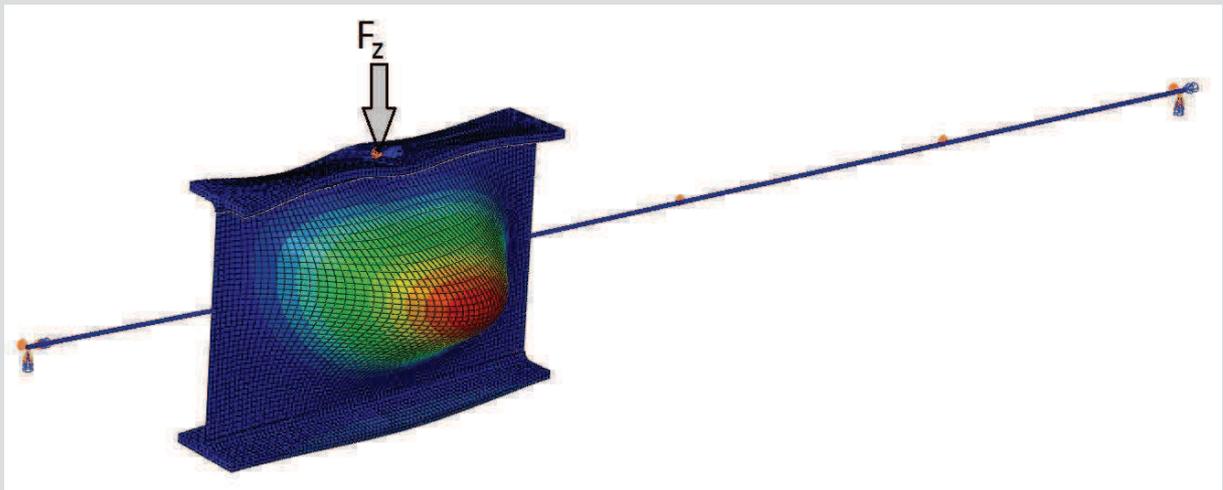


# STEIFENLOSE KRAFTEINLEITUNG BEI BIEGETRÄGERN

## Interaktionsverhalten globaler und lokaler Beanspruchungen



D-5-71/2018

**Katja Plasounig, BSc.**  
Institut für Stahlbau  
Technische Universität Graz



Katja PLASOUNIG BSc

**STEIFENLOSE KRAFTEINLEITUNG BEI BIEGETRÄGERN**  
**Interaktionsverhalten globaler und lokaler**  
**Beanspruchungen**

**MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur

eingereicht an der  
Technische Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. DI Dr.techn. Harald UNTERWEGER  
Ass.-Prof. DI Dr.techn. Markus KETTLER

Graz, September 2018



## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

---

Datum

---

Unterschrift



## DANKSAGUNG

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



## **KURZFASSUNG**

Im Zuge dieser Masterarbeit wird der Bereich einer steifenlosen lokalen Krafteinleitung bei Biegeträgern aus Stahl näher behandelt. Aus wirtschaftlicher Sicht möchte man auf die im Regelfall angeordneten Verstärkungssteifen an der Stelle der konzentrierten Krafteinleitung am Steg verzichten können. Ein einfaches Nachweisverfahren zur steifenlosen Einleitung konzentrierter Kräfte ist zurzeit im Eurocode noch nicht vorhanden. Traditionell wurde nach DIN 18800-1 vorgegangen. Diese Norm wurde mittlerweile zurückgezogen - sie berücksichtigt nicht alle auftretenden Effekte. In Teilen der europäischen Stahlbaunorm EN 1993 gibt es Vorgehensweisen, welche die lokale Krafteinleitung quer zum Steg bereits thematisieren. Es wurde bereits ein Bemessungsvorschlag, welcher dieses Thema behandelt, am Institut für Stahlbau an der TU Graz erarbeitet, der auch im nationalen Anwendungsdokument zur EN 1993-1-1 enthalten ist. Das Ziel dieser Arbeit ist es, mit Hilfe numerischer Berechnungen zu untersuchen, ob dieser Bemessungsvorschlag allgemein anwendbar ist und in welchen Bereichen Anpassungen vorzunehmen sind.

## **ABSTRACT**

This master's thesis treats the area of a concentrated local transversal load introduction in beams made of steel. From an economic point of view, it is preferable to avoid the normally obligatory stiffeners at the location of this concentrated load transfer into the web. A simple verification procedure for a non-stiffening web at the location of concentrated loads is currently not available in Eurocode. Traditionally, the verification was done according to DIN 18800-1. Meanwhile this standard has been withdrawn - it does not handle all the effects that occur. In parts of the European Standard EN 1993, there are procedures that already treat the topic of concentrated local transversal load transfer into the web. A design proposal dealing with this topic has already been worked out at the Institute of Steel Structures at Graz University of Technology and is part of the national annex of EN 1993-1-1. The aim of this work is to investigate with the help of numerical calculations whether this proposal is applicable or in which areas adjustments have to be made.



**INHALTSVERZEICHNIS**

1.	Einleitung.....	1
1.1	Allgemeines.....	1
1.2	Motivation und Ziele der Arbeit .....	1
1.3	Umfang.....	2
2.	Vergleich der Nachweiskonzepte nach Eurocode und DIN.....	3
2.1	Allgemeines.....	3
2.2	Vorgehen nach DIN 18800-1: Bemessung und Konstruktion .....	5
2.3	Vorgehen nach EN 1993-6: Kranbahnen .....	6
2.4	Vorgehen nach EN 19931 -1-8: Bemessung von Anschlüssen.....	9
2.5	Vorgehen nach EN 1993-1-5: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Plattenförmige Bauteile .....	10
2.6	Vorgehen nach dem Bemessungsvorschlag TU Graz.....	11
2.7	Vergleich der Normenergebnisse .....	12
2.7.1	Allgemeines .....	12
2.7.2	Zusammenfassung der Herangehensweisen der einzelnen Normen.....	12
2.7.3	Getroffene Annahmen für objektiven Normenvergleich .....	13
2.7.4	Vergleich der effektiven Vertikalspannungen infolge $F_z$ .....	13
2.7.5	Vergleich der Tragwiderstandskraft $F_{z,Rd}$ .....	17
3.	Modellfindung für die FEM-Berechnung.....	22
3.1	Berechnungsmodell .....	22
3.1.1	Modellierung .....	22
3.1.2	Randbedingungen im FEM-Modell.....	24
3.1.3	Material .....	25
3.2	Voruntersuchungen .....	25
4.	Untersuchte Trägersysteme .....	29
4.1	Allgemeines zur Systembeschreibung .....	29
4.1.1	System – S1.....	31
4.1.2	System – S2-1KE .....	32
4.1.3	System – S2-2KE .....	33
4.1.4	System – S2-3KE .....	33
5.	Ergebnisse.....	34

5.1	Allgemeines .....	34
5.2	Ergebnisse für Trägerprofil IPE 300 .....	35
5.2.1	Allgemeines .....	35
5.2.2	Berechnungsergebnisse im Detail.....	37
5.3	Ergebnisse für Trägerprofil HEA 1000 .....	47
5.3.1	Allgemeines .....	47
5.3.2	Berechnungsergebnisse im Detail.....	48
5.4	Ergebnisse für Geschweisstes Profil 1200 .....	55
5.4.1	Allgemeines .....	55
5.4.2	Berechnungsergebnisse im Detail.....	56
5.5	Vergleich der Gesamtergebnisse.....	62
6.	Zusammenfassung und Ausblick .....	66
7.	Literaturverzeichnis.....	67
8.	Anhang .....	68

## **1. EINLEITUNG**

Diese Arbeit befasst sich mit der steifenlosen Krafteinleitung bei Biegeträgern aus Stahl, ein Detail, welches im Hochbau sehr häufig vorzufinden ist. Es handelt sich dabei hauptsächlich um den Anschluss von Nebenträgern an den Hauptträger. Aus wirtschaftlicher Sicht möchte man auf die im Regelfall angeordneten Verstärkungssteifen an der Stelle der konzentrierten Krafteinleitung am Steg verzichten können. Ein einfaches Nachweisverfahren zur steifenlosen Einleitung konzentrierter Kräfte ist zurzeit im Eurocode noch nicht vorhanden.

### **1.1 ALLGEMEINES**

Die Stahlbau Grundnorm 1993-1-1 [2] beinhaltet zum Thema der steifenlosen Krafteinleitung bei Biegeträgern keine unmittelbaren Hinweise auf eine Nachweisführung. Traditionell wurde nach DIN 18800-1 [6] vorgegangen. Diese Norm wurde mittlerweile zurückgezogen - sie berücksichtigt nicht alle auftretenden Effekte. In Teilen der Stahlbaunorm EN 1993 (Teil 1-8-Anschlüsse [4] und Teil 1-5-Plattenbeulen [3]) gibt es Vorgehensweisen, welche die lokale Krafteinleitung quer zum Steg bereits thematisieren. Auch bei Kranbahnen mit lokalen Radlasten, welche in der EN 1993-6 [5] behandelt werden, handelt es sich vom Prinzip her um eine steifenlose Krafteinleitung in einen Träger.

### **1.2 MOTIVATION UND ZIELE DER ARBEIT**

Aufgrund der anstehenden Überarbeitung des Eurocode 3, soll das Thema der steifenlosen Krafteinleitung bei Biegeträgern neu mit aufgenommen werden. Es wurde bereits ein Bemessungsvorschlag [1], der dieses Thema behandelt, am Institut für Stahlbau an der TU Graz erarbeitet und auch im nationalen Anwendungsdokument für Österreich zur EN 1993-1-1 aufgenommen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es mit Hilfe numerischer Berechnungen zu untersuchen, ob dieser Bemessungsvorschlag [1] allgemein anwendbar ist bzw. in welchen Bereichen Anpassungen vorzunehmen sind.

Dabei wird in dieser Arbeit vor allem auf die Interaktion der einzelnen Beanspruchungen eingegangen (lokale Wirkung durch die konzentriert eingeleitete Querlast, sowie globale Wirkung durch die Biege- und Querkraftschubbeanspruchung am Träger).

### 1.3 UMFANG

Diese Arbeit setzt sich anfangs mit den Herangehensweisen der unterschiedlichen zuvor genannten Normen auseinander. Die Normen werden einem Vergleich unterzogen und gegenübergestellt. Dabei werden einerseits die effektiven Vertikalspannungen an der Stelle der Krafteinleitung nach EN 1993-6: Kranbau [5] mit der DIN 18800-1: Stahlbau [6] verglichen. Andererseits wird die Tragwiderstandskraft nach DIN 18800-1 [6], EN 1993-1-5 [3] und EN 1993-1-8 [4] dem Bemessungsvorschlag [1] gegenübergestellt. Aus dieser Vorstudie wird daraufhin ein repräsentatives Profil für die nähere numerische Untersuchung gewählt.

Die maximale Tragwiderstandskraft wird anschließend numerisch mit dem Programm Abaqus [8] ermittelt.

Für die steifenlose Krafteinleitung in den Steg bei Biegeträgern sind folgende Effekte zu berücksichtigen:

- I: lokale Querschnittstragfähigkeit des Steges, in Hinblick der senkrecht zur Trägerachse wirkenden Drucknormalspannungen (vgl. Abbildung 2 und 4)
  - abhängig von der Stegdicke und der Lasteinleitungslänge
- II: Beulgefahr
  - abhängig vom Verhältnis Steghöhe zu Stegdicke und der Lage der lokalen Krafteinleitung (z.B.: Trägerende)
- III: zusätzlich wirkende Längsnormalspannungen aus der Biegebeanspruchung am Träger
  - a) Vertikaldruck und Längsdruck
  - b) Vertikaldruck und Längszug
- IV: zusätzlich wirkender Schub aus der Querkraftbelastung am Träger

Dazu wird anfangs ein passendes Berechnungsmodell auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM), sowie mehrere repräsentative Systeme für baupraktische Fälle gesucht, die diese Effekte abdecken. Den ersten Berechnungsschritt stellt eine lineare Beulanalyse zur Ermittlung der lokalen Eigenwerte und der zugehörigen Eigenformen dar. Die entsprechenden Eigenformen werden anschließend als geometrische Ersatzimperfektion in der weiteren nichtlinearen Traglastanalyse angesetzt. Als Resultat erhält man eine maximale Tragfähigkeit für den Träger gegenüber einer lokalen Krafteinleitung in den Steg. Dieses Ergebnis wird schlussendlich dem Bemessungsvorschlag [1] gegenübergestellt.

## 2. VERGLEICH DER NACHWEISKONZEPTE NACH EUROCODE UND DIN

In diesem Abschnitt werden anfangs die Herangehensweisen folgender Stahlbaunormen beschrieben und anschließend verglichen.

- DIN 18800-1: Bemessung und Konstruktion [6]
- EN 1993-6: Kranbahnen [5]
- EN 1993-1-5: Plattenförmige Bauteile [3]
- EN 1993-1-8: Bemessung von Anschlüssen [4]

Es erfolgt ein Vergleich der effektiven Vertikalspannungen der Kranbahnnorm EN 1993-6 [5] mit der DIN 18800-1 [6] sowie ein Vergleich der Tragwiderstandskraft nach EN 1993-1-5 [3], EN 1993-1-8 [4] und der DIN 18800-1 [6]. Des Weiteren wird auch eine Gegenüberstellung zum Bemessungsvorschlag [1] vorgenommen.

### 2.1 ALLGEMEINES

Für eine bessere Übersicht werden die Abkürzungen der Normen bei gleicher Bedeutung vereinheitlicht.

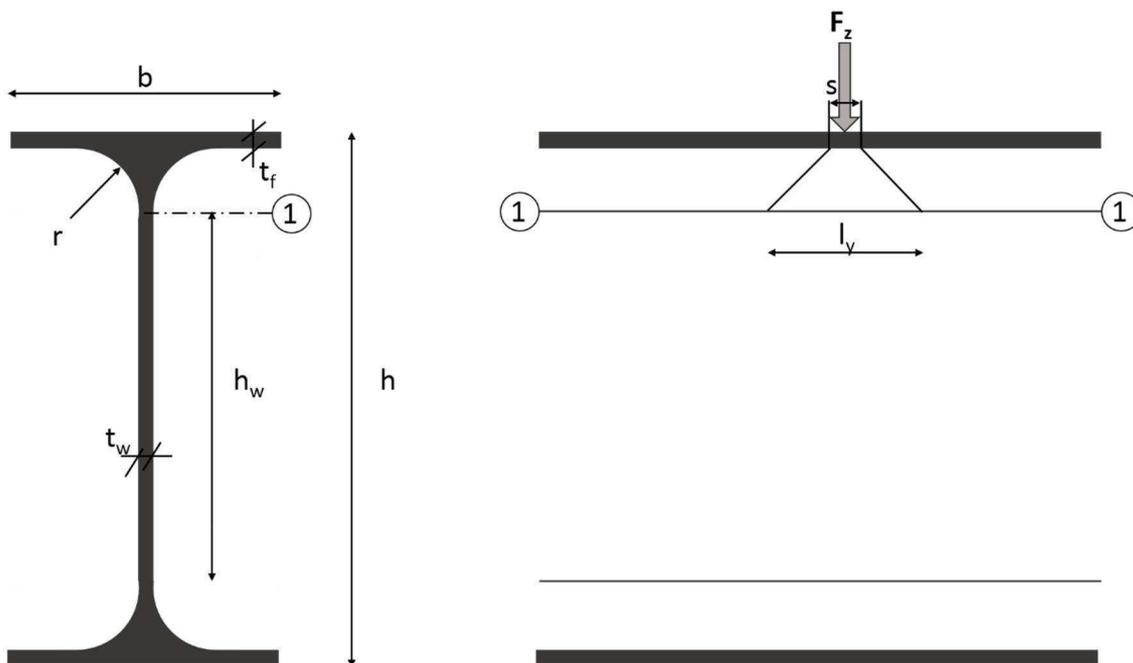


Abbildung 1: verwendete Bezeichnungen

Dabei sind im Folgenden nachstehende Abkürzungen angewendet worden.

$$F_{z,Rd} = \text{Tragwiderstandskraft für senkrecht zur Trägerachse angreifende Einzellast } F_z$$

- s = Breite des belasteten Laststreifens am Trägerflansch mit konstanter Linienlast  $p$  infolge  $F_z$
- $l_y$  = effektive Länge des belasteten Steges im kritischen Schnitt 1, am Ende der Walzprofilaustrundung bzw. am unteren Ende der Halskehlnaht (geschweißte Träger)
- h = Profilhöhe
- $h_w$  = Steghöhe (Anm.: bei geschweißten Trägern ist  $h_w = h - 2 \cdot t_f$ )
- b = Profilbreite
- $t_f$  = Trägerflanschdicke
- $t_w$  = Stegdicke
- r = Ausrundungsradius
- 
- $\omega$  = Abminderungsbeiwert durch begleitende Schubbeanspruchung
- $k_w$  = Abminderungsbeiwert durch gleichzeitige Längsspannungen
- $\rho$  = Abminderungsbeiwert, welcher das Beulen berücksichtigt

## 2.2 VORGEHEN NACH DIN 18800-1: BEMESSUNG UND KONSTRUKTION

Die DIN 18800-1: *Stahlbauten - Bemessung und Konstruktion* [6], welche mittlerweile zurückgezogen wurde, befasst sich mit der Krafteinleitung in nicht ausgesteifte Stege. Sie beinhaltet nicht die Effekte des Beulens, jedoch die zusätzliche Wirkung von Längszugspannungen. Unter der Bedingung, dass das Verhältnis Profilhöhe zu Stegdicke ( $h/t_w$ ) kleiner gleich 60 ist, kann die Tragwiderstandskraft wie folgt berechnet werden:

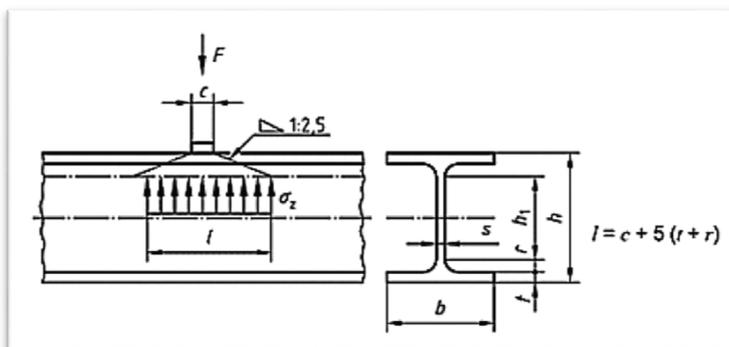
$$F_{z,Rd} = l_y * t_w * f_y * \frac{1}{\gamma_M}$$

$l_y$  ist die effektive Länge des belasteten Steges im kritischen Schnitt, welcher sich am Ende des Ausrundungsradius befindet. Dieser ergibt sich mit einem Lastausbreitungsverhältnis von 1:2,5 zu (vgl. Abbildung 2):

$$l_y = s + 2 * [(t_f + r) * 2,5]$$

$$l_y = s + 5 * (t_f + r)$$

Bei zusätzlich vorhandenen Längszugspannungen  $\sigma_x \geq 0,5 * f_y$  infolge Biegebeanspruchung am Träger (Wirkung ebenfalls im kritischen Schnitt) wird  $F_{z,Rd}$  um den Faktor  $(1,25 - 0,5 * \sigma_x / f_{y,k})$  abgemindert.



Hier ist

$$c = s$$

$$t = t_f$$

$$h_1 = h_w$$

$$s = t_w$$

$$l = l_y$$

Abbildung 2: Krafteinleitung in nicht ausgesteifte Stege nach DIN 18800-1 [6]

Somit kann auch die effektive Vertikalspannung  $\sigma_{z,eff}$  bei einer einwirkenden Kraft  $F_z$  nach DIN 18800-1 [6] wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{z,eff,DIN} = \frac{F_z}{l_y * t_w}$$

## 2.3 VORGEHEN NACH EN 1993-6: KRANBAHNEN

In der EN 1993-6: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Kranbahnen* [5], im Kapitel 5.7 „Lokale vertikale Druckspannung“, findet man die Vorgehensweise für die Ermittlung der lokalen vertikalen Spannungen  $\sigma_z$  infolge der Krafteinleitung bei Kranbahnen senkrecht zur Träger-Längsachse.

Laut Norm kann die vertikale Druckspannung  $\sigma_{oz,Ed}$  im Steg infolge Radlasten auf dem Oberflansch wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{oz,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{l_{eff} * t_w}$$

Dabei ist

$F_{z,Ed}$  der Bemessungswert der Radlast

$l_{eff}$  die effektive Lastausbreitungslänge an der Unterkante des Obergurttflansches

Die effektive Lastausbreitungslänge  $l_{eff}$  berechnet sich anhand Tabelle 5.1 in der Norm [5].

Fall	Beschreibung	Effektive Lastausbreitungslänge $l_{eff}$
(a)	Kranschiene schubstarr am Flansch befestigt	$l_{eff} = 3,25 [I_{ff} / t_w]^{1/3}$
(b)	Kranschiene nicht schubstarr am Flansch befestigt	$l_{eff} = 3,25 [(I_r + I_{f,eff}) / t_w]^{1/3}$
(c)	Kranschiene auf einer mind. 6mm dicken nachgiebigen Elastomerunterlage	$l_{eff} = 4,25 [(I_r + I_{f,eff}) / t_w]^{1/3}$
$I_{f,eff}$	Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie des Flansches mit der effektiven Breite $b_{eff}$	
$I_r$	Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie der Schiene	
$I_{ff}$	Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie des zusammengesetzten Querschnitts einschließlich der Schiene und des Flansches mit der effektiven Breite $b_{eff}$	
$t_w$	Stegdicke	
$b_{eff} = b_{fr} + h_r + t_f$ aber $b_{eff} \leq b$		
Dabei ist		
$b$	die Gesamtbreite des Obergurtes;	
$b_{fr}$	die Breite des Schienenfußes, siehe Bild 5.2;	
$h_r$	die Schienenhöhe, siehe Bild 5.1;	
$t_f$	die Flanschdicke.	
ANMERKUNG Der Verschleiß der Kranschiene wird bei der Bestimmung von $I_r$ , $I_{ff}$ und $h_r$ berücksichtigt, siehe 5.6.2(2) und 5.6.2(3).		

Abbildung 3: effektive Lastausbreitungslänge nach EN 1993-6 [5]

Die effektive Lastausbreitungslänge wird nachfolgend nach Fall (b) – „Kranschiene nicht schubstarr am Flansch befestigt“ berechnet, wie in Abbildung 3 ersichtlich.

$$l_{eff} = 3,25 * \left[ (I_r + I_{f,eff}) / t_w \right]^{\frac{1}{3}}$$

Um die Kranbahnnorm mit einem Hauptträger-Nebenträger Anschluss vergleichen zu können, müssen Abänderungen bzw. Annahmen getroffen werden, da ja keine Kranschiene vorliegt. Eine Kranschiene, welche in Längsrichtung des Hauptträgers aufliegt, wird beispielsweise zu einer Pfette, welche in Querrichtung zum Hauptträger aufliegt, geändert. Siehe dazu Abbildung 4. Da sich in diesem Fall keine Kranschiene befindet, fällt der Term  $I_r$  weg. Da die „Pfette“ über die ganze Breite aufliegt, kann angenommen werden, dass  $b_{eff} = b$  ist und somit  $I_{f,eff}$  dem Trägheitsmoment des Obergurtes entspricht.. Dabei ist  $b$  die Gesamtbreite des Obergurtes des Hauptträgers.

Von Interesse ist der kritische Stegquerschnitt, welcher sich genau im Übergang von Ausrundungsradius und Steg befindet. Die effektive Lastausbreitungslänge  $l_{eff}$  nach EN 1993-6 [5] befindet sich an der Unterkante des Oberflansches – für diese Höhenlage gilt der Wert  $\sigma_{oz,Ed}$ . Es kann laut Norm ein Lastausbreitungswinkel von  $45^\circ$  nach unten angenommen werden. Anhand der getroffenen Annahmen kann eine effektive Länge  $l_y$  im kritischen Stegquerschnitt wie folgt berechnet werden:

$$l_y = l_{eff} + 2r$$

$$l_y = 3,25 * \left[ \left( \frac{b * t_f^3}{12} \right) / t_w \right]^{\frac{1}{3}} + 2r$$

Die DIN 18800-1 [6] geht von einem plastischen Traglastzustand aus. Die EN 1993-6 [5] hingegen soll die elastische Spannungsverteilung annähern.

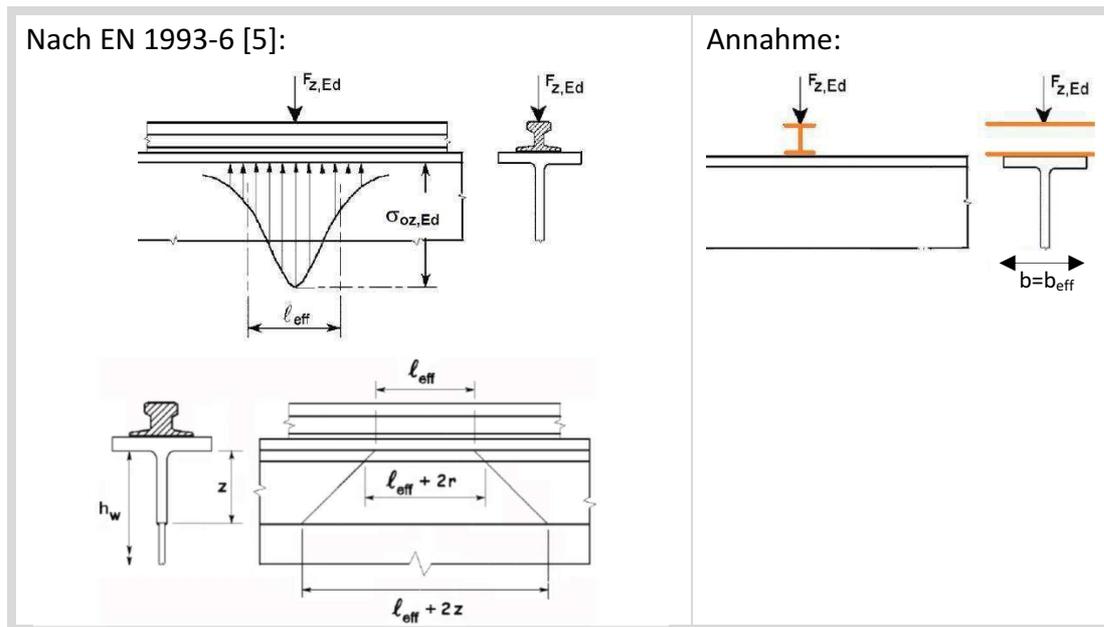


Abbildung 4: effektive Lastausbreitungslänge nach EN 1993-6 [5]

Somit kann die effektive Vertikalspannung  $\sigma_{z,eff}$  bei einer einwirkenden Kraft  $F_z$  nach EN 1993-6 [5] wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{z,eff,EC3-6} = \frac{F_z}{l_y \cdot t_w}$$

## 2.4 VORGEHEN NACH EN 1993-1-8: BEMESSUNG VON ANSCHLÜSSEN

Die EN 1993-1-8: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Bemessung von Anschlüssen* [4] behandelt in Abschnitt 6.2.6.2 „Stützensteg mit Beanspruchung durch Querdruck“ die Beanspruchung eines nicht ausgesteiften Stützensteges, welcher durch Querdruck beansprucht wird. Dies kann sinngemäß als eine lokale Krafteinleitung angesehen werden.

Die Tragfähigkeit eines nicht ausgesteiften Steges errechnet sich nach EN 1993-1-8 [4] aus:

$$F_{z,Rd} = \omega * k_w * \rho * l_y * t_w * f_y * \frac{1}{\gamma_M}$$

- Für die Berechnung der effektiven Länge  $l_y$  wurden Anpassungen getroffen. Für die Lasteinleitung wurde eine feste Lasteinleitungslänge  $s$  angenommen. Somit ergibt sich:

$$l_y = s + 5 * (t_f + r)$$

- Der Abminderungsbeiwert  $\omega$  für begleitende Schubbeanspruchung ergibt sich nach dem Umformen allgemein zu:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,43 * \left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}}\right)^2}}$$

Dabei sind:

$V_{Ed}$  die einwirkende Querkraft im Träger im Bereich der lokalen Krafteinleitung,

$V_{Rd} = \frac{f_y * A_{vc}}{\sqrt{3} * \gamma_M}$  die Querkrafttragfähigkeit des Trägers, mit

$$A_{vc} = A - 2 * b * t_f + (t_w + 2r) * t_f$$

- Der Abminderungsbeiwert  $k_w$  für gleichzeitig wirkende Längsdruckspannungen errechnet sich wie folgt:

$$\sigma_x \leq 0,7 * f_y \rightarrow k_w = 1,0$$

$$\sigma_x > 0,7 * f_y \rightarrow k_w = 1,7 - \frac{\sigma_x}{f_y}$$

- Der Abminderungsbeiwert  $\rho$ , welcher das Beulen berücksichtigt, ergibt sich aus:

$$\lambda_p \leq 0,72 \rightarrow \rho = 1,0$$

$$\lambda_p > 0,72 \rightarrow \rho = (\lambda_p - 0,2) / \lambda_p^2$$

Dabei ist

$$\lambda_p = 0,932 * \sqrt{\frac{l_y * h_w * f_y}{E * t_w^2}}$$

## 2.5 VORGEHEN NACH EN 1993-1-5: BEMESSUNG UND KONSTRUKTION VON STAHLBAUTEN – PLATTENFÖRMIGE BAUTEILE

Die EN 1993-1-5: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Plattenförmige Bauteile* [3] beinhaltet in Abschnitt 6 „Beanspruchbarkeit bei Querbelastung“ Vorgehensweisen bei der Beanspruchung des Steges ohne Steifen, wobei hier der Effekt des lokalen Beulens explizit miterfasst ist.

Die Tragfähigkeit eines nicht ausgesteiften Steges errechnet sich nach EN 1993-1-5 [3] aus

$$F_{z,Rd} = \rho * l_y * t_w * f_y * \frac{1}{\gamma_M}$$

- Die wirksame Lastausbreitungslänge  $l_y$  ist abhängig von der Stegslankheit und Beulslankheit und errechnet sich folgendermaßen:

$$l_y = s + t_f * 2 * (1 + \sqrt{m_1 + m_2})$$

Dabei sind

$$m_1 = \frac{b_f}{t_w}$$

$$\lambda_F > 0,5 \rightarrow m_2 = 0,02 * \left(\frac{h_w}{t_f}\right)^2$$

$$\lambda_F \leq 0,5 \rightarrow m_2 = 0$$

mit

$$\lambda_F = \sqrt{\frac{l_y * t_w * f_y}{F_{cr}}}$$

mit

$$F_{cr} = 0,9 * k_f * E * \frac{t_w^3}{h_w}$$

$$k_f = 6 + 2 * \left(\frac{h_w}{a}\right)^2$$

Dabei ist  $a$  der Abstand der Beulsteifen. Es wird angenommen, dass  $a$  sehr groß ist und somit  $k_f = 6$  ist.

- Der Beulabminderungswert  $\rho$  ergibt sich aus:

$$\rho = \frac{0,5}{\lambda_F} \leq 1,0$$

## 2.6 VORGEHEN NACH DEM BEMESSUNGSVORSCHLAG TU GRAZ

Der Bemessungsvorschlag [1] bezieht sich auf die EN 1993-1-8 [4], da diesbezüglich immer konservativere Ergebnisse als nach der deutlich aufwändigeren Vorgehensweise nach EN 1993-1-5 [3] erhalten werden (vgl. Abschnitt 2.5). Die Tragfähigkeit eines nicht ausgesteiften Steges errechnet sich laut dem Bemessungsvorschlag [1] zu:

$$F_{z,Rd} = \omega * k_w * \rho * l_y * t_w * f_y * \frac{1}{\gamma_M}$$

- Die effektive Länge  $l_y$  ergibt sich zu

$$l_y = s + 5 * (t_f + r)$$

- Der Abminderungsbeiwert  $\omega$  für begleitende Schubbeanspruchung aus Querkraft im Träger errechnet sich wie folgt:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 0,5 \rightarrow \omega = 1,0$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} > 0,5 \rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,43 * \left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}}\right)^2}}$$

Dabei ist

$V_{Ed}$  die einwirkende Querkraft im Träger, im Bereich der lokalen Krafteinleitung,

$V_{Rd} = \frac{f_y * A_{vc}}{\sqrt{3} * \gamma_M}$  die Querkrafttragfähigkeit des Trägers, mit

$$A_{vc} = A - 2 * b * t_f + (t_w + 2r) * t_f$$

- Der Abminderungsbeiwert  $k_w$  für gleichzeitig wirkende Längsdruckspannungen errechnet sich wie folgt:

$$\sigma_x \leq 0,7 * f_y \rightarrow k_w = 1,0$$

$$\sigma_x > 0,7 * f_y \rightarrow k_w = 1,7 - \frac{\sigma_x}{f_y}$$

- Der Abminderungsbeiwert  $\rho$ , welcher das Beulen berücksichtigt, ergibt sich aus:

$$\lambda_p \leq 0,72 \rightarrow \rho = 1,0$$

$$\lambda_p > 0,72 \rightarrow \rho = (\lambda_p - 0,2) / \lambda_p^2$$

Dabei ist

$$\lambda_p = 0,932 * \sqrt{\frac{l_y * h_w * f_y}{E * t_w^2}}$$

## 2.7 VERGLEICH DER NORMENERGEBNISSE

### 2.7.1 ALLGEMEINES

Der Vergleich der Normen wird für die im Hochbau praxisüblichen Profile (IPE, HEA, HEB) durchgeführt. Für den Vergleich wurde eine Stahlgüte von S235 bzw. eine Krafteinleitungslänge von  $s = 30 \text{ mm}$  angenommen.

### 2.7.2 ZUSAMMENFASSUNG DER HERANGEHENSWEISEN DER EINZELNEN NORMEN

Für die Berechnung der maximalen Tragwiderstandskraft  $F_{z,Rd}$  quer zum Steg gibt es unterschiedliche Herangehensweisen. In der DIN 18800-1 [6], in der EN 1993-1-8 [4], sowie im Bemessungsvorschlag [1] errechnet sich die wirksame Lasteinleitungslänge mit einem Lastausbreitungsverhältnis von 1:2,5. Die Lasteinleitungslänge nach EN 1993-1-5 [3] ist abhängig von der Stegslankheit sowie der Beulslankheit. Nach EN 1993-6 [5] wird das Flächenmoment zweiten Grades, um die horizontale Schwerlinie des Flansches, benötigt.

Die DIN 18800-1 [6] berücksichtigt für die Berechnung der maximalen Tragwiderstandskraft  $F_{z,Rd}$  keine zusätzlichen Abminderungsbeiwerte. Die Anwendbarkeit der Bemessung ist durch das Verhältnis Profilhöhe zu Stegdicke begrenzt, da der Effekt des lokalen Beulens nicht miterfasst ist. Die EN 1993-1-5 [3] berücksichtigt in der Bemessung zusätzlich den Beuleinfluss. Die EN 1993-1-8 [4], sowie der Bemessungsvorschlag [1] berücksichtigen zusätzlich zum Beulen die Interaktion von Moment und Querkraft (globale Trägerbeanspruchung) mit dem Vertikaldruck aus  $F_z$  (lokale Trägerbeanspruchung) in Form von Abminderungsbeiwerten.

Abbildung 5 zeigt eine Übersichtsskizze über die Unterschiede der Normen.

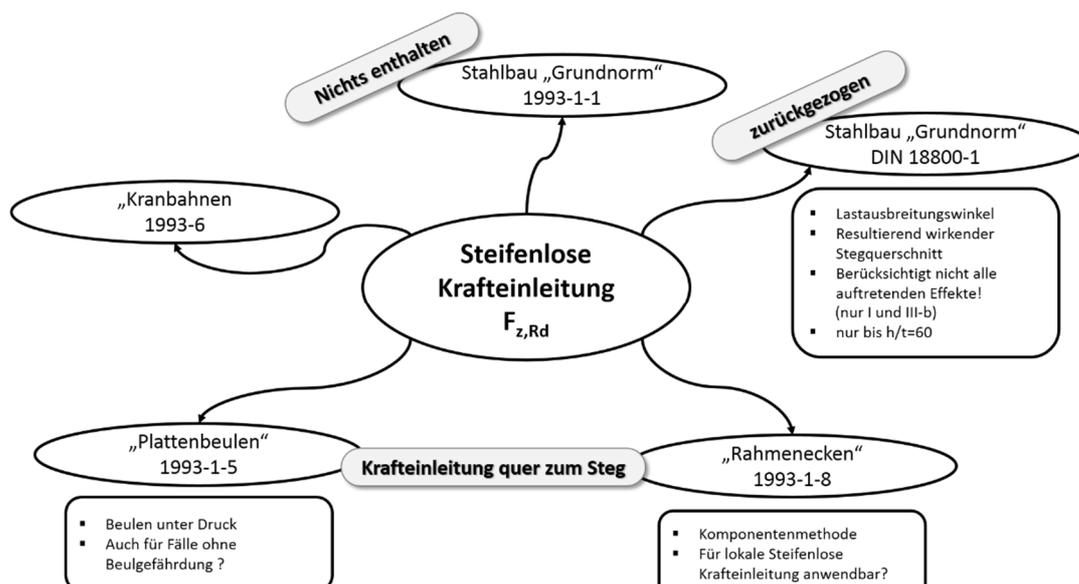


Abbildung 5: Übersicht der Normen zur Ermittlung der Tragfähigkeit  $F_{z,Rd}$

### 2.7.3 GETROFFENE ANNAHMEN FÜR DEN OBJEKTIVEN NORMENVERGLEICH

Da die Normen für unterschiedliche Anwendungsfälle gedacht sind, müssen Annahmen getroffen werden, um diese miteinander objektiv vergleichen zu können.

Die zusätzliche globale Wirkung von Normalkraft, Querkraft und Moment, welche sich aufgrund des statischen Systems und der Belastung ergibt, muss ebenfalls berücksichtigt werden. Um diese miteinbeziehen zu können und für alle Profile allgemein darstellen zu können, wurden die Ausnutzungsgrade  $\alpha_V$  (Querkraft) und  $\alpha_M$  (Moment) eingeführt. Diese besagen, dass bei einem Wert von 1,0 aus der alleinigen Wirkung von M und V bereits die Tragfähigkeit des Trägers erschöpft ist ( $V_{Ed} = V_{Rd}$  bzw.  $\sigma_x = f_y$ ) bzw. bei einem Wert von 0 liegt keinerlei globale Beanspruchung vor ( $V_{Ed} = 0$  bzw.  $\sigma_x = 0$ ).

### 2.7.4 VERGLEICH DER EFFEKTIVEN VERTIKALSPANNUNGEN INFOLGE $F_z$

Ein Vergleich von DIN 18800-1 [6] und EN 1993-6 [5] soll aufzeigen, ob es Ähnlichkeiten gibt, bzw. in welchen Bereichen der Nachweisführung Unterschiede vorliegen und in wieweit die Ergebnisse voneinander abweichen.

Dieser Vergleich soll auch dazu dienen, aufzuzeigen welche Profilgrößen für weitere FEM-Untersuchungen in Frage kommen.

Es wurde von einer einwirkenden Kraft  $F_z$  von 100 kN ausgegangen. Für die Berechnung nach DIN 18800-1 [6] wird eine Krafteinleitungsbreite von  $s = 30$  mm angenommen. Die effektive Vertikalspannung errechnet sich dann in beiden Fällen zu  $\sigma_{z,eff} = \frac{F_z}{l_y * t_w}$ .

