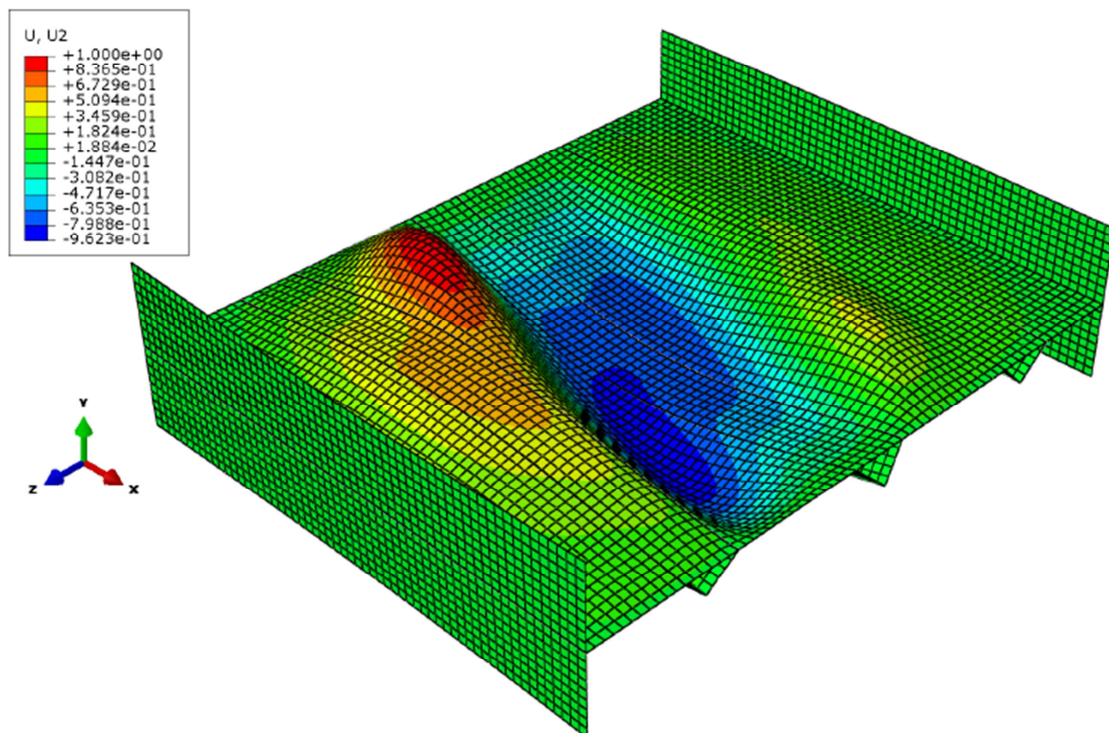


Abb. C-52: Fall 2 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 13,817$)

C.6.2.3 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,476.

$$V_u = 8209143,2 \text{ N}$$

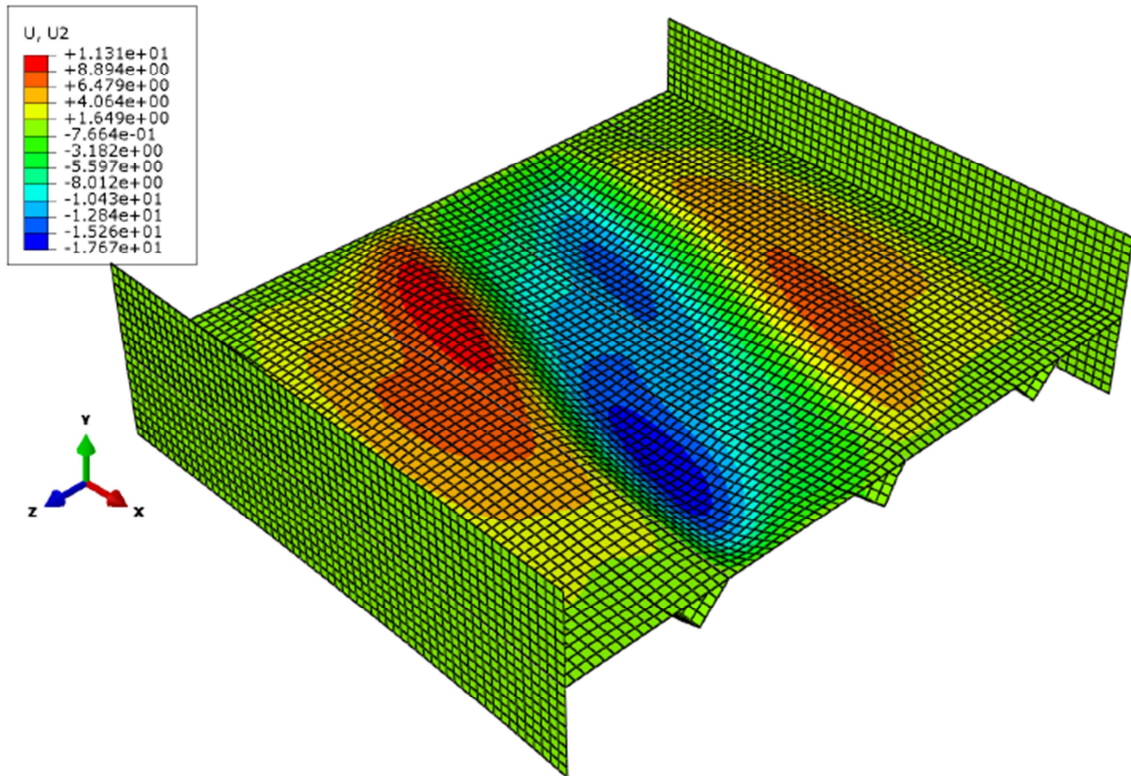


Abb. C-53: Fall 2 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

C.6.3 Lastfall 3 – 25% M&N + 100% V

C.6.3.1 Belastung

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-35: Referenzbelastungen Fall 3

	M	V	N			
	RP	Steg	LSt	OG	UG	Steg
	[Nmm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]
LBA	7,55E+08 (2,5%)	246,0 (10%)	24,2	121,1	169,6	48,5
GMNIA	1,51E+10 (50%)	4919,0 (200%)	484,6	2422,8	3391,9	969,1

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.6.3.2 LBA-Berechnung

In der folgenden Tabelle sind die Eigenwerte mit den zugehörigen Skalierfaktoren ersichtlich.

Tab. C-36: Eigenwerte & Imperfektionen Fall 3

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform	Imperfektion	SF
1	12,133	global	1	7,5
5	12,994	lokal	0,7	2,664

Die globale und lokale Eigenform wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

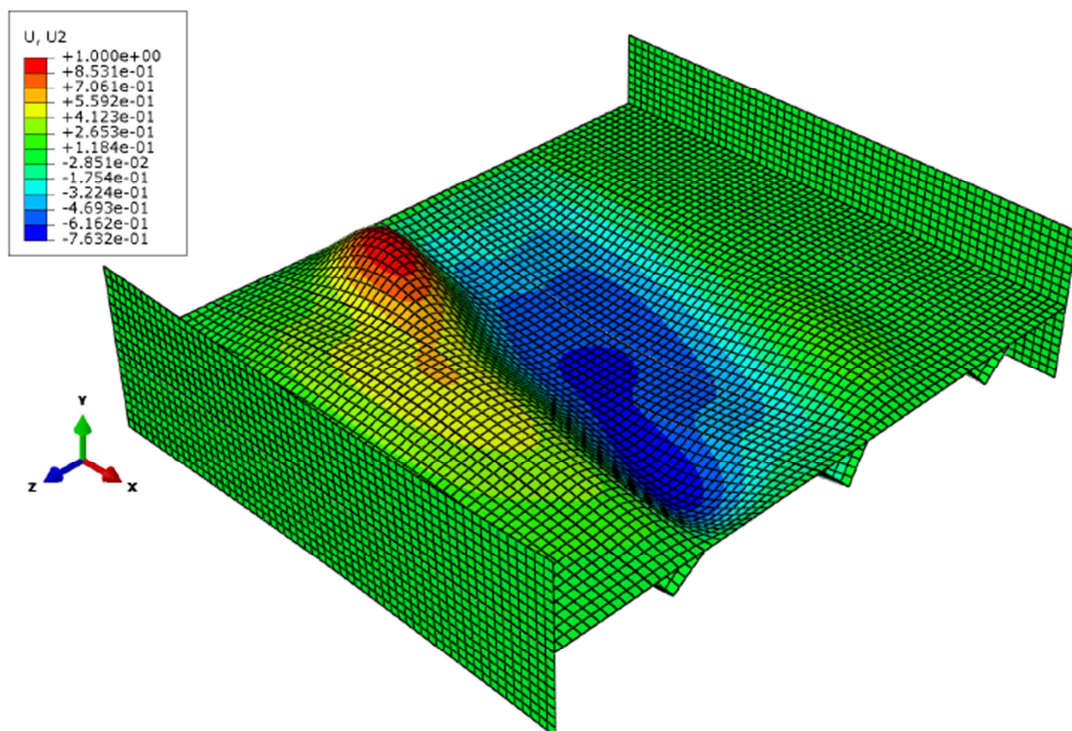


Abb. C-54: Fall 3 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 12,133$)