Das Diagramm in Abbildung 6 zeigt, dass die Spannungen, welche nach EN 1993-6 [5] (grün) berechnet wurden, deutlich über jenen nach DIN 18800-1 [6] (orange) liegen. Dies ist nicht verwunderlich, da die geringeren Spannungen nach DIN 18800-1 [6] effektive Spannungen darstellen, die eine Spannungsumlagerung durch plastizieren erfassen sollen.

In Abbildung 7 ist ein Vergleich der beiden Normen untereinander ersichtlich. Hier ist das Verhältnis der Vertikalspannungen nach EN 1993-6 [5] zu DIN 18800-1 [6] dargestellt.

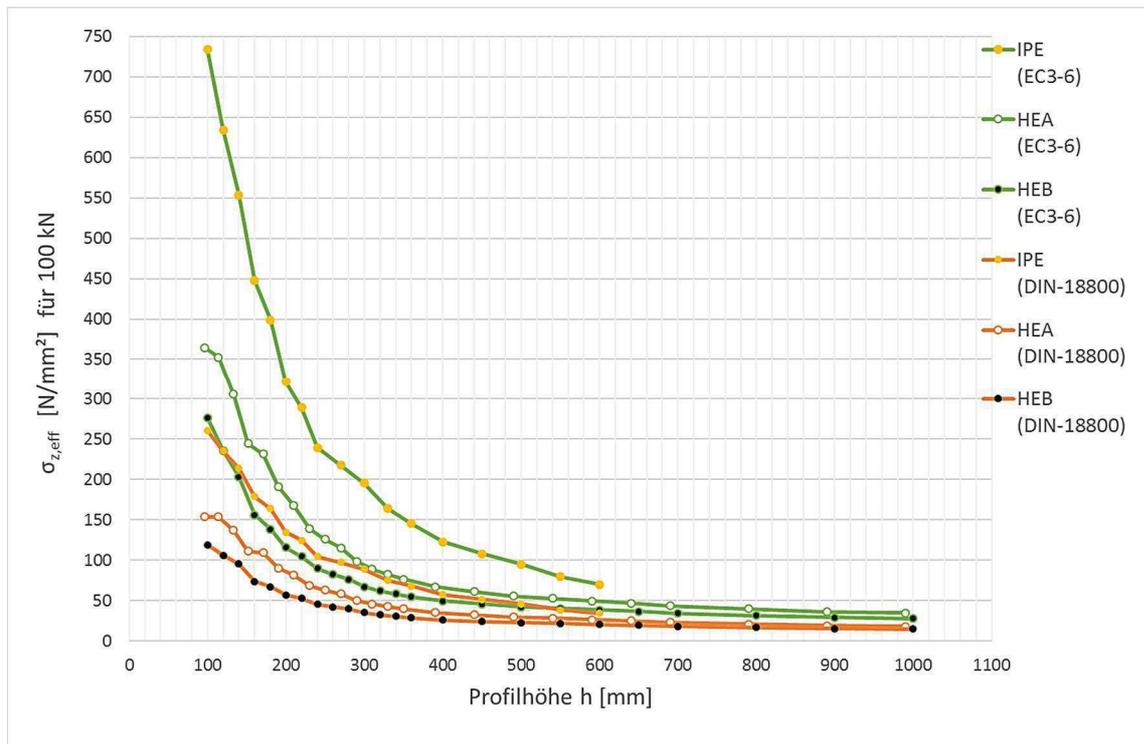


Abbildung 6: effektive Vertikalspannungen nach EC3-6 [5] und DIN 18800-1 [6] infolge  $F_z$  für Walzprofile der Reihe IPE, HEA und HEB

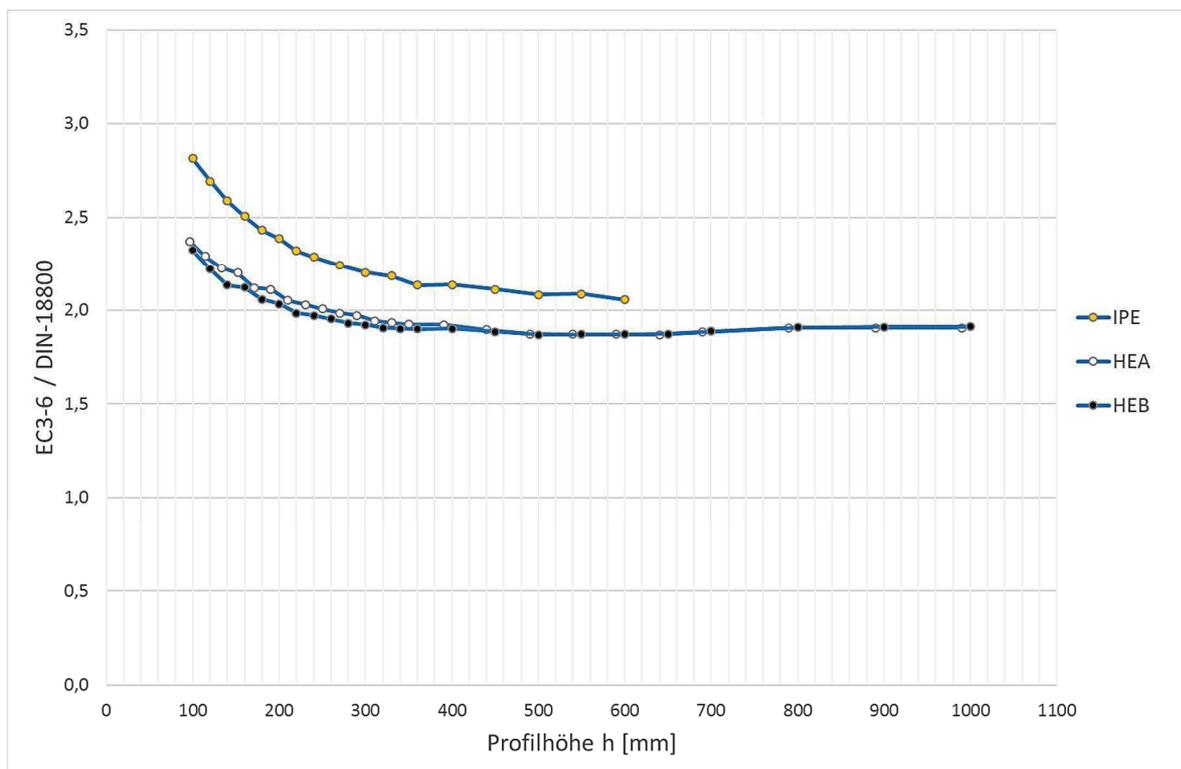


Abbildung 7: Verhältnis der Vertikalspannungen  $\sigma_z$  infolge  $F_z$  von EC3-6 [5] zu DIN 18800-1 [6] für Walzprofile der Reihe IPE, HEA und HEB

Ab einer Profilhöhe von ca. 300 mm ist das Verhältnis der Spannungen aus EN 1993-6 [5] zu DIN 18800-1 [6] etwa 2 und verändert sich mit dem Anstieg der Profilhöhe nicht wesentlich (vgl. Abbildung 7). Bei kleineren Profilhöhen steigt das Verhältnis deutlich an. Dies resultiert aus einer deutlich kürzeren effektiven Länge im Zuge der Berechnung nach EN 1993-6 [5]. Bei der Berechnung der effektiven Länge nach EN 1993-6 [5] ist die Breite des Obergurflansches, sowie das Flächenmoment zweiten Grades, um die horizontale Schwerlinie des Flansches, von Bedeutung. Für die Berechnung nach DIN 18800-1 [6] wird eine fixe Lasteinleitungslänge  $s$  angenommen. Die DIN 18800-1 [6] geht von einem plastischen Traglastzustand aus. Die EN 1993-6 [5] hingegen soll die elastische Spannungsverteilung annähern.

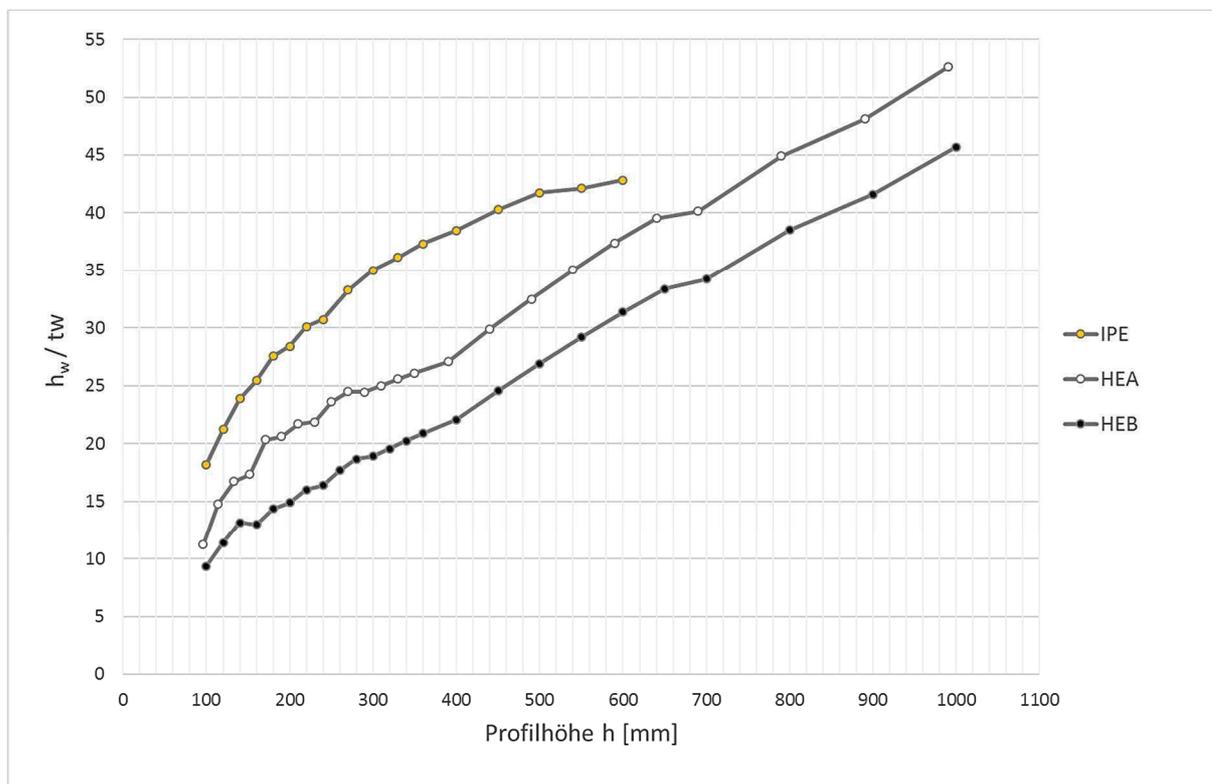


Abbildung 8: Verhältnis von Steghöhe zu Stegdicke ( $h_w/t_w$ ) für Walzprofile der Reihe IPE, HEA und HEB

Das Verhältnis von Steghöhe zu Stegdicke, welches für die Beulgefährdung von Bedeutung ist, steigt für die europäischen Walzprofile mit der Profilhöhe annähernd linear an, wie Abbildung 8 zeigt. Die größte Schlankheit erreicht der HEA 1000 mit einem  $h_w/t_w$  Verhältnis von 53.

Die Krafteinleitungslänge von  $s = 30$  mm ist eine - am Anfang getroffene - Annahme. Eine Vergrößerung der Krafteinleitungslänge würde zu einer Verkleinerung der Vertikalspannungen führen und dadurch nur den Abstand zwischen Eurocode und DIN

noch größer machen. Dies bedeutet, dass sich auch der Verlauf, wie er in Abbildung 7 dargestellt ist, nicht verändern würde, sondern die Linien nur parallel nach oben verschieben würde. Somit würde eine Vergrößerung der Krafteinleitungslänge die grundsätzliche Aussage nicht verändern. Ab einer Profilhöhe von 300 mm gibt es, unabhängig von der Krafteinleitungslänge, keine Veränderung des Verhältnisses der Vertikalspannungen  $\sigma_z$  von DIN 18800-1 [6] zu EN 1993-6 [5] mehr.

Es wurde aufgrund dieser Voruntersuchung entschieden, dass Profile ab einer Profilhöhe von zumindest 300 mm für weitere Untersuchungen herangezogen werden können, da es danach keine wirklichen Änderungen des Verhältnisses EN1993-6 [5] zu DIN 18800-1 [6] gibt, siehe Abbildung 7.

### 2.7.5 VERGLEICH DER TRAGWIDERSTANDSKRAFT $F_{z,Rd}$

In diesem Abschnitt wird hauptsächlich auf die Veröffentlichung von Unterwiesinger H. und Taras A. unter dem Titel „Steifenlose Kraffteinleitung bei Biegeträgern – Vorschlag einer vereinfachten Eurocode-konformen Nachweisführung“ [1] Bezug genommen und darauf aufgebaut. Diese genannte Veröffentlichung beinhaltet bereits eine Zusammenfassung der Vorgehensweise nach DIN 18800-1 [6], sowie den Teilen des Eurocodes EN 1993-1-5 [3] (Plattenbeulen) und EN 1993-1-8 [4] (Anschlüsse). Dabei werden auch die unterschiedlichen Vorgehensweisen miteinander verglichen. Zusätzlich befindet sich darin ein Bemessungsvorschlag [1] zur steifenlosen Kraffteinleitung bei Biegeträgern.

Hier wird nun speziell für die Walzprofilserien IPE, HEA und HEB die Tragwiderstandskraft für den Vergleich herangezogen. Die Abbildungen 9 bis 11 zeigen die Tragwiderstandskraft  $F_{z,Rd}$  berechnet nach den folgenden Normen

- DIN 18800-1: Bemessung und Konstruktion [6]
- EN 1993-1-5: Plattenförmige Bauteile [3]
- EN 1993-1-8: Bemessung von Anschlüssen [4]

und dem Bemessungsvorschlag [1].

Da der Bemessungsvorschlag [1] für die Berechnung der Tragwiderstandskraft die gleiche Herangehensweise hat wie die EN 1993-1-8 [4], werden diese im Diagramm in einer Linie zusammengeführt. Es wird auch hier von einer Kraffteinleitungslänge von  $s = 30$  mm ausgegangen. In den dargestellten Fällen gibt es keine Interaktion mit Schub- und Längsnormalspannungen. Dies zeigen auch die Faktoren  $\alpha_V$  (Querkraft) und  $\alpha_M$  (Moment) im Diagramm an ( $M=V=0$ , daher  $\alpha_V=\alpha_M=0$ ). Somit sind die zugehörigen Abminderungsfaktoren  $\omega$  (Abminderungsbeiwert durch begleitende Schubbeanspruchung) und  $k_w$  (Abminderungsbeiwert durch gleichzeitige Längsspannungen) gleich 1,0.

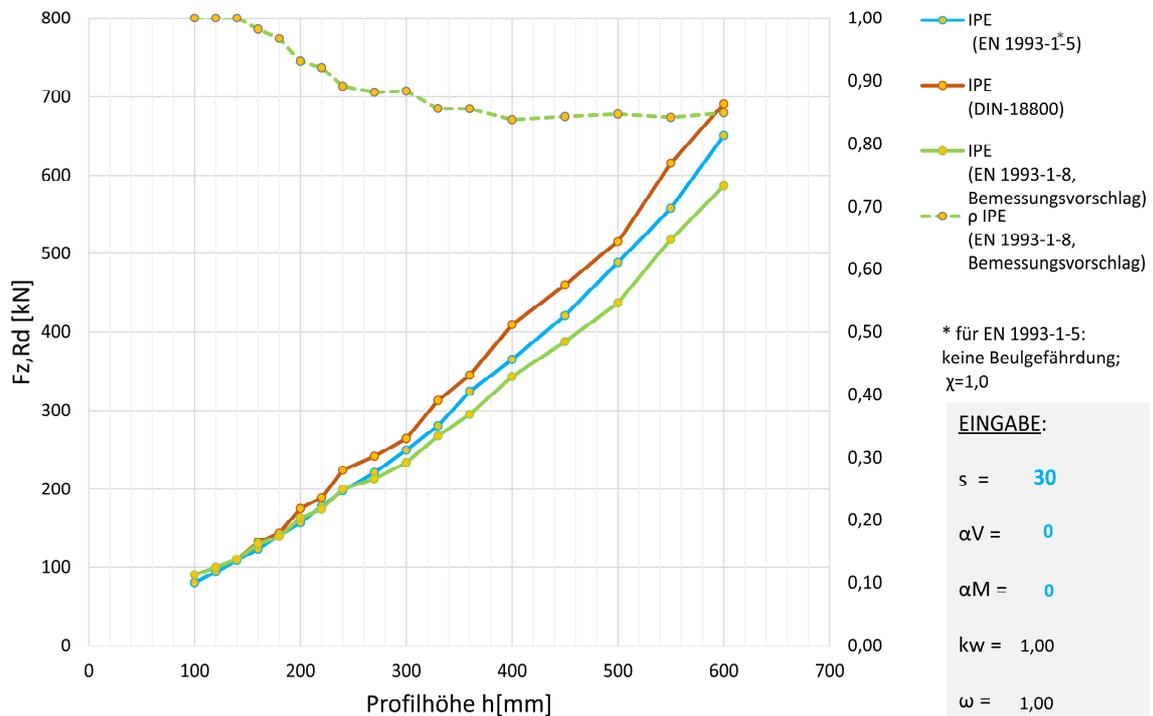


Abbildung 9: Traglastwiderstand  $F_{z,Rd}$  für IPE-Profile (Material S235;  $\gamma_M=1,0$ )

Nach DIN werden bei der IPE-Serie die höchsten Traglastwiderstände  $F_{z,Rd}$  erreicht. Dies resultiert daraus, dass die Berechnung nach DIN 18800-1 [6] keine Beulabminderung beinhaltet. Die Beulgefährdung wird lediglich mit einer Begrenzung der zu verwendenden Querschnitte ( $h/t_w \leq 60$ ) abgedeckt. Auch nach EN 1993-1-5 [3] gibt es keine Beulabminderung. Der in EN 1993-1-5 [3] beinhaltende Beulabminderungsfaktor wird bei diesen Walzprofilen nicht wirkend, womit es keine Beulgefährdung gibt. Obwohl es in der DIN 18800-1 [6] und der EN 1993-1-5 [3] keine Beulabminderung gibt, unterscheiden sich diese beiden Berechnungen trotzdem. Nach DIN 18800-1 [6] wird von einer fixen Lasteinleitungslänge und einem fixen Lastausbreitungsverhältnis ausgegangen. Nach EN 1993-1-5 [3] hingegen ist die effektive Länge des belasteten Steges im kritischen Schnitt vom Verhältnis Flanschbreite zu Stegdicke abhängig. Bei der Berechnung nach EN1993-1-8 [4] bzw. nach dem Bemessungsvorschlag [1] wird von einer fixen Lasteinleitungslänge und einem fixen Lastausbreitungsverhältnis ausgegangen. Ebenso wird die Tragwiderstandskraft mit dem Beulabminderungsbeiwert reduziert. Dieser stellt die grün, strichlierte Linie in Abbildung 9 bis 11 dar. In der Sekundärachse auf der rechten Seite im Diagramm ist die zugehörige Größenskala der Beulabminderung dargestellt.

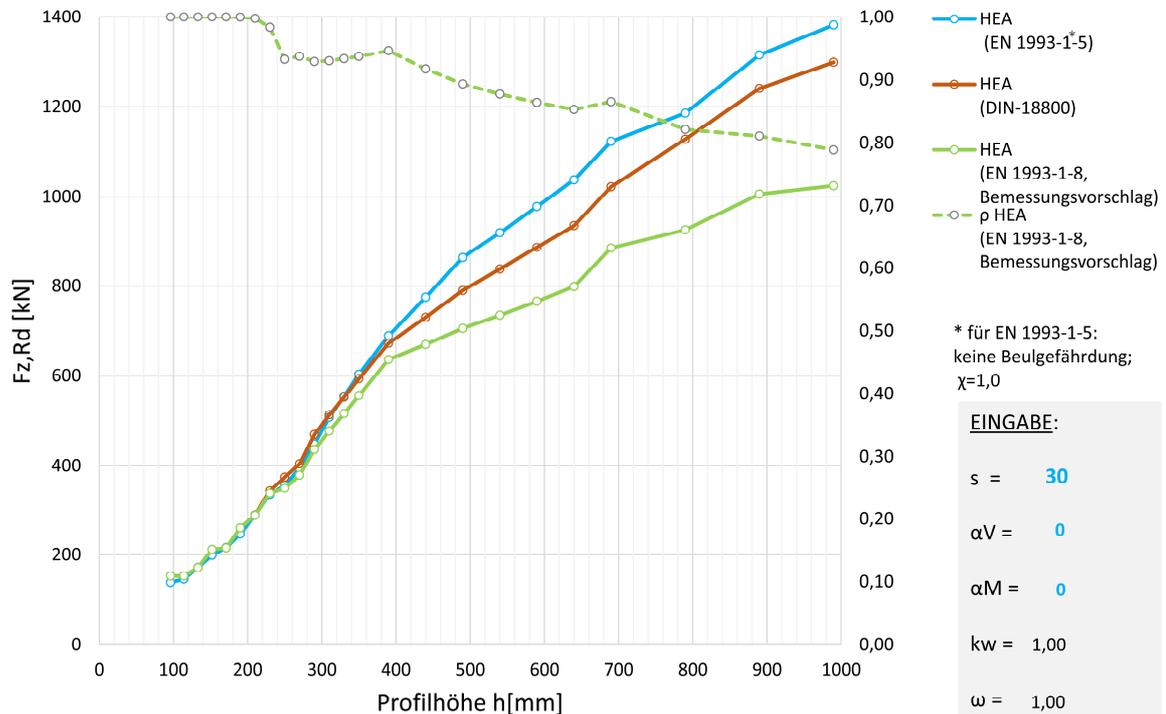


Abbildung 10: Traglastwiderstand  $F_{z,Rd}$  für HEA-Profile (Material S235;  $\gamma_M=1,0$ )

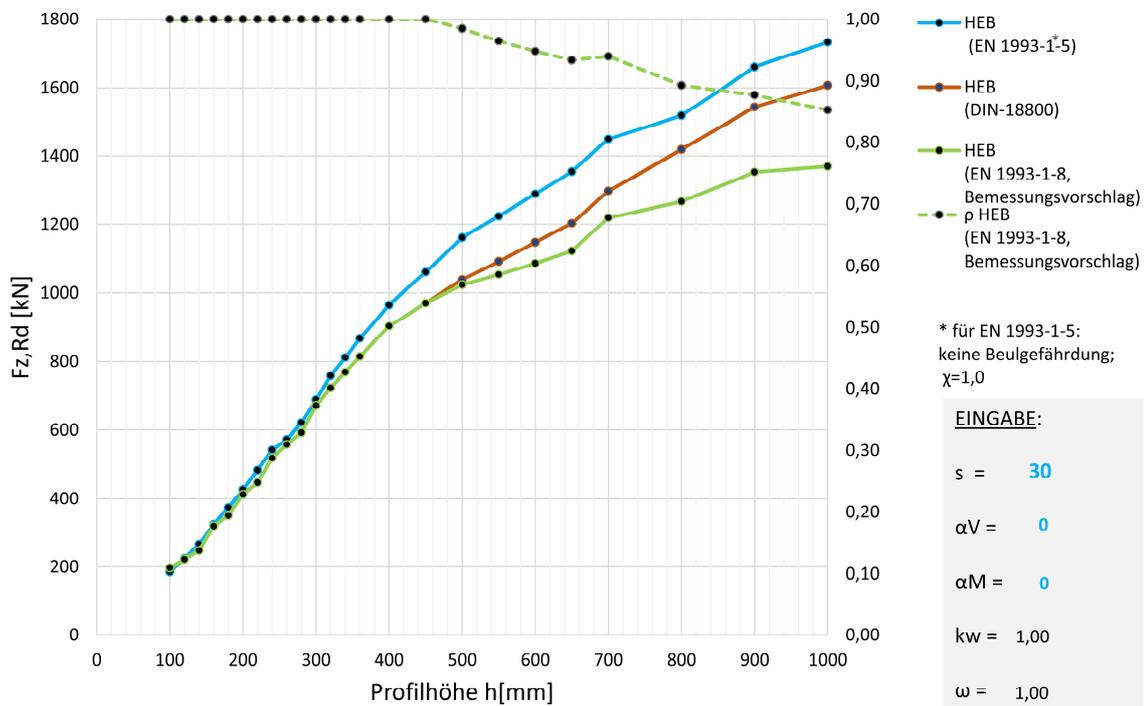


Abbildung 11: Traglastwiderstand  $F_{z,Rd}$  für HEB-Profile (Material S235;  $\gamma_M=1,0$ )

Für die HEA und HEB Walzprofilserie liegt, im Gegensatz zur IPE Serie, die Traglastwiderstandskraft  $F_{z,Rd}$  nach EN 1993-1-5 [3] über jener nach DIN 18800-1 [6]. Dies resultiert aus dem Verhältnis Flanschbreite zu Stegdicke der HEA und HEB Profilserien. Die

Differenz der Tragwiderstände zwischen EN 1993-1-5 [3] und EN 1993-1-8 [4] (bzw. Bemessungsvorschlag [1]) wird mit ansteigender Profilhöhen immer größer. Dies folgt daraus, dass sich mit steigender Profilhöhen auch die Schlankheit der Profile erhöht und somit durch größere Beulgefährdung auch der Beulabminderungsbeiwert zunimmt.

Der Beulabminderungswert  $\rho$  ist geometriebedingt. Aufgrund dessen verändert sich dieser Faktor mit der Höhe des Profils. Er ist in der vertikalen Sekundärachse auf der rechten Seite in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt. Nach EN 1993-1-5 [3] ist noch keine Beulgefährdung gegeben. Der Beulabminderungsfaktor  $\rho$  ist somit in allen Fällen gleich 1,0.

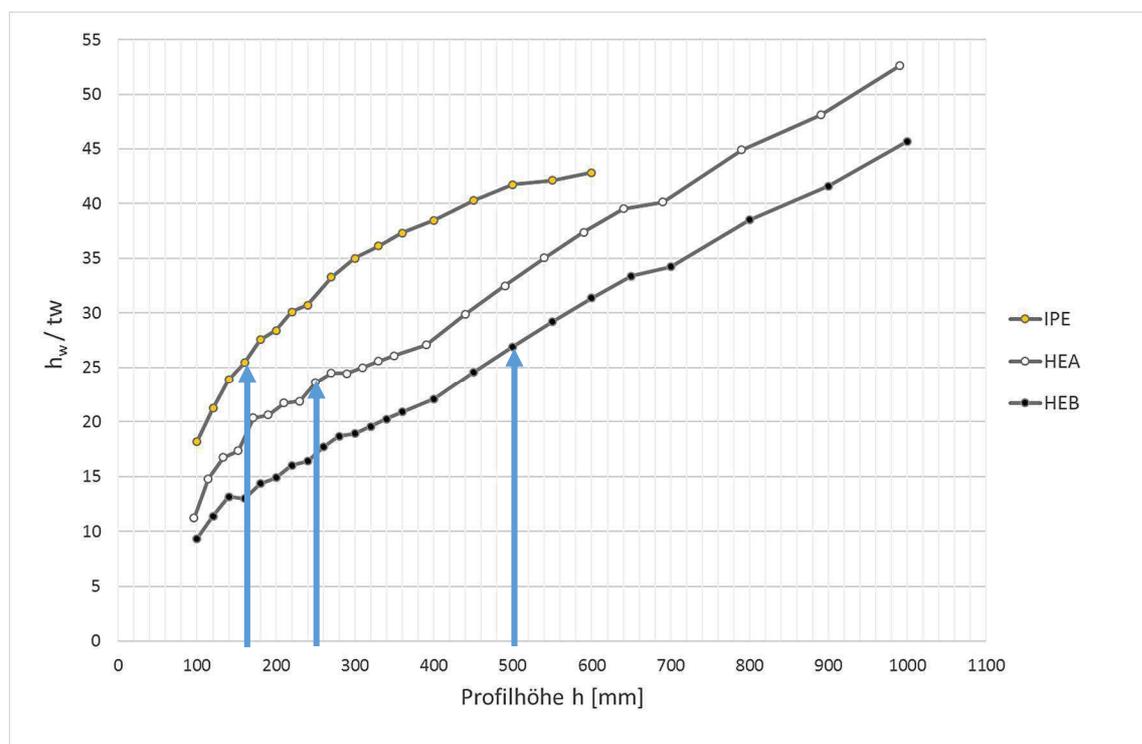


Abbildung 12: Verhältnis von Steghöhe zu Stegdicke - Stegslankheit ab dem der Beulabminderungsbeiwert wirkt (Ermittlung  $\rho$  nach EN 1993-1-8 [4] bzw. Bemessungsvorschlag [1])

Für die IPE Serie wird die Tragwiderstandskraft  $F_{z,Rd}$  durch den Beulabminderungsfaktor  $\rho$  ab einer Profilhöhe von 160 mm abgemindert. Bei der HEA-Serie erfolgt dies ab einer Höhe von 240 mm. Bei der HEB Serie hat der Faktor erst ab einer Höhe von 500 mm Auswirkungen. Dies steht auch im direkten Zusammenhang mit dem  $h_w/t_w$  Verhältnis der Profile. Die Stellen entsprechen somit einem  $h_w/t_w$  Verhältnis von ca. 25. Beziehungsweise überschreitet an diesen Stellen das Verhältnis  $h_w/t_w$  das Verhältnis  $h_w/t_w$  (Grenz), ab dem der Beuleffekt die Tragfähigkeit reduziert. Diese Beziehungen sind in Abbildung 12 ersichtlich.

Die Vergleiche wurden daraufhin noch vorhandenen numerischen Untersuchungen eines IPE 500 und IPE 600 Profils gegenübergestellt. Diese FE-Berechnungen sind jeweils mit und ohne Material-Wiederverfestigung durchgeführt. Die vorhandenen Untersuchungen wurden für die Voruntersuchungen herangezogen und sind im Kapitel 3.2 näher beschrieben.

Die  $\alpha_V$  (Querkraft) und  $\alpha_M$  (Moment) Werte wurden auf das vorliegende statische System, wie in Abbildung 13 dargestellt, angepasst, sodass im linken Trägerfeld nur eine mittige Lasteinleitung vorliegt. Die Werte mit Wiederverfestigung liegen knapp über jenen der DIN 18800-1 [6]. Die Werte ohne Wiederverfestigung befinden sich knapp unter jener nach EN 1993-1-5 [3], sind aber noch über jener des Bemessungsvorschlages [1], siehe Abbildung 14.

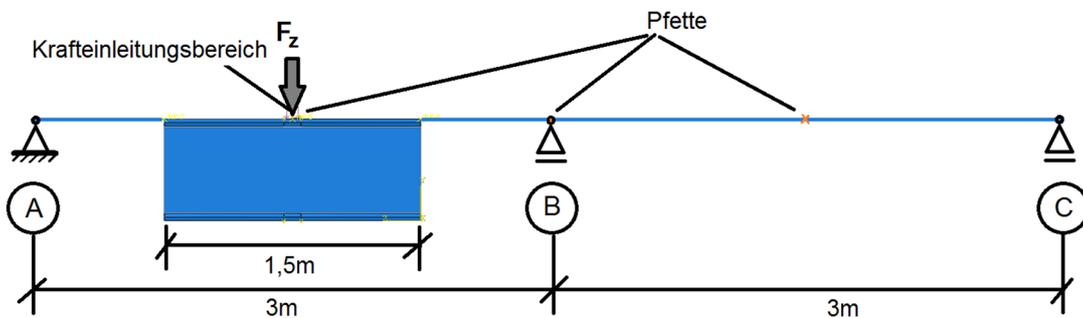


Abbildung 13: Statisches System IPE 600

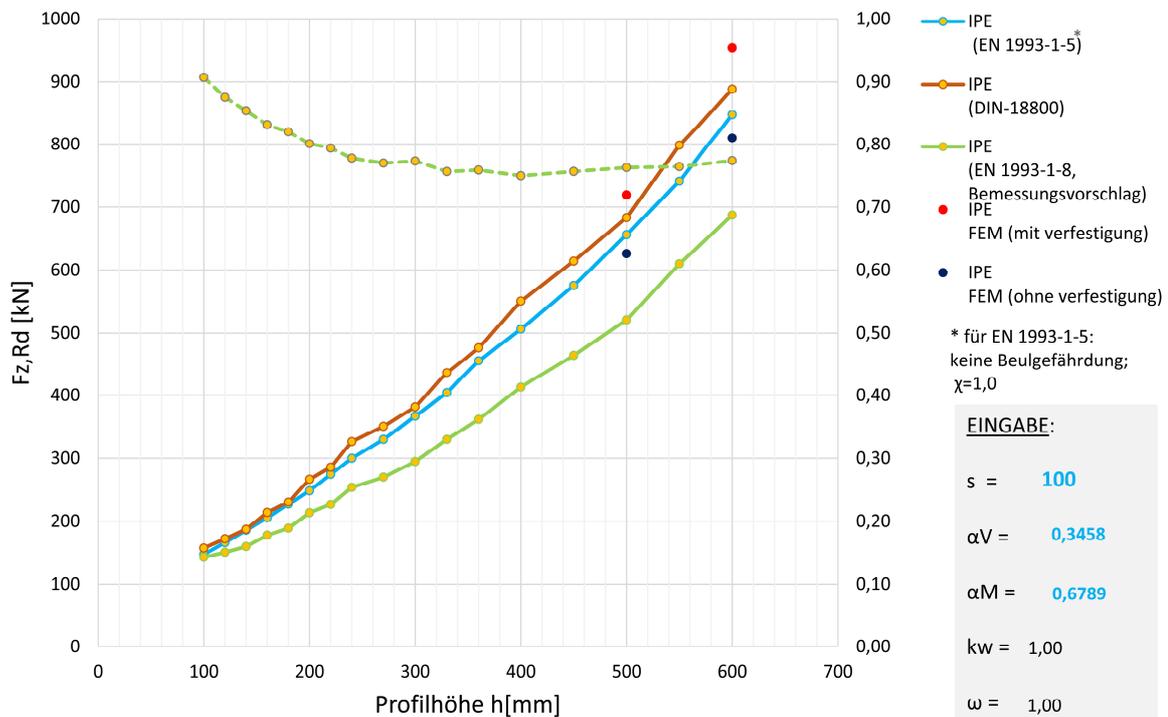


Abbildung 14: Traglastwiderstand IPE-Profile im Vergleich mit FEM-Berechnungen (IPE 500 und IPE 600)

### 3. MODELLFINDUNG FÜR DIE FEM-BERECHNUNG

Die Finite-Elemente Berechnungen wurden im Programm Abaqus [8] durchgeführt. Anfangs wurde nach einem Modell gesucht, welches für die gewünschten Berechnungsergebnisse optimal geeignet ist. Als Testprofil wurde ein IPE 600 gewählt. Das IPE 600 wurde für die Modellfindung herangezogen, da es aus früheren Untersuchungen bereits Ergebniswerte zur lokalen Kräfteinleitung zu diesem Profil gibt. Diese Ergebniswerte wurden als Referenzgrößen betrachtet.

In erster Linie wurde darauf geachtet, dass das Berechnungsmodell Ergebnisse liefert, welche nur im geringen Prozentbereich von den Ergebnissen früherer Untersuchungen abweichen. Ein weiterer wichtiger Punkt stellte die Rechenzeit des Modells dar. Kurze Rechenzeiten sind in diesem Fall von Vorteil.

Schlussendlich ergab sich ein Berechnungsmodell, welches zu 97% mit den Ergebniswerten aus früheren Untersuchungen übereinstimmt und eine Rechenzeit zur Ermittlung der Traglast  $F_{z,Rd}$  von 6 Minuten für einen IPE 600 aufweist.

#### 3.1 BERECHNUNGSMODELL

Für die Untersuchung der lokalen Kräfteinleitung bei Biegeträgern, ist nur der Bereich der Kräfteinleitung von Interesse. Es werden Randbedingungen angenommen, um ein Versagen in anderen Bereichen des Biegeträgers auszuschließen.

##### 3.1.1 MODELLIERUNG

Das Berechnungsmodell ist folgendermaßen aufgebaut:

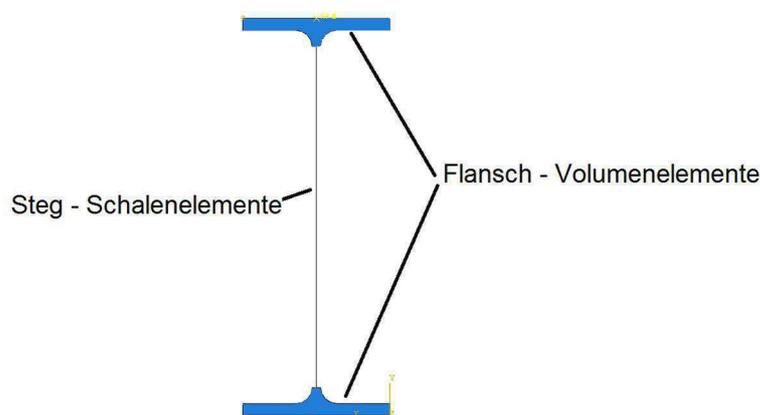


Abbildung 15: FEM-Modellierung Überblick

Die Trägerflansche sind bis zum Ende des Ausrundungsradius als Volumselement definiert. Um die Berechnungszeiten gering zu halten, wird der Steg mit Schalenelementen ausgeführt.

Jener Trägerbereich, bei dem diese Art der Modellierung vorliegt (Volumen- und Schalenelemente) wird nachfolgend als Grundelement bezeichnet (siehe Abbildung 25).

Die Verbindung der Elemente erfolgt über ein sogenanntes „Shell to Solid coupling“. An das zu berechnende Trägerelement im Bereich der Krafteinleitung wurde beidseits in Trägerlängsrichtung mit dem Befehl „Coupling“ ein Stab (1D-Abbildung des Trägers) angehängt, der das System bis zu den Trägerauflagern vervollständigt. Die zusätzlichen Stabelemente wurden verwendet, um Rechenzeiten zu sparen. Sie sind notwendig, um die zusätzliche Interaktionen aus Moment und Querkraft in das Trägerelement zu bekommen. Der Stab ist am Obergurt mit dem Grundelement verbunden. Dort befindet sich der Referenzpunkt der MPC-Beam (multiple point constraint) Bedingung des Randquerschnittes des Trägerelementes. Durch die MPC-Beam Bedingung sind alle ausgewählten Knoten durch starre Exzenter an den Kontrollpunkt gekoppelt, siehe Abbildung 16.

Abweichend von der üblichen Vorgehensweise das Stabelement in die Schwerachse des Trägers zu legen, wurde in dieser Arbeit die Schwerachse des Obergurtes gewählt. Da in allen Systemen keine Normalkräfte  $N$  am Träger auftreten, ergeben sich idente Ergebnisse, wie für eine Lage der Stabelemente in der Schwerachse des Trägers

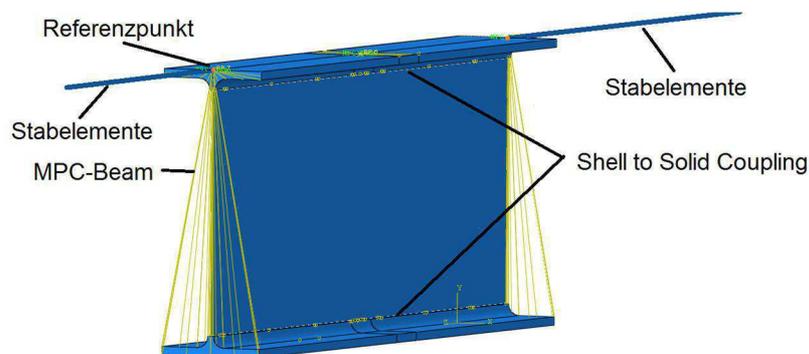


Abbildung 16: Kopplungsbedingungen

Für das FE-Netz wird in allen Elementen der Elementtyp „quadratisch“ gewählt. In Trägerlängsrichtung wird eine Netzfeinheit von 20 mm angenommen. Im Bereich der Volumselemente wurden über die Flanschdicke 1 Element und über die Stegdicke 2 Elemente gewählt, siehe Abbildung 17.

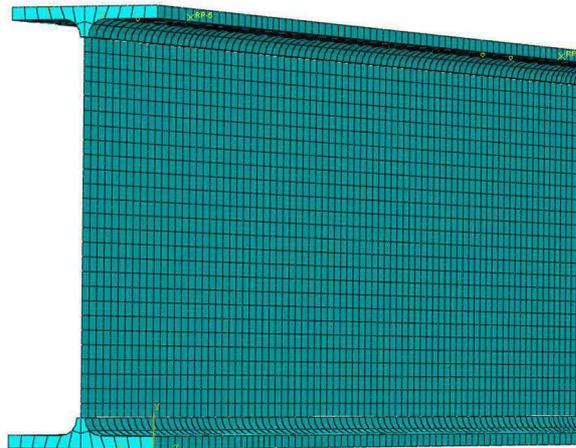


Abbildung 17: FE Netz im Bereich der vertikalen Kräfteileitung

### 3.1.2 RANDBEDINGUNGEN IM FEM-MODELL

Das System wird in den Auflagerpunkten gegen Verschiebung vertikal sowie horizontal aus der Ebene gehalten. Im Auflagerpunkt A wird zusätzlich die horizontale Verschiebung in Trägerlängsrichtung gesperrt. Ebenso wird der Träger in den Auflagerpunkten gegen die Verdrehung um die Längsachse gesperrt (Gabellagerung). Im Bereich der Kräfteinleitung, welche den Auflagerpunkt der Pfette auf den Hauptträger darstellt, wird ebenfalls die Horizontalverschiebung aus der Ebene, sowie die Verdrehung um die Längsachse behindert. Die restlichen Pfettenhalterungen sperren das System gegen horizontale Verschiebung aus der Ebene.

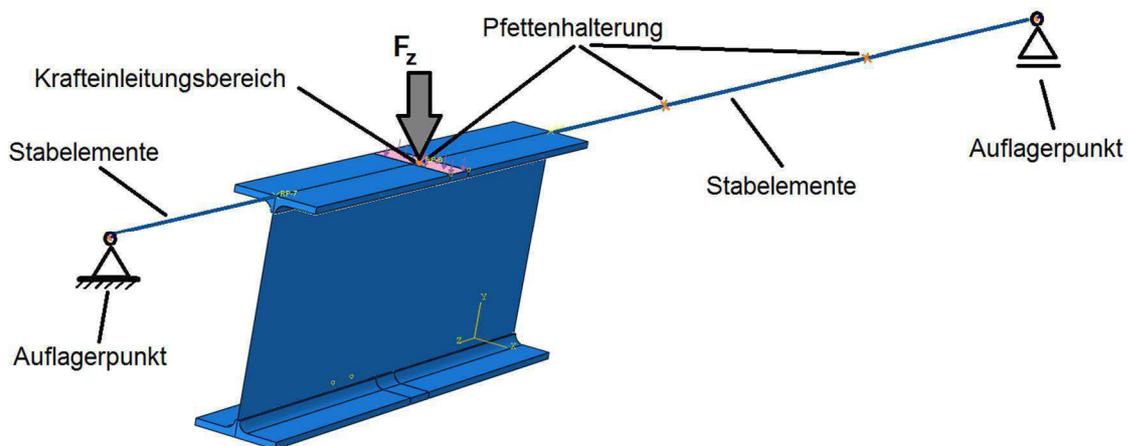


Abbildung 18: Randbedingungen im FEM-Modell

### 3.1.3 MATERIAL

Es wurde für alle Berechnungen die Stahlgüte S235 verwendet, mit folgenden Parametern:

Streckgrenze:	$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
E-Modul:	$E = 210000 \text{ N/mm}^2$
Querkontraktionszahl:	$\nu = 0,3$
Materialsicherheitsbeiwert:	$\gamma_{M1} = 1,0$

Das Materialverhalten für das Trägerelement ist linear elastisch – ideal plastisch. Es wird in allen gezeigten Ergebnissen keine Wiederverfestigung angenommen, abgesehen von den bereits vorliegenden Voruntersuchungen. Um ungewolltes Versagen in den Stabelementen auszuschließen, wurden diese rein elastisch angenommen. Bei den ersten Berechnungen wurde das Material für den Stab noch linear elastisch – ideal plastisch angenommen. Dabei kam es aber bei manchen Systemen zu Versagen in der Trägermitte, aufgrund von lokalen Spannungsüberschreitungen.

### 3.2 VORUNTERSUCHUNGEN

Als Testprofil wurde ein IPE 600 gewählt. Der IPE 600 Trägerquerschnitt wurde für die Modellfindung herangezogen, da es aus früheren Untersuchungen bereits Ergebniswerte zur lokalen Krafteinleitung zu diesem Profil gibt. Durch die folgende Variantenstudie ist das in Kapitel 3.1 beschriebene Modell entstanden.

Die vorliegenden Ergebnisse beziehen sich auf einen Zweifeldträger mit einer Feldlänge von jeweils 3 m. Die lokale Krafteinleitung ist alleine im linken Feldbereich in Feldmitte, siehe Abbildung 19. Die Abbildung 19 zeigt bereits das FE-Modell, dass nur in einem lokalen Bereich Schalen- und Volumenelemente aufweist (Grundelement) und dann mit Stabelementen ergänzt ist (Bezeichnung: *Modell\_SolidShell\_Quadratic\_STAB* in Tabelle 1)

Ergänzend wurden in der Voruntersuchung Modellierungen alleine mit Schalen- und Volumenelementen (im gesamten Trägerbereich) durchgeführt – dies sind die drei erstgenannten Modelle in Tabelle 1.

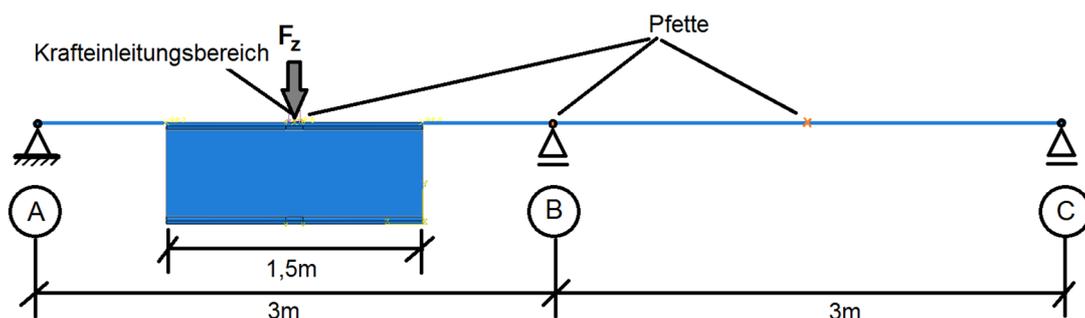


Abbildung 19: Systembeschreibung für Voruntersuchung IPE 600

Der genaue Ablauf der Berechnungen im Programm Abaqus [8] ist in Kapitel 5.1 detailliert beschrieben. Prinzipiell wurde anfangs eine lineare Beulanalyse (LBA) vorgenommen. Anschließend wurde mit den erhaltenen geometrischen Imperfektionen die eigentliche materiell nichtlineare Analyse mit geometrischen Ersatzimperfektionen (GMNIA) durchgeführt.

Es wurden mehrere Varianten mit unterschiedlichen Elementarten, Netzarten und Netzfeinheiten untersucht. Modelle mit zu langer Rechenzeit und geringer Genauigkeit wurden ausgeschlossen. Tabelle 1 zeigt einen kleinen Teil der untersuchten Varianten.

Modellname	Flansch- elemente	Steg- elemente	Mesh-Art	FE-Netzfeinheit			Stab vorhanden	LBA [kN]	Genau- igkeit	Zeit [h:min]	GMNIA [kN]	Genau- igkeit	Zeit [h:min]
				Gesamt [mm]	Flansch [Elemente]	Steg [Elemente]							
Modell_SolidShell_Linear	Solid	Shell	Linear	10/5	4	4	Nein	4.232	1,03	0:15	902	1,11	1:45
Modell_SolidShell_Quadratic	Solid	Shell	Quadratic	20	1	2	Nein	4.103	1,00	0:04	813	1,00	0:19
Modell_SolidSolid_Quadratic	Solid	Solid	Quadratic	20	1	1	Nein	4.205	1,02	0:03	871	1,08	0:22
Referenzmodell	Solid	Shell	Quadratic	20	1	1	Nein	4.105	1,00	0:05	810	1,00	0:20
Modell_SolidShell_Quadratic_STAB	Solid	Shell	Quadratic	20	1	2	Ja	4.057	0,99	0:01	788	0,97	0:06

Tabelle 1: IPE 600 Modellversuche

Wie in Tabelle 1 ersichtlich ist, liefert die Kombination von Volumselementen für die Flansche mit Schalenelementen für den Steg und einem quadratischen FE-Netz die genauesten Ergebnisse.

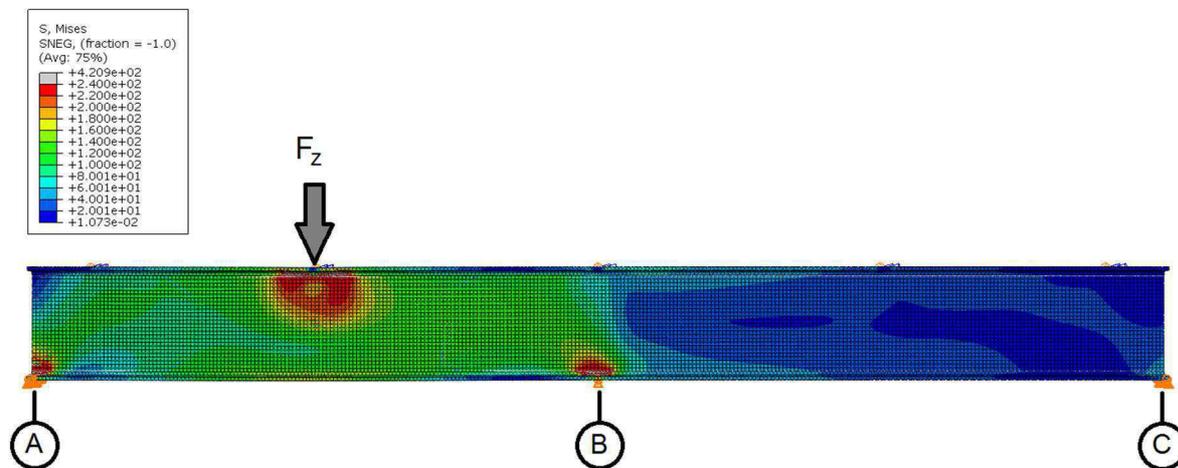


Abbildung 20: GMNIA Berechnung für IPE 600 – Vergleichsspannungen bei Erreichen der Traglast (Modell\_SolidShell\_Quadratic)

Abbildung 20 zeigt das Berechnungsergebnis der GMNIA-Berechnung für das Modell „Modell\_SolidShell\_Quadratic“, bei Erreichen der Traglast. Es wurden Volumselemente für die Flansche und Schalenelemente für den Steg modelliert. Die FE-Netzfeinheit über die Trägerlänge beträgt 20 mm. Über die Flanschdicke wurde ein Element gewählt und über die Stegbreite im Bereich des Ausrundungsradius wurden zwei Elemente gewählt (vgl. Abbildung 17). Die Abbildung 20 zeigt, dass der Bereich um die Krafteinleitung deutlich durch das Erreichen der maximalen Spannungen (in Rot dargestellt) erkennbar ist. Im

Bereich der Auflager (Achse A und B) kommt es zu Spannungsspitzen. Diesen Spannungsspitzen wurde, mit der Aufbringung der Auflagerreaktionskräfte verteilt auf die Auflagerfläche, entgegengewirkt.

Um auch bei der Rechenzeit weiter einzusparen, wird nicht der ganze Träger als Volumen-/Schalenelement modelliert, sondern nur ein Elementbereich von 1,5 m im Bereich der lokalen Kräfteinleitung. Der übrige Bereich wird als Stab modelliert (vgl. Abbildung 19).

Die Elementlänge ergibt sich aus der linearen Beulanalyse. Die Größe der Beule definiert die Mindestlänge des Elementes, siehe Abbildung 21.

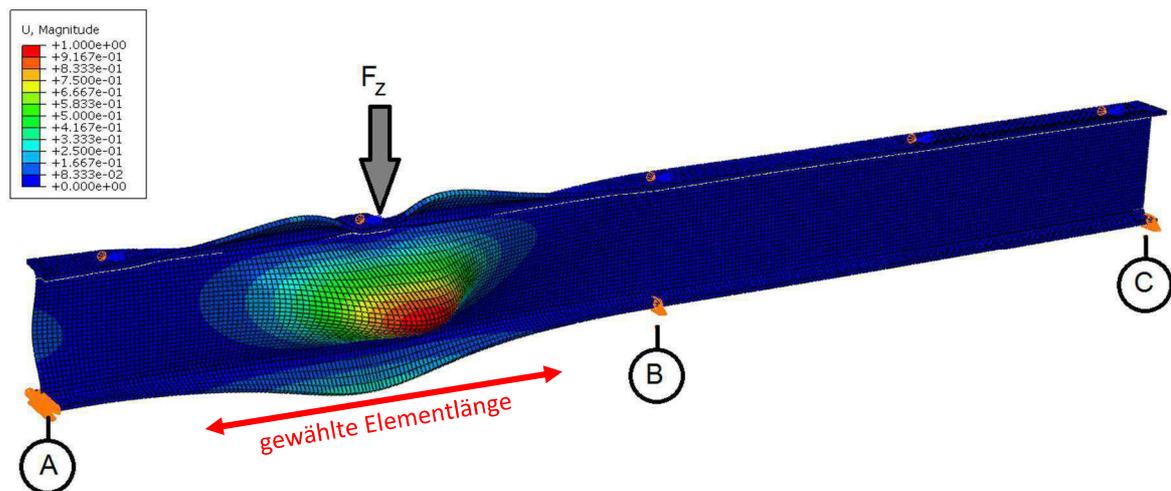


Abbildung 21: LBA Berechnung für IPE 600  
(Modell\_SolidShell\_Quadratic)

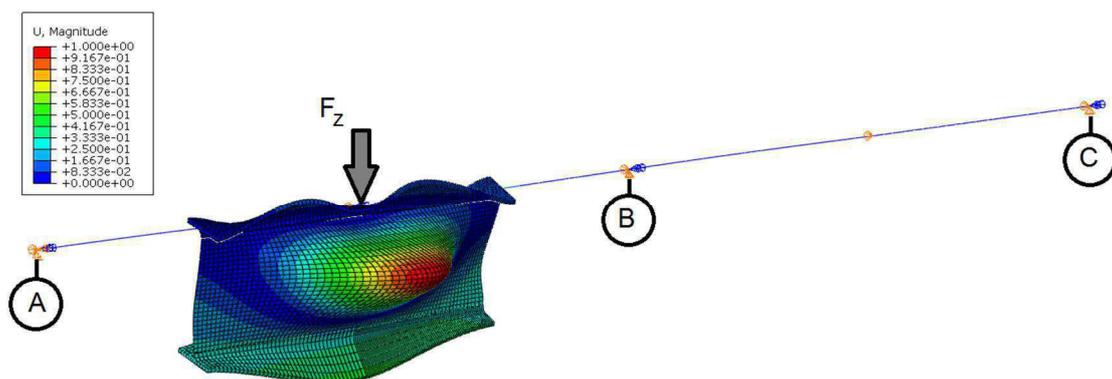


Abbildung 22: LBA Berechnung für IPE 600 mit angeschlossenen Stabelementen  
(Modell\_SolidShell\_Quadratic\_STAB)

Wie aus Abbildung 22 ersichtlich ist, kann sich auch im Stabmodell die Beule voll ausbilden. Der Bereich der Kräfteinleitung  $F_z$  im Stabmodell (Abbildung 23) verhält sich bei der nichtlinearen Traglastberechnung gleich wie jener ohne Stabanbindung (vgl. Abbildung 20).

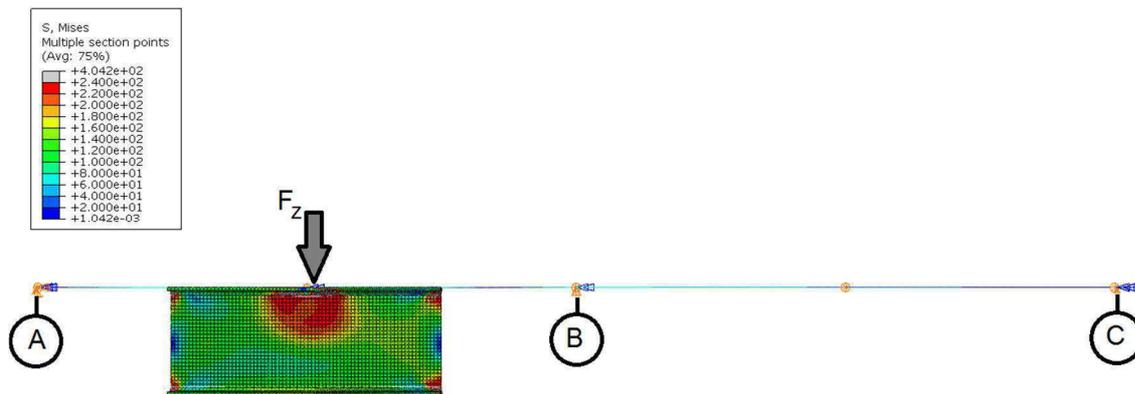


Abbildung 23: GMNIA Berechnung für IPE 600 mit angeschlossenen Stabelementen  
 (Modell\_SolidShell\_Quadratic\_STAB)

Die Genauigkeit des Stabmodelles weicht dabei um 3 % vom Modell ohne jegliche Stabelemente ab, befindet sich aber immer noch in einem angemessenen Rahmen. Die Rechenzeit für die GMNIA-Berechnung verkürzt sich, durch die Anbringung von Stabelementen deutlich auf 6 Minuten gegenüber 19 Minuten, wie in Tabelle 1 ersichtlich ist.

Für die weiteren Untersuchungen wurde daraus folgend, wie auch bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, ein Trägerquerschnitt nahe der Krafteinleitung  $F_z$  aus einer Kombination von Volumselementen (Flansche) und Schalelementen (Steg) modelliert und durch Stabelemente bis zu den Trägerauflagern fortgesetzt (Ausnahme System S1).

## 4. UNTERSUCHTE TRÄGERSYSTEME

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der lokalen Krafterleitung in einen Biegeträger. Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, sind dazu folgende Effekte zu berücksichtigen:

- Querschnitts-Tragfähigkeit des Steges
  - abhängig von der Stegdicke und der Lasteinleitungslänge
- Beulgefahr
  - abhängig vom Verhältnis Steghöhe zu Stegdicke und der Lage
- zusätzlich wirkende Längsnormalspannungen
  - Vertikaldruck und Längsdruck
  - Vertikaldruck und Längszug
- zusätzlich wirkender Schub

Um diese Effekte abdecken zu können, wurden unterschiedliche Systeme gewählt.

### 4.1 ALLGEMEINES ZUR SYSTEMBESCHREIBUNG

Grundsätzlich werden zwei unterschiedliche Systeme gewählt.

System 1, eines Einfeldträgers mit mittiger Krafterleitung  $F_z$  (siehe Abbildung 26), deckt die reine Interaktion mit Längsnormalspannungen ab (direkt unter  $F_z$  ist  $V=0$ ). System 2 beinhaltet des Weiteren auch die Interaktion mit Schub infolge Querkraft, da die Krafterleitung nun exzentrisch liegt. System 2 wurde weiter unterteilt in die Systeme 2-1KE, 2-2KE und 2-3KE (siehe Abbildung 28,31,32), mit 1,2 oder 3 lokalen Krafterleitungen (KE). Sie unterscheiden sich lediglich hinsichtlich der Größe des Querkrafterinflusses. Die unterschiedlichen Systeme werden in den Kapiteln 4.1.1 bzw. 4.1.2 bis 4.1.4 detailliert vorgestellt.

Alle Systeme bestehen aus einem Einfeldträger. Die Pfetten sind in regelmäßigen Abständen angeordnet. Abhängig vom jeweiligen System gibt es eine (System S1) oder drei (System S2) Pfetten, welche das System aus der Ebene horizontal halten. Im Bereich der Krafterleitung wird das System zusätzlich gegen Verdrehen um die Achse am Obergurt fixiert.

Die Krafterleitungsfläche ist in allen Fällen konstant. Sie entspricht einer Länge von  $s = 30$  mm, über die gesamte Trägerbreite reichend, siehe Abbildung 24.

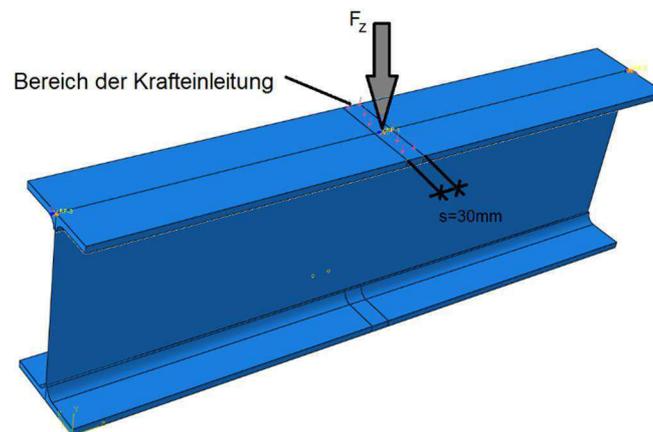


Abbildung 24: Krafteinleitungsbereich mit konstanter Auflagerpressung

Abhängig vom Trägerprofil und dem angewendeten System wird ein Bereich des Systems, wie in Kapitel 3 erläutert, mit Volumen-/Schalenelementen modelliert. Dieses wird in weiterer Folge als „Grundelement“ bezeichnet. Das Grundelement ist an den Stabelementen gekoppelt, welche das System bis zu den Auflagern des Trägers vervollständigen.

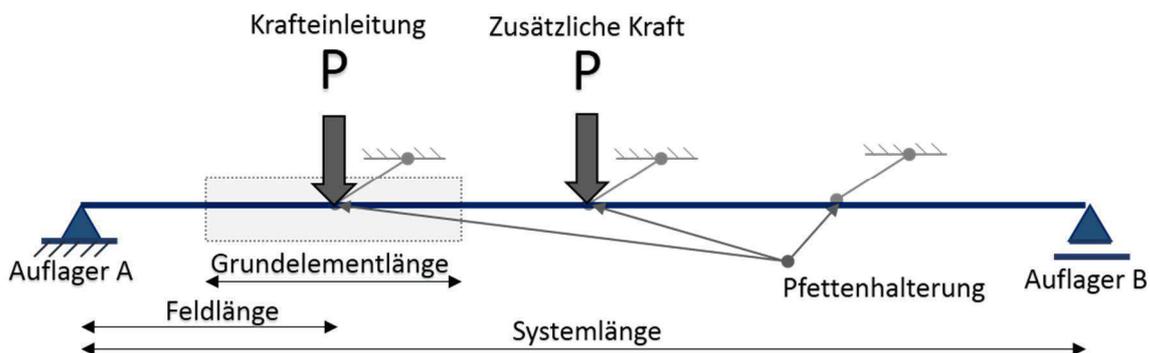


Abbildung 25: Begriffserklärung zur FEM-Modellierung

In Abbildung 25 sind, die in weiterer Folge verwendeten Begriffe, dargestellt.

Von Interesse sind die resultierenden vertikalen Spannungen an der Stegoberkante am Ende des Ausrundungsradius, wo sie am größten sind. Diese Stelle ist von großem Interesse, da Vertikalspannungen darunter über die Höhe rasch abnehmen. Im Kapitel 2 wurde ebenfalls auf diese Stelle Bezug genommen.

Um die Höhe der Längsnormalspannungen im Grundelement zu steuern, werden zusätzliche externe Momente an den Trägerenden aufgebracht. Bei den ersten Berechnungen wurden die externen Momente jeweils an den Enden des Grundelementes aufgebracht. Nach der Änderung des Materialverhaltens des Stabelementes im Modell von linear elastisch – ideal plastisch zu rein elastisch, konnten die externen Momente auch einheitlich an den Trägerenden aufgebracht werden. Es wurden dazu stichprobenartig mehrere Fälle zur Lage der externen Momente untersucht. Die Berechnungen lieferten die gleichen Ergebnisse.

### 4.1.1 SYSTEM – S1

Das System S1 wurde gewählt, um die alleinige Interaktion von Längsnormalspannungen zu Vertikalspannungen darzustellen ( $V=0$  unmittelbar unter der Last  $P$ ). Dies ist in Abbildung 26 gezeigt. Die Vertikalspannungen resultieren aus der vertikalen Kräfteinleitung am Obergurt. Das zusätzliche Aufbringen eines Momentes an beiden Trägerenden führt zu einer Erhöhung der Längsnormalspannungen im System. Die Momente werden bei System S1 in Höhe der Trägerachse aufgebracht.

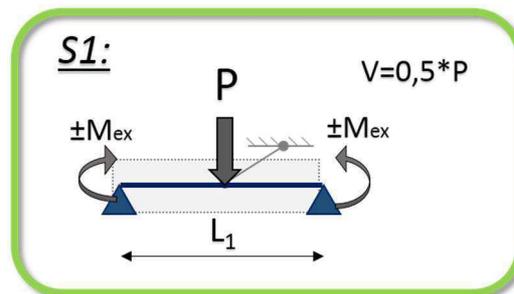


Abbildung 26: System S1

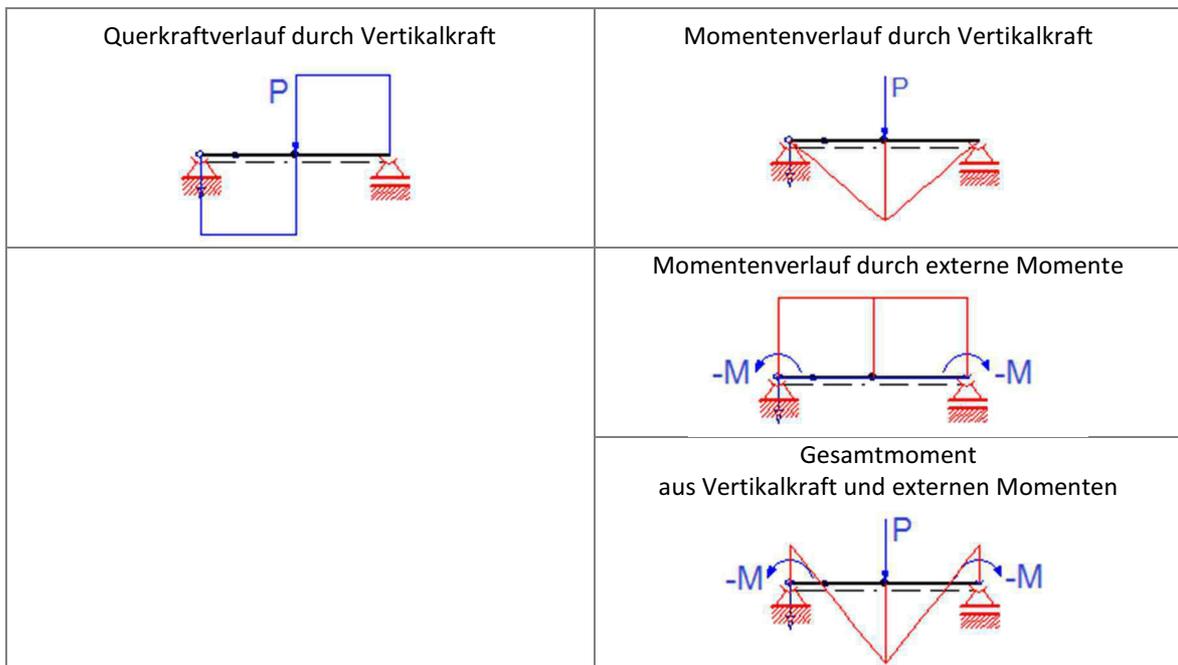


Abbildung 27: Schematischer Schnittkraftverlauf von System S1 [9]

Wie in Abbildung 27 ersichtlich, reduziert sich das Gesamtmoment durch die Aufbringung externer negativer Momente. Dadurch können größere Vertikalkräfte auf das System aufgebracht werden. Durch die höhere Vertikalkraft führt dies zu einem lokalen Versagen im Bereich der Kräfteinleitung und nicht zu einem Überschreiten der maximalen Momententragfähigkeit des Trägers.

#### 4.1.2 SYSTEM – S2-1KE

In System S2-1KE ist zusätzlich zur Interaktion von lokaler Kräfteinleitung mit Längsnormalspannungen im Bereich der Kräfteinleitung auch eine zusätzliche Schubbeanspruchung vorhanden. Im Viertelpunkt des Einfeldträgers wird eine Kraft  $P = F_z$  aufgebracht. In den weiteren zwei Viertelpunkten ist zusätzlich eine Halterung aus der Ebene gegeben, siehe Abbildung 28.

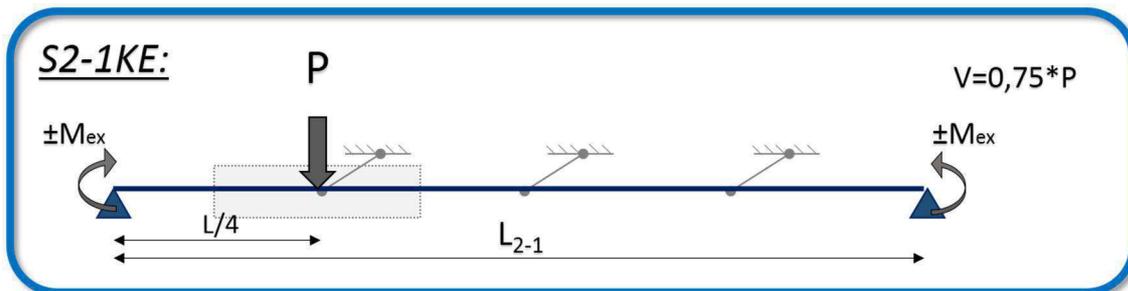


Abbildung 28: System S2-1KE

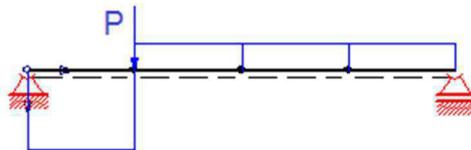


Abbildung 29: Querkraftverlauf System S2-1KE [9]

Durch die ausmittige Kräfteinleitung, siehe Abbildung 29, ergibt sich an der Stelle der Einzellast eine erhöhte Querkraft von  $0,75 \cdot P$ , links von der Kräfteinleitung.



Abbildung 30: Momentenverlauf System S2-1KE [9]- links: externe Momente an den Enden des Grundelementes, rechts: externe Momente an den Trägerenden

Bei diesem System wurde erkannt, dass die Aufbringung der externen Momente an den Enden des Grundelementes den Nachteil brachte, dass das System global am Elementrand des Grundelementes versagte. Es wurde an diesen Stellen das maximal aufnehmbare Moment des Trägers überschritten. Dieser Effekt tritt nur auf, wenn die Momente negativ aufgebracht werden. Bei positiver Aufbringung der externen Momente kommt es zum Versagen im Kräfteinleitungspunkt. Somit wurden in weiterer Folge die Momente nicht mehr nur am Element, sondern am Trägerende aufgebracht.

#### 4.1.3 SYSTEM – S2-2KE

System S2-2KE hat, neben den externen Momenten, zwei wirkende Vertikalkräfte, siehe Abbildung 31. Dieses System wurde erst nachträglich ergänzt, da für das gedrungene Profil IPE 300 drei Kräfte zu zu großer Schubeinwirkung führten, und das System auf Querkraft versagte. Somit erhoffte man sich, durch die Aufbringung von nur zwei Kräften, das Querkraftversagen im Trägerquerschnitt auszuschließen.

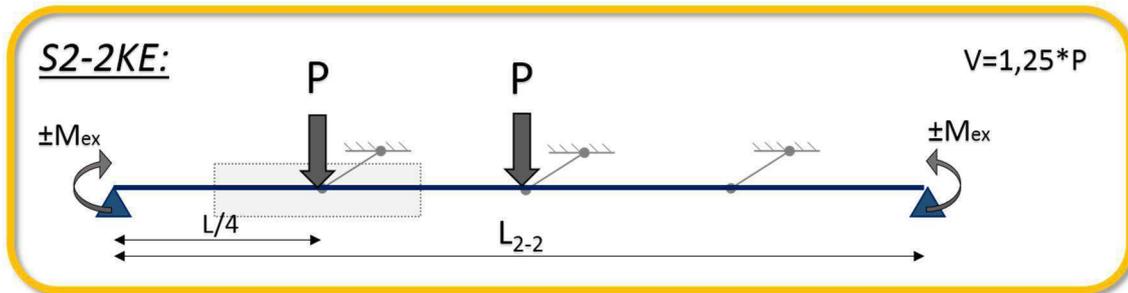


Abbildung 31: System S2-2KE

Dieses System führt zu einer erhöhten Querkraft von  $1,25 \cdot P$  im Kräfteinleitungsbereich, links von der Einzellast.

#### 4.1.4 SYSTEM – S2-3KE

System S2-3KE in Abbildung 32 hat aufgrund der Aufbringung von 3 Kräften in den Viertelpunkten des Systems im Elementbereich eine maximale Querkraft von  $1,5 \cdot P$ , siehe Abbildung 33. Somit wird das Interaktionsverhalten von Vertikalspannungen mit großen Schubspannungen aufgezeigt. Abbildung 33 zeigt den resultierenden Querkraftverlauf bei der Einleitung von drei gleichgroßen Kräften in das System.

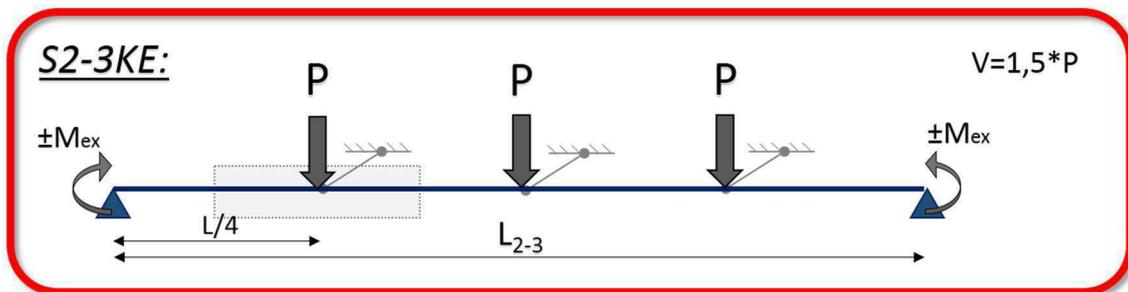


Abbildung 32: System S2-3KE

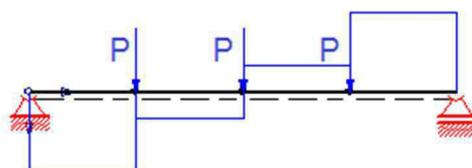


Abbildung 33: Querkraftverlauf System S2-3KE [9]

## 5. ERGEBNISSE

Kapitel 5 beinhaltet die Ergebnisse zu den in Abaqus [8] durchgeführten Finite-Element Berechnungen. Nach einer allgemeinen Beschreibung der Berechnungsdurchführung und Ergebnisdarstellung, folgt die Ergebnisbeschreibung und -interpretation für einen IPE 300, einen HEA 1000 und ein geschweißtes Profil mit einer Steghöhe von 1200 mm. Am Ende werden die Resultate der unterschiedlichen Profile gegenübergestellt.

### 5.1 ALLGEMEINES

Zuerst wird eine lineare Beulanalyse (LBA) durchgeführt. Die daraus erhaltenen Eigenformen werden als Ersatzimperfektionen für die nichtlineare Traglastberechnung angesetzt. Im nächsten Schritt wird eine geometrische und materiell nichtlineare Analyse mit geometrischen Ersatzimperfektionen (GMNIA) ausgeführt.

Die erhaltene, geometrische Imperfektion aus der linearen Beulanalyse wird in der nichtlinearen Traglastberechnung mit dem Faktor  $h_w/200$ , entsprechend EN 1993-1-5 [3], skaliert und zur Berechnungsgrundlage eingefügt. Wobei  $h_w$  gleich der Steghöhe entspricht.

Im ersten Berechnungsschritt „Step-M“ werden die externen Momente „ $M_{\text{extern}}$ “ aufgebracht. Diese werden mit einem fixen Wert vorgegeben. Im zweiten Berechnungsschritt „Step-P“ steigert das Programm die vertikalen Kräfte  $P = F_z$  bis zum Erreichen der maximalen Traglast des Biegeträgers.

Resultierend daraus, kann eine Beziehung von Momenteneinwirkung „ $M_{\text{ges}}$ “ zu maximaler Traglast „P“ dargestellt werden. Dabei wird das Moment  $M_{\text{ges}}$  am Einzelstab direkt an der Stelle der Last P „händisch“ ermittelt (Belastung für das jeweilige System zufolge P und  $M_{\text{extern}}$ ). Um die Darstellung zu verallgemeinern, wird auf der Horizontalachse nicht nur die Momenteneinwirkung an der Lasteinleitungsstelle alleine dargestellt, sondern auch im Verhältnis zur plastischen Momententragfähigkeit des jeweiligen Profils. Zusätzlich wird ergänzend auf der Horizontalachse die Spannung  $\sigma_{x,1}$  im Ausrundungsradius abgebildet.

Auf der sekundären Vertikalachse ist das Verhältnis der einwirkenden Querkraft  $V_{Ed}$  zur resultierenden Schubtragfähigkeit  $V_{Rd}$ , dargestellt. Die einwirkende Querkraft  $V_{Ed}$  entspricht immer dem größeren Wert der Querkraft beidseits der Krafteinleitung  $P = F_z$  (ebenfalls „händisch“ am Einzelstab ermittelt) Die Schubtragfähigkeit wird mit der Schubfläche  $A_{vc}$  nach Eurocode berechnet. Das Verhältnis  $V_{Ed}/V_{Rd}$  ist für jedes System separat dargestellt, da sich aus den unterschiedlichen Systemlängen und der unterschiedlichen Anzahl an Krafteinleitungen verschiedene Querkräfte (unterschiedliche Verhältnisse  $V_{Ed}/P$ ) im Krafteinleitungspunkt ergeben.

Die Berechnungsergebnisse aus dem Programm Abaqus [8] werden auch direkt dem Bemessungsvorschlag [1] in den Diagrammen gegenübergestellt. Die verwendeten Systemlängen sind der jeweiligen Legende zu entnehmen.

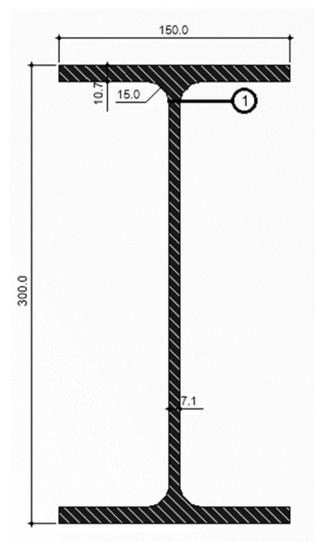
## 5.2 ERGEBNISSE FÜR TRÄGERPROFIL IPE 300

Startquerschnitt für die Finite-Elemente Berechnung ist das Profil IPE 300. Dieses wurde aufgrund der Voruntersuchung „Vergleich der effektiven Vertikalspannungen von DIN 18800-1 [6] mit EC 3-6“ gewählt – hier sind keine Beuleffekte zu erwarten.