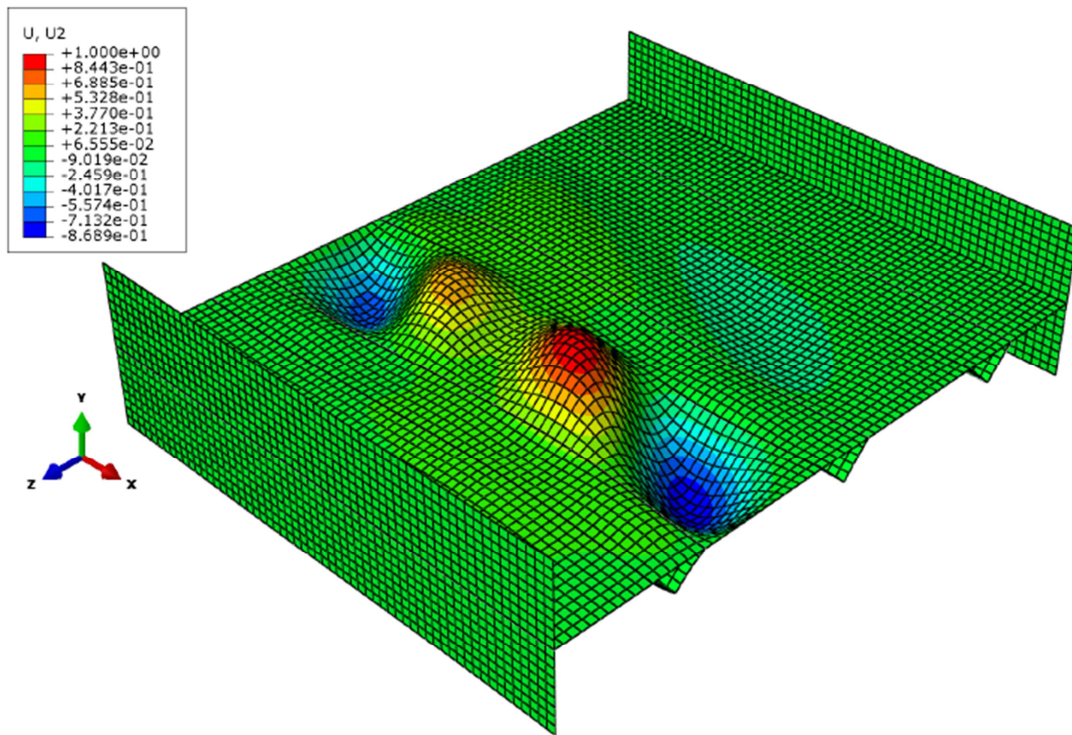


Abb. C-55: Fall 3 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 12,994$)

C.6.3.3 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,465.

$$M_u = 7,02E+09 \text{ Nmm}$$

$$N_u = 4318288,0 \text{ N}$$

$$V_u = 8019436,1 \text{ N}$$

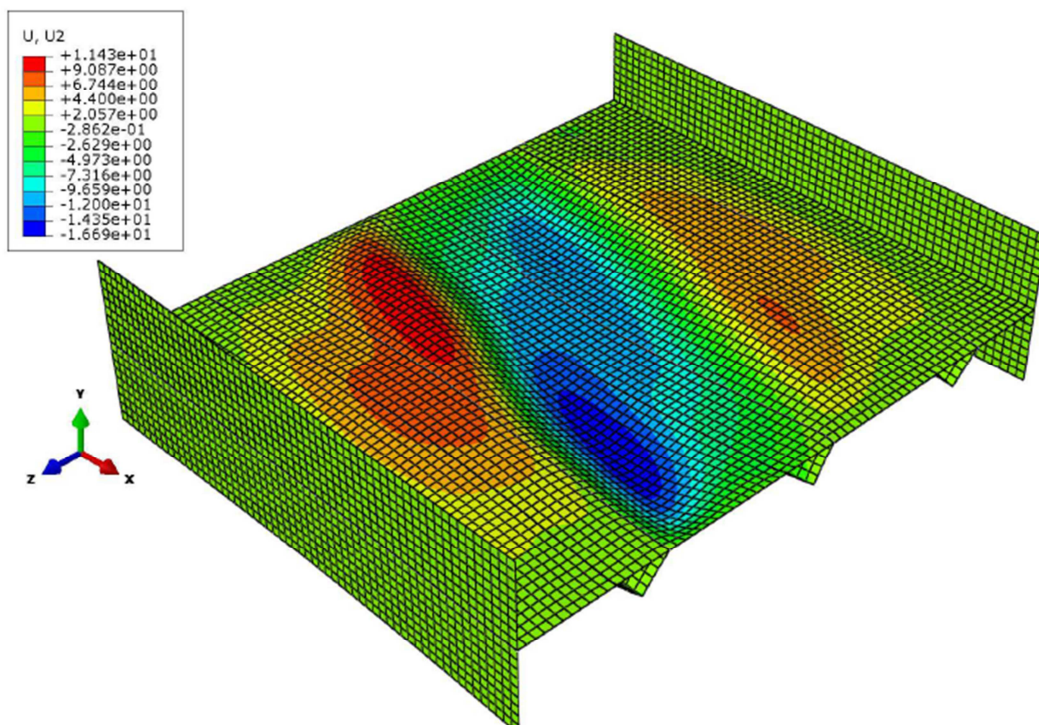


Abb. C-56: Fall 3 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

C.6.4 Lastfall 4 – 50% M&N + 100% V

C.6.4.1 Belastung

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-37: Referenzbelastungen Fall 4

	M	V	N			
	RP	Steg	LSt	OG	UG	Steg
	[Nmm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]
LBA	1,51E+09 (5%)	246,0 (10%)	48,5	242,3	339,2	96,9
GMNIA	3,02E+10 (100%)	4919,0 (200%)	969,1	4845,6	6783,8	1938,2

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.6.4.2 LBA-Berechnung

In der folgenden Tabelle sind die Eigenwerte mit den zugehörigen Skalierfaktoren ersichtlich.

Tab. C-38: Eigenwerte & Imperfektionen Fall 4

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform	Imperfektion	SF
2	11,131	lokal	0,7	2,664
8	14,914	global	1,0	7,5

Die globale und lokale Eigenform wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

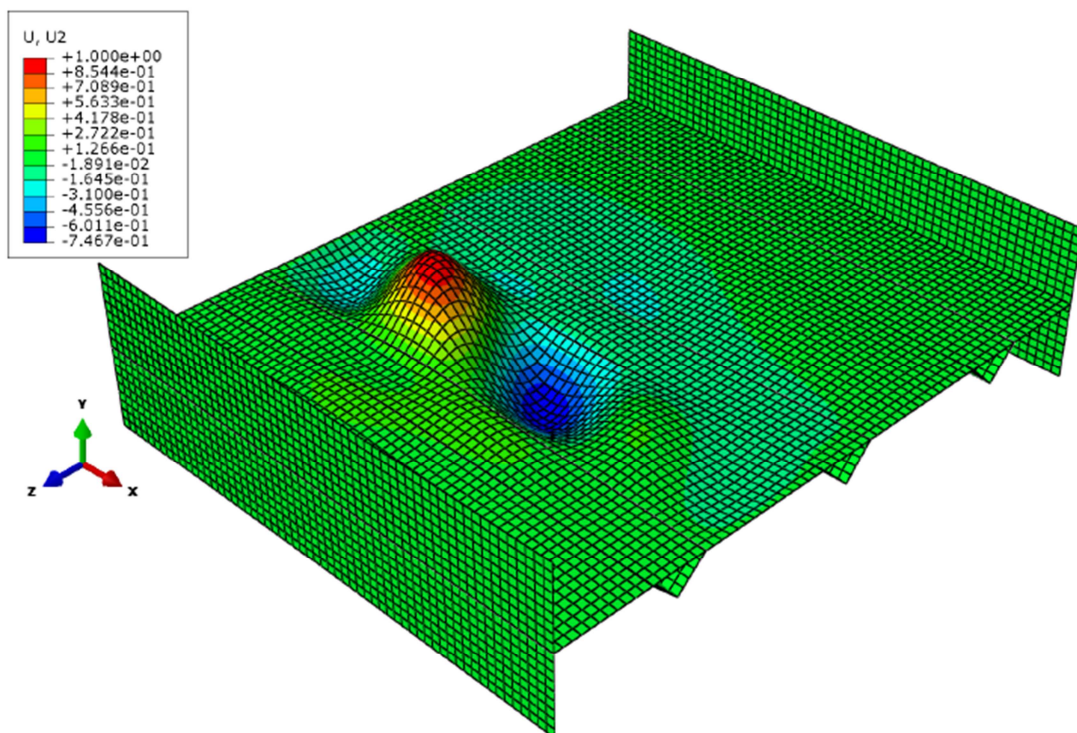


Abb. C-57: Fall 4 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 11,131$)