### 5.2.1 ALLGEMEINES

Die anzusetzende geometrische Ersatzimperfektion beträgt 1,24 mm (= 248,6 / 200). Die Krafteinleitungsfläche beträgt  $A = b * s = 150 * 30 = 4500 \text{ mm}^2$ . Die Berechnung wurde für die Systeme S1, S2-1KE, S2-2KE und S2-3KE durchgeführt.

#### 5.2.1.1 QUERSCHNITTSWERTE



$$A = 5381 \text{ mm}^2$$

$$W_y = 557 \text{ cm}^3$$

$$h = 300 \text{ mm}$$

$$W_{y, \text{Ausrundung}} = W_{y,1} = 672 \text{ cm}^3$$

$$b = 150 \text{ mm}$$

$$M_{pl} = 148 \text{ kNm}$$

$$t_w = 7,1 \text{ mm}$$

$$t_f = 10,7 \text{ mm}$$

$$V_{Rd} = 348 \text{ kN}$$

$$r = 15 \text{ mm}$$

$$A_{vc} = 2568 \text{ mm}^2$$

$$h_w = 248,6 \text{ mm}$$

$$A_{vc} = A - 2 * b * t_f + (t_w + 2r) * t_f$$

$$h_w / t_w = 35$$

#### 5.2.1.2 MODELLKONTROLLE

Es wird mit System S1 begonnen. Um ausschließen zu können, dass die gewählte Systemlänge Einfluss auf das Ergebnis hat, werden zu Beginn zwei verschiedene Systemlängen gewählt. Im ersten Fall wird die Systemlänge mit der Grundelementlänge von 1 m gleichgesetzt. Im zweiten Fall wird eine praxisübliche Spannweite von  $L = 3 \text{ m}$  angenommen.

In Abbildung 34 ist ersichtlich, dass sich bei gleicher möglicher Traglast die Spannungsverteilung im Bereich der Krafteinleitung ident verhält.

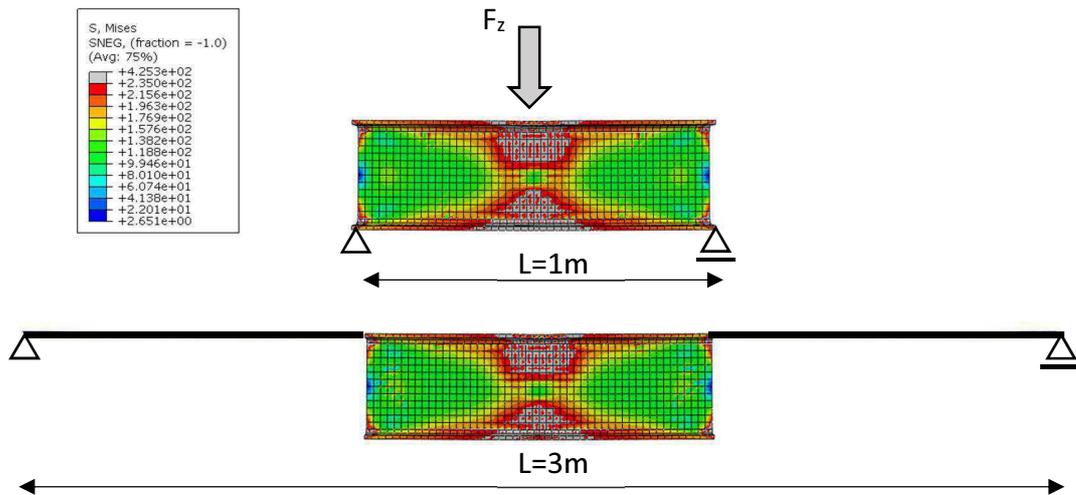


Abbildung 34: Spannungsverteilung IPE 300 – System S1 bei P= 200 kN

In Abbildung 35 ist deutlich ersichtlich, dass es bei unterschiedlicher Systemlänge keinen Unterschied im Ergebnis gibt. Der Verlauf der Berechnung mit 1 m Systemlänge deckt sich mit jenem mit 3 m Systemlänge.

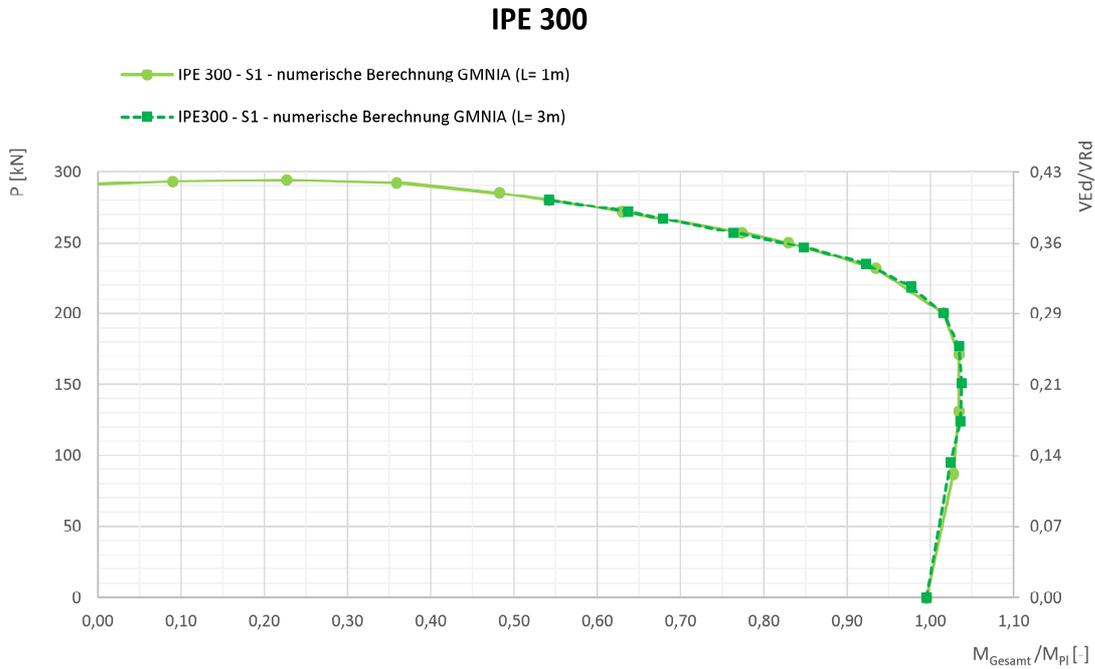


Abbildung 35: Traglastdiagramm IPE 300 – System S1

### 5.2.2 BERECHNUNGSERGEBNISSE IM DETAIL

In Abbildung 36 werden die Ergebnisse aus der in Abaqus [8] durchgeführten FEM-Berechnung dargestellt. Die tabellarischen Ergebnis- und Eingabewerte des Diagrammes sind dem Anhang zu entnehmen.

In dieser Darstellung sind bereits die Berechnungsergebnisse für alle vier untersuchten Systeme zusammengefasst (siehe Abschnitt 4.1)

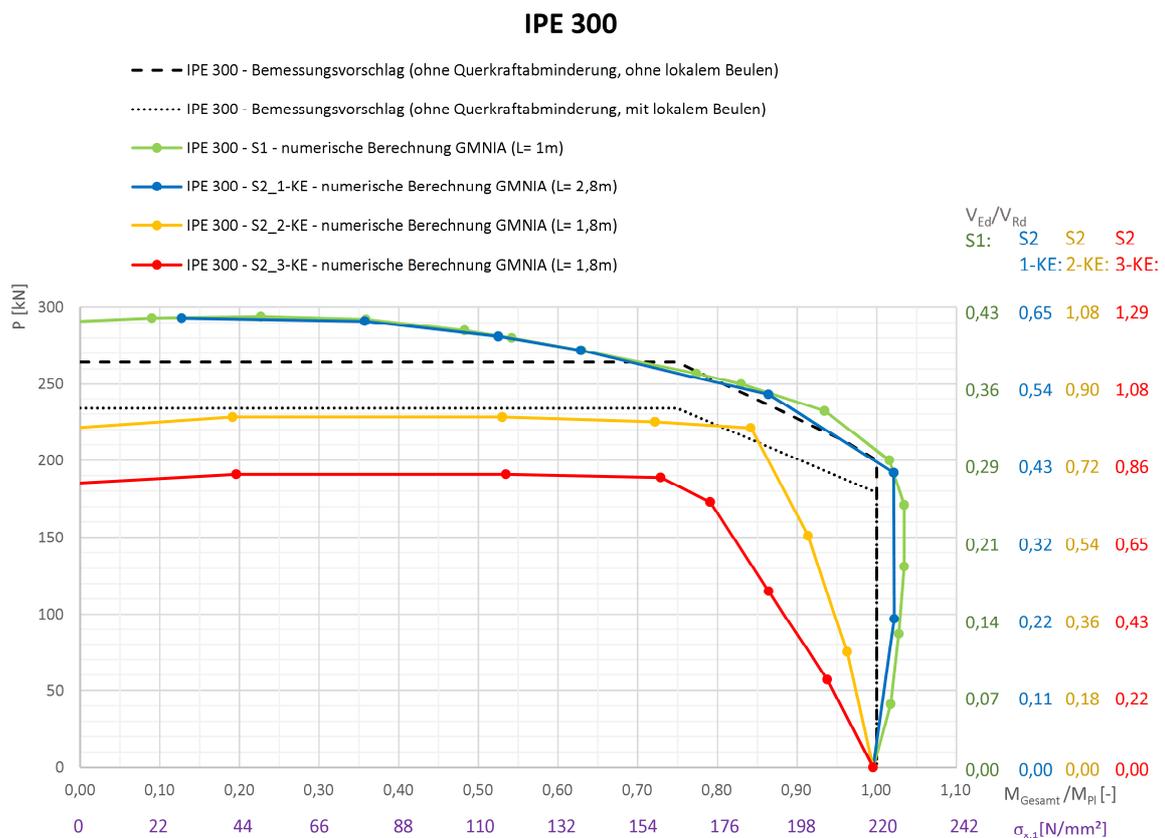


Abbildung 36: Berechnungsergebnisse IPE 300 – System S1 (L=1m) und S2 (L=2,8m bzw. L=1,8m)

Im System S1 (grün) und S2-1KE (blau) sind im Diagramm keine deutlichen Abweichungen zueinander erkennbar. Es wird eine maximale Traglast von  $P = F_z = 294 \text{ kN}$  erreicht. Im Bereich größerer Momenteninteraktion nimmt die zusätzlich mögliche Einzellast P stark ab. Bis zu einer Ausnutzung von 40 % des plastischen Momentes hat die Interaktion von Längsnormalspannungen mit lokaler Einzellast offenbar keinen Einfluss auf die lokale Traglasteinleitung. Ab diesem Punkt beginnt sich das Plateau zu neigen. Die Traglast P nimmt annähernd linear ab, bis zu dem Punkt, an dem 90 % des plastischen Moments erreicht werden. Von dort fällt die Kurve stark ab.

Die Spannungen am Ende des Ausrundungsradius erreichen maximal  $220 \text{ N/mm}^2$ .

In Abbildung 37 ist das Verhalten des Trägerelementes von System S1 unter lokaler Krafteinwirkung, bei unterschiedlich hoher Momentenbelastung, dargestellt. Wie die einzelnen Spannungsverteilungen zeigen, ist die lokale Auswirkung der Krafteinleitung deutlich erkennbar. Die Kombination aus großen Längsnormalspannungen und Vertikalspannungen führen sogar lokal zu einer Spannungsreduktion direkt unter der Krafteinleitung, wo die Vertikalspannungen am größten sind. Bei geringerem Momenteneinfluss ist ein deutlicher Bereich der lokalen maximalen Spannungen alleine in der oberen Steghälfte zu erkennen.

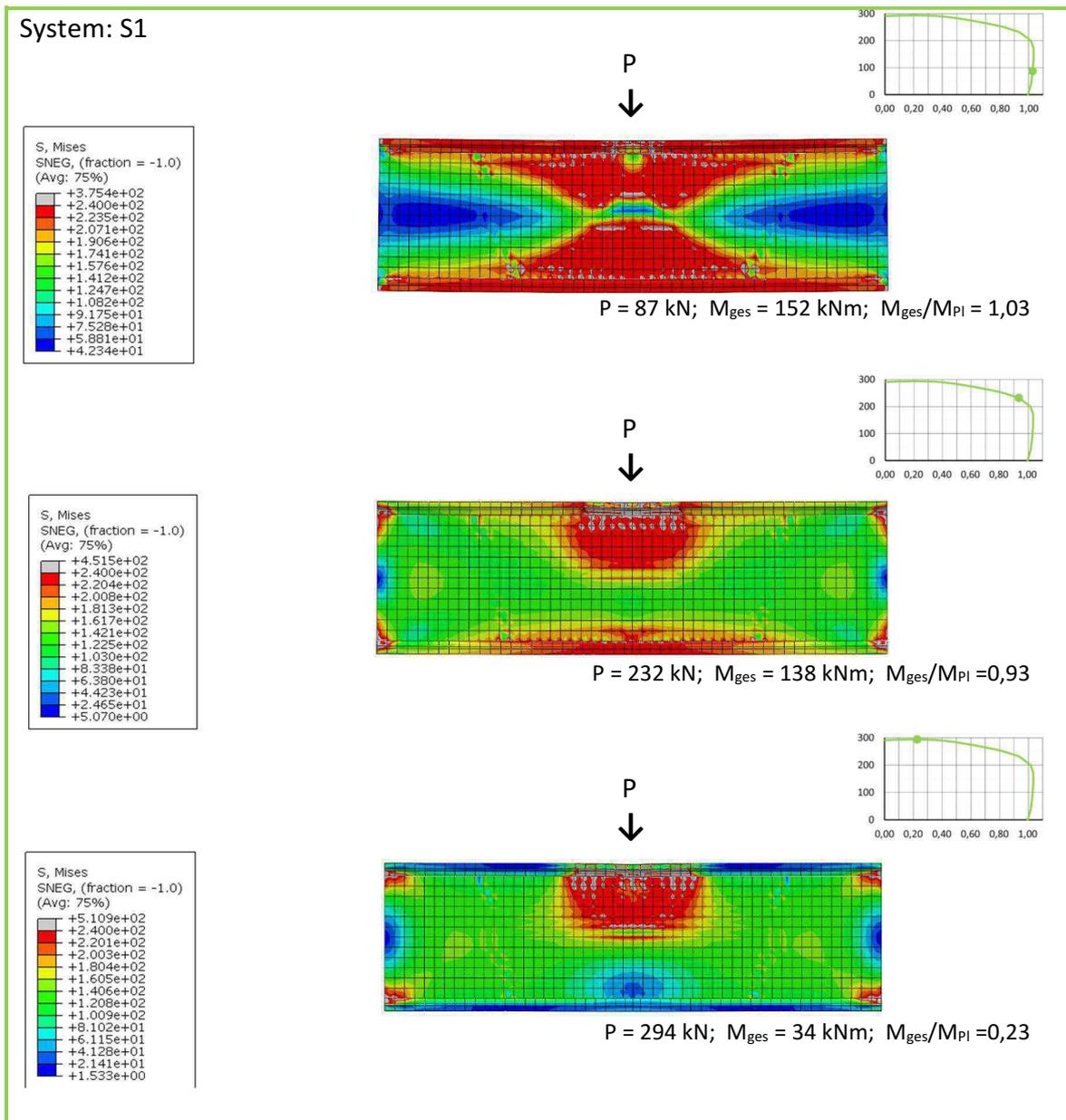


Abbildung 37: Spannungsverteilungen im Traglastzustand - System S1, bei Systemlänge  $L=1\text{m}$

Anders hingegen ist es bei System S2-2KE (orange in Abbildung 36) und S2-3KE (rot in Abbildung 36). Hier ist der Querkraftereinfluss so groß, dass es zu Schubversagen im Stegquerschnitt kommt. Im Bereich links der Kraftereinleitung ist die Querkraft bei System S2-2KE gleich  $1,25 \cdot P$  (Abbildung 31) und bei System S2-3KE gleich  $1,5 \cdot P$  (Abbildung 32). Die maximal aufnehmbare Kraft für System S2-2KE beträgt  $P = 228 \text{ kN}$ , das entspricht einer Querkraft von  $285 \text{ kN}$ . Für System S2-3KE beträgt die maximal aufnehmbare Kraft  $P = 191 \text{ kN}$ . Das entspricht ebenso einer Querkraft von  $285 \text{ kN}$  im Träger. Bei einer Querkraftausnutzung von 25 % ist der deutliche Schubeinfluss bereits erkenntlich. Im Bereich direkt unter der Kraftereinleitung kommt es zu keiner direkten lokalen Spannungsüberschreitung. Bei größerer Kraft  $P$  kommt es zu reinem Schubversagen des Querschnittes, siehe Abbildung 38 bei  $P = 191 \text{ kN}$  für System S2-3KE.

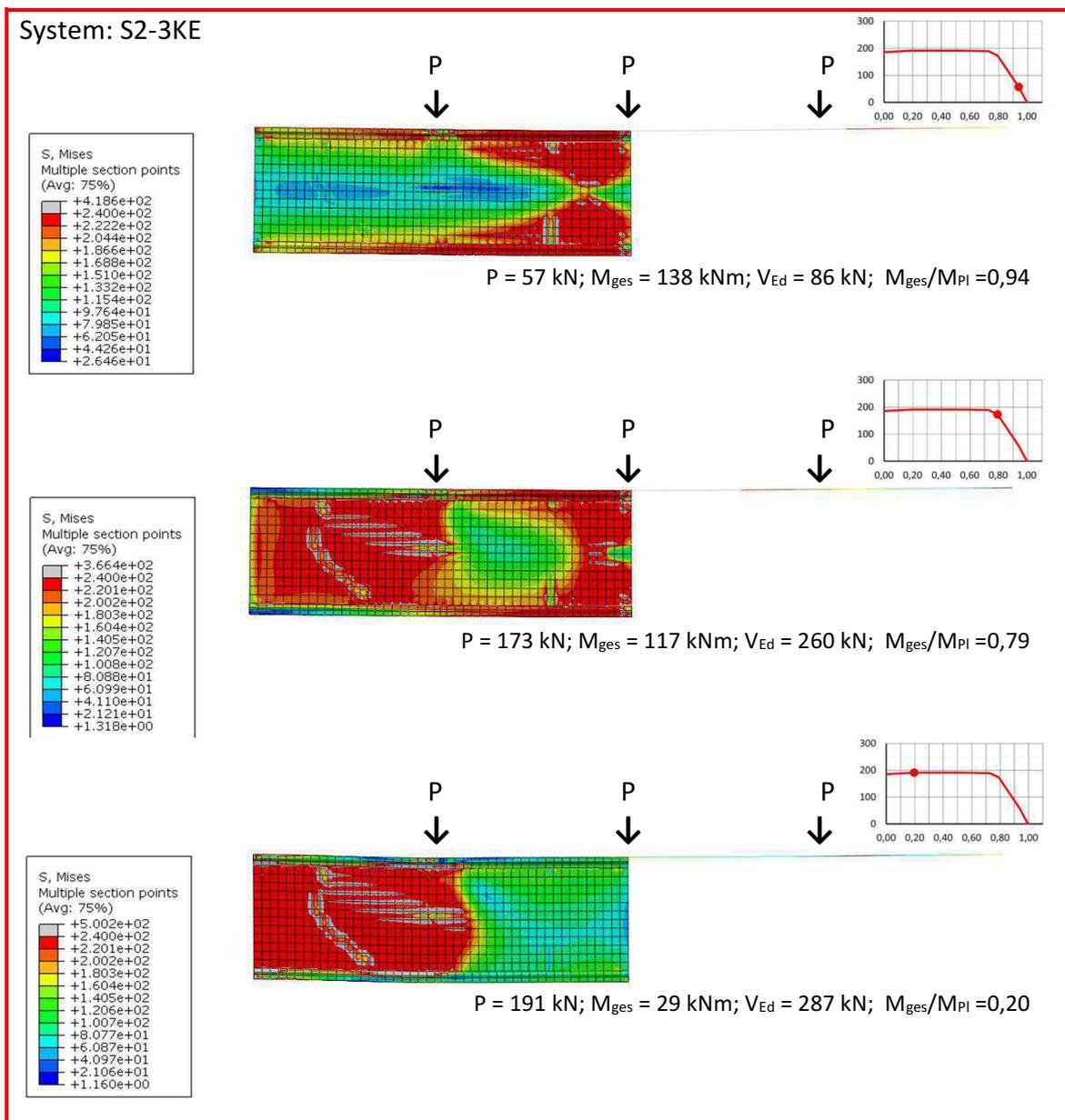


Abbildung 38: Spannungsverteilung im Traglastzustand - System S2-3KE, Systemlänge  $L = 1,8 \text{ m}$

Die graphischen Darstellungen zu den Spannungsverläufen im Traglastzustand der anderen Systeme sind dem Anhang zu entnehmen.

Auf der rechten Seite in Abbildung 36 ist die einwirkende Querkraft  $V_{Ed}$  bezogen auf die Querkrafttragfähigkeit  $V_{Rd}$  abgebildet. Man würde davon ausgehen, dass bei Schubversagen des Trägers das Verhältnis von Einwirkung zu Tragfähigkeit gleich 1,0 sein sollte, bzw., dass 100 % der Schubtragfähigkeit erreicht sind. Wie jedoch in der Grafik ersichtlich, sind erst 82 % der Querkrafttragfähigkeit nach Eurocode erreicht. Es wurde untersucht was der Grund für die Abweichung sein kann. Zuerst wurde überprüft, ob das Problem am Berechnungsmodell liegt. Es wurden die gleichen Berechnungen mit einem feineren FEM-Netz, jedoch ohne Materialwiederverfestigung (linear elastisch - ideal plastisch), durchgeführt. Auch diese numerischen Analysen liefern die gleichen Resultate. Man kam zum Schluss, dass es mit der Berechnung der Schubfläche in Zusammenhang steht. Die Schubfläche  $A_{vc}$  zur Berechnung der Querschnittstragfähigkeit  $V_{Rd,c}$  wird nach Eurocode berechnet. Im Eurocode wird die Schubfläche folgendermaßen definiert:

$$A_{vc} = A - 2 * b * t_f + (t_w + 2r) * t_f$$

Daraus ergibt sich eine Schubfläche nach Eurocode von 2568 mm<sup>2</sup> für das Profil IPE 300, siehe Abbildung 39. Erst durch Abbildung der Wiederverfestigung würde das Eurocode-Modell bestätigt werden können. Bei den FE-Berechnungen wurde jedoch keine Wiederverfestigung angenommen. Laut DIN würde sich eine Schubfläche  $A_{vc}$  von 2054 mm<sup>2</sup> und somit eine Ausnutzung der Querkraftsausnutzung im FE-Modell von 103 % ergeben. Eine weitere Variante, bei der der Steg inklusive Ausrundungsradius herangezogen wird, trifft das Ergebnis der FEM-Berechnung mit einer Genauigkeit von 3 % ebenso gut.

Damit ist gezeigt, dass das Nichterreichen der maximalen Schubtragfähigkeit des Querschnittes trotz Schubversagen, an der Berechnungsmethode der Schubtragfähigkeit nach Eurocode liegt.

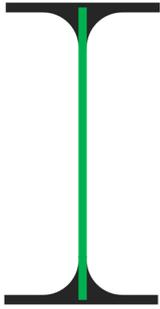
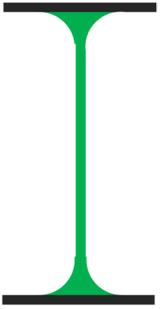
	<i>EC</i>	<i>DIN</i>	<i>Variante</i>
			
Schubfläche:	$A-2*b*t_f+(t_w+2r)*t_f$ <b>Avc= 2568 mm<sup>2</sup></b>	$(h-t_f)*t_w$ <b>Avc= 2054 mm<sup>2</sup></b>	$A-2*b*t_f$ <b>Avc= 2171 mm<sup>2</sup></b>
V <sub>Rd</sub> :	<b>348 kN</b>	<b>279 kN</b>	<b>295 kN</b>
V <sub>Ed</sub> /V <sub>Rd</sub> :	0,82*	1,03*	0,97*
*bei System S2-2KE: M <sub>ges</sub> /M <sub>pl</sub> ≤ 0,84; P = 228 kN; V <sub>Ed</sub> = 285 kN bei System S2-3KE: M <sub>ges</sub> /M <sub>pl</sub> ≤ 0,73; P = 191 kN; V <sub>Ed</sub> = 286 kN			

Abbildung 39: Schubflächenvergleich für Profil IPE 300

In Abbildung 36 strichliert dargestellt ist der Bemessungsvorschlag [1]. Dieser beinhaltet noch keine Querkraftabminderung. Die Abminderung aus zusätzlich wirkenden Längsnormalspannungen ist enthalten. Ab 70 % der Längsnormalspannungen greift der Abminderungsfaktor. Dies entspricht  $0,75 * M_{ges}/M_{pl}$ . Der Beulabminderungsbeiwert  $\rho$  ist von der Stegslankheit abhängig. Der Bemessungsvorschlag [1] wurde einmal mit und einmal ohne Beulabminderungsbeiwert dargestellt.

Für die beiden Systeme, die nicht global auf Schub versagen (S1 und S2-1KE), überschreitet die FEM-Berechnung im Bereich geringer Momenteneinwirkung den Bemessungsvorschlag [1] um 25 %. Bei größerer Momenteninteraktion passt sich die FEM-Berechnung den Bemessungsvorschlag [1] auf 10 % Genauigkeit an.

### 5.2.2.1 LOKALE DEHNUNGEN AN DER KRAFTEINLEITUNG

Für vier Berechnungspunkte wurden der horizontale Dehnungsverlauf im Ausrundungsradius, sowie der vertikale Dehnungsverlauf im Steg direkt unter der Krafteinleitung ausgewertet. Die Lage der ausgewerteten Berechnungspunkte ist in Abbildung 40 zur Übersichtlichkeit angeführt.

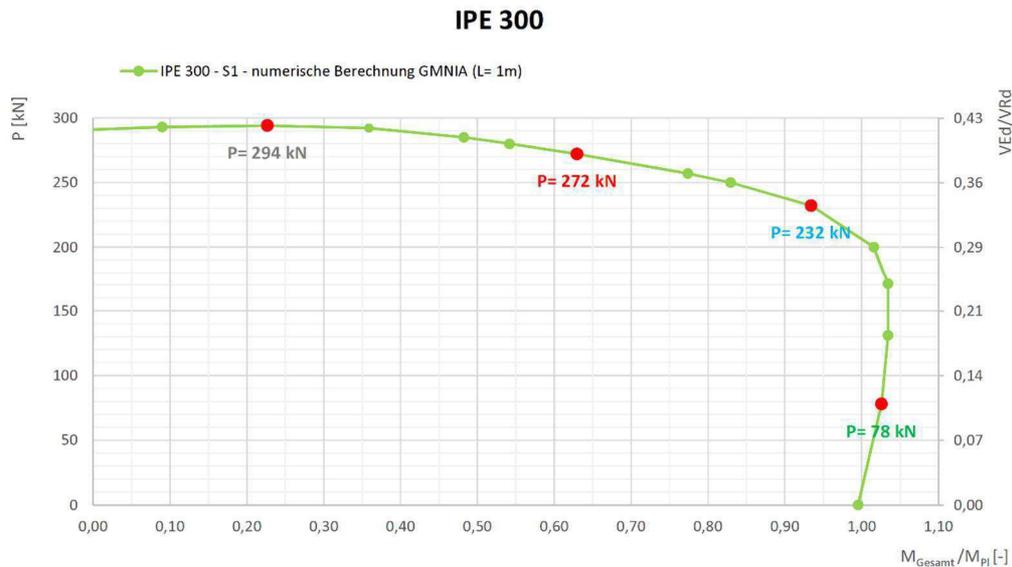


Abbildung 40: Übersicht der Lage der ausgewerteten Berechnungspunkte für die Darstellung des Dehnungsverlaufes

Es wurden die Dehnungen nach 100 % des Erreichens der Traglast mit durchgezogener Linie dargestellt, sowie nach 98 % Aufbringung der Traglast mit strichlierter Linie (Abbildung 41 bis 44). Eine Reduktion von nur 2 % der maximalen Traglast mindert die auftretenden Dehnungen deutlich ab.

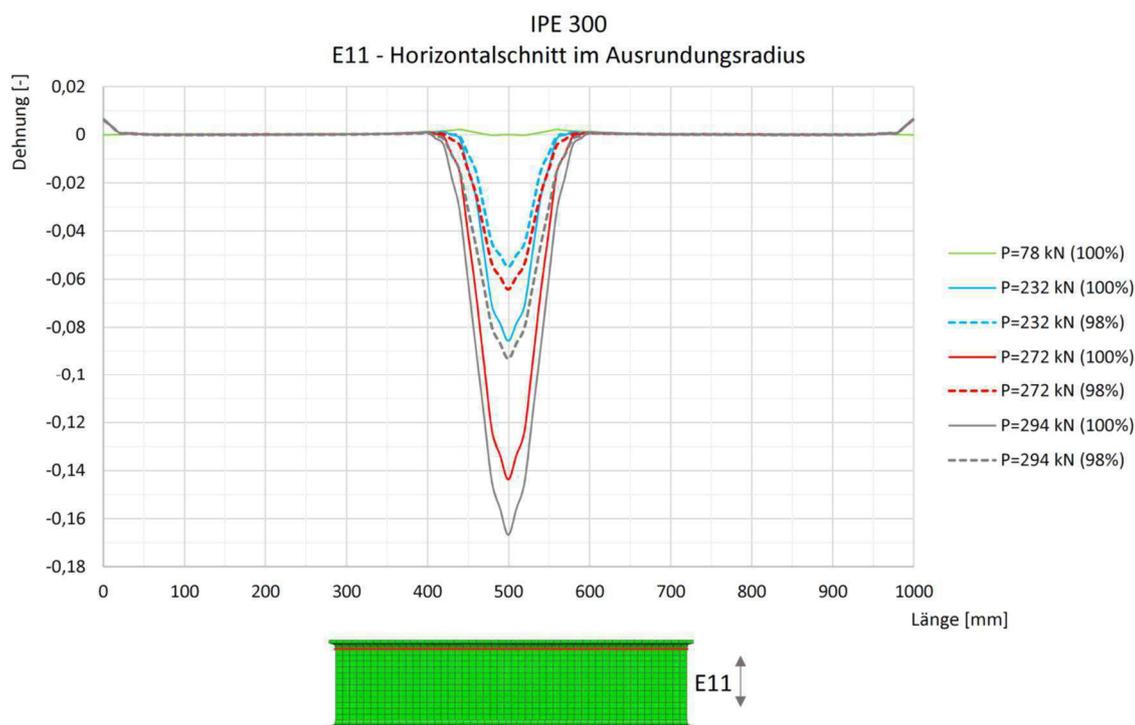
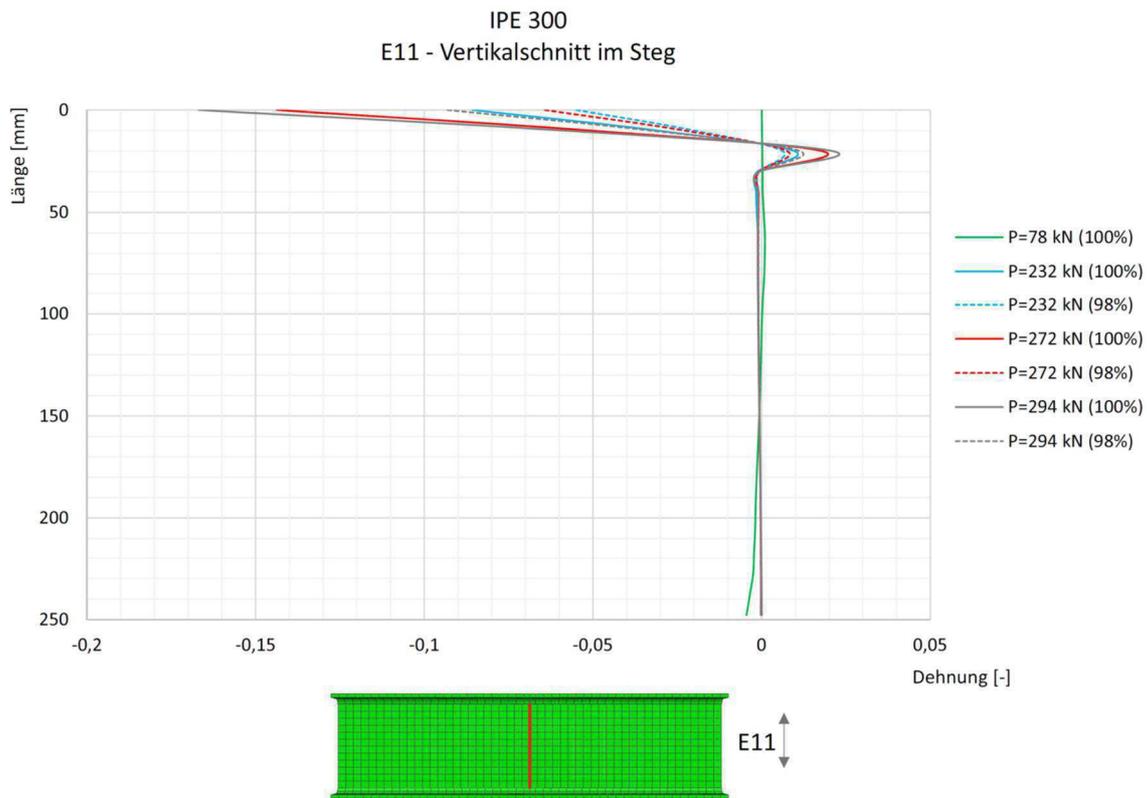


Abbildung 41: Vertikaldehnung E11 im Horizontalschnitt Stegoberkante

In Abbildung 41 ist der Verlauf der Vertikaldehnungen über die Länge des Grundelementes im Horizontalschnitt in der Stegoberkante am Ende des Ausrundungsradius dargestellt. Die Dehnungen wurden für eine mögliche Krafteinleitung von 78 kN, 232 kN, 272 kN und 294 kN ausgewertet, siehe Abbildung 40. Die maximale Vertikaldehnung im Horizontalschnitt im Ausrundungsradius wird bei maximal möglicher Krafteinleitung von 294 kN erreicht. Sie beträgt an der Stelle der Krafteinleitung 17 %. Die Dehnung nimmt an dieser Stelle, bei einer Reduktion der Traglast von 2 %, um 44 % ab, und beträgt dann nur noch 9 %. Bei einer Einleitung von 272 kN wird eine Dehnung von 14 % erreicht. Bei 267 kN (entspricht 98 % von 272 kN) beträgt die Vertikaldehnung nur noch 6 %. Bei 78 kN Krafteinleitung ist die daraus resultierende Dehnung nahezu gleich Null. Der Einflussbereich der Dehnungen erstreckt sich jeweils 100 mm links und rechts der Krafteinleitung.



Von Interesse ist auch die Betrachtung der Vertikaldehnung über die Steghöhe, wie in Abbildung 42 dargestellt. Hier ist erkennbar, dass die Dehnungen 30 mm unter dem Ausrundungsradius bereits, unabhängig von der Größe der Kraft  $P$ , vollständig abgeklungen sind. Die Größe der Dehnungen ist abhängig von der jeweiligen Kraftgröße, die Stelle der Maxima ist jedoch unabhängig von der Größe der Kraft und somit für alle gleich.

IPE 300  
E22 - Vertikalschnitt im Steg

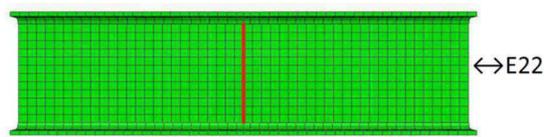
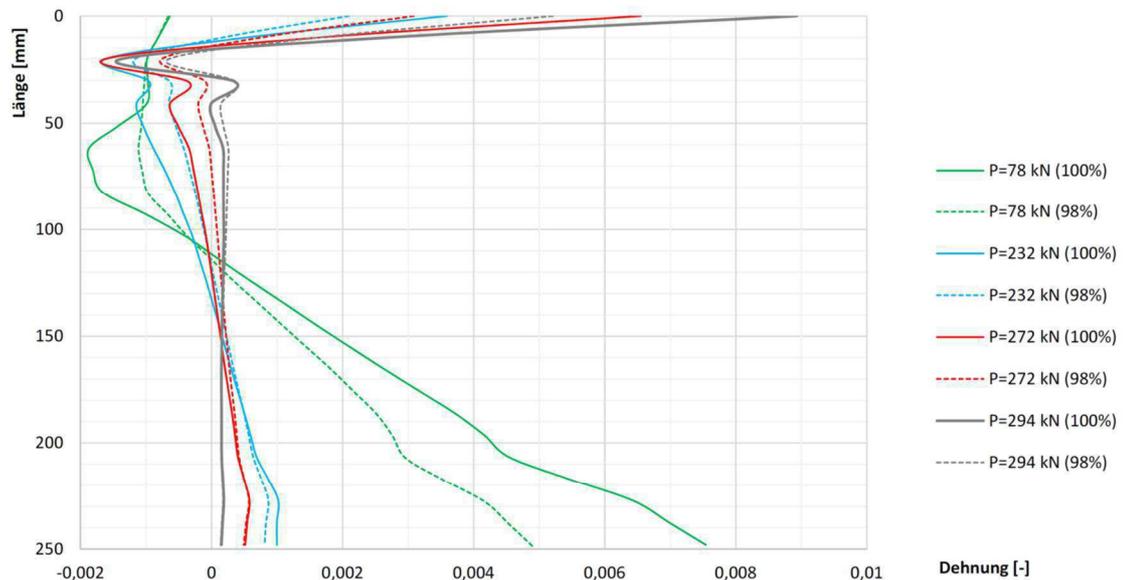


Abbildung 43: Längsdehnung E22 im Vertikalschnitt

Betrachtet man die Längsdehnungen im Vertikalschnitt unter der Krafteinleitung (siehe Abbildung 43) gibt es Ähnlichkeiten im Verlauf mit den Vertikaldehnungen. Die maximalen Horizontaldehnungen betragen nur 9‰. In diesem Fall ist die Dehnung, bei einer eingeleiteten Kraft von  $P = 78 \text{ kN}$ , am Fußpunkt des Steges am größten. Dies kann aufgrund der größeren Längsnormalspannungen resultieren, welche aus den Momenteinwirkungen entstehen. Der Verlauf der Dehnungslinien zeigt auch deutlich den Spannungsverlauf im Stegquerschnitt. In der oberen Hälfte treten Längsdruckspannungen und in der unteren Hälfte Längszugspannungen auf. Der Spannungsnullpunkt liegt bei der Einleitung größerer Kräfte vom oberen Ausrundungsradius aus gesehen bei etwa 150 mm.