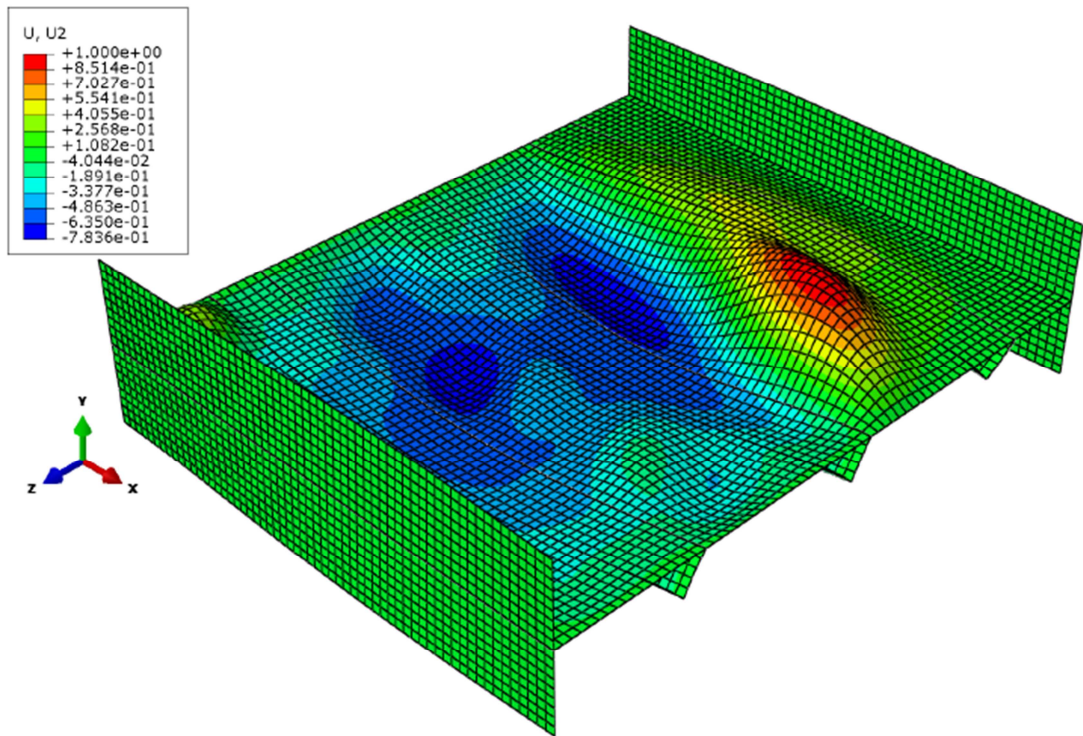


Abb. C-58: Fall 4 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 14,914$)

C.6.4.3 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,461.

$$M_u = 1,39E+10 \text{ Nmm}$$

$$N_u = 8562282,9 \text{ N}$$

$$V_u = 7950451,7 \text{ N}$$

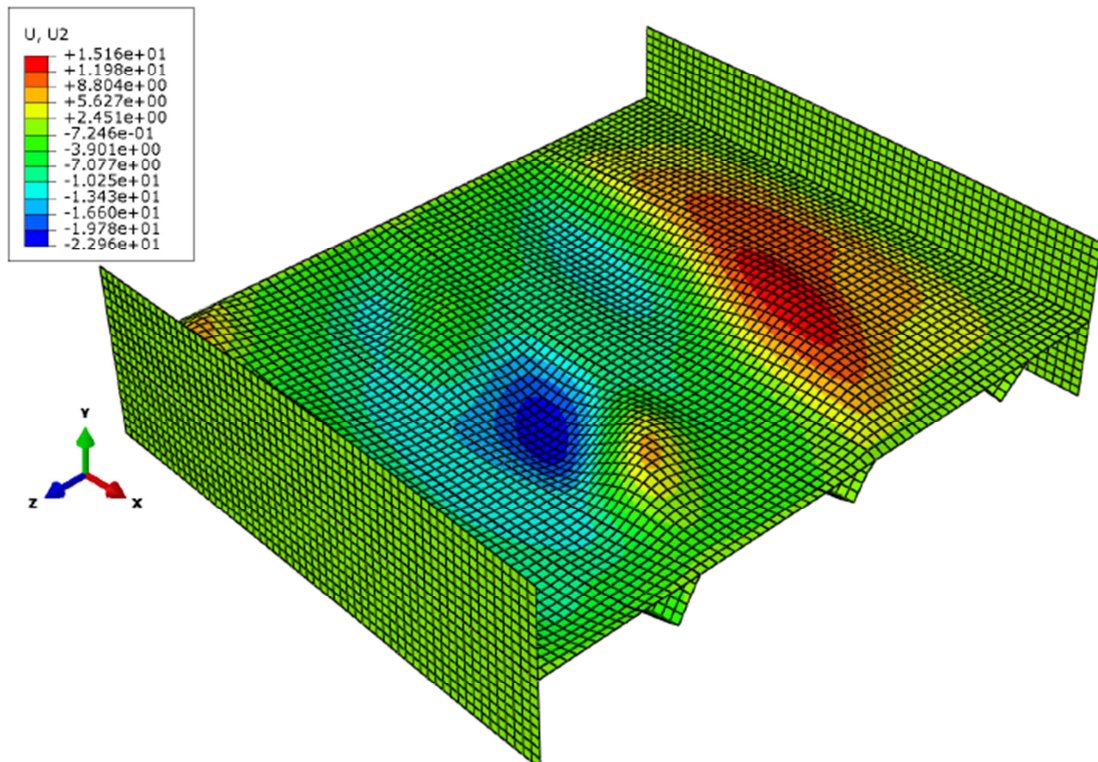


Abb. C-59: Fall 4 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

C.6.5 Lastfall 5 – 75% M&N + 100% V

C.6.5.1 Belastung

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-39: Referenzbelastungen Fall 5

	M	V	N			
	RP	Steg	LSt	OG	UG	Steg
	[Nmm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]
LBA	2,26E+09 (7,5%)	246,0 (10%)	72,7	363,42	508,8	145,4
GMNIA	4,53E+10 (150%)	4919,0 (200%)	1453,7	7268,4	10175,8	2907,4

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.6.5.2 LBA-Berechnung

In der folgenden Tabelle sind die Eigenwerte mit den zugehörigen Skalierfaktoren ersichtlich.

Tab. C-40: Eigenwerte & Imperfektionen Fall 5

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform	Imperfektion	SF
2	9,575	lokal	0,7	2,664
9	13,549	global	-1,0	-7,5

Die globale und lokale Eigenform wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

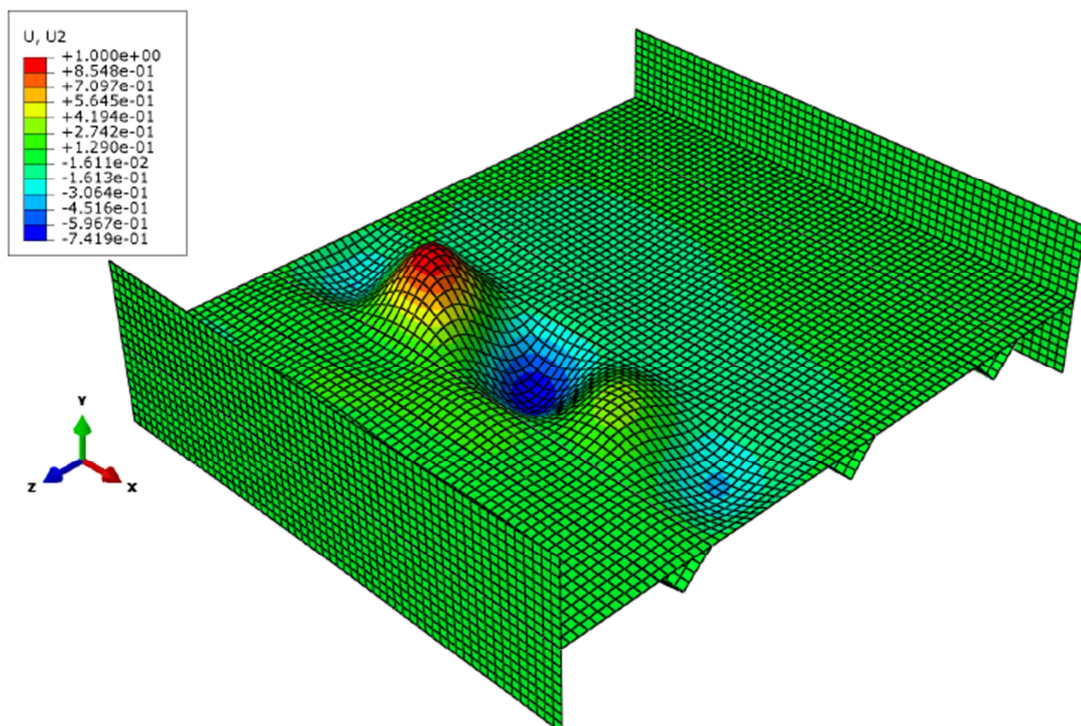


Abb. C-60: Fall 5 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 9,575$)

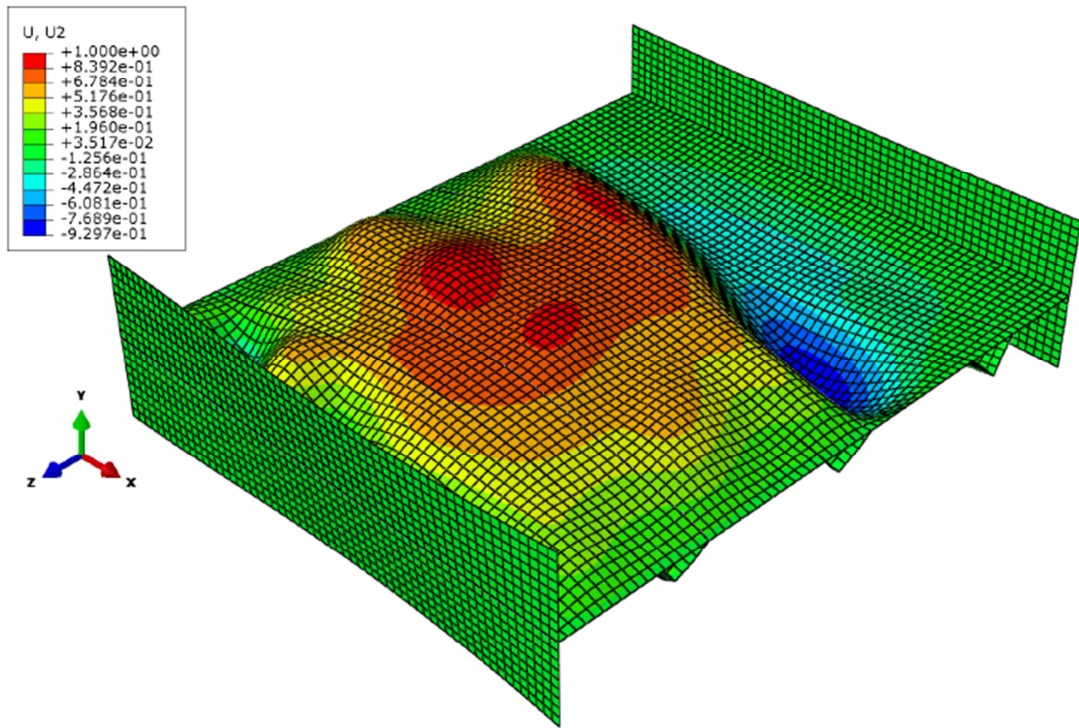


Abb. C-61: Fall 5 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 13,549$)

C.6.5.3 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,413.

$$M_u = 1,87E+10 \text{ Nmm}$$

$$N_u = 11506148,0 \text{ N}$$

$$V_u = 7122639,0 \text{ N}$$

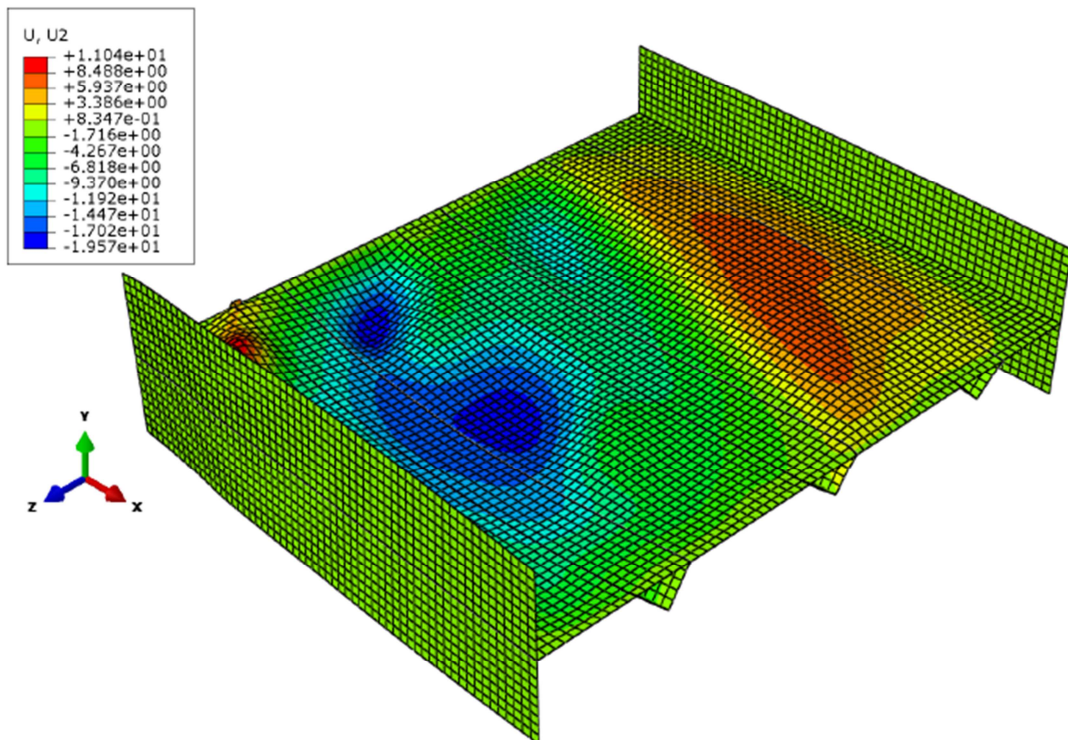


Abb. C-62: Fall 5 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

C.6.6 Lastfall 6 – 100% M&N + 100% V

C.6.6.1 Belastung

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-41: Referenzbelastungen Fall 6

	M	V	N			
	RP	Steg	LSt	OG	UG	Steg
	[Nmm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]
LBA	3,02E+09 (10%)	246,0 (10%)	96,9	484,6	678,4	193,8
GMNIA	6,04E+10 (200%)	4919,0 (200%)	1938,2	9691,2	13567,7	3876,5

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.6.6.2 LBA-Berechnung

In der folgenden Tabelle sind die Eigenwerte mit den zugehörigen Skalierfaktoren ersichtlich.

Tab. C-42: Eigenwerte & Imperfektionen Fall 6

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform	Imperfektion	SF
2	8,309	lokal	0,7	2,664
10	12,105	global	-1,0	-7,5

Die globale und lokale Eigenform wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