IPE 300  
E22 - Horizontalschnitt im Ausrundungsradius

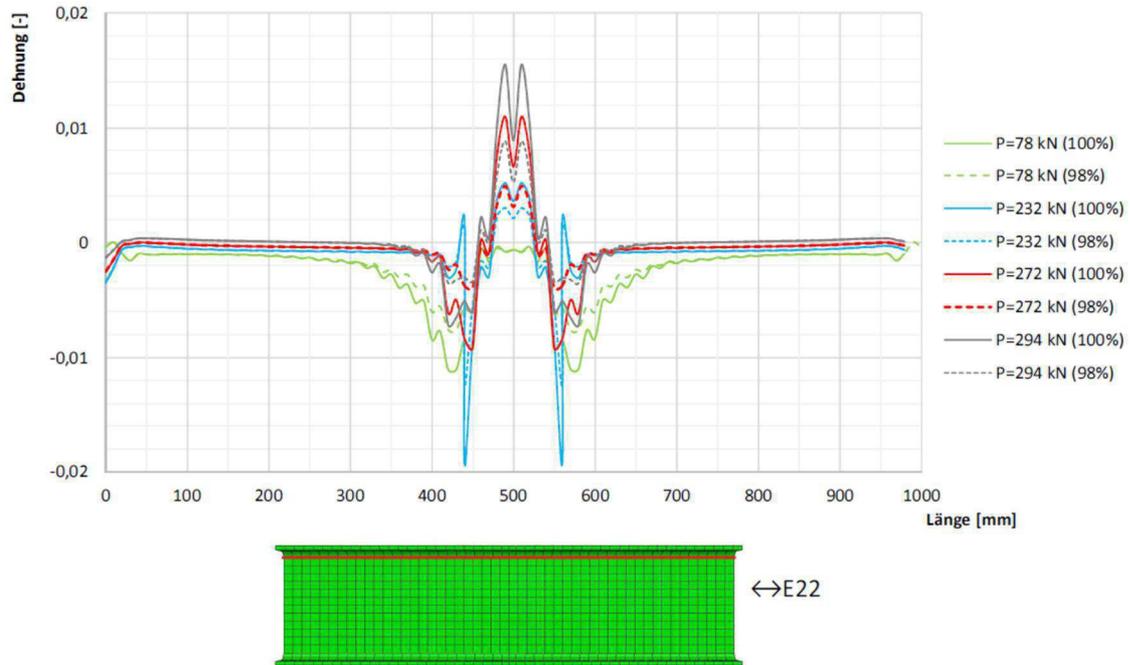


Abbildung 44: Längsdehnung E22 im Horizontalschnitt Stegoberkante

Die Längsdehnungen im Horizontalschnitt am Ende des Ausrundungsradius können ein Maximum von 2 % erreichen, siehe Abbildung 44. Der Einflussbereich beträgt etwa 200 mm.

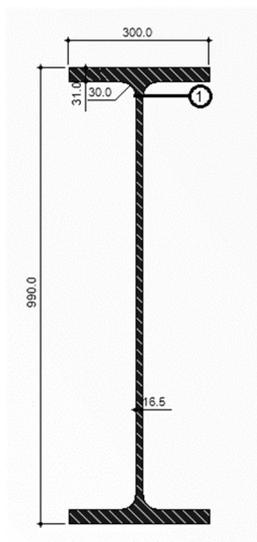
## 5.3 ERGEBNISSE FÜR TRÄGERPROFIL HEA 1000

Der IPE 300 ist ein gedrungener Querschnitt. Um Ergebnisse für schlanke Querschnitte zu erhalten, mit zusätzlichem Beuleffekt, wurde der HEA 1000 gewählt. Mit einer Steghöhe von  $h_w = 868$  mm und einer Stegdicke von 16,5 mm hat der HEA 1000 ein  $h_w/t_w$  Verhältnis von 53, welches deutlich über jenem des IPE 300 von 35 liegt.

### 5.3.1 ALLGEMEINES

Die anzusetzende geometrische Ersatzimperfection beträgt 4,34 mm ( $= 868/200$ ). Die Krafteinleitungsfläche beträgt  $A = b * s = 300 * 30 = 9000 \text{ mm}^2$ . Die Berechnung wurde für die Systeme S1, S2-1KE und S2-3KE durchgeführt.

#### 5.3.1.1 QUERSCHNITTSWERTE



$$A = 36480 \text{ mm}^2$$

$$W_y = 11189 \text{ cm}^3$$

$$h = 990 \text{ mm}$$

$$W_{y,1} = 12761 \text{ cm}^3$$

$$b = 300 \text{ mm}$$

$$M_{pl} = 3014 \text{ kNm}$$

$$t_w = 16,5 \text{ mm}$$

$$t_f = 31 \text{ mm}$$

$$V_{Rd} = 2504 \text{ kN}$$

$$r = 30 \text{ mm}$$

$$A_{vc} = 18456 \text{ mm}^2$$

$$h_w = 868 \text{ mm}$$

$$A_{vc} = A - 2 * b * t_f + (t_w + 2r) * t_f$$

$$h_w/t_w = 53$$

### 5.3.2 BERECHNUNGSERGEBNISSE IM DETAIL

In Abbildung 45 werden die Berechnungsergebnisse des HEA 1000 zusammenfassend dargestellt. Die tabellarischen Ergebnisse sind dem Anhang zu entnehmen.

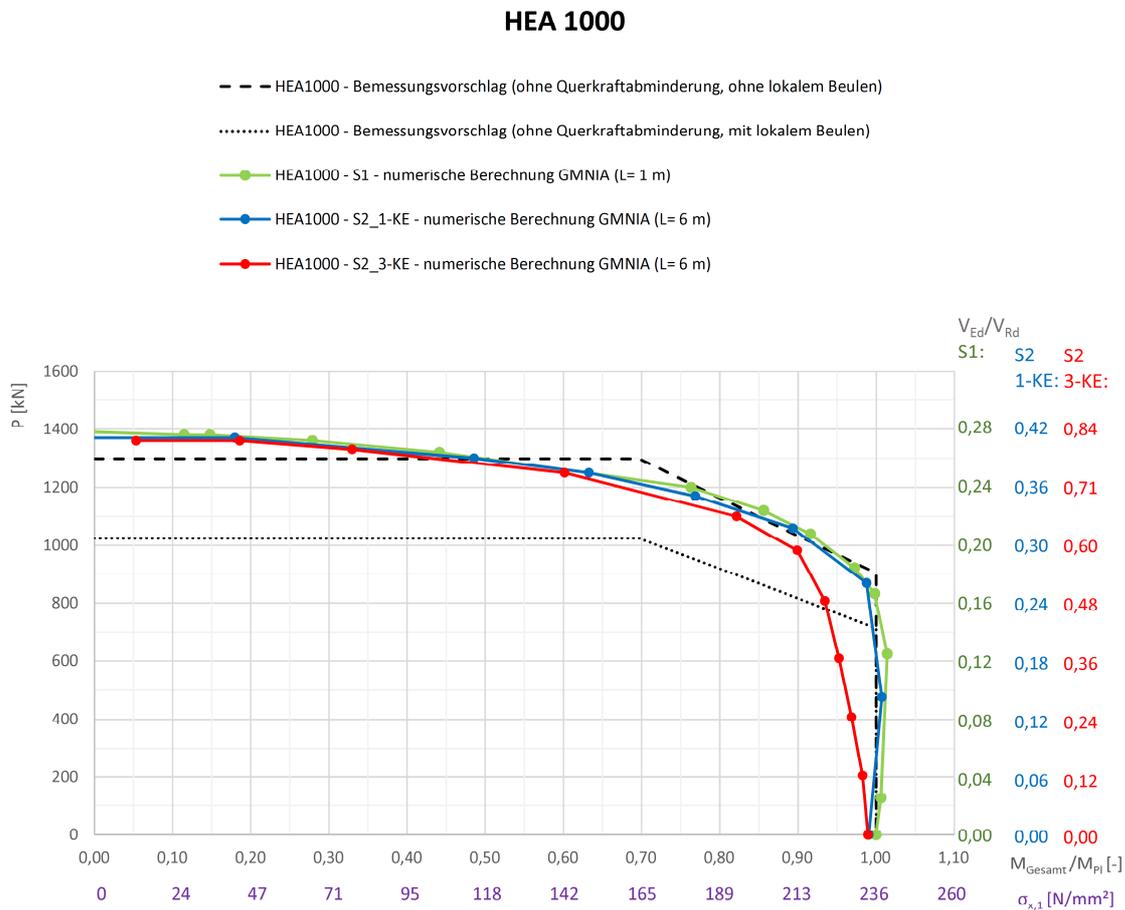


Abbildung 45: Berechnungsergebnisse HEA 1000 – System S1 (L=1m) und S2 (L=6m)

Der HEA 1000 ist in der Lage eine maximale lokale Kraft von  $P = 1380$  kN aufzunehmen. Die maximale Traglast nimmt kontinuierlich mit der Zunahme der Längsnormalspannungen ab. Der Verlauf des Bemessungsvorschlages [1], ohne lokale Beulabminderung, ist fast ident mit jener der FEM-Berechnung. System S2-3KE (rot), welches die größte Querkraftinteraktion hat, ist im Bereich großer Momente nicht in der Lage das volle plastische Moment zusätzlich aufzunehmen. Das System S2-3KE gleicht sich den beiden anderen ab einer plastischen Momentenausnutzung von ca. 60 % an. Trotz dem Erreichen von 81 % der Querkraftausnutzung nach Eurocode im System S2-3KE, kommt es zu keinem Schubversagen des Querschnittes, siehe Abbildung 46. Nach DIN wird die Querkraftausnutzung ebenfalls nicht voll erreicht.

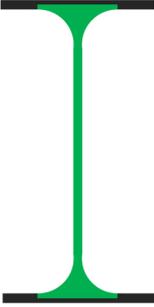
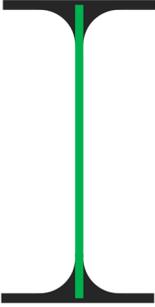
	<i>EC</i>	<i>DIN</i>
		
Schubfläche:	$A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2r) \cdot t_f$ <b>Avc= 18456 mm<sup>2</sup></b>	$(h - t_f) \cdot t_w$ <b>Avc= 15824 mm<sup>2</sup></b>
V <sub>Rd</sub> :	<b>2504 kN</b>	<b>2147 kN</b>
V <sub>Ed</sub> /V <sub>Rd</sub> :	0,81*	0,95*
*bei System S2-3KE: M <sub>ges</sub> /M <sub>pl</sub> ≤ 0,20; P = 1360 kN; V <sub>Ed</sub> = 2040 kN		

Abbildung 46: Schubfläche nach Eurocode und DIN für Profil HEA 1000

Für den Ergebnisverlauf in Abbildung 45 wurden Systemlängen für das System S2 von L = 6 m gewählt. Dies entschied sich nach vorherigen Berechnungen mit unterschiedlichen Längen. Gestartet wurde mit einer Systemlänge von L = 12 m. Dabei ergeben sich praxisübliche Pfettenabstände von jeweils 3 m. Bei dieser langen Spannweite kommt es jedoch zu Systeminstabilitäten (Biegedrillknicken). Diese globalen Verformungen beeinflussen auch das Ergebnis im Bereich der lokalen Kräfteinleitung und vor allem die erreichbare Traglast erheblich. Der Vergleich der linearen Beulanalyse zeigt die Einflüsse bereits deutlich bei einer Systemlänge von L = 12 m zu einer Systemlänge von L = 6 m, siehe Abbildung 47 und 48.

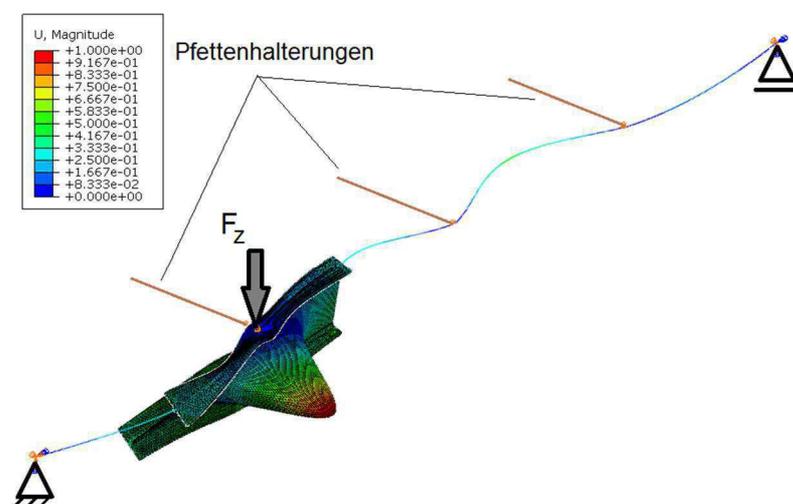


Abbildung 47: Lineare Beulanalyse: 1. Eigenform, System S2-1KE, L=12 m

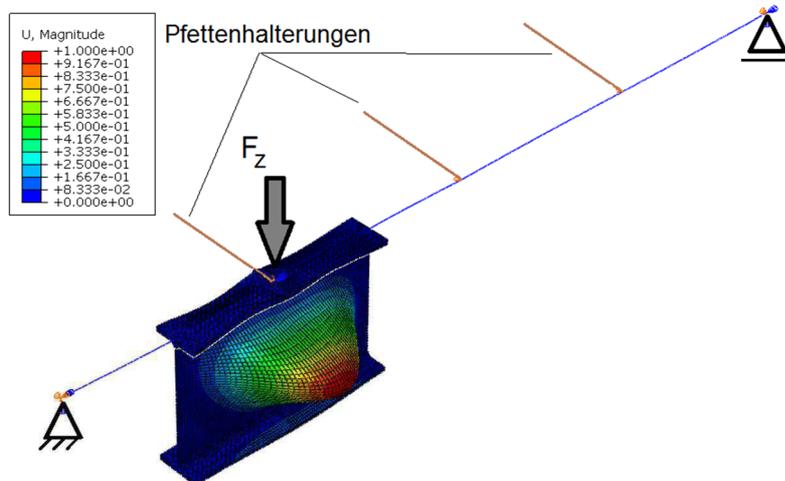


Abbildung 48: Lineare Beulanalyse: 1.Eigenform, System S2-1KE, L=6 m

In einem weiteren Schritt wurde versucht den globalen Einwirkungen entgegenzuwirken. Dabei wurde beim System S2-3KE mit einer Spannweite von  $L = 12$  m der Obergurt kontinuierlich gegen eine Verschiebung aus der Ebene gehalten, siehe Abbildung 49. Somit wurde ein Stabilitätsversagen ausgeschlossen und das Hauptaugenmerk auf die lokale Kräfteinleitung gelegt.

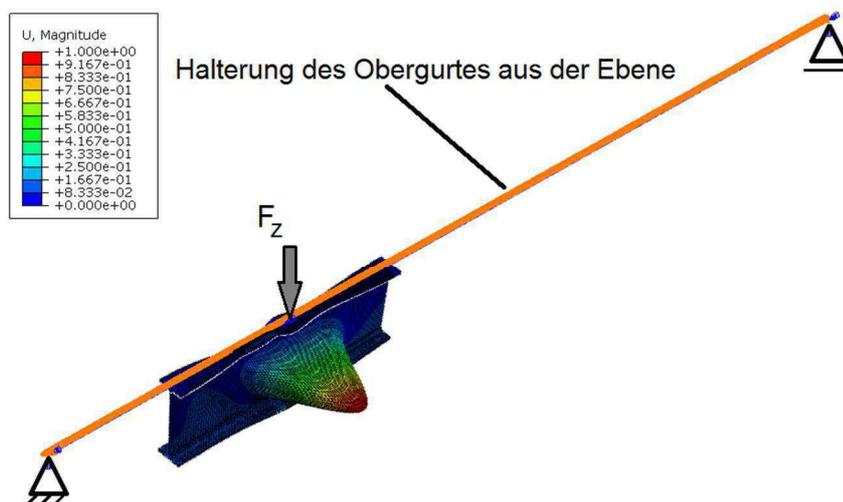


Abbildung 49: Lineare Beulanalyse: 1.Eigenform, System S2-1KE, L=12 m, Obergurt durchgehend gehalten

Die Darstellung dieser Fälle in einem gemeinsamen Diagramm (Abbildung 50) zeigen den Einfluss der Systemlängen. Bei einer Spannweite von  $L = 12$  m, mit reiner Pfettenhalterung aus der Trägerebene, kann das plastische Moment nur zu 96 % erreicht werden. Des Weiteren sind keine höheren, lokalen Kräfte  $P$  aufnehmbar, da das System global versagt.

Durch die kontinuierliche Halterung des Obergurtes können 100 % des plastischen Momentes erreicht werden. Die Reduzierung der Spannweite  $L$  von 12 m auf 6 m bringt, bei gleicher Traglast  $P$ , höhere mögliche Momente mit sich, da durch die Reduktion der Trägerlänge das Versagen aufgrund von Stabstabilität wegfällt.

### HEA 1000

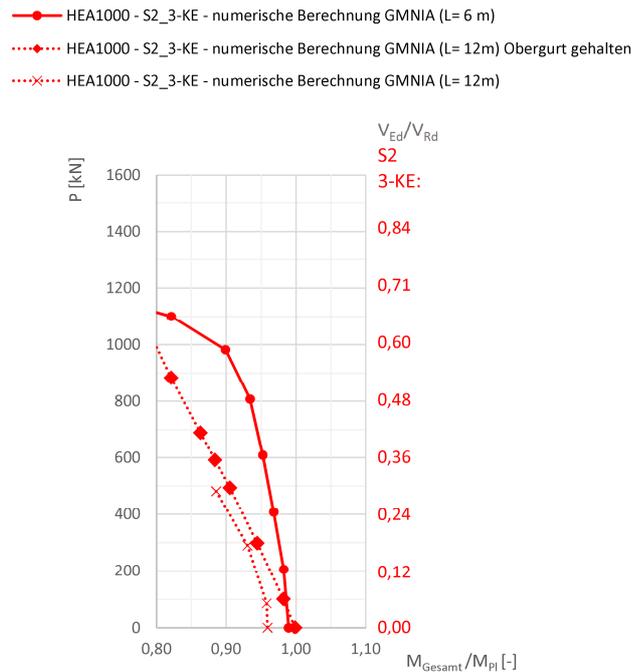


Abbildung 50: Systemlängenvergleich für HEA 1000 - System S2-3KE

Zuerst konnte nicht festgestellt werden, ob der Unterschied von System S2 mit drei Kräfteleitungen zum System S1 mit einer Kräfteinleitung in Trägermitte bzw. System S2 mit einer Kräfteinleitung im Viertelpunkt, wie in Abbildung 45 ersichtlich ist, aus dem Einfluss der Querkraftinteraktion kommt, oder ob es sich um den Einfluss globalen Versagens handelt. Durch die Halterung des Obergurtes ist nun ersichtlich, dass globales Versagen (Biegedrillknicken) ausgeschlossen werden kann. Der Unterschied von System S2-KE zu den beiden anderen Systemen entsteht somit aus reinem Querkrafteinfluss.

### 5.3.2.1 VERFORMUNGEN AUS DER STEGEBENE

Es wurden die Verformungen des Steges aus seiner Ebene unter dem Einfluss der lokalen Krafteinleitung P näher betrachtet. Dabei war die Lage der Beule, bei unterschiedlich großer Kraft P, von Interesse.

Es werden jeweils drei Punkte jedes Systems dargestellt. Die Lage der gewählten Punkte ist in Abbildung 51 zu sehen.

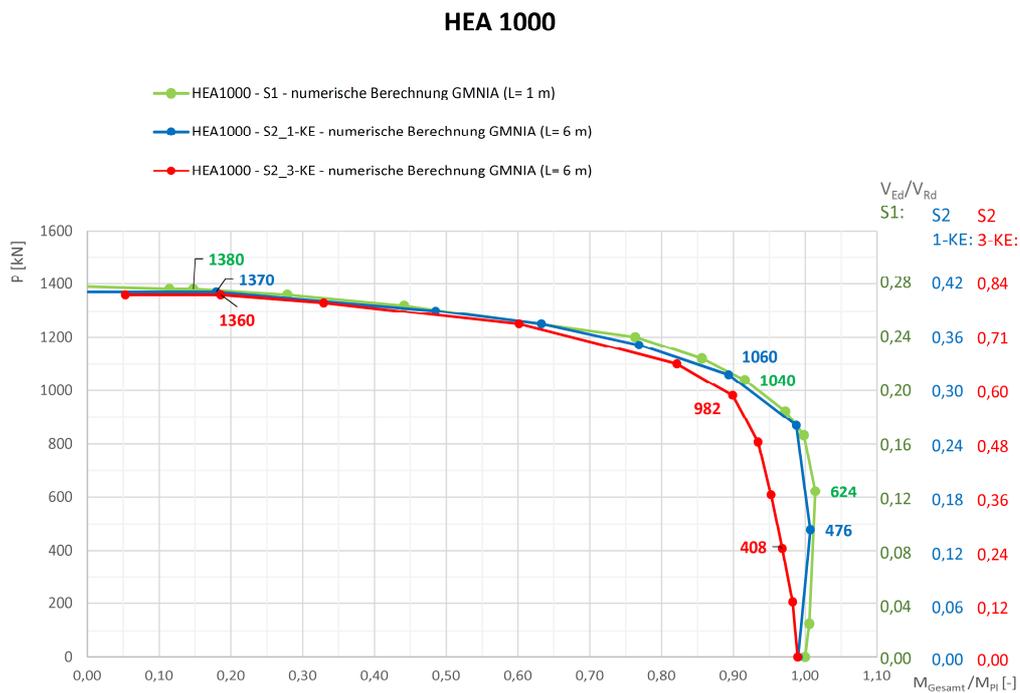


Abbildung 51: Lage der Berechnungspunkte für die Verformungsdarstellung

Abbildung 52 zeigt die Verformung aus der Stegebene direkt unter der Krafteinleitung P für die in Abbildung 51 ersichtlichen Punkte. Die grünen Linien zeigen die Verformungen aus der Stegebene für das System S1. Die blauen Linien stellen die Verformung von System S2-1KE dar. Die roten Linien geben die Verformungen von System S2-3KE wieder. Betrachtet man die Lage der Beulverformung, befindet sich die maximale Verformung aus der Stegebene vom Ausrundungsradius aus gesehen im Regelfall bei etwa 250-350 mm. Somit hat das System auf die Form der Beule keinen großen Einfluss. Nur die Größe der Verformung ändert sich.

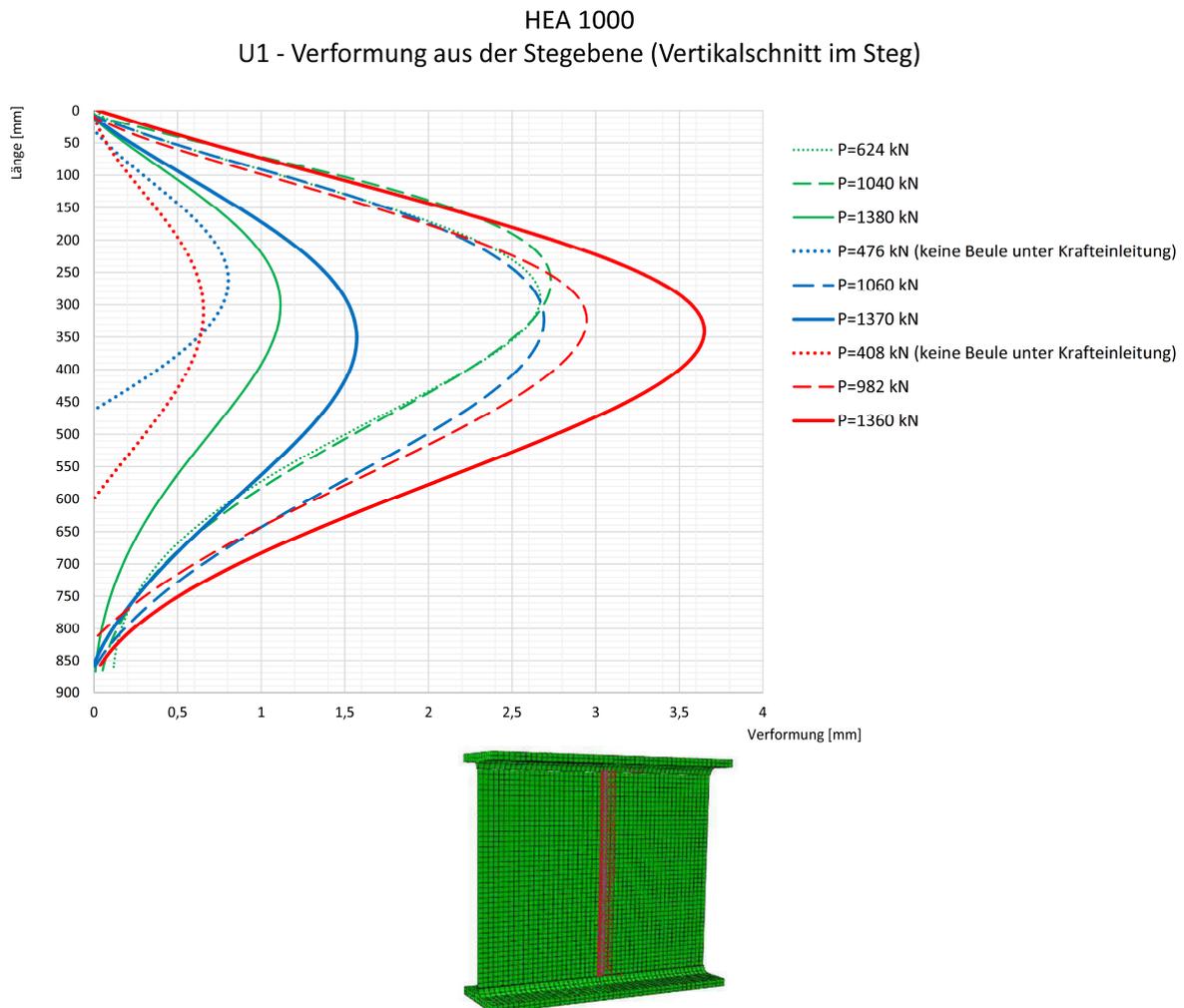


Abbildung 52: Verformungen aus der Stegebene, unmittelbar unter der Kräfteinleitung für HEA 1000

Die blau- und die rot punktierte Linie zeigen sehr geringe bzw. sogar in den negativen Bereich führende Verformungen. Das sind jene beiden Fälle, bei denen der Schub bereits große Einwirkung auf das System hat. Hier befindet sich die Beule nicht mehr direkt unter der Kräfteinleitung, sondern im Bereich der großen Schubbeanspruchung, wie in den Abbildungen 53-55 veranschaulicht ist.

Das eingetragene Kreuzsymbol stellt in den folgenden Abbildungen die Stelle der maximalen Verformung  $u_{\max}$  aus der Stegebene dar.

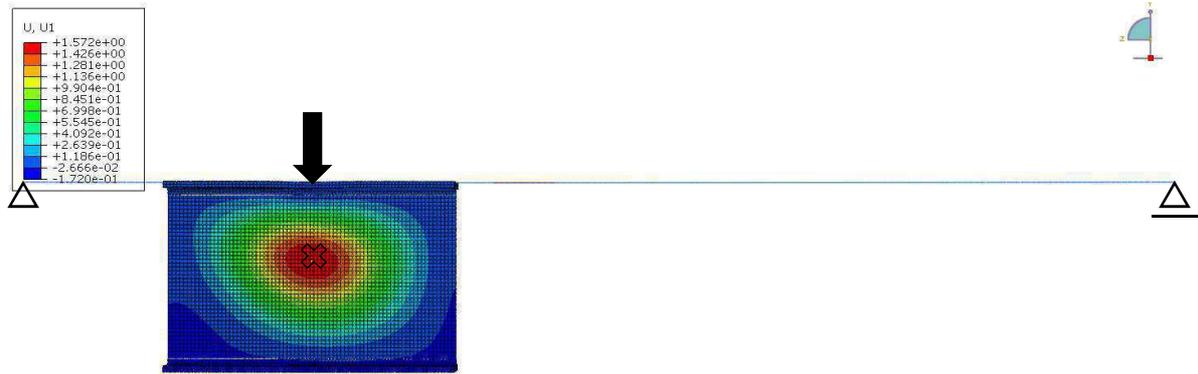


Abbildung 53: Verformung aus der Stegebene – System S2-1KE-, bei  $P=1370$  kN,  $U_{max}=1,57$  mm

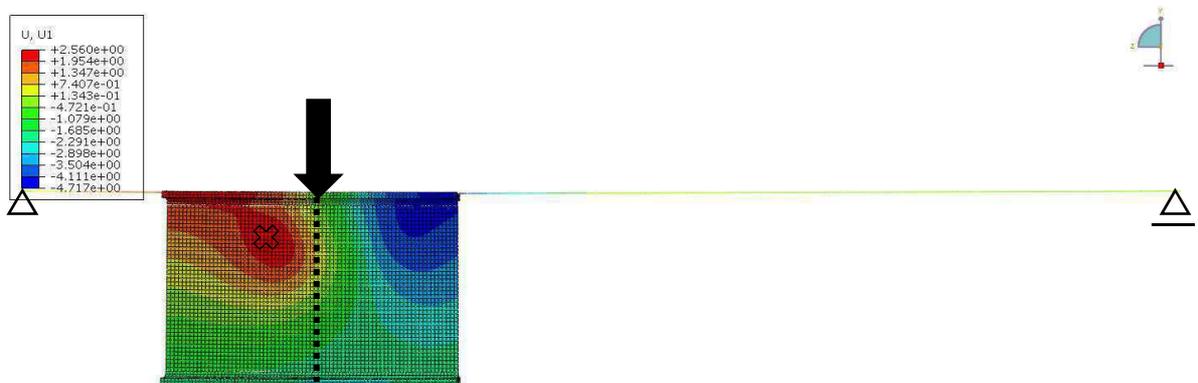


Abbildung 54: Verformung aus der Stegebene – System S2-1KE, bei  $P=476$  kN,  $U_{max}=2,56$  mm

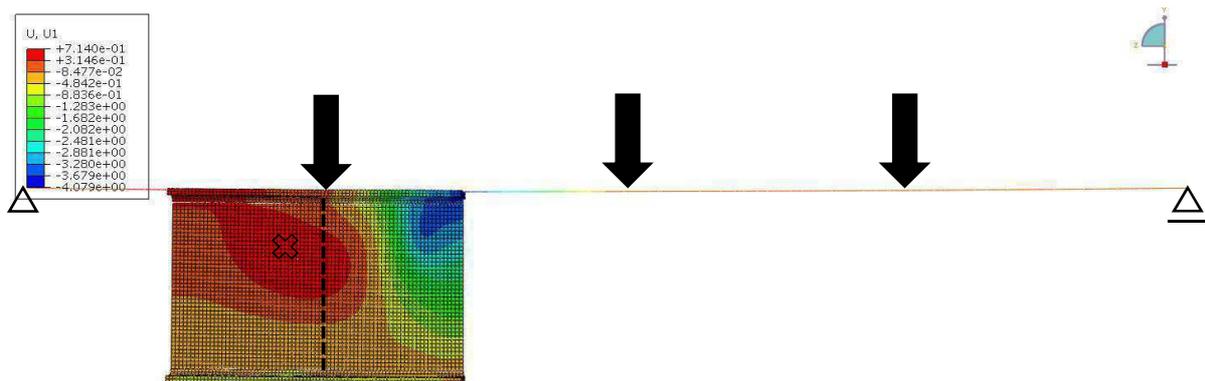


Abbildung 55: Verformung aus der Stegebene – System S2-3KE, bei  $P=408$  kN,  $U_{max}=0,71$  mm

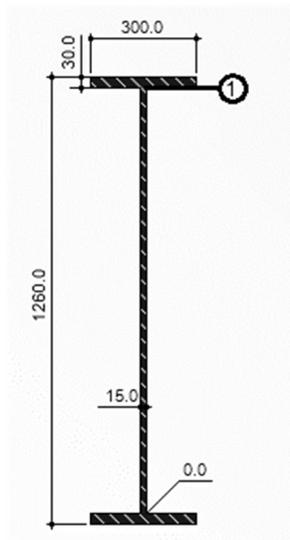
## 5.4 ERGEBNISSE FÜR GESCHWEISSTES PROFIL 1200

Das geschweißte Profil 1200 wurde gewählt, um einerseits das Verhalten eines geschweißten Profils ohne Abrundungen darzustellen, und andererseits einen noch schlankeren Querschnitt zu erreichen. Deswegen wurde ein Profil mit einem höheren Steg definiert. Die Geometrie dieses Profils ergab sich aus dem gewünschten  $h_w/t_w$  Verhältnis von 80. Auf dieses Verhältnis rückgerechnet, und mit Bezug auf den Trägerquerschnitt HEA 1000, ergab sich eine Steghöhe von  $h_w = 1200$  mm. Daraus ergibt sich auch der, im Weiteren verwendete Name, des Profils „Profil 1200“.

### 5.4.1 ALLGEMEINES

Die anzusetzende geometrische Ersatzimperfektion beträgt hier 6,0 mm (= 1200/200). Die Krafteinleitungsfläche beträgt  $A = b * s = 300 * 30 = 9000 \text{ mm}^2$ . Es wurden die Systeme S1, S2-1KE und S2-3KE betrachtet.

#### 5.4.1.1 QUERSCHNITTSWERTE



$$A = 36000 \text{ mm}^2$$

$$W_y = 14237 \text{ cm}^3$$

$$h = 1260 \text{ mm}$$

$$W_{y,1} = 14949 \text{ cm}^3$$

$$b = 300 \text{ mm}$$

$$M_{pl} = 3870 \text{ kNm}$$

$$t_w = 15 \text{ mm}$$

$$t_f = 30 \text{ mm}$$

$$V_{Rd} = 2442 \text{ kN}$$

$$h_w = 1200 \text{ mm}$$

$$A_{vc} = h_w * t_w = 18000 \text{ mm}^2$$

$$h_w/t_w = 80$$

### 5.4.2 BERECHNUNGSERGEBNISSE IM DETAIL

In diesem Kapitel werden die Berechnungsergebnisse des Profils 1200 wiedergegeben. In Abbildung 56 ist ersichtlich, dass es beim System S2 Probleme gibt, die volle Momententragfähigkeit auszunutzen. Dies liegt auch hier daran, dass es zuerst zu Stabstabilitätsproblemen kommt. Alle drei Systeme können einer maximalen Krafteinleitung von  $P = 1110$  kN widerstehen. Der Bemessungsvorschlag [1] liegt diesmal fast 50 % unter der FEM-Berechnung. Dies resultiert vermutlich daraus, dass für die Berechnung der maximalen lokalen Krafteinleitung von einem Lastausbreitungsverhältnis von 1:2,5 ausgegangen wird. Die betrachtete Stelle mit der effektiven Lasteinleitungslänge befindet sich dann an der Stegoberkante (unter dem Ausrundungsradius). In diesem Fall gibt es jedoch keinen Ausrundungsradius, wodurch die Länge der effektiven Lasteinleitung erheblich reduziert wird.

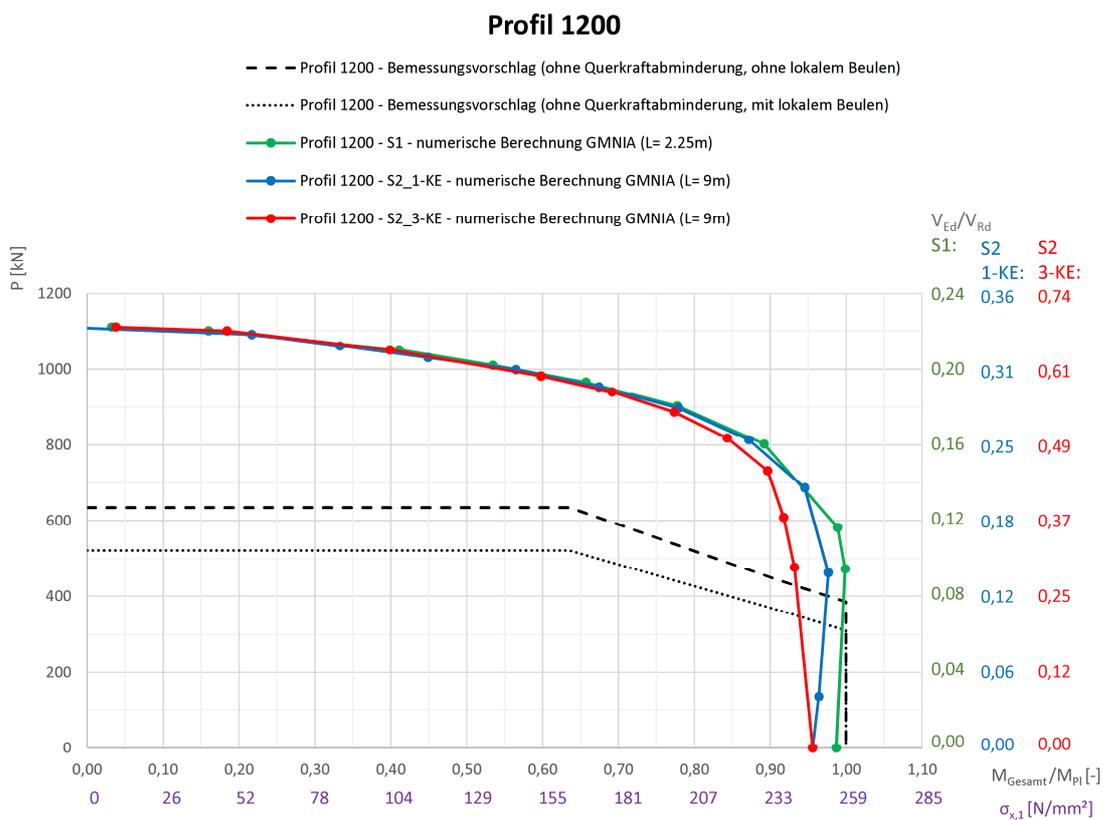


Abbildung 56: Berechnungsergebnisse Profil 1200 – System S1 (L=2,25m) und S2 (L=9m)

Die Systemlänge für S2 ergibt sich aus dem Profilhöhe zu Systemlänge Verhältnis, bezogen auf den HEA 1000 – daraus ergibt sich  $L = 9$  m. Die Grundelementlänge, welche zugleich auch die Systemlänge für System S1 ist, entspricht einem Viertel davon und beträgt  $L = 2,25$  m.

Das Problem des Überschreitens der Querkrafttragfähigkeit durch hohe lokale Krafteinleitung ist bei diesem geschweißten Querschnitt nicht relevant. Da kein Ausrundungsradius vorhanden ist, ist die Schubfläche  $A_{vc}$  nach Eurocode ident zur Stegfläche. Somit kommt es im FE-Modell zuerst zu einem lokalen Versagen, bevor es zu einer globalen Überschreitung der Schubtragfähigkeit des Trägers kommt.

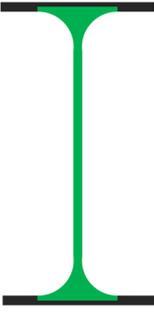
	<i>EC</i>	<i>DIN</i>
		
Schubfläche:	$h_w * t_w$ <b><math>A_{vc} = 18000 \text{ mm}^2</math></b>	$h_w * t_w$ <b><math>A_{vc} = 18000 \text{ mm}^2</math></b>
$V_{Rd}$ :	<b>2442 kN</b>	<b>2442 kN</b>
$V_{Ed}/V_{Rd}$ :	0,68	0,68
*bei System S2-3KE: $M_{ges}/M_{Pl} \leq 0,20$ ; $P = 1100 \text{ kN}$ ; $V_{Ed} = 1650 \text{ kN}$		

Abbildung 57: Schubfläche nach Eurocode und DIN für Profil 1200

Die maximal aufnehmbare Traglast im Krafteinleitungsbereich von  $P = 1110 \text{ kN}$  entspricht einer Querkraft von  $V_{Ed} = P * 1,5 = 1110 * 1,5 = 1665 \text{ kN}$  für System S2-3KE. Das bedeutet eine maximale Querkraftausnutzung von nur 68 % für diesen Querschnitt, sowohl für EC als auch für DIN, siehe Abbildung 57.

Wie auch die Abbildung 58 zeigt, ist im System S2-3KE (größte Querkraftinteraktion), nur eine lokale Spannungsüberschreitung im direkten Bereich unter der Krafteinleitung ersichtlich.

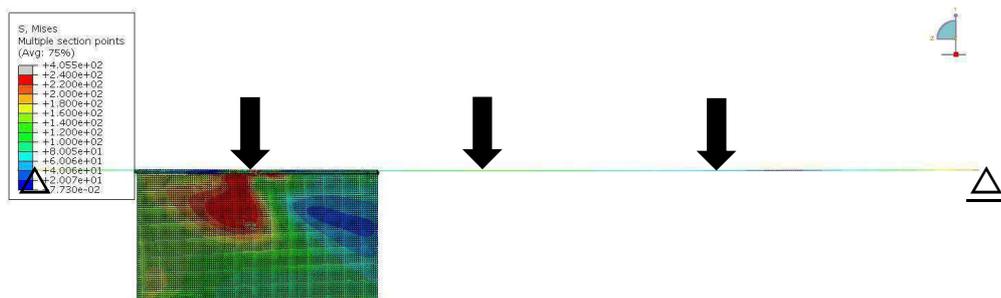


Abbildung 58: System S2-3KE mit  $L=9\text{m}$ , bei  $P=1100\text{kN}$ ,  $M_{ges}=713\text{kNm}$ ,  $V_{Ed}=1650\text{kN}$

Bei System S2-1KE werden generell nur 96 % des plastischen Momentes erreicht. Um zu zeigen, dass es sich auch hierbei nur um Systeminstabilitäten (wie beim HEA 1000) handelt, wurde der Obergurt kontinuierlich gegen Verschiebung aus der Ebene gehalten, siehe Abbildung 59.

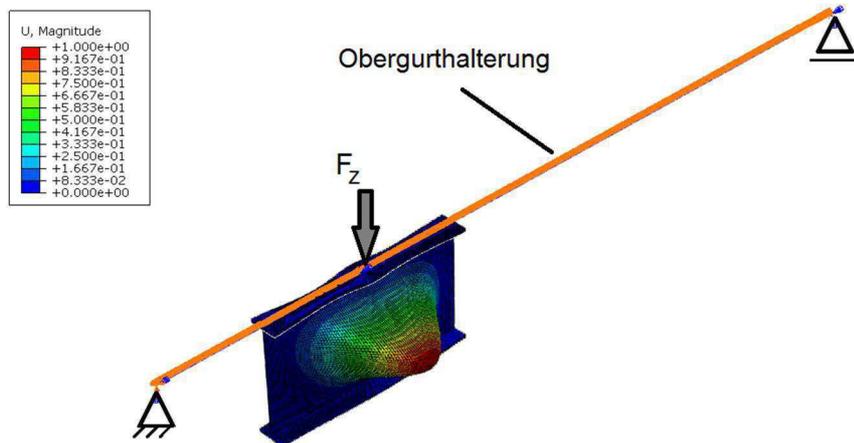


Abbildung 59: Lineare Beulanalyse, System S2-1KE, L=9 m, Obergurt durchgehend gehalten

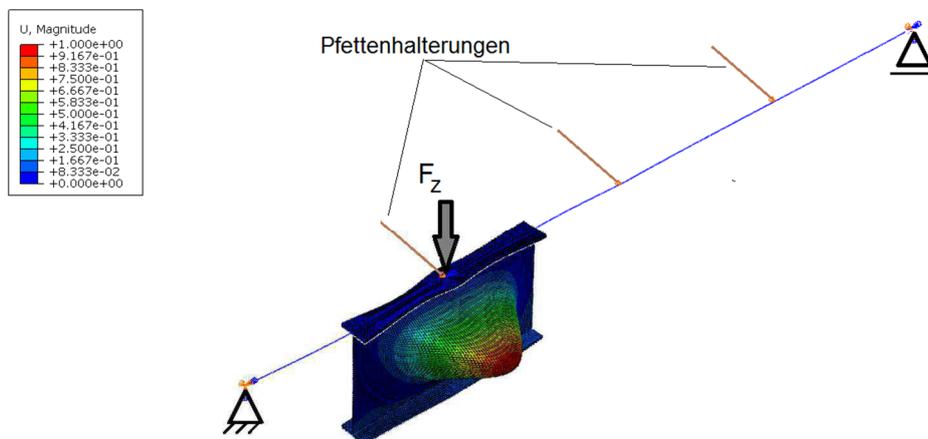


Abbildung 60: Lineare Beulanalyse, System S2-1KE, L=9 m

Der Unterschied in der linearen Beulanalyse (Abbildung 60) ist minimal und fast nicht erkennbar, jedoch hat er einen größeren Einfluss auf die nichtlineare Traglastberechnung. Die Halterung des Obergurtes bewirkt, wie in Abbildung 61 dargestellt ist, die volle Ausnutzung des plastischen Momentes. Dabei sind die punktierten Linien jene, bei der das System eine durchgehende Obergurthalterung hat. Verglichen zur reinen Pfettenhalterung in den Viertelpunkten des Trägers (durchgezogene Linien), wird durch die Halterung des gesamten Obergurtes die Ausnutzung des plastischen Momentes von 96 % auf 100 % gesteigert.

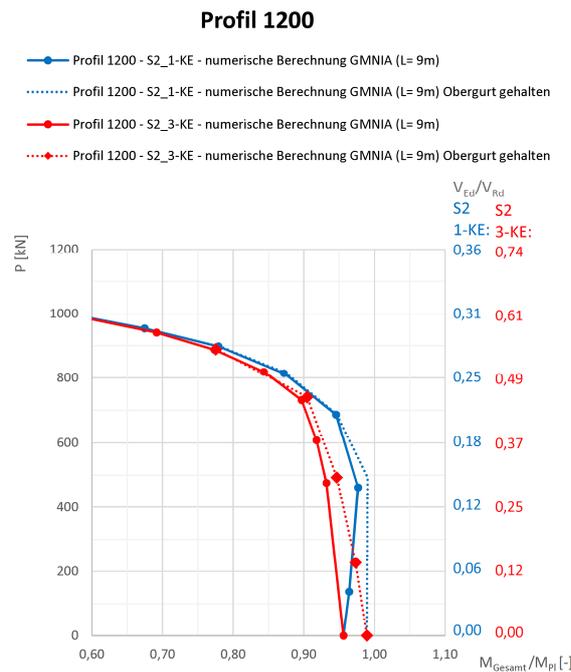


Abbildung 61: Systemvergleich System S2, L=9m, Träger 1200

In Abbildung 62 sind abschließend die Berechnungsergebnisse mit durchgehender Obergurthalterung in das Diagramm der Berechnungsergebnisse ohne Obergurthalterung aus Abbildung 56 hinzugefügt worden. Hierbei wird nun in allen Systemen das plastische Moment voll erreicht. Das Abweichen von System S2-3KE (rote Linie) von den beiden anderen Systemen kommt, wie in Kapitel 5.3.2 genauer beschrieben, aus reinem Querkrafteinfluss. Durch die zusätzliche Halterung der Obergurte wird Stabilitätsversagen ausgeschlossen.

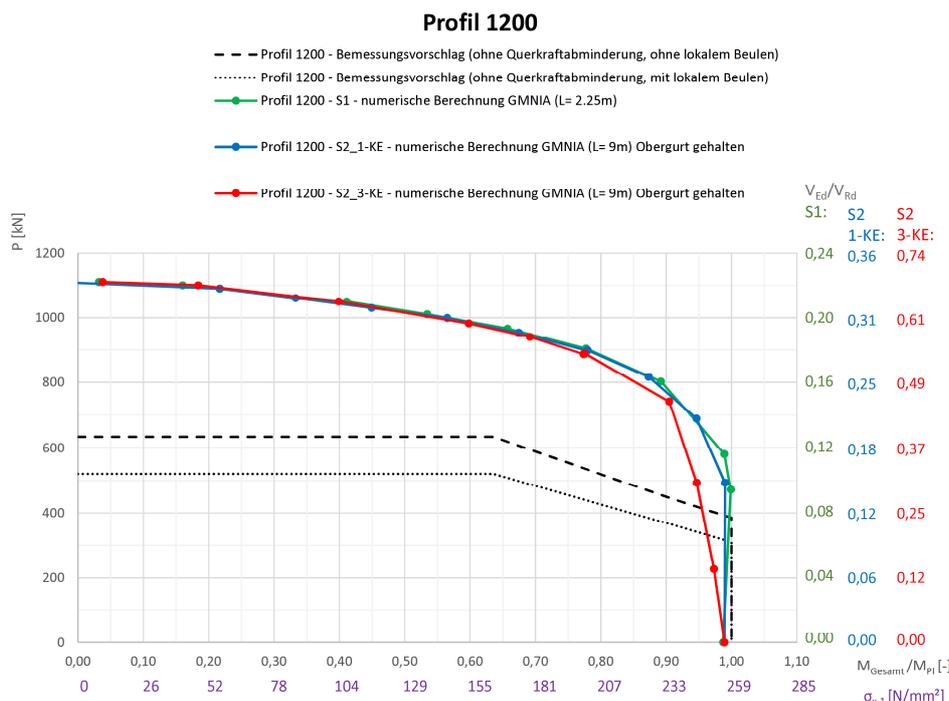


Abbildung 62: Berechnungsergebnisse Profil 1200 – System S1 und S2

### 5.4.2.1 VERFORMUNGEN AUS DER STEGEBENE

Die durch die lokale Aufbringung einer Kraft  $P$  entstehenden Verformungen aus der Stegebene unmittelbar unter der Last ist für alle Systeme nachfolgend aufgezeigt. Es werden jeweils drei Punkte jedes Systems dargestellt. Bei hoher Kraft  $P$ , im Übergang sowie bei geringer Kraft  $P$ , aber großem Moment. Die Lage der gewählten Punkte ist in Abbildung 63 zu sehen.

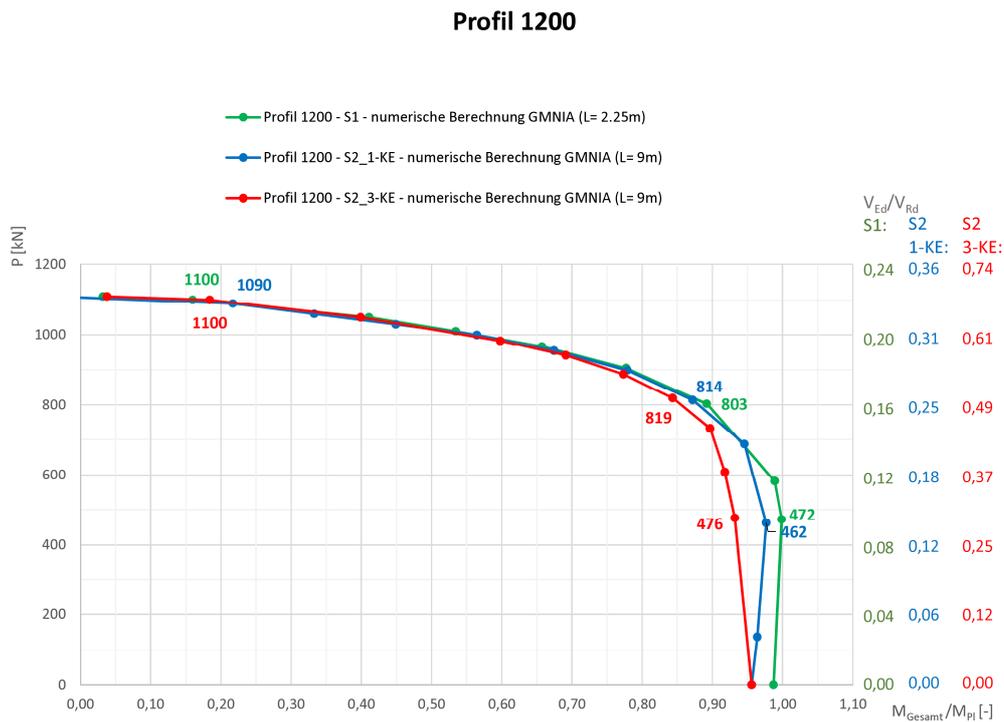


Abbildung 63: Lage der Berechnungspunkte für die Verformungsdarstellung

In Abbildung 64 sind die Verformungen aus der Stegebene ersichtlich. Die Verformungen für System S1 sind in grün dargestellt. In Blau abgebildet sind die Verformungen aus System S2-1KE und in Rot die Verformungen aus System S2-3KE.

Bei einer lokalen Krafteinleitung von  $P = 1100$  kN ist die Lage der maximalen Verformung aus der Stegebene, unabhängig vom System, bei 500 mm vom oberen Stegrand, siehe Abbildung 64. Bei einer Reduzierung der Kraft auf etwa  $P = 800$  kN verschiebt sich die Lage minimal um 50 mm nach oben. Bei System S2-3KE wirkt der Schub dezent mit, sodass sich die Lage der maximalen Ausbeulung nicht mehr direkt unter der Krafteinleitung befindet, sondern sich etwas ins Schubfeld verlagert. In den Abbildungen 65 und 66 ist die Lage der Beule für System S2-1KE und System S2-3KE graphisch dargestellt. Das eingetragene Kreuzsymbol in der Abbildung 66 stellt die Lage der maximalen Verformung  $u_{max}$  dar, welches sich nicht direkt unter der Krafteinleitung befindet.

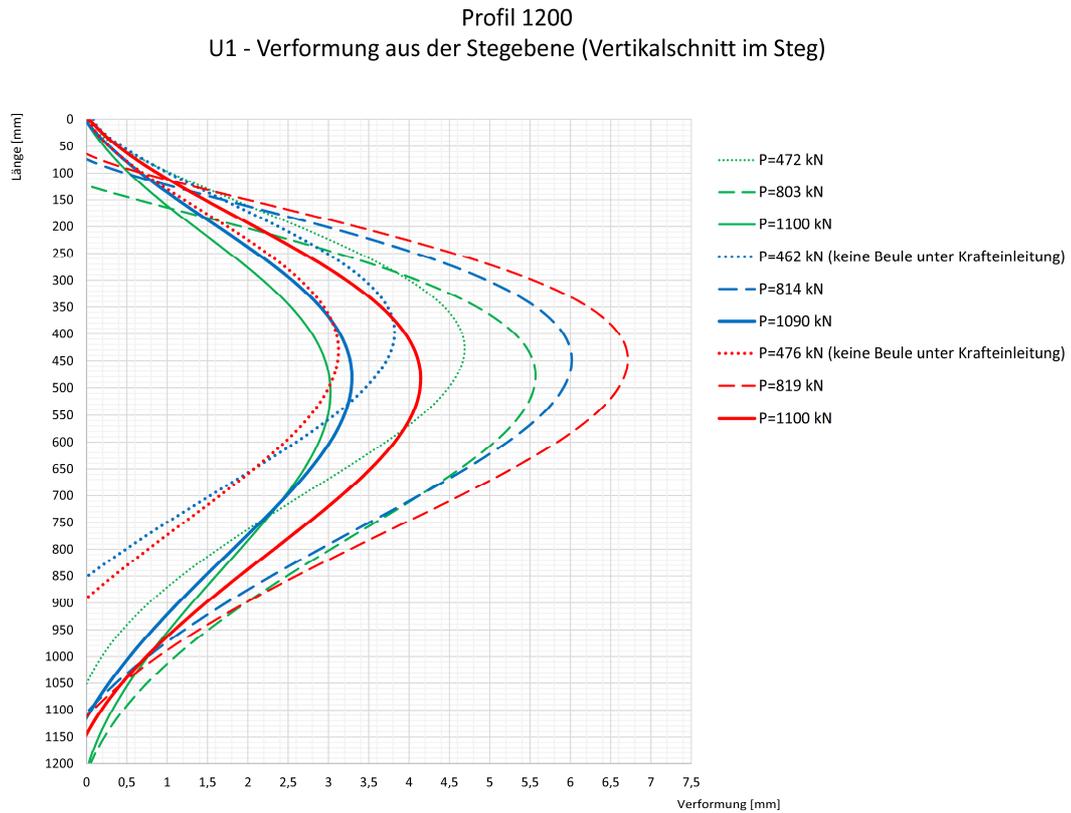
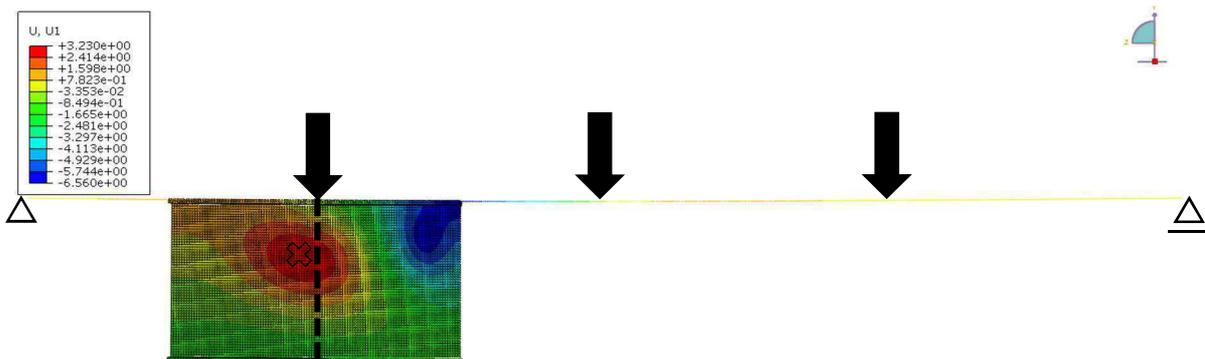
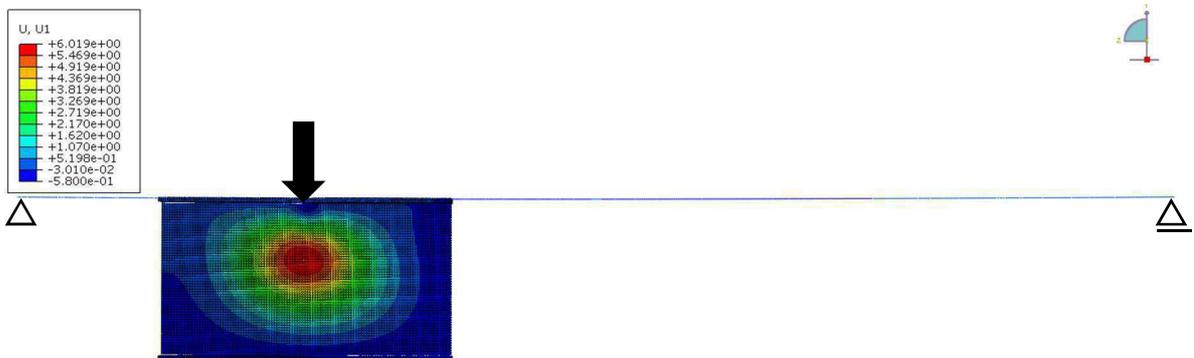


Abbildung 64: Verformungen aus der Stegebene, unmittelbar unter der Krafteinleitung für Profil 1200



## 5.5 VERGLEICH DER GESAMTERGEBNISSE

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der verschiedenen untersuchten Profile gegenübergestellt.

a) Gegenüberstellung der Querschnitte:

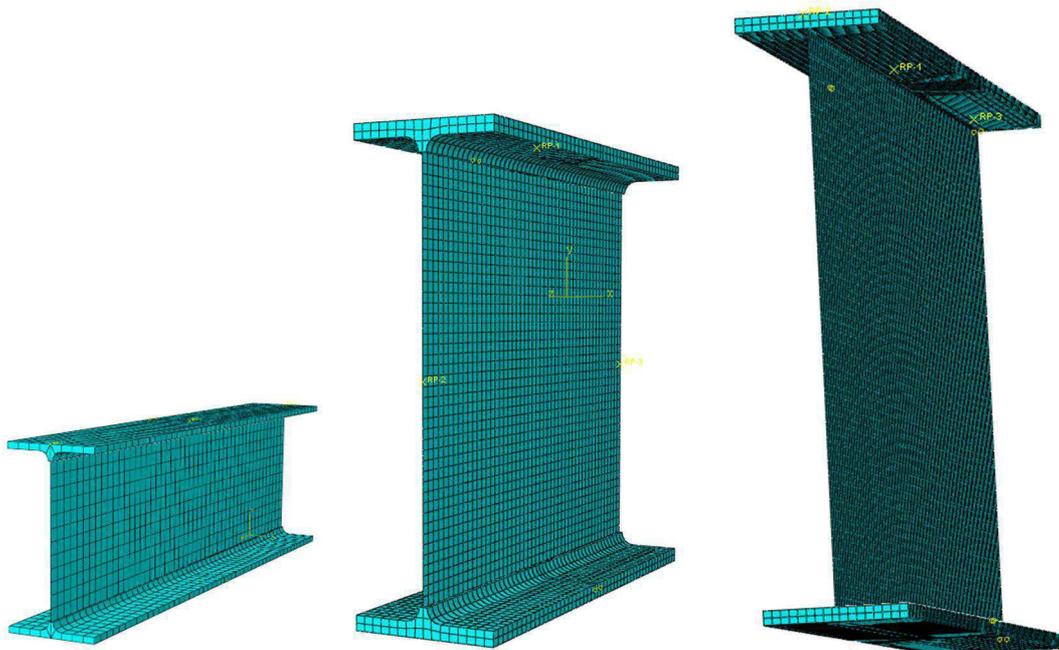


Abbildung 67: IPE300, HEA 1000, Profil 1200 im Vergleich

Der IPE 300 ist der gedrungeenste Querschnitt der drei untersuchten Profile. Der IPE 300 sowie der HEA 1000 sind Querschnitte der Querschnittsklasse 1.

$$h_w/t_w \leq 72 * \varepsilon \quad (\varepsilon = 1,0 \text{ für } S235)$$

Das Profil 1200 entspricht der Querschnittsklasse 2 und stellt den schlankesten untersuchten Querschnitt dar.

$$h_w/t_w \leq 83 * \varepsilon \quad (\varepsilon = 1,0 \text{ für } S235)$$

Die Klassifizierung wurde für Normalspannungen aus reiner Biegebeanspruchung durchgeführt. Bei reiner Biegung sind also die Tragfähigkeiten aller drei Querschnitte nicht durch Stegbeulen beeinflusst. In Tabelle 2 sind die  $h_w/t_w$  Verhältnisse der drei Querschnitte gegenübergestellt.

Profil	IPE 300	HEA 1000	Profil 1200
$h_w/t_w$	35	53	80

Tabelle 2:  $h_w/t_w$  für IPE300, HEA 1000, Profil 1200

b) Gegenüberstellung der Schubflächen und Querkrafttragfähigkeit nach Eurocode:

Mit der Zunahme der Schubfläche steigt automatisch auch die Querkrafttragfähigkeit an. Die maximal auftretende Querkraft  $V_{Ed}$  je System ist in Tabelle 3 in Bezug auf die maximale Querkrafttragfähigkeit  $V_{Rd}$  dargestellt. Mit ansteigender Schubtragfähigkeit sinkt gleichzeitig auch die Querkraftausnutzung. Bei gedrunenen Querschnitten braucht das lokale Versagen, aufgrund des globalen Schubversagens, nicht mehr betrachtet werden. (ansonst Unterschätzung der lokalen Tragfähigkeit  $P = F_z$ )

Profil		IPE 300	HEA 1000	Profil 1200
$A_{vc}$		2568 mm <sup>2</sup>	18456 mm <sup>2</sup>	18800 mm <sup>2</sup>
$V_{Rd}$		348 kN	2504 kN	2442 kN
$V_{Ed}/V_{Rd}$	System S1	0,42	0,28	0,23
	System S2-1KE	0,63	0,41	0,34
	System S2-2KE	0,82	-	-
	System S2-3KE	0,82	0,81	0,68

Tabelle 3: Schubtragfähigkeit für IPE300, HEA 1000, Profil 1200

c) Gegenüberstellung der Ergebnisdifferenz zum Bemessungsvorschlag [1]:

Der Bemessungsvorschlag [1], nachfolgend dargestellt, inklusive Beulabminderung aber ohne Querkraftabminderung, wird nun den FEM-Berechnungsergebnissen an drei Punkten gegenübergestellt, siehe Abbildung 68. Schnitt A stellt den Bereich der geringsten Längsnormalspannungsinteraktion dar, mit maximal möglicher Vertikalkraft P. Bereich B stellt den Übergang dar, in dem der Bemessungsvorschlag [1] aufgrund der Interaktion mit Längsnormalspannungen beginnt abgemindert zu werden. Im Schnitt C wird das plastische Moment erreicht. Dies grenzt somit den Bemessungsvorschlag [1] ab.

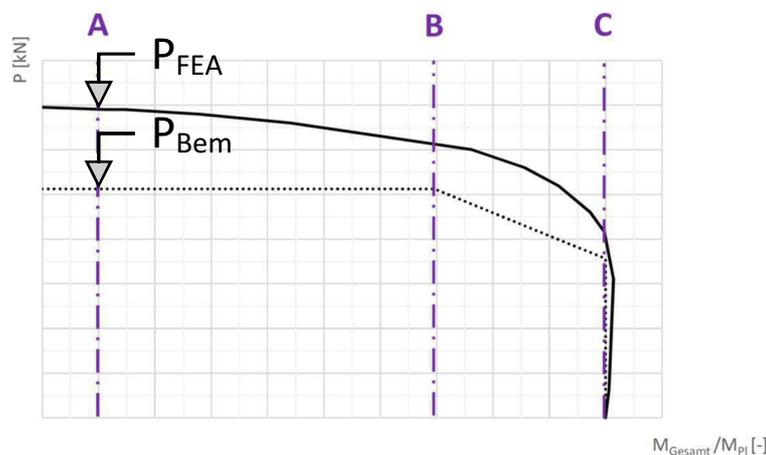


Abbildung 68: Betrachtete Schnitte für die Gegenüberstellung zum Bemessungsvorschlag [1]

In Tabelle 4 und 5 ist anhand der Ergebnisse  $P_{Bem}/P_{FEA}$  ersichtlich, dass je schlanker das Profil wird, desto weiter entfernt sich der Bemessungsvorschlag [1] von der FEM-Berechnung. Für den IPE 300 beträgt die Treffsicherheit des Bemessungsvorschlags [1] 80 % bis 91 % - für das Profil HEA 1000 75 % bis 85 % und für das Profil 1200 etwa 50 %. Die enorme Unterschreitung beim geschweißten Profil wurde bereits in Kapitel 5.4.2 „Geschweißtes Profil 1200 - Berechnungsergebnisse“ erläutert. Die geringe effektive Lasteinleitungslänge in den Stegquerschnitt könnte der Grund dafür sein.

Stelle A:

	IPE 300	HEA 1000	Profil 1200
System S1	80 %	75 %	47 %
System S2-1KE	80 %	75 %	47 %
System S2-2KE	122 % <sup>1)</sup>	-	-
System S2-3KE	103 % <sup>1)</sup>	75 %	47 %

Tabelle 4: Ergebnisse  $P_{Bem}/P_{FEA}$  in [%] – Annäherung des Bemessungsvorschlages [1] an der Stelle A  
(<sup>1)</sup>Schubversagen in der FE-Berechnung)

Stelle B:

	IPE 300	HEA 1000	Profil 1200
System S1	91 %	84 %	55 %
System S2-1KE	91 %	85 %	55 %
System S2-2KE	130 % <sup>1)</sup>	-	-
System S2-3KE	102 % <sup>1)</sup>	87 %	55 %

Tabelle 5: Ergebnisse  $P_{Bem}/P_{FEA}$  in [%] – Annäherung des Bemessungsvorschlages [1] an der Stelle B  
(<sup>1)</sup>Schubversagen in der FE-Berechnung)

Für die Systeme S2-2KE und S2-3KE unterschreiten die FE-Traglasten den Bemessungsvorschlag [1] an der Stelle A und der Stelle B. Dies ist aber die Folge von globalem Schubversagen des Trägers und nicht von lokalem Versagen im Bereich der Krafteinleitung. Ein Nachweis auf Schub ist für eine statische Bemessung ohnehin erforderlich. Dadurch ist die Begrenzung mit großer Querkraftinteraktion bereits indirekt gegeben. Eine Reduzierung des Bemessungsvorschlages [1] ist somit nicht erforderlich.

Stelle C:

	IPE 300	HEA 1000	Profil 1200
System S1	Ja	Ja	Ja
System S2-1KE	Ja	Ja	Nein
System S2-2KE	Nein	-	-
System S2-3KE	Nein	Nein	Nein

*Tabelle 6: Erreichen des plastischen Momentes in der FE-Berechnung*

Bei Stelle C wird das vollplastische Moment nicht in allen Fällen erreicht, siehe Tabelle 6. Die Kombination aus Schub- und Momenteneinwirkung mit Vertikaldruck infolge P unterschreitet die Tragfähigkeit P aus dem Bemessungsvorschlag [1].

## 6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Allgemeinen passt sich der Bemessungsvorschlag [1] zur Bestimmung der lokalen Tragfähigkeit für  $P = F_z$  den numerischen Berechnungen für Walzprofile gut an. Im Bereich reiner Querdruckbeanspruchung ( $M$  und  $V$  gering) ist für gedrungene Walzprofile, auch ohne lokale Beulabminderung, noch Reserve vorhanden. Vor allem bei schlanken Walzprofilen ergibt sich, durch den sehr konservativen enthaltenen Beulabminderungsbeiwert, noch genügend Reserve. Für geschweißte Profile ist die Bestimmung der Lasteinleitungslänge sehr konservativ gehandhabt, sodass der Bemessungsvorschlag sehr konservative Ergebnisse liefert.

Der Bemessungsvorschlag [1] enthält einen Abminderungsfaktor für zusätzliche Schubbeanspruchung. Dieser Abminderungsfaktor soll die maximale Traglast für  $P = F_z$  reduzieren. Wie die Ergebnisse zeigen, ist diese Abminderung jedoch nicht erforderlich. In all den dargestellten Diagrammen für die Ergebnisse des Bemessungsvorschlages [1] wurde dieser Abminderungsfaktor noch nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse der numerischen Berechnung liegen trotzdem weit darüber. Eine Begrenzung der Momentenausnutzung bei zusätzlicher Schubbeanspruchung ist angeraten.

Die durchgeführten Berechnungen haben auch gezeigt, dass die gewählten Spannweiten großen Einfluss auf die Traglastergebnisse haben können. Wurde ein System mit praxisüblichen Spannweiten im Hochbau gewählt, kam es zuerst vermehrt zu globalem Versagen. Dieses globale Systemversagen resultiert aus Biegedrillknickgefährdung und demzufolge Überschreitung der Momenten Tragfähigkeit, noch ohne Einzellasten  $P$ . Die Systemlänge musste auf praxisunübliche Längen reduziert werden oder der Träger musste durch spezielle Randbedingungen gehalten werden, um das gewünschte lokale Versagen im Bereich der vertikalen Krafteinleitung zu erzwingen. Da Stabilitätsnachweise, Querschnittsnachweise und Schubnachweise standardmäßig bei einer statischen Bemessung durchgeführt werden müssen, kann die Interaktion mit lokaler Einzellast  $P = F_z$  entfallen.

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] *Unterweger H., Taras A.: „Steifenlose Krafteinleitung bei Biegeträgern – Vorschlag einer vereinfachten Eurocode-konformen Nachweisführung“, in: Stahlbau 84, Ernst & Sohn, 06/2015*
- [2] *ÖNORM EN 1993-1-1: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 15.10.2014*
- [3] *ÖNORM EN 1993-1-5: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 15.07.2017*
- [4] *ÖNORM EN 1993-1-8: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 01.03.2012*
- [5] *ÖNORM EN 1993-6: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 6: Kranbahnen, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 15.08.2010*
- [6] *DIN 18800-1: Stahlbauten – Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Deutsches Institut für Normung, 2008*
- [7] *Unterweger H.: Stahlbau Skriptum zur Lehrveranstaltung „Stahlbau“, Institut für Stahlbau, TU Graz, 2014*
- [8] *Dessault Systemes Simulia Corp., Softwarepaket Abaqus Version 6.14-5, 2015*
- [9] *RuckZuck 6.0, Studentenversion*
- [10] *Dlubal, RFEM 5 Studentenversion*



## 8. ANHANG

### ANHANGSVERZEICHNIS

#### ANHANG A

A.	Normenvergleich.....	1
A.1	Vergleich der effektiven Vertikalspannungen.....	1
A.2	Vergleich der Tragwiderstandskraft.....	4

#### ANHANG B

B.	Finite Elemente Berechnungen.....	1
B.1	IPE 300.....	1
B.1.1	Graphische Darstellung.....	1
B.1.2	Tabellarische Eingabewerte.....	8
B.2	HEA 1000.....	11
B.2.1	Graphische Darstellung.....	11
B.2.2	Tabellarische Eingabewerte.....	18
B.3	Profil 1200.....	20
B.3.1	Graphische Darstellung.....	20
B.3.2	Tabellarische Eingabewerte.....	27

## A. NORMENVERGLEICH

### A.1 VERGLEICH DER EFFEKTIVEN VERTIKALSPANNUNGEN

#### Tabellarische Eingabe- und Ergebniswerte

Auf den folgenden drei Seiten werden die Ergebnisse des Vergleiches der effektiven Vertikalspannungen für die Walzprofilserien IPE, HEA und HEB dargestellt. Die effektiven Vertikalspannungen wurden nach DIN 18800-1 [6] und Eurocode 3-6 „Kranbahnen“ [5] berechnet. Ebenso ist das nach den beiden Normen berechnete Verhältnis der Vertikalspannungen angeführt, sowie das Verhältnis von Steghöhe zu Stegdicke.

In Tabelle A-1 sind die effektiven Vertikalspannungen nach DIN 18800-1 [6] und Eurocode 3-6 „Kranbahnen“ [5] der IPE-Walzprofilserie dargestellt.

IPE							
Profil	h <sub>Profil</sub> mm	DIN 18800-1 [6]		EC3-6 [5]		EC3-6 / DIN- 18800	h <sub>w</sub> /t <sub>w</sub>
		l <sub>y</sub> -DIN mm	σ <sub>z,eff,DIN</sub> N/mm <sup>2</sup>	l <sub>y</sub> -EC3-6 mm	σ <sub>z,eff,EC3-6</sub> N/mm <sup>2</sup>		
100	100	94	260,86	33	734,07	2,81	18,2
120	120	97	235,52	36	634,29	2,69	21,2
140	140	100	213,84	38	553,52	2,59	23,9
160	160	112	178,57	45	447,54	2,51	25,4
180	180	115	164,07	47	398,92	2,43	27,5
200	200	133	134,77	56	321,53	2,39	28,4
220	220	136	124,63	59	289,08	2,32	30,1
240	240	154	104,73	67	239,47	2,29	30,7
270	270	156	97,13	70	217,70	2,24	33,3
300	300	159	88,86	72	195,64	2,20	35,0
330	330	178	75,12	81	164,05	2,18	36,1
360	360	184	68,12	86	145,46	2,14	37,3
400	400	203	57,42	95	122,64	2,14	38,5
450	450	208	51,15	98	108,05	2,11	40,3
500	500	215	45,60	103	94,96	2,08	41,8
550	550	236	38,17	113	79,68	2,09	42,1
600	600	245	34,01	119	69,96	2,06	42,8

Tabelle A-1: effektive Vertikalspannungen der IPE-Profile

In Tabelle A-2 sind die effektiven Vertikalspannungen nach DIN 18800-1 [6] und Eurocode 3-6 „Kranbahnen“ [5] der HEA-Walzprofilserie dargestellt.

HEA							
Profil	h <sub>Profil</sub> mm	DIN 18800-1 [6]		EC3-6 [5]		EC3-6/ DIN- 18800	h <sub>w</sub> /t <sub>w</sub>
		l <sub>y</sub> -DIN mm	σ <sub>z,eff,DIN</sub> N/mm <sup>2</sup>	l <sub>y</sub> -EC3-6 mm	σ <sub>z,eff,EC3-6</sub> N/mm <sup>2</sup>		
100	96	130	153,85	55	364,79	2,37	11,2
120	114	130	153,85	57	352,37	2,29	14,8
140	133	133	137,22	59	305,60	2,23	16,7
160	152	150	111,11	68	244,49	2,20	17,3
180	171	153	109,29	72	231,79	2,12	20,3
200	190	170	90,50	80	191,15	2,11	20,6
220	210	175	81,63	85	167,52	2,05	21,7
240	230	195	68,38	96	138,77	2,03	21,9
260	250	213	62,75	106	125,95	2,01	23,6
280	270	215	58,14	108	115,35	1,98	24,5
300	290	235	50,06	119	98,70	1,97	24,5
320	310	243	45,82	125	89,02	1,94	25,0
340	330	248	42,53	128	82,21	1,93	25,6
360	350	253	39,60	131	76,22	1,92	26,1
400	390	260	34,97	135	67,25	1,92	27,1
450	440	270	32,21	142	61,06	1,90	29,9
500	490	280	29,76	149	55,75	1,87	32,5
550	540	285	28,07	152	52,54	1,87	35,0
600	590	290	26,53	155	49,62	1,87	37,4
650	640	295	25,11	158	46,95	1,87	39,6
700	690	300	22,99	159	43,31	1,88	40,1
800	790	320	20,83	168	39,71	1,91	44,9
900	890	330	18,94	173	36,10	1,91	48,1
1000	990	335	18,09	176	34,49	1,91	52,6

Tabelle A-2: effektive Vertikalspannungen der HEA-Profile

In Tabelle A-3 sind die effektiven Vertikalspannungen nach DIN 18800-1 [6] und Eurocode 3-6 „Kranbahnen“ [5] der HEB-Walzprofilserie dargestellt.

HEB							
Profil	h <sub>Profil</sub> mm	DIN 18800-1 [6]		EC3-6 [5]		EC3-6 / DIN- 18800	h <sub>w</sub> /t <sub>w</sub>
		l <sub>y</sub> -DIN mm	σ <sub>z,eff,DIN</sub> N/mm <sup>2</sup>	l <sub>y</sub> -EC3-6 mm	σ <sub>z,eff,EC3-6</sub> N/mm <sup>2</sup>		
100	100	140	119,05	60	276,57	2,32	9,3
120	120	145	106,10	65	235,71	2,22	11,4
140	140	150	95,24	70	203,39	2,14	13,1
160	160	170	73,53	80	156,07	2,12	13,0
180	180	175	67,23	85	138,43	2,06	14,4
200	200	195	56,98	96	115,90	2,03	14,9
220	220	200	52,63	101	104,49	1,99	16,0
240	240	220	45,45	112	89,60	1,97	16,4
260	260	238	42,11	122	82,24	1,95	17,7
280	280	240	39,68	124	76,59	1,93	18,7
300	300	260	34,97	135	67,25	1,92	18,9
320	320	268	32,51	140	61,98	1,91	19,6
340	340	273	30,58	143	58,18	1,90	20,3
360	360	278	28,83	146	54,75	1,90	20,9
400	400	285	25,99	150	49,45	1,90	22,1
450	450	295	24,21	157	45,64	1,88	24,6
500	500	305	22,61	163	42,28	1,87	26,9
550	550	310	21,51	166	40,22	1,87	29,2
600	600	315	20,48	168	38,32	1,87	31,4
650	650	320	19,53	171	36,57	1,87	33,4
700	700	325	18,10	172	34,15	1,89	34,2
800	800	345	16,56	181	31,61	1,91	38,5
900	900	355	15,23	186	29,10	1,91	41,6
1000	1000	360	14,62	188	27,96	1,91	45,7

Tabelle A-3: effektive Vertikalspannungen der HEB-Profile

## A.2 VERGLEICH DER TRAGWIDERSTANDSKRAFT

Verglichen wurden die Vorgehensweisen nach DIN 18800-1 [6], EN 1993-1-8 [4], EN 1993-1-5 [3] und dem Bemessungsvorschlag [1].

### Tabellarische Eingabe- und Ergebniswerte

In den folgenden drei Tabellen A-4 bis A-6 sind die Berechnungswerte für die Walzprofilserien IPE, HEA und HEB tabellarisch aufgelistet. Diese Werte sind geometrisch bedingt. Sie dienen als Zwischenergebnisse für die Berechnung der Tragwiderstandskraft und deren Abminderungsbeiwerte. Rot markierte Werte stellen das Überschreiten eines Grenzwertes dar, ab dem ein Abminderungsbeiwert greifend wird.