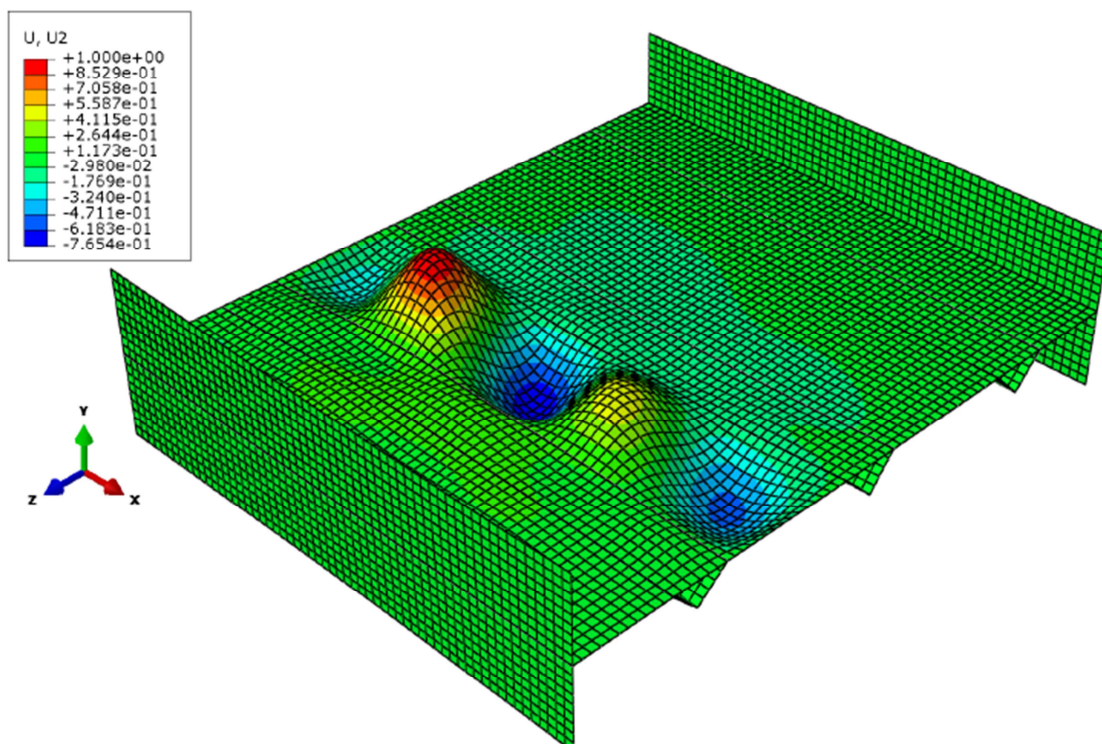


Abb. C-63: Fall 6 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 8,309$)

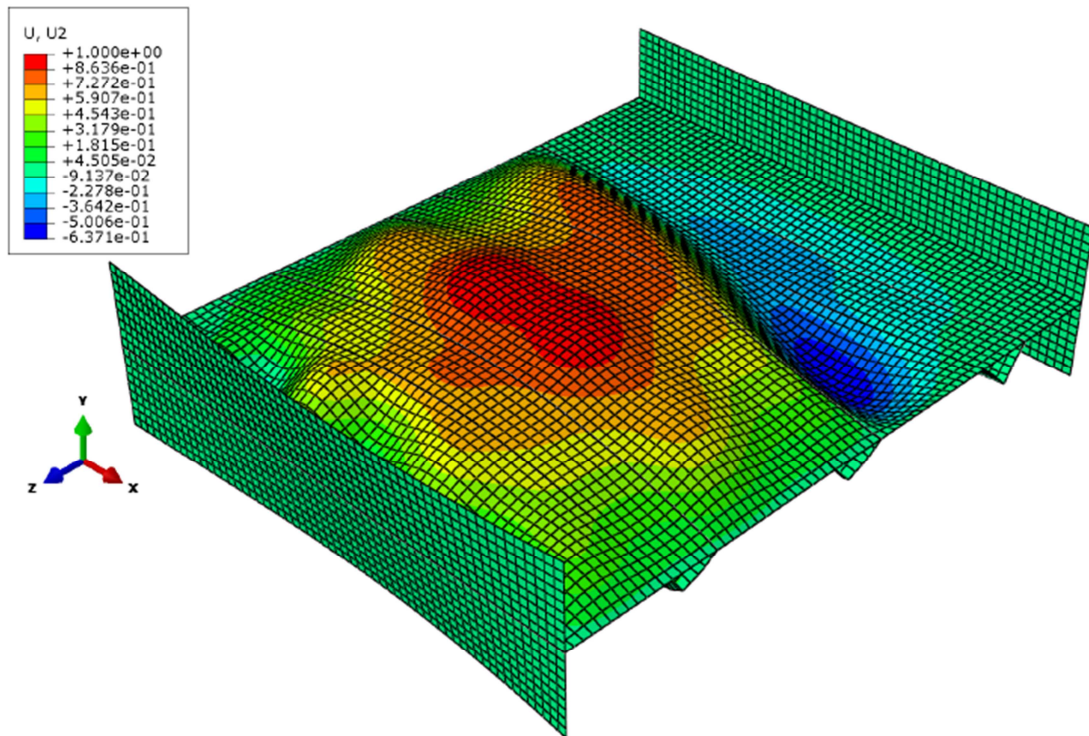


Abb. C-64: Fall 6 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 12,105$)

C.6.6.3 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,349.

$$M_u = 2,11E+10 \text{ Nmm}$$

$$N_u = 12964150,6 \text{ N}$$

$$V_u = 6018888,6 \text{ N}$$

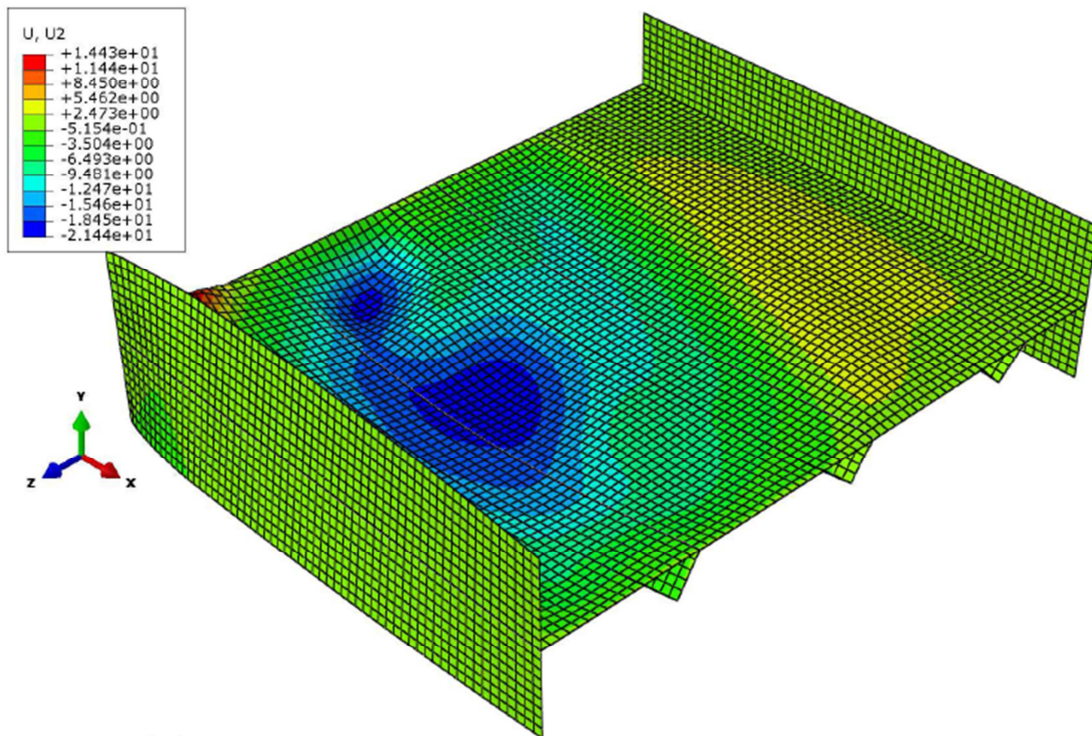


Abb. C-65: Fall 6 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

C.6.7 Lastfall 7 – 100% M&N + 75% V

C.6.7.1 Belastung

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-43: Referenzbelastungen Fall 7

	M	V	N			
	RP	Steg	LSt	OG	UG	Steg
	[Nmm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]
LBA	3,02E+09 (10%)	184,5 (7,5%)	96,9	484,6	678,4	193,8
GMNIA	6,04E+10 (200%)	3689,3 (150%)	1938,2	9691,2	13567,7	3876,5

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.6.7.2 LBA-Berechnung

In der folgenden Tabelle sind die Eigenwerte mit den zugehörigen Skalierfaktoren ersichtlich.