Ab einer Profilhöhe von 160 mm wird das Verhältnis  $h_w/t_w$  (Grenz) zu  $h_w/t_w$  bei IPE Walzprofilen überschritten.

$$\frac{h_w}{t_w \text{ Grenz}} = 23,1 * \varepsilon * \sqrt{\frac{h_w/l_y}{F_{z,Ed}/F_{z,Rd}}}$$

$$\text{mit } \varepsilon = \sqrt{235/f_y} * \frac{F_{z,Ed}}{F_{z,Rd}} = 1,0$$

$\lambda_p$  erreicht bei dieser Profilhöhe ebenso den Grenzwert von 0,72. Dies bedeutet, dass ab einer Profilhöhe von 160 mm der Beulabminderungsbeiwert  $p$  anzusetzen ist.

Für die HEA Walzprofilserie gilt das gleiche ab einer Profilhöhe von 190 mm und für die HEB Walzprofilserie ab einer Profilhöhe von 500 mm.

PROFILWERTE										DIN-18800	1993-1-8	FÜR EN 1993-1-5						Bemessungsvorschlag			
h	b	t <sub>w</sub>	t <sub>f</sub>	r	h - 2c	A	A <sub>vc</sub>	J <sub>y</sub>	V <sub>Rd</sub>	h/t <sub>w</sub>	λ <sub>p</sub>	m1	m2	λF	F <sub>cr</sub>	kf	a	λ <sub>p</sub>	h <sub>w</sub> /t <sub>w</sub> ) <sub>Grenz</sub>	h <sub>w</sub> /t <sub>w</sub>	
mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	kN	<=60					N		mm	>0,72	(h <sub>w</sub> /t <sub>w</sub> ) <sub>Grenz</sub>	< (h <sub>w</sub> /t <sub>w</sub> )	
IPE																					
100	100	55	4,1	5,7	7	74,6	10,32	508	171	69,0	24	0,635	13,4	0,0	0,277	1.047.673	6,0	100.000	0,635	20,63	18,20
120	120	64	4,4	6,3	7	93,4	13,21	631	318	85,6	27	0,673	14,5	0,0	0,301	1.034.247	6,0	100.000	0,673	22,73	21,23
140	140	73	4,7	6,9	7	112,2	16,43	764	541	103,7	30	0,701	15,5	0,0	0,321	1.049.335	6,0	100.000	0,701	24,53	23,87
160	160	82	5,0	7,4	9	127,2	20,09	966	869	131,0	32	0,744	16,4	0,0	0,332	1.114.387	6,0	100.000	0,744	24,62	25,44
180	180	91	5,3	8,0	9	146,0	23,95	1125	1317	152,7	34	0,762	17,2	0,0	0,348	1.156.347	6,0	100.000	0,762	26,03	27,55
200	200	100	5,6	8,5	12	159,0	28,48	1400	1943	189,9	36	0,808	17,9	0,0	0,353	1.252.508	6,0	100.000	0,808	25,30	28,39
220	220	110	5,9	9,2	12	177,6	33,37	1588	2772	215,5	37	0,821	18,6	0,0	0,368	1.311.374	6,0	100.000	0,821	26,40	30,10
240	240	120	6,2	9,8	15	190,4	39,12	1914	3892	259,7	39	0,861	19,4	0,0	0,373	1.419.455	6,0	100.000	0,861	25,69	30,71
270	270	135	6,6	10,2	15	219,6	45,95	2214	5790	300,4	41	0,874	20,5	0,0	0,386	1.484.613	6,0	100.000	0,874	27,41	33,27
300	300	150	7,1	10,7	15	248,6	53,81	2568	8356	348,4	42	0,872	21,1	0,0	0,391	1.632.630	6,0	100.000	0,872	28,93	35,01
330	330	160	7,5	11,5	18	271,0	62,61	3081	11767	418,0	44	0,912	21,3	0,0	0,399	1.765.341	6,0	100.000	0,912	28,54	36,13
360	360	170	8,0	12,7	18	298,6	72,73	3514	16266	476,7	45	0,912	21,3	0,0	0,408	1.944.440	6,0	100.000	0,912	29,47	37,33
400	400	180	8,6	13,5	21	331,0	84,46	4269	23128	579,3	47	0,939	20,9	0,0	0,409	2.179.124	6,0	100.000	0,939	29,53	38,49
450	450	190	9,4	14,6	21	378,8	98,82	5085	33743	689,9	48	0,931	20,2	0,0	0,411	2.486.501	6,0	100.000	0,931	31,17	40,30
500	500	200	10,2	16,0	21	426,0	115,5	5987	48199	812,3	49	0,925	19,6	0,0	0,416	2.824.923	6,0	100.000	0,925	32,52	41,76
550	550	210	11,1	17,2	24	467,6	134,4	7234	67116	981,5	50	0,933	18,9	0,0	0,410	3.316.734	6,0	100.000	0,933	32,52	42,13
600	600	220	12,0	19,0	24	514,0	156,0	8378	92083	1136,8	50	0,922	18,3	0,0	0,413	3.812.392	6,0	100.000	0,922	33,46	42,83

Tabelle A-4: Berechnungswerte IPE-Profile

PROFILWERTE										DIN-18800	1993-1-8	FÜR EN 1993-1-5						Bemessungsvorschlag			
h	b	t <sub>w</sub>	t <sub>f</sub>	r	h - 2c	A	A <sub>vc</sub>	J <sub>y</sub>	V <sub>Rd</sub>	h/t <sub>w</sub>	λ <sub>p</sub>	m1	m2	λF	F <sub>cr</sub>	kf	a	λ <sub>p</sub>	h <sub>w</sub> /t <sub>w</sub> <sub>Grenz</sub>	h <sub>w</sub> /t <sub>w</sub>	
mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	kN	≤60					N		mm	>0,72	(h <sub>w</sub> /t <sub>w</sub> ) <sub>Grenz</sub> < (h <sub>w</sub> /t <sub>w</sub> )		
Steg	Gurt																				
<b>HEA</b>																					
100	96	100	5,0	8,0	12	56	21,24	756	349	102,5	19	0,532	20,0	0,0	0,234	2.531.250	6,0	100.000	0,532	15,16	11,20
120	114	120	5,0	8,0	12	74	25,34	846	606	114,7	23	0,612	24,0	0,0	0,276	1.915.541	6,0	100.000	0,612	17,43	14,80
140	133	140	5,5	8,5	12	92	31,42	1012	1033	137,4	24	0,626	25,5	0,0	0,289	2.050.753	6,0	100.000	0,626	19,25	16,73
160	152	160	6,0	9,0	15	104	38,77	1321	1673	179,2	25	0,649	26,7	0,0	0,290	2.355.232	6,0	100.000	0,649	19,23	17,33
180	171	180	6,0	9,5	15	122	45,25	1447	2510	196,3	29	0,709	30,0	0,0	0,328	2.007.739	6,0	100.000	0,709	20,66	20,33
200	190	200	6,5	10,0	18	134	53,83	1808	3692	245,3	29	0,724	30,8	0,0	0,325	2.324.067	6,0	100.000	0,724	20,51	20,62
220	210	220	7,0	11,0	18	152	64,34	2067	5410	280,5	30	0,726	31,4	0,0	0,336	2.558.962	6,0	100.000	0,726	21,53	21,71
240	230	240	7,5	12,0	21	164	76,84	2518	7763	341,6	31	0,743	32,0	0,0	0,339	2.917.114	6,0	100.000	0,743	21,18	21,87
260	250	260	7,5	12,5	24	177	86,82	2876	10455	390,2	33	0,806	34,7	0,0	0,363	2.702.863	6,0	100.000	0,806	21,08	23,60
280	270	280	8,0	13,0	24	196	97,26	3174	13673	430,7	34	0,800	35,0	0,0	0,365	2.962.290	6,0	100.000	0,800	22,06	24,50
300	290	300	8,5	14,0	27	208	112,5	3728	18263	505,8	34	0,811	35,3	0,0	0,366	3.348.167	6,0	100.000	0,811	21,73	24,47
320	310	300	9,0	15,5	27	225	124,4	4113	22929	558,1	34	0,809	33,3	0,0	0,372	3.674.166	6,0	100.000	0,809	22,25	25,00
340	330	300	9,5	16,5	27	243	133,5	4495	27693	609,9	35	0,805	31,6	0,0	0,372	4.001.091	6,0	100.000	0,805	22,89	25,58
360	350	300	10,0	17,5	27	261	142,8	4896	33090	664,2	35	0,800	30,0	0,0	0,373	4.344.837	6,0	100.000	0,800	23,49	26,10
400	390	300	11,0	19,0	27	298	159,0	5733	45069	777,8	35	0,789	27,3	0,0	0,369	5.064.961	6,0	100.000	0,789	24,73	27,09
450	440	300	11,5	21,0	27	344	178,0	6578	63722	892,5	38	0,826	26,1	0,0	0,393	5.013.602	6,0	100.000	0,826	26,07	29,91
500	490	300	12,0	23,0	27	390	197,5	7472	86975	1013,8	41	0,859	25,0	0,0	0,414	5.024.518	6,0	100.000	0,859	27,26	32,50
550	540	300	12,5	24,0	27	438	211,8	8372	111932	1135,9	43	0,881	24,0	0,0	0,427	5.056.753	6,0	100.000	0,881	28,64	35,04
600	590	300	13,0	25,0	27	486	226,5	9321	141208	1264,6	45	0,900	23,1	0,0	0,437	5.126.374	6,0	100.000	0,900	29,90	37,38
650	640	300	13,5	26,0	27	534	241,6	10319	175178	1400,0	47	0,917	22,2	0,0	0,446	5.224.891	6,0	100.000	0,917	31,08	39,56
700	690	300	14,5	27,0	27	582	260,5	11697	215301	1587,1	48	0,898	20,7	0,0	0,435	5.940.171	6,0	100.000	0,898	32,17	40,14
800	790	300	15,0	28,0	30	674	285,8	13883	303443	1883,5	53	0,965	20,0	0,0	0,457	5.678.498	6,0	100.000	0,965	33,52	44,93
900	890	300	16,0	30,0	30	770	320,5	16333	422075	2216,0	56	0,982	18,8	0,0	0,467	6.032.410	6,0	100.000	0,982	35,29	48,13
1000	990	300	16,5	31,0	30	868	346,8	18456	553846	2504,1	60	1,019	18,2	0,0	0,485	5.868.891	6,0	100.000	1,019	37,18	52,61

Tabelle A-5: Berechnungswerte HEA-Profile

PROFILWERTE										DIN-18800	1993-1-8	FÜR EN 1993-1-5						Bemessungsvorschlag			
h	b	t <sub>w</sub>	t <sub>r</sub>	r	h - 2c	A	A <sub>VC</sub>	J <sub>y</sub>	V <sub>Rd</sub>	h/t <sub>w</sub>	λ <sub>p</sub>	m1	m2	λF	F <sub>cr</sub>	kf	a	λ <sub>p</sub>	h <sub>w</sub> /t <sub>w</sub> <sub>Gren</sub>	h <sub>w</sub> /t <sub>w</sub>	
mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	kN	≤60					N		mm		(h <sub>w</sub> /t <sub>w</sub> ) <sub>Grenz</sub>	(h <sub>w</sub> /t <sub>w</sub> )	
		Steg	Gurt			= h <sub>w</sub>										Annahme a>>		>0,72	(h <sub>w</sub> /t <sub>w</sub> ) <sub>Grenz</sub>	< (h <sub>w</sub> /t <sub>w</sub> )	
HEB																					
100	100	100	6,0	10,0	12	56	26,04	904	450	122,6	17	0,460	16,7	0,0	0,206	4.374.000	6,0	100.000	0,460	14,61	9,33
120	120	120	6,5	11,0	12	74	34,01	1096	864	148,7	18	0,497	18,5	0,0	0,231	4.208.443	6,0	100.000	0,497	16,50	11,38
140	140	140	7,0	12,0	12	92	42,96	1308	1509	177,4	20	0,523	20,0	0,0	0,251	4.227.849	6,0	100.000	0,523	18,09	13,14
160	160	160	8,0	13,0	15	104	54,25	1759	2492	238,7	20	0,518	20,0	0,0	0,241	5.582.771	6,0	100.000	0,518	18,07	13,00
180	180	180	8,5	14,0	15	122	65,25	2024	3831	274,6	21	0,536	21,2	0,0	0,256	5.708.345	6,0	100.000	0,536	19,29	14,35
200	200	200	9,0	15,0	18	134	78,08	2483	5696	336,9	22	0,560	22,2	0,0	0,263	6.169.302	6,0	100.000	0,560	19,15	14,89
220	220	220	9,5	16,0	18	152	91,04	2792	8091	378,8	23	0,572	23,2	0,0	0,275	6.396.474	6,0	100.000	0,572	20,14	16,00
240	240	240	10,0	17,0	21	164	105,99	3323	11259	450,8	24	0,592	24,0	0,0	0,280	6.914.640	6,0	100.000	0,592	19,94	16,40
260	260	260	10,0	17,5	24	177	118,44	3759	14919	510,1	26	0,639	26,0	0,0	0,299	6.406.786	6,0	100.000	0,639	19,94	17,70
280	280	280	10,5	18,0	24	196	131,36	4109	19270	557,6	27	0,644	26,7	0,0	0,305	6.697.696	6,0	100.000	0,644	20,88	18,67
300	300	300	11,0	19,0	27	208	149,1	4743	25166	643,5	27	0,659	27,3	0,0	0,308	7.256.520	6,0	100.000	0,659	20,66	18,91
320	320	300	11,5	20,5	27	225	161,3	5177	30824	702,4	28	0,665	26,1	0,0	0,314	7.665.223	6,0	100.000	0,665	21,19	19,57
340	340	300	12,0	21,5	27	243	170,9	5609	36656	761,0	28	0,669	25,0	0,0	0,317	8.064.016	6,0	100.000	0,669	21,81	20,25
360	360	300	12,5	22,5	27	261	180,6	6060	43193	822,1	29	0,671	24,0	0,0	0,320	8.486.011	6,0	100.000	0,671	22,40	20,88
400	400	300	13,5	24,0	27	298	197,8	6998	57680	949,4	30	0,673	22,2	0,0	0,321	9.362.663	6,0	100.000	0,673	23,62	22,07
450	450	300	14,0	26,0	27	344	218,0	7966	79888	1080,8	32	0,709	21,4	0,0	0,343	9.045.664	6,0	100.000	0,709	24,94	24,57
500	500	300	14,5	28,0	27	390	238,6	8982	107176	1218,6	34	0,742	20,7	0,0	0,362	8.864.508	6,0	100.000	0,742	26,12	26,90
550	550	300	15,0	29,0	27	438	254,1	10007	136691	1357,7	37	0,766	20,0	0,0	0,374	8.738.070	6,0	100.000	0,766	27,46	29,20
600	600	300	15,5	30,0	27	486	270,0	11081	171041	1503,4	39	0,787	19,4	0,0	0,385	8.689.110	6,0	100.000	0,787	28,69	31,35
650	650	300	16,0	31,0	27	534	286,3	12204	210616	1655,8	41	0,806	18,8	0,0	0,395	8.698.330	6,0	100.000	0,806	29,84	33,38
700	700	300	17,0	32,0	27	582	306,4	13710	256888	1860,1	41	0,798	17,6	0,0	0,389	9.572.861	6,0	100.000	0,798	30,91	34,24
800	800	300	17,5	33,0	30	674	334,2	16175	359083	2194,6	46	0,859	17,1	0,0	0,410	9.017.245	6,0	100.000	0,859	32,29	38,51
900	900	300	18,5	35,0	30	770	371,3	18875	494065	2560,9	49	0,881	16,2	0,0	0,422	9.324.941	6,0	100.000	0,881	34,02	41,62
1000	1000	300	19,0	36,0	30	868	400,0	21249	644748	2882,9	53	0,917	15,8	0,0	0,440	8.961.177	6,0	100.000	0,917	35,87	45,68

Tabelle A-6: Berechnungswerte HEB-Profile

In den folgenden drei Tabellen A-7 bis A-9 sind die Ergebniswerte der Tragwiderstandskraft für die IPE-, HEA- und HEB-Profilserien mit Ihren Abminderungsbeiwerten dargestellt. Im Folgenden gibt es keine Interaktion zwischen Moment und Querkraft, womit die Abminderungsbeiwerte  $k_w$  und  $\omega$  gleich 1,0 sind. Es wird lediglich der Beulabminderungsbeiwert  $\rho$  für die Berechnung der Tragwiderstandskraft berücksichtigt.

	DIN-18800			EN 1993-1-8				EN 1993-1-5			Bemessungsvorschlag					
	$l_y$ mm	k	$F_{z,Rd}$ kN	$l_y$ mm	$\omega$	$k_{wc}$	$\rho$	$F_{z,Rd}$ kN	$l_y$ mm	$\chi_F$ = $\rho$	$F_{z,Rd}$ kN	$l_y$ mm	$\omega$	$k_{wc}$	$\rho$	$F_{z,Rd}$ kN
<b>IPE</b>																
<b>100</b>	94	1,00	<b>90,09</b>	94	1,00	1,00	1,00	<b>90,09</b>	83	1,00	<b>80,12</b>	94	1,00	1,00	1,00	<b>90,09</b>
<b>120</b>	97	1,00	<b>99,78</b>	97	1,00	1,00	1,00	<b>99,78</b>	91	1,00	<b>93,74</b>	97	1,00	1,00	1,00	<b>99,78</b>
<b>140</b>	100	1,00	<b>109,90</b>	100	1,00	1,00	1,00	<b>109,90</b>	98	1,00	<b>108,45</b>	100	1,00	1,00	1,00	<b>109,90</b>
<b>160</b>	112	1,00	<b>131,60</b>	112	1,00	1,00	<b>0,98</b>	<b>129,30</b>	105	1,00	<b>123,06</b>	112	1,00	1,00	<b>0,98</b>	<b>129,30</b>
<b>180</b>	115	1,00	<b>143,23</b>	115	1,00	1,00	<b>0,97</b>	<b>138,61</b>	112	1,00	<b>139,87</b>	115	1,00	1,00	<b>0,97</b>	<b>138,61</b>
<b>200</b>	133	1,00	<b>174,37</b>	133	1,00	1,00	<b>0,93</b>	<b>162,38</b>	119	1,00	<b>156,39</b>	133	1,00	1,00	<b>0,93</b>	<b>162,38</b>
<b>220</b>	136	1,00	<b>188,56</b>	136	1,00	1,00	<b>0,92</b>	<b>173,69</b>	128	1,00	<b>177,26</b>	136	1,00	1,00	<b>0,92</b>	<b>173,69</b>
<b>240</b>	154	1,00	<b>224,38</b>	154	1,00	1,00	<b>0,89</b>	<b>200,05</b>	136	1,00	<b>197,90</b>	154	1,00	1,00	<b>0,89</b>	<b>200,05</b>
<b>270</b>	156	1,00	<b>241,96</b>	156	1,00	1,00	<b>0,88</b>	<b>213,43</b>	143	1,00	<b>221,27</b>	156	1,00	1,00	<b>0,88</b>	<b>213,43</b>
<b>300</b>	159	1,00	<b>264,46</b>	159	1,00	1,00	<b>0,88</b>	<b>233,78</b>	150	1,00	<b>249,88</b>	159	1,00	1,00	<b>0,88</b>	<b>233,78</b>
<b>330</b>	178	1,00	<b>312,84</b>	178	1,00	1,00	<b>0,86</b>	<b>267,86</b>	159	1,00	<b>280,65</b>	178	1,00	1,00	<b>0,86</b>	<b>267,86</b>
<b>360</b>	184	1,00	<b>344,98</b>	184	1,00	1,00	<b>0,86</b>	<b>295,26</b>	172	1,00	<b>324,28</b>	184	1,00	1,00	<b>0,86</b>	<b>295,26</b>
<b>400</b>	203	1,00	<b>409,25</b>	203	1,00	1,00	<b>0,84</b>	<b>343,12</b>	181	1,00	<b>364,84</b>	203	1,00	1,00	<b>0,84</b>	<b>343,12</b>
<b>450</b>	208	1,00	<b>459,47</b>	208	1,00	1,00	<b>0,84</b>	<b>387,51</b>	190	1,00	<b>420,77</b>	208	1,00	1,00	<b>0,84</b>	<b>387,51</b>
<b>500</b>	215	1,00	<b>515,36</b>	215	1,00	1,00	<b>0,85</b>	<b>436,66</b>	204	1,00	<b>488,27</b>	215	1,00	1,00	<b>0,85</b>	<b>436,66</b>
<b>550</b>	236	1,00	<b>615,61</b>	236	1,00	1,00	<b>0,84</b>	<b>518,35</b>	214	1,00	<b>558,29</b>	236	1,00	1,00	<b>0,84</b>	<b>518,35</b>
<b>600</b>	245	1,00	<b>690,90</b>	245	1,00	1,00	<b>0,85</b>	<b>586,81</b>	231	1,00	<b>650,59</b>	245	1,00	1,00	<b>0,85</b>	<b>586,81</b>

 Tabelle A-7: Tragwiderstandskraft der IPE-Profile für  $s=30$  mm,  $\alpha_v=0$ ,  $\alpha_w=0$

	DIN-18800			EN 1993-1-8				EN 1993-1-5			Bemessungsvorschlag						
	$I_y$	k	$F_{z,Rd}$	$I_y$	$\omega$	$k_{wc}$	$\rho$	$F_{z,Rd}$	$I_y$	$\chi_F$	$F_{z,Rd}$	$I_y$	$\omega$	$k_{wc}$	$\rho$	$F_{z,Rd}$	
	mm		kN	mm				kN	mm	= $\rho$	kN	mm				kN	
<b>HEA</b>																	
100	130	1,00	<b>152,75</b>	130	1,00	1,00	1,00	<b>152,75</b>	118	1,00	<b>138,13</b>	130	1,00	1,00	1,00	<b>152,75</b>	
120	130	1,00	<b>152,75</b>	130	1,00	1,00	1,00	<b>152,75</b>	124	1,00	<b>146,15</b>	130	1,00	1,00	1,00	<b>152,75</b>	
140	133	1,00	<b>171,26</b>	133	1,00	1,00	1,00	<b>171,26</b>	133	1,00	<b>171,60</b>	133	1,00	1,00	1,00	<b>171,26</b>	
160	150	1,00	<b>211,50</b>	150	1,00	1,00	1,00	<b>211,50</b>	141	1,00	<b>198,74</b>	150	1,00	1,00	1,00	<b>211,50</b>	
180	153	1,00	<b>215,03</b>	153	1,00	1,00	1,00	<b>215,03</b>	153	1,00	<b>215,82</b>	153	1,00	1,00	1,00	<b>215,03</b>	
200	170	1,00	<b>259,68</b>	170	1,00	1,00	1,00	<b>259,60</b>	161	1,00	<b>245,84</b>	170	1,00	1,00	1,00	<b>259,60</b>	
220	175	1,00	<b>287,88</b>	175	1,00	1,00	1,00	<b>287,19</b>	175	1,00	<b>288,43</b>	175	1,00	1,00	1,00	<b>287,19</b>	
240	195	1,00	<b>343,69</b>	195	1,00	1,00	0,98	<b>337,94</b>	190	1,00	<b>334,46</b>	195	1,00	1,00	0,98	<b>337,94</b>	
260	213	1,00	<b>374,53</b>	213	1,00	1,00	0,93	<b>349,31</b>	202	1,00	<b>356,37</b>	213	1,00	1,00	0,93	<b>349,31</b>	
280	215	1,00	<b>404,20</b>	215	1,00	1,00	0,94	<b>378,93</b>	210	1,00	<b>394,46</b>	215	1,00	1,00	0,94	<b>378,93</b>	
300	235	1,00	<b>469,41</b>	235	1,00	1,00	0,93	<b>436,09</b>	224	1,00	<b>448,13</b>	235	1,00	1,00	0,93	<b>436,09</b>	
320	243	1,00	<b>512,89</b>	243	1,00	1,00	0,93	<b>477,18</b>	240	1,00	<b>507,55</b>	243	1,00	1,00	0,93	<b>477,18</b>	
340	248	1,00	<b>552,54</b>	248	1,00	1,00	0,93	<b>515,93</b>	248	1,00	<b>554,65</b>	248	1,00	1,00	0,93	<b>515,93</b>	
360	253	1,00	<b>593,38</b>	253	1,00	1,00	0,94	<b>556,12</b>	257	1,00	<b>603,25</b>	253	1,00	1,00	0,94	<b>556,12</b>	
400	260	1,00	<b>672,10</b>	260	1,00	1,00	0,95	<b>635,94</b>	266	1,00	<b>688,77</b>	260	1,00	1,00	0,95	<b>635,94</b>	
450	270	1,00	<b>729,68</b>	270	1,00	1,00	0,92	<b>669,36</b>	287	1,00	<b>774,31</b>	270	1,00	1,00	0,92	<b>669,36</b>	
500	280	1,00	<b>789,60</b>	280	1,00	1,00	0,89	<b>705,44</b>	306	1,00	<b>862,92</b>	280	1,00	1,00	0,89	<b>705,44</b>	
550	285	1,00	<b>837,19</b>	285	1,00	1,00	0,88	<b>734,41</b>	313	1,00	<b>919,88</b>	285	1,00	1,00	0,88	<b>734,41</b>	
600	290	1,00	<b>885,95</b>	290	1,00	1,00	0,86	<b>765,42</b>	320	1,00	<b>978,19</b>	290	1,00	1,00	0,86	<b>765,42</b>	
650	295	1,00	<b>935,89</b>	295	1,00	1,00	0,85	<b>798,24</b>	327	1,00	<b>1037,82</b>	295	1,00	1,00	0,85	<b>798,24</b>	
700	300	1,00	<b>1022,25</b>	300	1,00	1,00	0,87	<b>884,51</b>	330	1,00	<b>1123,19</b>	300	1,00	1,00	0,87	<b>884,51</b>	
800	320	1,00	<b>1128,00</b>	320	1,00	1,00	0,82	<b>926,45</b>	336	1,00	<b>1185,95</b>	320	1,00	1,00	0,82	<b>926,45</b>	
900	330	1,00	<b>1240,80</b>	330	1,00	1,00	0,81	<b>1006,01</b>	350	1,00	<b>1315,28</b>	330	1,00	1,00	0,81	<b>1006,01</b>	
1000	335	1,00	<b>1298,96</b>	335	1,00	1,00	0,79	<b>1024,61</b>	356	1,00	<b>1381,82</b>	335	1,00	1,00	0,79	<b>1024,61</b>	

 Tabelle A-8: Tragwiderstandskraft der HEA-Profile für  $s=30$  mm,  $\alpha_v=0$ ,  $\alpha_w=0$

Tabelle A-9: Tragwiderstandskraft der HEB-Profile für  $s=30$  mm,  $\alpha_v=0$ ,  $\alpha_w=0$ 

	DIN-18800			EN 1993-1-8				EN 1993-1-5			Bemessungsvorschlag						
	$I_y$	$k$	$F_{z,Rd}$	$I_y$	$\omega$	$k_{wc}$	$\rho$	$F_{z,Rd}$	$I_y$	$\chi_F$	$F_{z,Rd}$	$I_y$	$\omega$	$k_{wc}$	$\rho$	$F_{z,Rd}$	
	mm		kN	mm				kN	mm	= $\rho$	kN	mm				kN	
<b>HEB</b>																	
100	140	1,00	<b>197,40</b>	140	1,00	1,00	1,00	<b>197,40</b>	132	1,00	<b>185,63</b>	140	1,00	1,00	1,00	<b>197,40</b>	
120	145	1,00	<b>221,49</b>	145	1,00	1,00	1,00	<b>221,49</b>	147	1,00	<b>223,82</b>	145	1,00	1,00	1,00	<b>221,49</b>	
140	150	1,00	<b>246,75</b>	150	1,00	1,00	1,00	<b>246,75</b>	161	1,00	<b>265,39</b>	150	1,00	1,00	1,00	<b>246,75</b>	
160	170	1,00	<b>319,60</b>	170	1,00	1,00	1,00	<b>319,60</b>	172	1,00	<b>323,88</b>	170	1,00	1,00	1,00	<b>319,60</b>	
180	175	1,00	<b>349,56</b>	175	1,00	1,00	1,00	<b>349,56</b>	187	1,00	<b>373,23</b>	175	1,00	1,00	1,00	<b>349,56</b>	
200	195	1,00	<b>412,43</b>	195	1,00	1,00	1,00	<b>412,43</b>	201	1,00	<b>426,01</b>	195	1,00	1,00	1,00	<b>412,43</b>	
220	200	1,00	<b>446,50</b>	200	1,00	1,00	1,00	<b>446,50</b>	216	1,00	<b>482,20</b>	200	1,00	1,00	1,00	<b>446,50</b>	
240	220	1,00	<b>517,00</b>	220	1,00	1,00	1,00	<b>517,00</b>	231	1,00	<b>541,83</b>	220	1,00	1,00	1,00	<b>517,00</b>	
260	238	1,00	<b>558,13</b>	238	1,00	1,00	1,00	<b>558,13</b>	243	1,00	<b>572,14</b>	238	1,00	1,00	1,00	<b>558,13</b>	
280	240	1,00	<b>592,20</b>	240	1,00	1,00	1,00	<b>592,20</b>	252	1,00	<b>621,57</b>	240	1,00	1,00	1,00	<b>592,20</b>	
300	260	1,00	<b>672,10</b>	260	1,00	1,00	1,00	<b>672,10</b>	266	1,00	<b>688,77</b>	260	1,00	1,00	1,00	<b>672,10</b>	
320	268	1,00	<b>722,92</b>	268	1,00	1,00	1,00	<b>722,92</b>	280	1,00	<b>757,81</b>	268	1,00	1,00	1,00	<b>722,92</b>	
340	273	1,00	<b>768,45</b>	273	1,00	1,00	1,00	<b>768,45</b>	288	1,00	<b>812,16</b>	273	1,00	1,00	1,00	<b>768,45</b>	
360	278	1,00	<b>815,16</b>	278	1,00	1,00	1,00	<b>815,16</b>	295	1,00	<b>867,90</b>	278	1,00	1,00	1,00	<b>815,16</b>	
400	285	1,00	<b>904,16</b>	285	1,00	1,00	1,00	<b>904,16</b>	304	1,00	<b>965,31</b>	285	1,00	1,00	1,00	<b>904,16</b>	
450	295	1,00	<b>970,55</b>	295	1,00	1,00	1,00	<b>970,55</b>	323	1,00	<b>1061,73</b>	295	1,00	1,00	1,00	<b>970,55</b>	
500	305	1,00	<b>1039,29</b>	305	1,00	1,00	<b>0,98</b>	<b>1023,49</b>	341	1,00	<b>1161,01</b>	305	1,00	1,00	<b>0,98</b>	<b>1023,49</b>	
550	310	1,00	<b>1092,75</b>	310	1,00	1,00	<b>0,96</b>	<b>1054,19</b>	347	1,00	<b>1224,53</b>	310	1,00	1,00	<b>0,96</b>	<b>1054,19</b>	
600	315	1,00	<b>1147,39</b>	315	1,00	1,00	<b>0,95</b>	<b>1087,41</b>	354	1,00	<b>1289,32</b>	315	1,00	1,00	<b>0,95</b>	<b>1087,41</b>	
650	320	1,00	<b>1203,20</b>	320	1,00	1,00	<b>0,93</b>	<b>1122,85</b>	360	1,00	<b>1355,36</b>	320	1,00	1,00	<b>0,93</b>	<b>1122,85</b>	
700	325	1,00	<b>1298,38</b>	325	1,00	1,00	<b>0,94</b>	<b>1219,65</b>	363	1,00	<b>1449,60</b>	325	1,00	1,00	<b>0,94</b>	<b>1219,65</b>	
800	345	1,00	<b>1418,81</b>	345	1,00	1,00	<b>0,89</b>	<b>1267,04</b>	369	1,00	<b>1518,61</b>	345	1,00	1,00	<b>0,89</b>	<b>1267,04</b>	
900	355	1,00	<b>1543,36</b>	355	1,00	1,00	<b>0,88</b>	<b>1354,02</b>	382	1,00	<b>1660,25</b>	355	1,00	1,00	<b>0,88</b>	<b>1354,02</b>	
1000	360	1,00	<b>1607,40</b>	360	1,00	1,00	<b>0,85</b>	<b>1370,29</b>	388	1,00	<b>1732,86</b>	360	1,00	1,00	<b>0,85</b>	<b>1370,29</b>	

In den nächsten drei Tabellen A-10 bis A-12 sind die Ergebniswerte der Tragwiderstandskraft mit ihren Abminderungsbeiwerten dargestellt. Im Folgenden wird von einer Interaktion zwischen Moment und Querkraft ausgegangen. Es werden die maximalen Abminderungsbeiwerte für  $k_w$  und  $\omega$  herangezogen. Diese werden unabhängig von der Profilhöhe angesetzt.

	DIN-18800			EN 1993-1-8				EN 1993-1-5			Bemessungsvorschlag					
	$l_y$	$k$	$F_{z,Rd}$	$l_y$	$\omega$	$k_{wc}$	$\rho$	$F_{z,Rd}$	$l_y$	$\chi_F$	$F_{z,Rd}$	$l_y$	$\omega$	$k_{wc}$	$\rho$	$F_{z,Rd}$
	mm		kN	mm				kN	mm	= $\rho$	kN	mm				kN
<b>IPE</b>																
<b>100</b>	94	1,00	<b>90,09</b>	94	0,84	0,70	1,00	<b>52,73</b>	83	1,00	<b>80,12</b>	94	0,84	0,70	1,00	<b>52,73</b>
<b>120</b>	97	1,00	<b>99,78</b>	97	0,84	0,70	1,00	<b>58,41</b>	91	1,00	<b>93,74</b>	97	0,84	0,70	1,00	<b>58,41</b>
<b>140</b>	100	1,00	<b>109,90</b>	100	0,84	0,70	1,00	<b>64,33</b>	98	1,00	<b>108,45</b>	100	0,84	0,70	1,00	<b>64,33</b>
<b>160</b>	112	1,00	<b>131,60</b>	112	0,84	0,70	0,98	<b>75,69</b>	105	1,00	<b>123,06</b>	112	0,84	0,70	0,98	<b>75,69</b>
<b>180</b>	115	1,00	<b>143,23</b>	115	0,84	0,70	0,97	<b>81,14</b>	112	1,00	<b>139,87</b>	115	0,84	0,70	0,97	<b>81,14</b>
<b>200</b>	133	1,00	<b>174,37</b>	133	0,84	0,70	0,93	<b>95,05</b>	119	1,00	<b>156,39</b>	133	0,84	0,70	0,93	<b>95,05</b>
<b>220</b>	136	1,00	<b>188,56</b>	136	0,84	0,70	0,92	<b>101,67</b>	128	1,00	<b>177,26</b>	136	0,84	0,70	0,92	<b>101,67</b>
<b>240</b>	154	1,00	<b>224,38</b>	154	0,84	0,70	0,89	<b>117,11</b>	136	1,00	<b>197,90</b>	154	0,84	0,70	0,89	<b>117,11</b>
<b>270</b>	156	1,00	<b>241,96</b>	156	0,84	0,70	0,88	<b>124,94</b>	143	1,00	<b>221,27</b>	156	0,84	0,70	0,88	<b>124,94</b>
<b>300</b>	159	1,00	<b>264,46</b>	159	0,84	0,70	0,88	<b>136,85</b>	150	1,00	<b>249,88</b>	159	0,84	0,70	0,88	<b>136,85</b>
<b>330</b>	178	1,00	<b>312,84</b>	178	0,84	0,70	0,86	<b>156,80</b>	159	1,00	<b>280,65</b>	178	0,84	0,70	0,86	<b>156,80</b>
<b>360</b>	184	1,00	<b>344,98</b>	184	0,84	0,70	0,86	<b>172,83</b>	172	1,00	<b>324,28</b>	184	0,84	0,70	0,86	<b>172,83</b>
<b>400</b>	203	1,00	<b>409,25</b>	203	0,84	0,70	0,84	<b>200,85</b>	181	1,00	<b>364,84</b>	203	0,84	0,70	0,84	<b>200,85</b>
<b>450</b>	208	1,00	<b>459,47</b>	208	0,84	0,70	0,84	<b>226,83</b>	190	1,00	<b>420,77</b>	208	0,84	0,70	0,84	<b>226,83</b>
<b>500</b>	215	1,00	<b>515,36</b>	215	0,84	0,70	0,85	<b>255,61</b>	204	1,00	<b>488,27</b>	215	0,84	0,70	0,85	<b>255,61</b>
<b>550</b>	236	1,00	<b>615,61</b>	236	0,84	0,70	0,84	<b>303,43</b>	214	1,00	<b>558,29</b>	236	0,84	0,70	0,84	<b>303,43</b>
<b>600</b>	245	1,00	<b>690,90</b>	245	0,84	0,70	0,85	<b>343,50</b>	231	1,00	<b>650,59</b>	245	0,84	0,70	0,85	<b>343,50</b>

 Tabelle A-10: Tragwiderstandskraft der IPE-Profile für  $s=30$  mm,  $\alpha_v=1$ ,  $\alpha_w=1$

Tabelle A-11: Tragwiderstandskraft der HEA-Profile für  $s=30$  mm,  $\alpha_v=1$ ,  $\alpha_w=1$ 