Tab. C-44: Eigenwerte & Imperfektionen Fall 7

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform	Imperfektion	SF
2	9,337	lokal	0,7	2,664
10	13,598	global	-1,0	-7,5

Die globale und lokale Eigenform wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

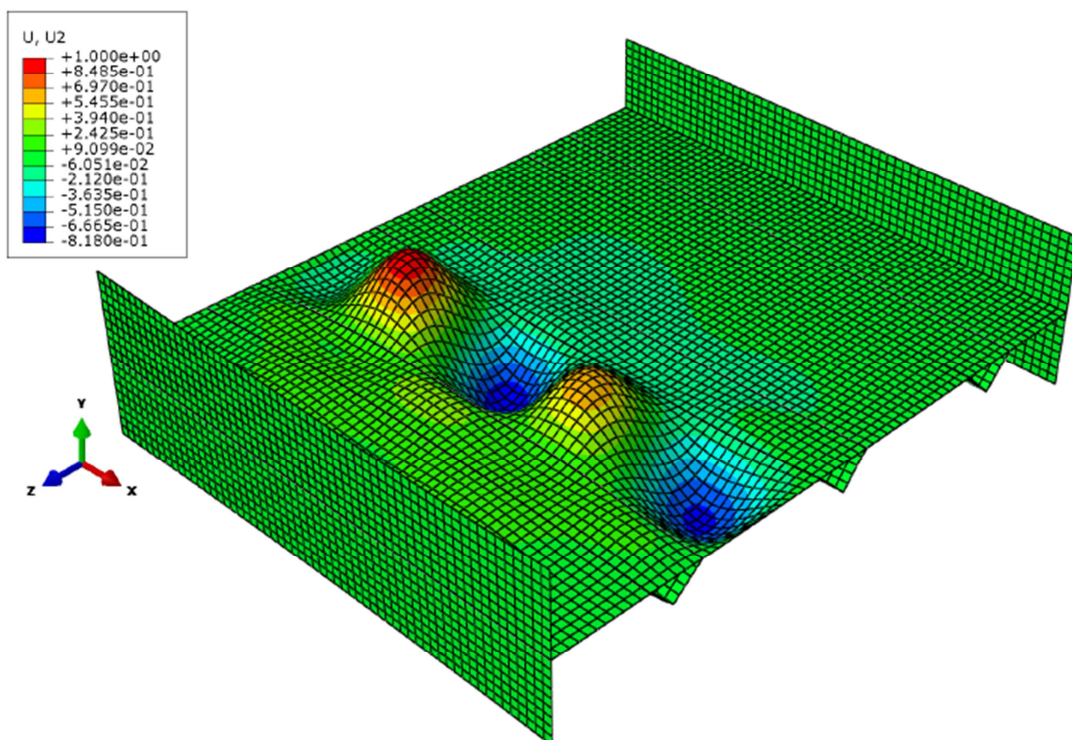


Abb. C-66: Fall 7 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 9,337$)

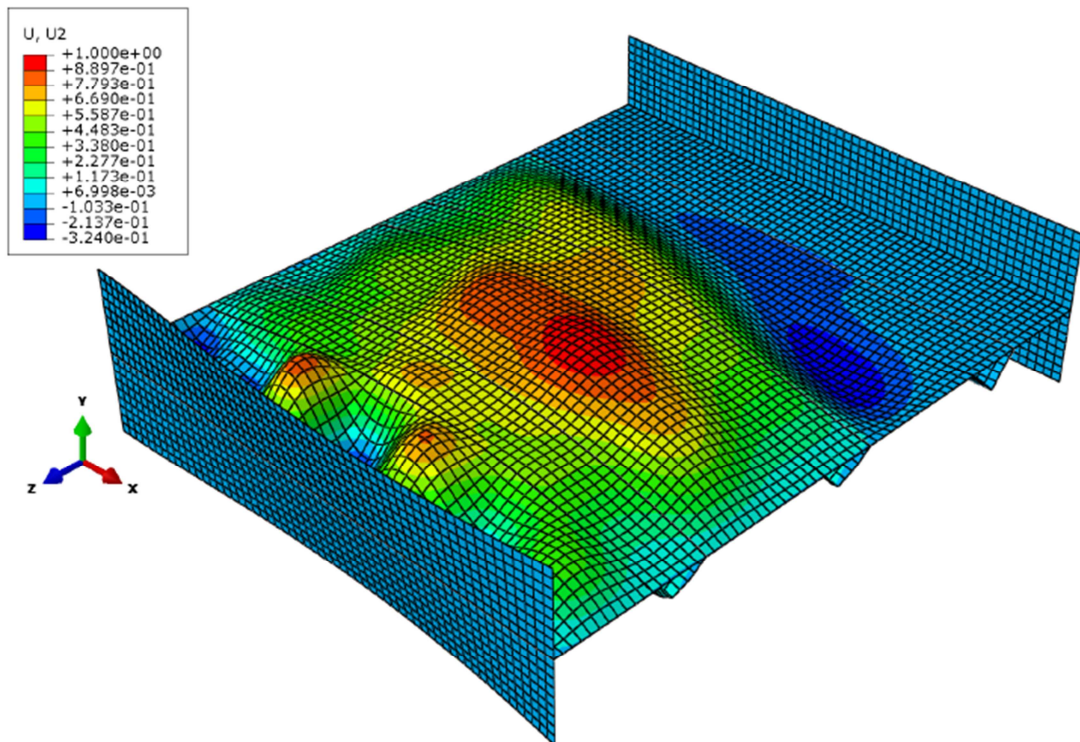


Abb. C-67: Fall 7 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 13,598$)

C.6.7.3 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,379.

$$M_u = 2,29E+10 \text{ Nmm}$$

$$N_u = 14078547,5 \text{ N}$$

$$V_u = 4902203,7 \text{ N}$$

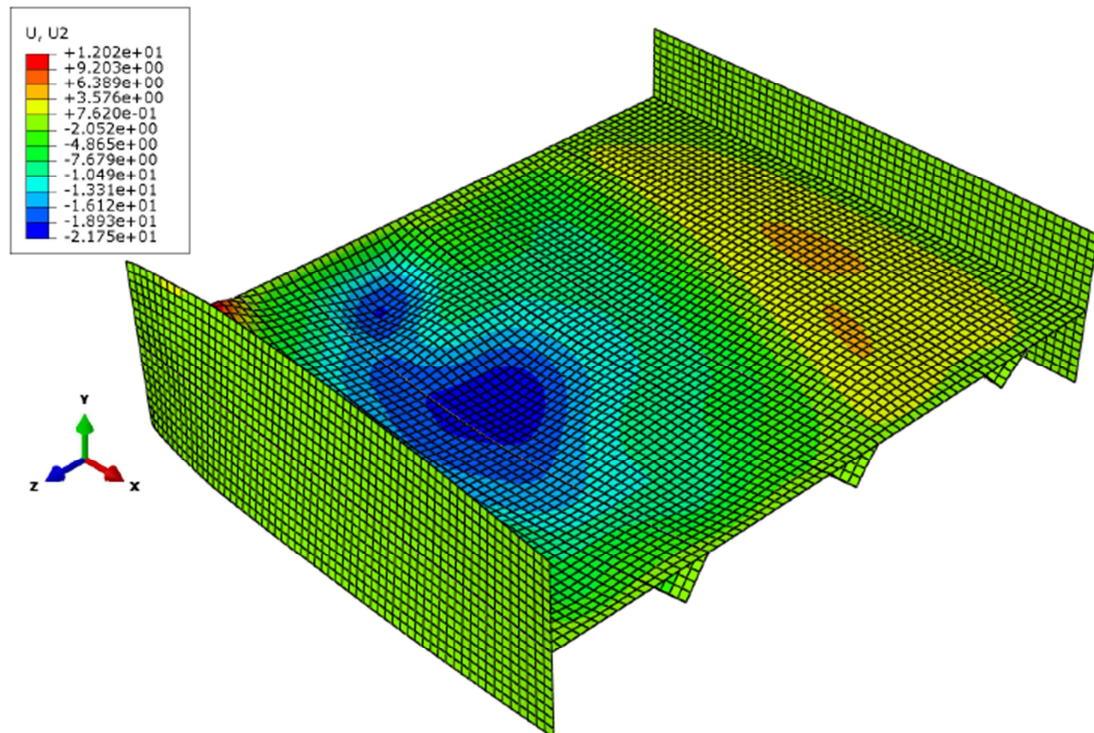


Abb. C-68: Fall 7 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

C.6.8 Lastfall 8 – 100% M&N + 50% V

C.6.8.1 Belastung

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-45: Referenzbelastungen Fall 8

	M	V	N			
	RP	Steg	LSt	OG	UG	Steg
	[Nmm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]
LBA	3,02E+09 (10%)	123,0 (5%)	96,9	484,6	678,4	193,8
GMNIA	6,04E+10 (200%)	2459,5 (100%)	1938,2	9691,2	13567,7	3876,5

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.6.8.1.1 LBA-Berechnung

In der folgenden Tabelle sind die Eigenwerte mit den zugehörigen Skalierfaktoren ersichtlich.

Tab. C-46: Eigenwerte & Imperfektionen Fall 8

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform	Imperfektion	SF
2	10,511	lokal	0,7	2,664
12	15,565	global	-1,0	-7,5

Die globale und lokale Eigenform wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

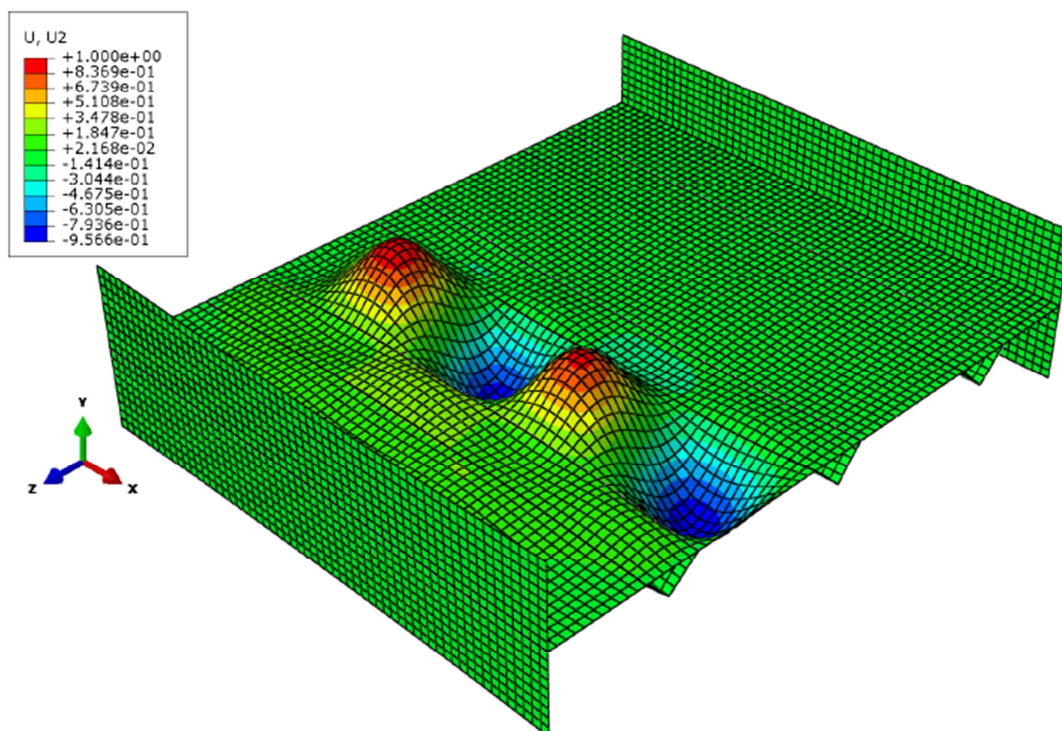


Abb. C-69: Fall 8 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 10,511$)

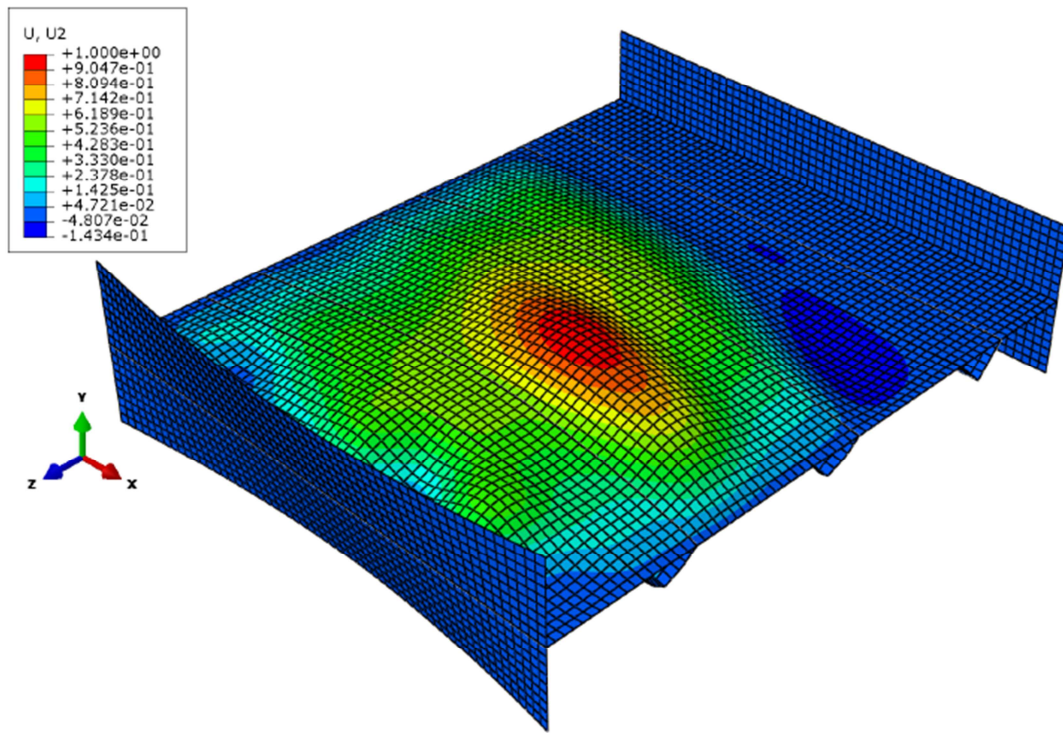


Abb. C-70: Fall 8 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 15,565$)

C.6.8.2 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,407.

$$M_u = 2,46E+10 \text{ Nmm}$$

$$N_u = 15118651,3 \text{ N}$$

$$V_u = 3509581,1 \text{ N}$$

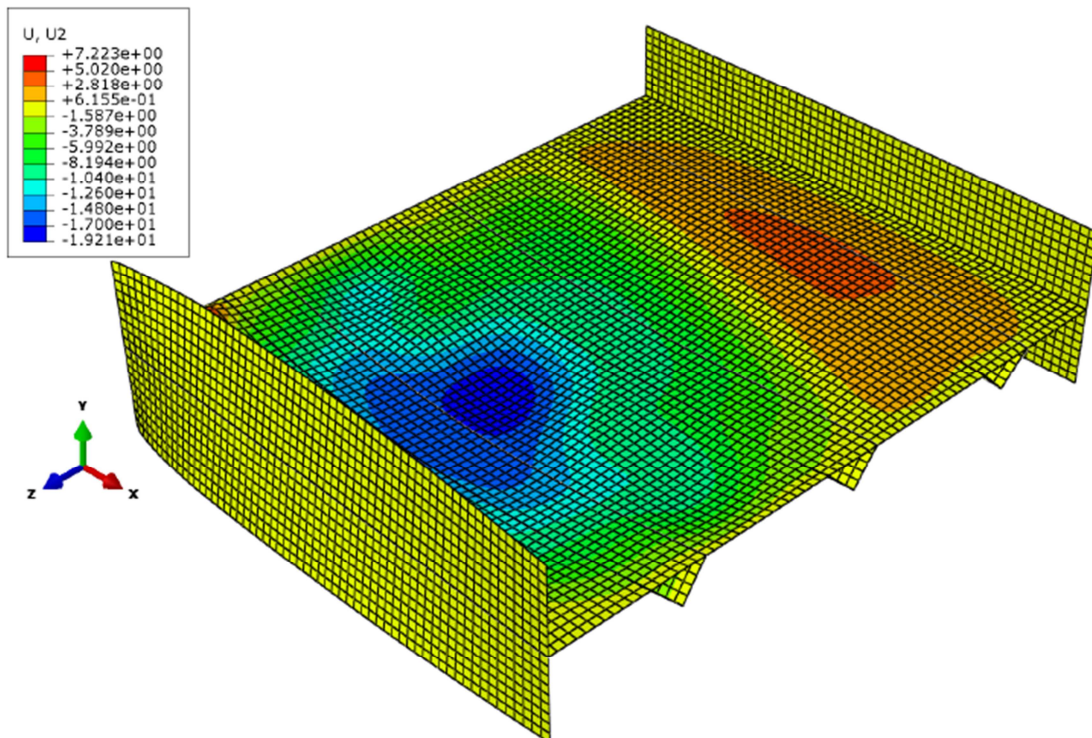


Abb. C-71: Fall 8 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

C.6.9 Lastfall 9 – 100% M&N + 25% V

C.6.9.1 Belastung

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der angesetzten Lasten zu finden.

Tab. C-47: Referenzbelastungen Fall 9

	M	V	N			
	RP	Steg	LSt	OG	UG	Steg
	[Nmm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]	[N/mm]
LBA	3,02E+09 (10%)	61,5 (2,5%)	96,9	484,6	678,4	193,8
GMNIA	6,04E+10 (200%)	1229,8 (50%)	1938,2	9691,2	13567,7	3876,5

Anm.: Die Klammerwerte geben den Prozentsatz von $M/M_{el,R}$ bzw. $V/V_{el,R}$ an.

C.6.9.2 LBA-Berechnung

In der folgenden Tabelle sind die Eigenwerte mit den zugehörigen Skalierfaktoren ersichtlich.