	DIN-18800			EN 1993-1-8					EN 1993-1-5			Bemessungsvorschlag					
	$l_y$	$k$	$F_{z,Rd}$	$l_y$	$\omega$	$k_{wc}$	$\rho$	$F_{z,Rd}$	$l_y$	$\chi_F$	$F_{z,Rd}$	$l_y$	$\omega$	$k_{wc}$	$\rho$	$F_{z,Rd}$	
	mm		kN	mm				kN	mm	= $\rho$	kN	mm				kN	
<b>HEA</b>																	
100	130	1,00	<b>152,75</b>	130	0,84	0,70	1,00	<b>89,42</b>	118	1,00	<b>138,13</b>	130	0,84	0,70	1,00	<b>89,42</b>	
120	130	1,00	<b>152,75</b>	130	0,84	0,70	1,00	<b>89,42</b>	124	1,00	<b>146,15</b>	130	0,84	0,70	1,00	<b>89,42</b>	
140	133	1,00	<b>171,26</b>	133	0,84	0,70	1,00	<b>100,25</b>	133	1,00	<b>171,60</b>	133	0,84	0,70	1,00	<b>100,25</b>	
160	150	1,00	<b>211,50</b>	150	0,84	0,70	1,00	<b>123,81</b>	141	1,00	<b>198,74</b>	150	0,84	0,70	1,00	<b>123,81</b>	
180	153	1,00	<b>215,03</b>	153	0,84	0,70	1,00	<b>125,87</b>	153	1,00	<b>215,82</b>	153	0,84	0,70	1,00	<b>125,87</b>	
200	170	1,00	<b>259,68</b>	170	0,84	0,70	1,00	<b>151,96</b>	161	1,00	<b>245,84</b>	170	0,84	0,70	1,00	<b>151,96</b>	
220	175	1,00	<b>287,88</b>	175	0,84	0,70	1,00	<b>168,11</b>	175	1,00	<b>288,43</b>	175	0,84	0,70	1,00	<b>168,11</b>	
240	195	1,00	<b>343,69</b>	195	0,84	0,70	0,98	<b>197,82</b>	190	1,00	<b>334,46</b>	195	0,84	0,70	0,98	<b>197,82</b>	
260	213	1,00	<b>374,53</b>	213	0,84	0,70	0,93	<b>204,48</b>	202	1,00	<b>356,37</b>	213	0,84	0,70	0,93	<b>204,48</b>	
280	215	1,00	<b>404,20</b>	215	0,84	0,70	0,94	<b>221,82</b>	210	1,00	<b>394,46</b>	215	0,84	0,70	0,94	<b>221,82</b>	
300	235	1,00	<b>469,41</b>	235	0,84	0,70	0,93	<b>255,27</b>	224	1,00	<b>448,13</b>	235	0,84	0,70	0,93	<b>255,27</b>	
320	243	1,00	<b>512,89</b>	243	0,84	0,70	0,93	<b>279,32</b>	240	1,00	<b>507,55</b>	243	0,84	0,70	0,93	<b>279,32</b>	
340	248	1,00	<b>552,54</b>	248	0,84	0,70	0,93	<b>302,01</b>	248	1,00	<b>554,65</b>	248	0,84	0,70	0,93	<b>302,01</b>	
360	253	1,00	<b>593,38</b>	253	0,84	0,70	0,94	<b>325,53</b>	257	1,00	<b>603,25</b>	253	0,84	0,70	0,94	<b>325,53</b>	
400	260	1,00	<b>672,10</b>	260	0,84	0,70	0,95	<b>372,26</b>	266	1,00	<b>688,77</b>	260	0,84	0,70	0,95	<b>372,26</b>	
450	270	1,00	<b>729,68</b>	270	0,84	0,70	0,92	<b>391,82</b>	287	1,00	<b>774,31</b>	270	0,84	0,70	0,92	<b>391,82</b>	
500	280	1,00	<b>789,60</b>	280	0,84	0,70	0,89	<b>412,94</b>	306	1,00	<b>862,92</b>	280	0,84	0,70	0,89	<b>412,94</b>	
550	285	1,00	<b>837,19</b>	285	0,84	0,70	0,88	<b>429,90</b>	313	1,00	<b>919,88</b>	285	0,84	0,70	0,88	<b>429,90</b>	
600	290	1,00	<b>885,95</b>	290	0,84	0,70	0,86	<b>448,05</b>	320	1,00	<b>978,19</b>	290	0,84	0,70	0,86	<b>448,05</b>	
650	295	1,00	<b>935,89</b>	295	0,84	0,70	0,85	<b>467,27</b>	327	1,00	<b>1037,82</b>	295	0,84	0,70	0,85	<b>467,27</b>	
700	300	1,00	<b>1022,25</b>	300	0,84	0,70	0,87	<b>517,77</b>	330	1,00	<b>1123,19</b>	300	0,84	0,70	0,87	<b>517,77</b>	
800	320	1,00	<b>1128,00</b>	320	0,84	0,70	0,82	<b>542,32</b>	336	1,00	<b>1185,95</b>	320	0,84	0,70	0,82	<b>542,32</b>	
900	330	1,00	<b>1240,80</b>	330	0,84	0,70	0,81	<b>588,89</b>	350	1,00	<b>1315,28</b>	330	0,84	0,70	0,81	<b>588,89</b>	
1000	335	1,00	<b>1298,96</b>	335	0,84	0,70	0,79	<b>599,78</b>	356	1,00	<b>1381,82</b>	335	0,84	0,70	0,79	<b>599,78</b>	

	DIN-18800			EN 1993-1-8				EN 1993-1-5			Bemessungsvorschlag					
	$l_y$	k	$F_{z,Rd}$	$l_y$	$\omega$	$k_{wc}$	$\rho$	$F_{z,Rd}$	$l_y$	$\chi_F$	$F_{z,Rd}$	$l_y$	$\omega$	$k_{wc}$	$\rho$	$F_{z,Rd}$
	mm		kN	mm				kN	mm	= $\rho$	kN	mm				kN
<b>HEB</b>																
100	140	1,00	<b>197,40</b>	140	0,84	0,70	1,00	<b>115,55</b>	132	1,00	<b>185,63</b>	140	0,84	0,70	1,00	<b>115,55</b>
120	145	1,00	<b>221,49</b>	145	0,84	0,70	1,00	<b>129,65</b>	147	1,00	<b>223,82</b>	145	0,84	0,70	1,00	<b>129,65</b>
140	150	1,00	<b>246,75</b>	150	0,84	0,70	1,00	<b>144,44</b>	161	1,00	<b>265,39</b>	150	0,84	0,70	1,00	<b>144,44</b>
160	170	1,00	<b>319,60</b>	170	0,84	0,70	1,00	<b>187,08</b>	172	1,00	<b>323,88</b>	170	0,84	0,70	1,00	<b>187,08</b>
180	175	1,00	<b>349,56</b>	175	0,84	0,70	1,00	<b>204,62</b>	187	1,00	<b>373,23</b>	175	0,84	0,70	1,00	<b>204,62</b>
200	195	1,00	<b>412,43</b>	195	0,84	0,70	1,00	<b>241,42</b>	201	1,00	<b>426,01</b>	195	0,84	0,70	1,00	<b>241,42</b>
220	200	1,00	<b>446,50</b>	200	0,84	0,70	1,00	<b>261,37</b>	216	1,00	<b>482,20</b>	200	0,84	0,70	1,00	<b>261,37</b>
240	220	1,00	<b>517,00</b>	220	0,84	0,70	1,00	<b>302,64</b>	231	1,00	<b>541,83</b>	220	0,84	0,70	1,00	<b>302,64</b>
260	238	1,00	<b>558,13</b>	238	0,84	0,70	1,00	<b>326,71</b>	243	1,00	<b>572,14</b>	238	0,84	0,70	1,00	<b>326,71</b>
280	240	1,00	<b>592,20</b>	240	0,84	0,70	1,00	<b>346,66</b>	252	1,00	<b>621,57</b>	240	0,84	0,70	1,00	<b>346,66</b>
300	260	1,00	<b>672,10</b>	260	0,84	0,70	1,00	<b>393,43</b>	266	1,00	<b>688,77</b>	260	0,84	0,70	1,00	<b>393,43</b>
320	268	1,00	<b>722,92</b>	268	0,84	0,70	1,00	<b>423,17</b>	280	1,00	<b>757,81</b>	268	0,84	0,70	1,00	<b>423,17</b>
340	273	1,00	<b>768,45</b>	273	0,84	0,70	1,00	<b>449,83</b>	288	1,00	<b>812,16</b>	273	0,84	0,70	1,00	<b>449,83</b>
360	278	1,00	<b>815,16</b>	278	0,84	0,70	1,00	<b>477,17</b>	295	1,00	<b>867,90</b>	278	0,84	0,70	1,00	<b>477,17</b>
400	285	1,00	<b>904,16</b>	285	0,84	0,70	1,00	<b>529,27</b>	304	1,00	<b>965,31</b>	285	0,84	0,70	1,00	<b>529,27</b>
450	295	1,00	<b>970,55</b>	295	0,84	0,70	1,00	<b>568,13</b>	323	1,00	<b>1061,73</b>	295	0,84	0,70	1,00	<b>568,13</b>
500	305	1,00	<b>1039,29</b>	305	0,84	0,70	0,98	<b>599,12</b>	341	1,00	<b>1161,01</b>	305	0,84	0,70	0,98	<b>599,12</b>
550	310	1,00	<b>1092,75</b>	310	0,84	0,70	0,96	<b>617,09</b>	347	1,00	<b>1224,53</b>	310	0,84	0,70	0,96	<b>617,09</b>
600	315	1,00	<b>1147,39</b>	315	0,84	0,70	0,95	<b>636,54</b>	354	1,00	<b>1289,32</b>	315	0,84	0,70	0,95	<b>636,54</b>
650	320	1,00	<b>1203,20</b>	320	0,84	0,70	0,93	<b>657,28</b>	360	1,00	<b>1355,36</b>	320	0,84	0,70	0,93	<b>657,28</b>
700	325	1,00	<b>1298,38</b>	325	0,84	0,70	0,94	<b>713,94</b>	363	1,00	<b>1449,60</b>	325	0,84	0,70	0,94	<b>713,94</b>
800	345	1,00	<b>1418,81</b>	345	0,84	0,70	0,89	<b>741,69</b>	369	1,00	<b>1518,61</b>	345	0,84	0,70	0,89	<b>741,69</b>
900	355	1,00	<b>1543,36</b>	355	0,84	0,70	0,88	<b>792,60</b>	382	1,00	<b>1660,25</b>	355	0,84	0,70	0,88	<b>792,60</b>
1000	360	1,00	<b>1607,40</b>	360	0,84	0,70	0,85	<b>802,12</b>	388	1,00	<b>1732,86</b>	360	0,84	0,70	0,85	<b>802,12</b>

 Tabelle A-12: Tragwiderstandskraft der HEB-Profile für  $s=30$  mm,  $\alpha_v=1$ ,  $\alpha_w=1$



## B. FINITE ELEMENTE BERECHNUNGEN

### B.1 IPE 300

#### B.1.1 GRAPHISCHE DARSTELLUNG

Wie bereits in Kapitel 5.2 beschrieben, finden sich hier für alle 4 Systeme des IPE 300 die graphischen Darstellungen inklusive Ergebniswerte aus der linearen Beulanalyse (LBA), der materiellen nichtlinearen Analyse (MNA) und der geometrischen und materiellen nichtlinearen imperfekten Analyse (GMNIA). Abbildung B-1 zeigt einen Überblick über die Lage der Graphiken der geometrischen und materiellen nichtlinearen imperfekten Analyse.

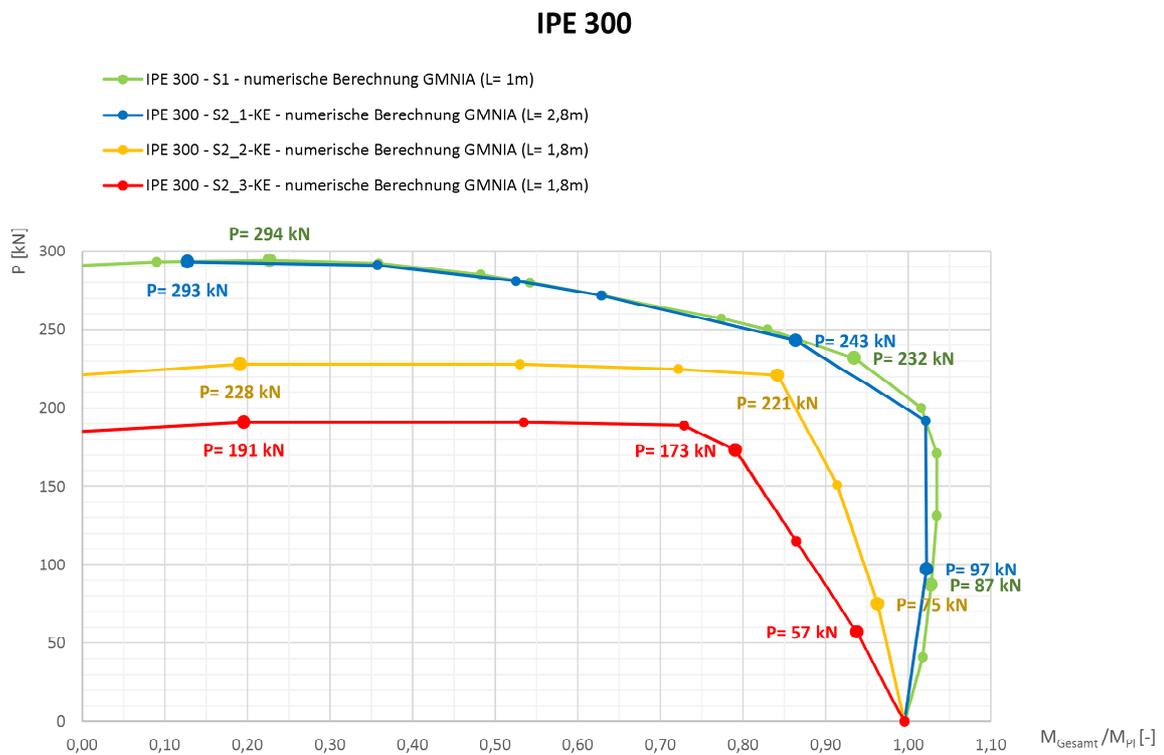


Abbildung B-1: Übersicht der im Detail dargestellten Berechnungspunkte des IPE 300

### B.1.1.1 SYSTEM S1:

#### Lineare Beulanalyse (LBA):

Die lineare Beulanalyse ergibt bei einer Systemlänge von 1 m als ersten Eigenwert eine kritische Beullast von 1775 kN. Die zugehörige Eigenform ist in Abbildung B-2 dargestellt.

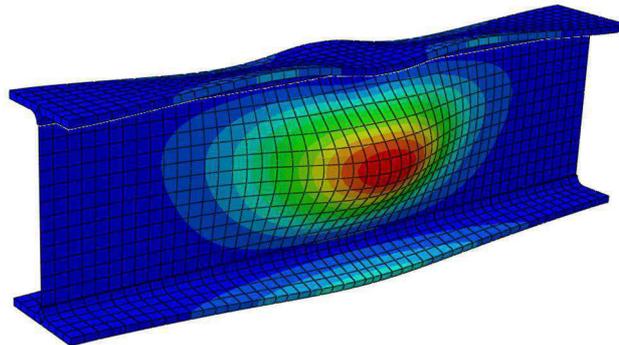


Abbildung B-2: LBA: System S1, Systemlänge=1 m

#### Materielle nichtlineare Analyse (MNA):

Die materielle nichtlineare Analyse ergibt ein plastisches Moment von 148 kNm, siehe Abbildung B-3.

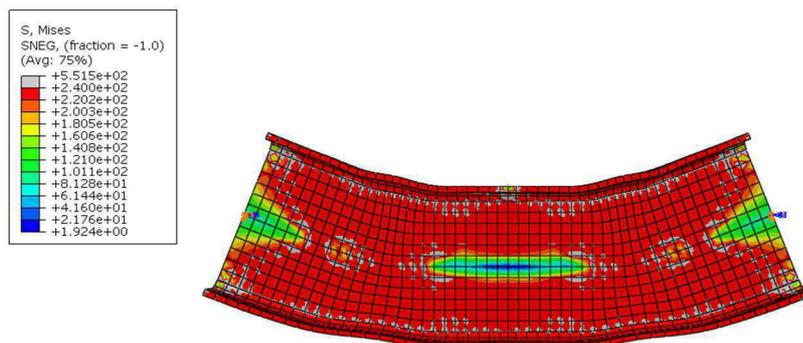


Abbildung B-3: MNA: System S1, Systemlänge=1 m

#### Geometrisch und materiell nichtlineare imperfekte Analyse (GMNIA):

Für die geometrisch und materiell nichtlineare imperfekte Analyse wird eine Imperfektion von 1,24 angesetzt. Die maximale, ohne Quersteifen einleitbare Last für das IPE 300 beträgt

294 kN. Drei Berechnungspunkte sind hier graphisch dargestellt. Die roten Bereiche in Abbildung B-4 stellen die Erreichung der Fließgrenze von  $f_y=235 \text{ N/mm}^2$  dar.

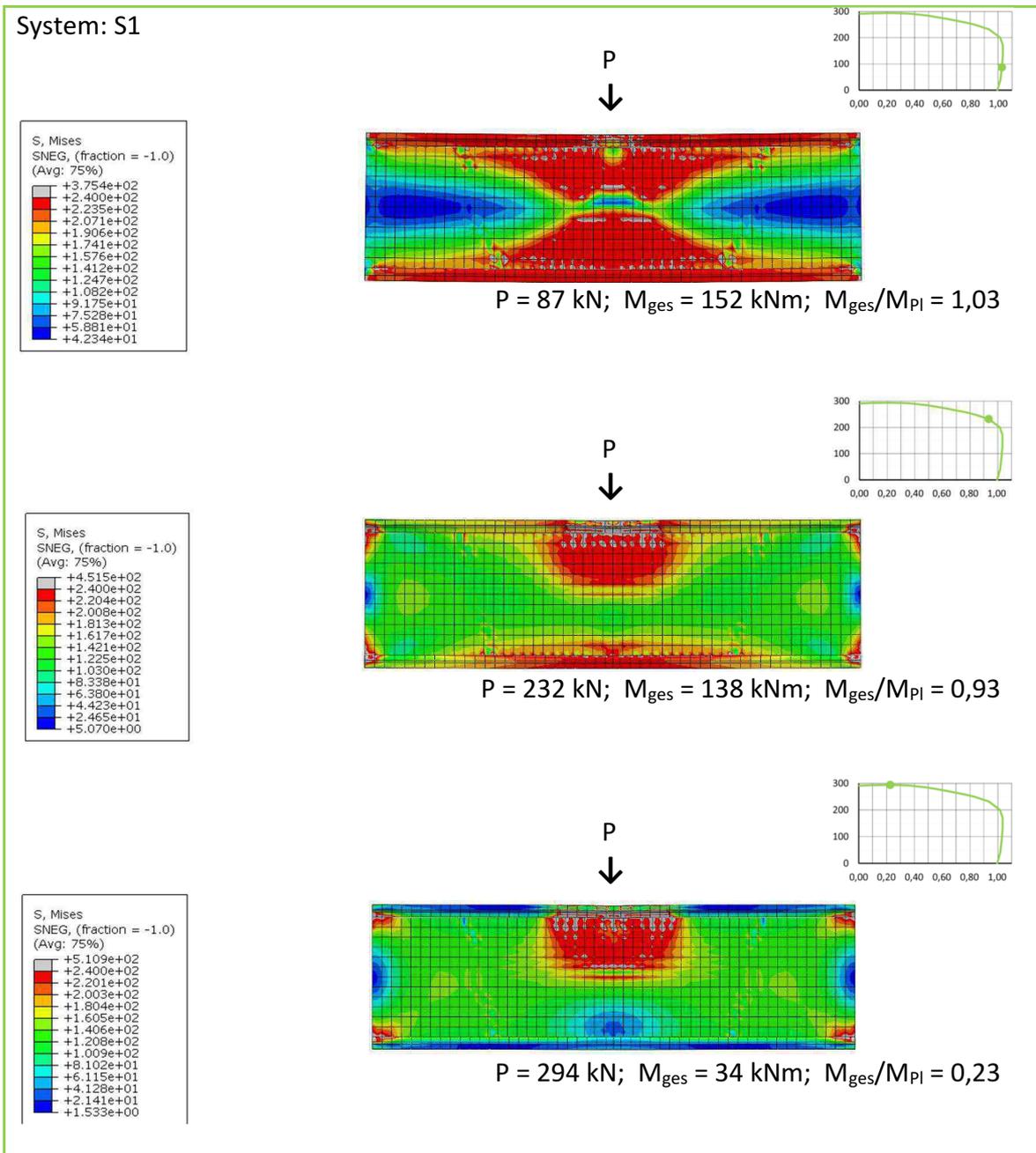


Abbildung B-4: GMNIA-IPE300: System S1, Systemlänge=1 m

### B.1.1.2 SYSTEM S2:

#### Lineare Beulanalyse (LBA):

Die lineare Beulanalyse ergibt bei einer Systemlänge von 1,8 m als ersten Eigenwert eine kritische Beullast von 1738 kN und bei einer Systemlänge von 2,8 m gleich 1667 kN. Die Eigenform für eine Systemlänge von 2,8 m ist in Abbildung B-5 dargestellt.

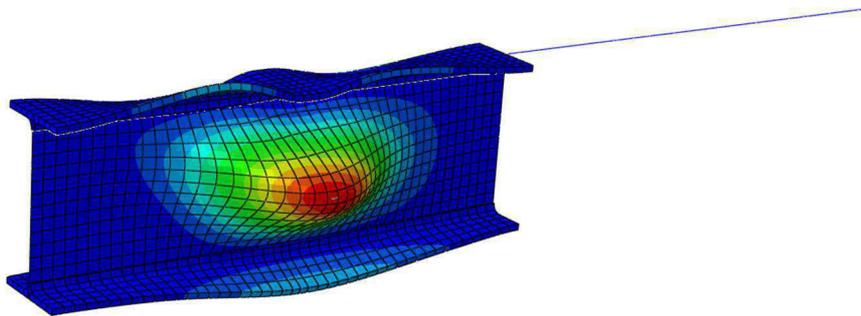


Abbildung B-5: LBA: System S2, Systemlänge=1,8 m

#### Materielle nichtlineare Analyse (MNA):

Die materielle nichtlineare Analyse ergibt ein plastisches Moment von 148 kNm, siehe Abbildung B-6.

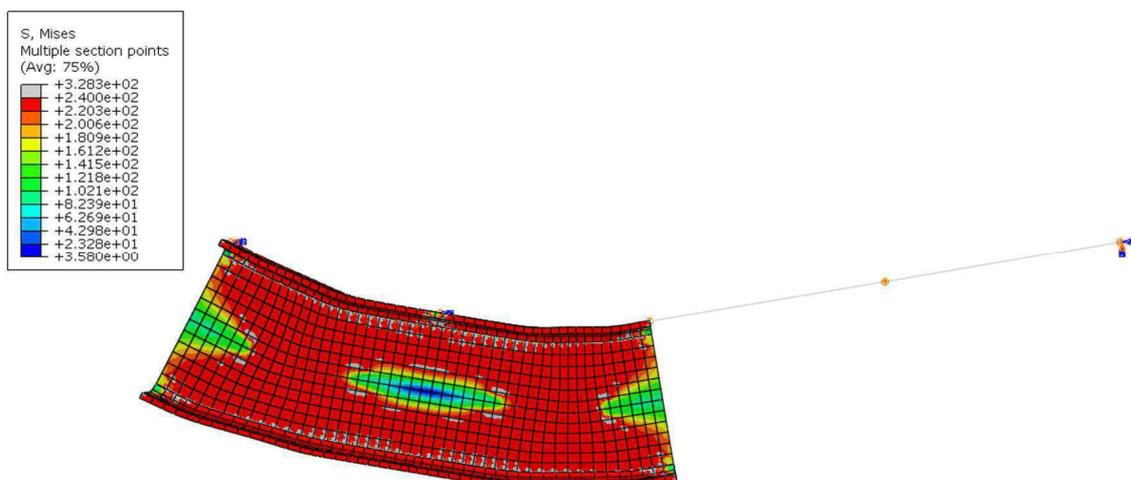


Abbildung B-6: MNA: System S2, Systemlänge=1,8 m

### Geometrisch und materiell nichtlineare imperfekte Analyse (GMNIA):

Für die geometrisch und materiell nichtlineare imperfekte Analyse wird eine Imperfektion von 1,24 angesetzt. Die maximale, ohne Quersteifen einleitbare Last für das IPE 300 beträgt 294 kN. Drei Berechnungspunkte sind hier jeweils für die folgenden drei Systeme S2-1KE, S2-2KE und S2-3KE graphisch dargestellt. Die roten Bereiche in den Abbildungen B-7 bis B-9 stellen die Erreichung der Fließgrenze von  $f_y=235 \text{ N/mm}^2$  dar.

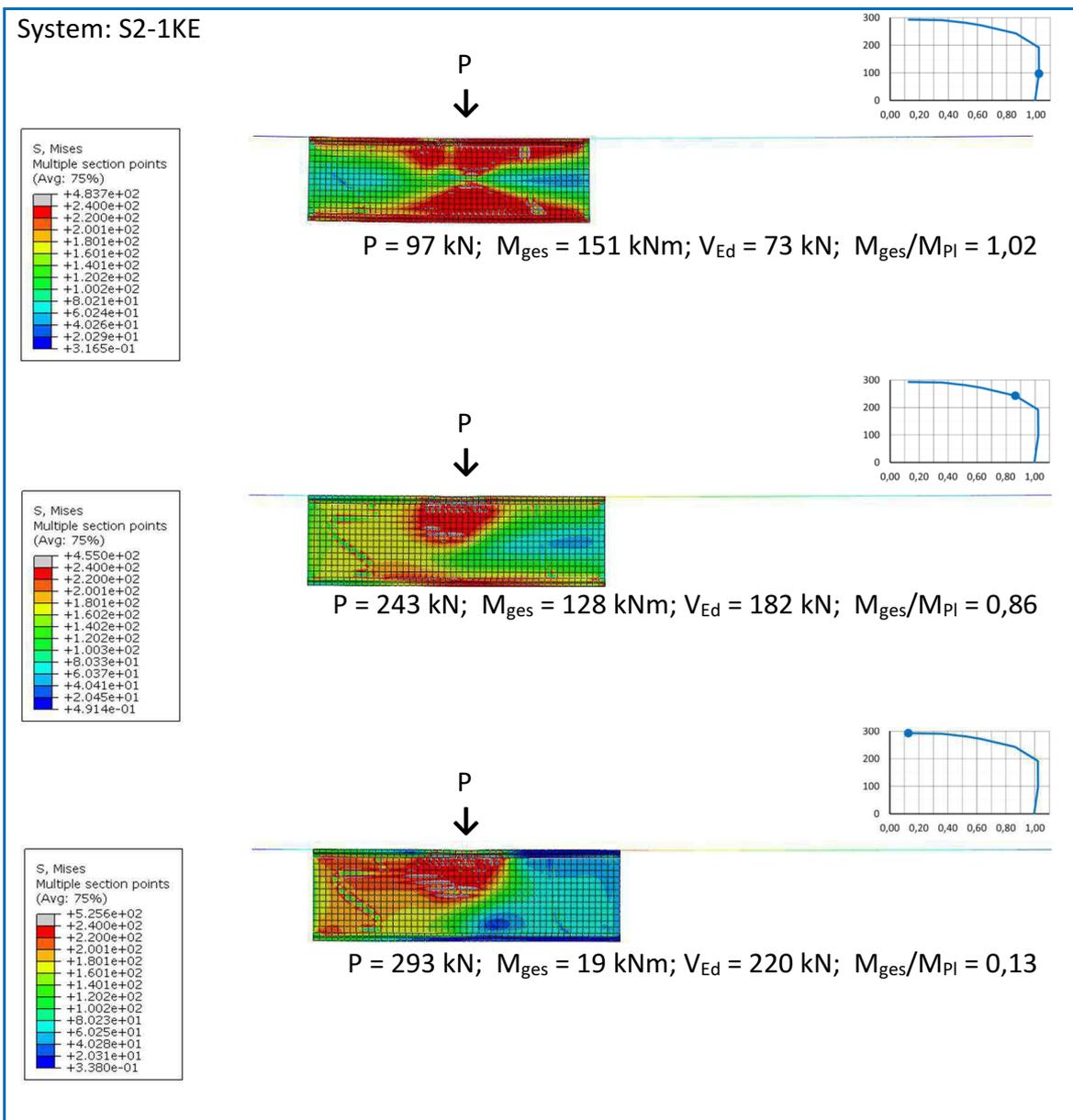


Abbildung B-7: GMNIA-IPE300: System S2-1KE Systemlänge=2,8 m

System: S2-2KE

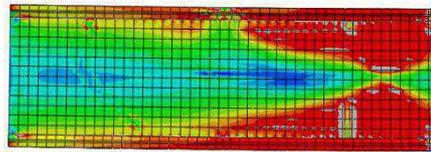
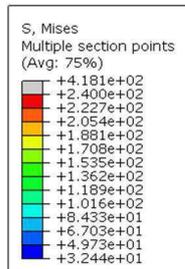
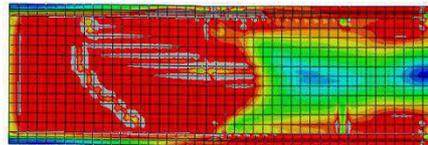
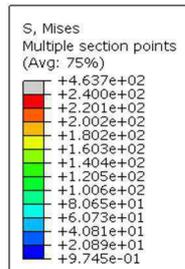
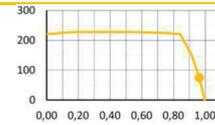
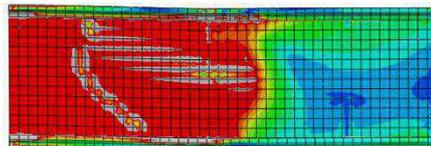
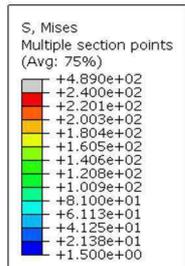
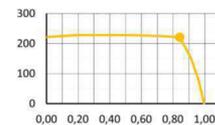
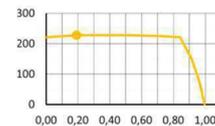

 $P = 75 \text{ kN}; M_{ges} = 142 \text{ kNm}; V_{Ed} = 94 \text{ kN}; M_{ges}/M_{Pl} = 0,96$ 

 $P = 221 \text{ kN}; M_{ges} = 124 \text{ kNm}; V_{Ed} = 276 \text{ kN}; M_{ges}/M_{Pl} = 0,84$ 

 $P = 228 \text{ kN}; M_{ges} = 28 \text{ kNm}; V_{Ed} = 285 \text{ kN}; M_{ges}/M_{Pl} = 0,19$ 


Abbildung B-8: GMNIA-IPE300: System S2-2KE Systemlänge =1,8 m

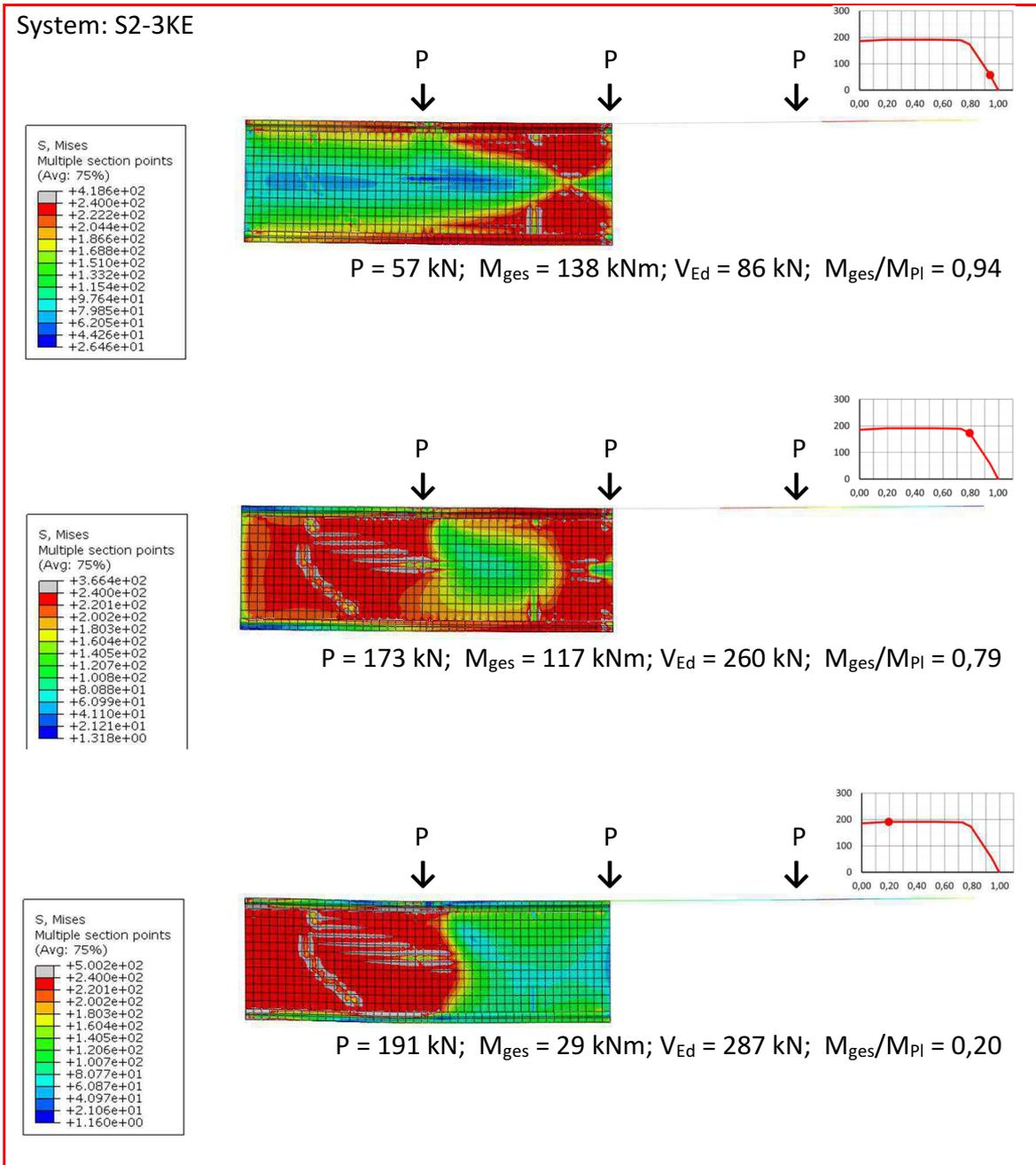
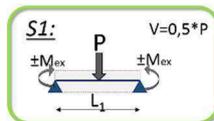


Abbildung B-9: GMNIA-IPE300: System S2-3KE Systemlänge =1,8 m

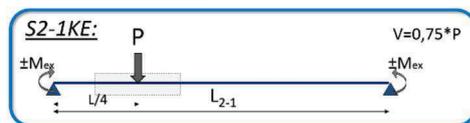
## B.1.2 TABELLARISCHE EINGABEWERTE

Im Folgenden sind die Eingabe- und Ergebniswerte für das IPE 300 in tabellarischer Form dargestellt.  $M_{\text{extern}}$  ist ein Eingabewert für die Berechnung.  $P$  ist das Ergebnis der FEM-Berechnung. Die restlichen Werte wurden zugehörig berechnet.

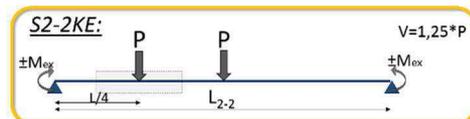
$$A_{\text{aus } P} = P * q$$



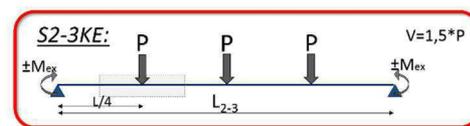
$$\text{System } S1: \quad q=0,50$$



$$\text{System } S2-1KE: \quad q=0,75$$



$$\text{System } S2-2KE: \quad q=1,25$$



$$\text{System } S2-3KE: \quad q=1,50$$

$$M_{\text{aus } P} = A_{\text{aus } P} * \text{Feldlänge}$$

$$M_{\text{gesamt}} = M_{\text{extern}} + M_{\text{aus } P}$$

$$\sigma_{x,1} = M_{\text{gesamt}} * W_{y,\text{Ausrundung}}$$

$$V_{Ed} = A_{\text{aus } P} = P * q$$

$$V_{Rd} = A_{vc} * f_y / \sqrt{3}$$

<b>IPE 300</b>									
$M_{Pl, Tabelle} =$	148 kNm	$W_{Pl, Tabelle} =$	628 cm <sup>3</sup>	$\sigma_x =$	235 N/mm <sup>2</sup>				
$A_{vc} =$	2567 mm <sup>2</sup>	$V_{Rd} =$	348 kN	$W_{y, Ausru.} =$	672 cm <sup>3</sup>				

<b>IPE 300 - S1 - numerische Berechnung GMNIA (L= 1m)</b>									
Spannweite 1,0 m		Feldlänge: 1,00 m			Elementlänge 1 m			V = P * 0,5	
P	M <sub>extern</sub>	M <sub>aus P</sub>	M <sub>gesamt</sub>	M <sub>gesamt</sub> /M <sub>Pl</sub>	$\sigma_{x,1}$	V <sub>Ed</sub>	V <sub>Ed</sub> /V <sub>Rd</sub>		
[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[-]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN]	[-]		
0	147	0	147	1,00	21,9	0	0,00		
41	140	10	150	1,02	22,4	21	0,06		
87	130	22	152	1,03	22,6	44	0,12		
131	120	33	153	1,03	22,7	66	0,19		
171	110	43	153	1,03	22,7	86	0,25		
200	100	50	150	1,02	22,3	100	0,29		
232	80	58	138	0,93	20,5	116	0,33		
250	60	63	123	0,83	18,2	125	0,36		
257	50	64	114	0,77	17,0	129	0,37		
272	25	68	93	0,63	13,8	136	0,39		
280	10	70	80	0,54	11,9	140	0,40		
285	0	71	71	0,48	10,6	143	0,41		
292	-20	73	53	0,36	7,9	146	0,42		
294	-40	74	34	0,23	5,0	147	0,42		
293	-60	73	13	0,09	2,0	147	0,42		
291	-73	73	0	0,00	0,0	146	0,42		

Tabelle B-1: Tabellarische Eingabe- und Ergebniswerte für IPE 300, S1

<b>IPE 300 - S2 1-KE - numerische Berechnung GMNIA (L= 2,8m)</b>									
Spannweite 2,80 m		Feldlänge: 0,70 m			Elementlänge 1 m			V = P * 0,75	
P	M <sub>extern</sub>	A <sub>aus P</sub>	M <sub>aus P</sub>	M <sub>gesamt</sub>	M <sub>gesamt</sub> /M <sub>Pl</sub>	$\sigma_{x,1}$	V <sub>Ed</sub>	V <sub>Ed</sub> /V <sub>Rd</sub>	
[kN]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[-]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN]	[-]	
0	147	0	0	147	1,00	21,9	0	0,00	
97	100	73	51	151	1,02	22,5	73	0,21	
192	50	144	101	151	1,02	22,4	144	0,41	
243	0	182	128	128	0,86	19,0	182	0,52	
272	-50	204	143	93	0,63	13,8	204	0,59	
281	-70	211	148	78	0,52	11,5	211	0,61	
291	-100	218	153	53	0,36	7,9	218	0,63	
293	-135	220	154	19	0,13	2,8	220	0,63	
0	-145	0	0	-145	-0,98	-21,6	0	0,00	

Tabelle B-2: Tabellarische Eingabe- und Ergebniswerte für IPE 300, S2-1KE

<b>IPE 300 - S2 2-KE - numerische Berechnung GMNIA (L= 1,8m)</b>									
Spannweite 1,80 m		Feldlänge: 0,45 m			Elementlänge 0,90 m			V = P * 1,25	
P	M <sub>extern</sub>	A <sub>aus P</sub>	M <sub>aus P</sub>	M <sub>gesamt</sub>	M <sub>gesamt</sub> /M <sub>Pl</sub>	$\sigma_{x,1}$	V <sub>Ed</sub>	V <sub>Ed</sub> /V <sub>Rd</sub>	
[kN]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[-]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN]	[-]	
0	147	0	0	147	1,00	21,9	0	0,00	
75	100	94	42	142	0,96	21,2	94	0,27	
151	50	189	85	135	0,91	20,1	189	0,54	
221	0	276	124	124	0,84	18,5	276	0,79	
225	-20	281	127	107	0,72	15,9	281	0,81	
228	-50	285	128	78	0,53	11,6	285	0,82	
228	-100	285	128	28	0,19	4,2	285	0,82	
217	-140	271	122	-18	-0,12	-2,7	271	0,78	

Tabelle B-3: Tabellarische Eingabe- und Ergebniswerte für IPE 300, S2-2KE

IPE 300 - S2 3-KE - numerische Berechnung GMNIA (L= 1,8m)									
Spannweite 1,80 m		Feldlänge: 0,45 m			Elementlänge 0,90 m			V = P * 1,50	
P	M <sub>extern</sub>	A <sub>aus P</sub>	M <sub>aus P</sub>	M <sub>gesamt</sub>	M <sub>gesamt</sub> /M <sub>pl</sub>	σ <sub>x,1</sub>	V <sub>Ed</sub>	V <sub>Ed</sub> /V <sub>Rd</sub>	
[kN]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[-]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN]	[-]	
0	147	0	0	147	1,00	21,9	0	0,00	
57	100	86	38	138	0,94	20,6	86	0,25	
115	50	173	78	128	0,86	19,0	173	0,50	
173	0	260	117	117	0,79	17,4	260	0,75	
189	-20	284	128	108	0,73	16,0	284	0,81	
191	-50	287	129	79	0,53	11,7	287	0,82	
191	-100	287	129	29	0,20	4,3	287	0,82	
182	-140	273	123	-17	-0,12	-2,6	273	0,78	