Tab. C-48: Eigenwerte & Imperfektionen Fall 9

Nr.	ϕ_{cr}	Eigenform	Imperfektion	SF
2	11,653	lokal	0,7	2,664
8	15,213	global	-1,0	-7,5

Die globale und lokale Eigenform wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

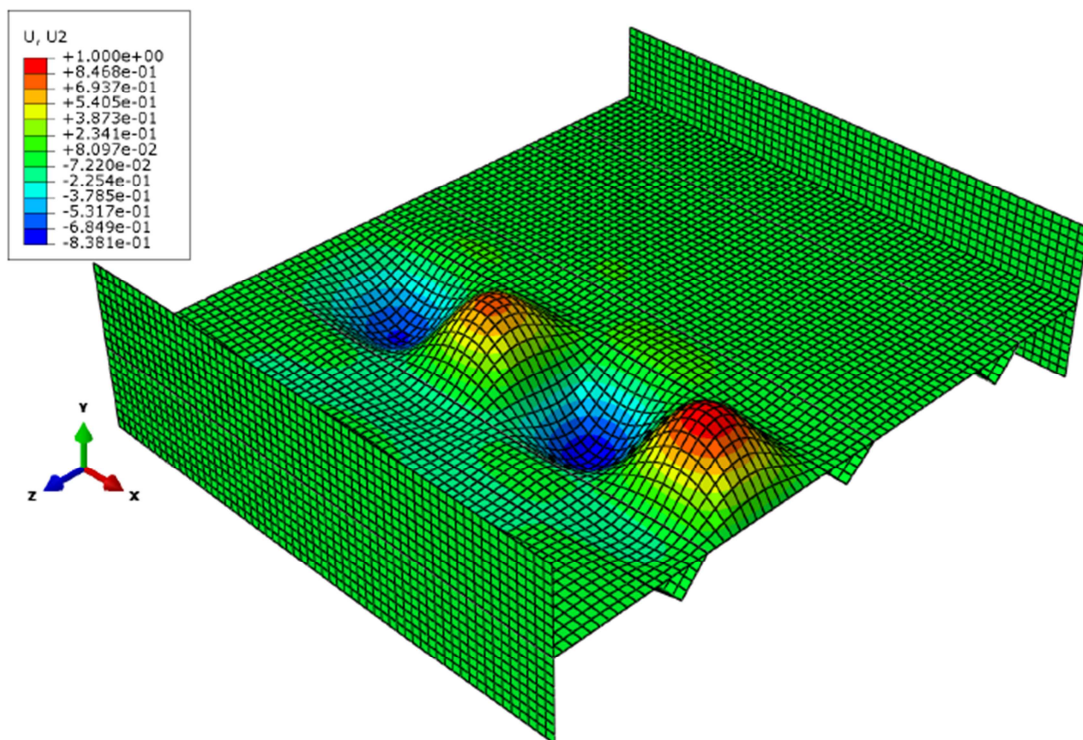


Abb. C-72: Fall 9 lokale Eigenform ($\phi_{cr} = 11,653$)

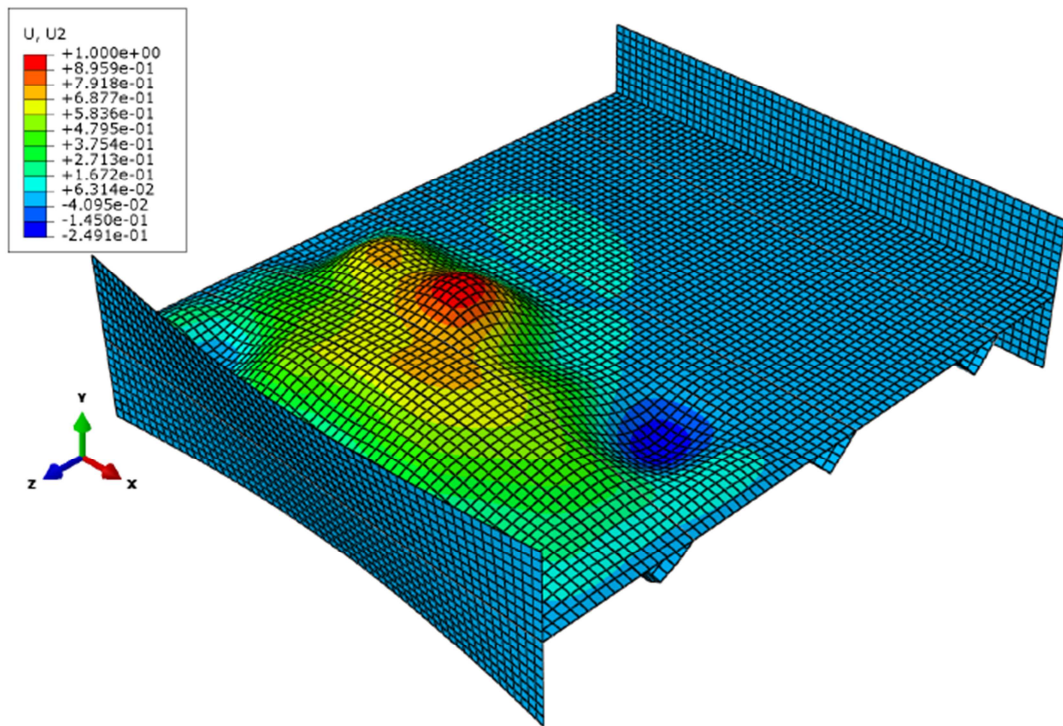


Abb. C-73: Fall 9 globale Eigenform ($\phi_{cr} = 15,213$)

C.6.9.3 GMNIA-Berechnung

Die numerische Traglastanalyse ergibt einen Laststeigerungsfaktor LSF von 0,446.

$$M_u = 2,69E+10 \text{ Nmm}$$

$$N_u = 16567367,3 \text{ N}$$

$$V_u = 1922940,1 \text{ N}$$

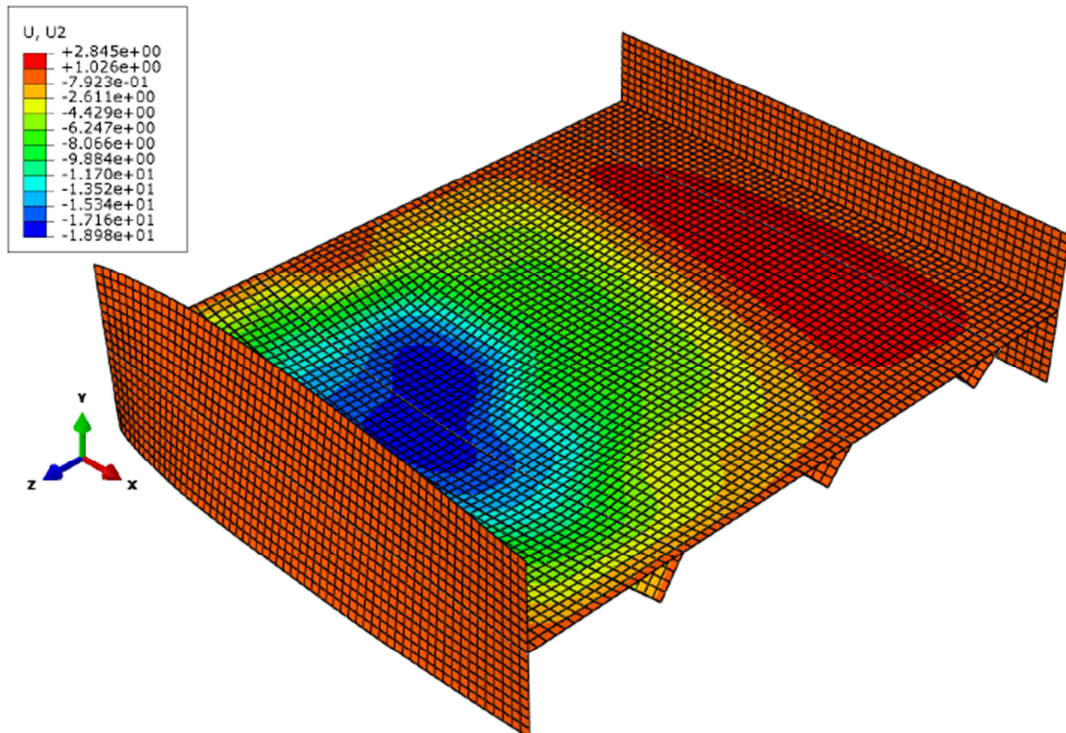


Abb. C-74: Fall 9 – Traglastzustand – Verschiebungen in y-Richtung

Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe:

D – Diplom-, Masterarbeiten/Dissertationen | F – Forschungsberichte
S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | V – Vorträge, Tagungen

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik
10 – Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl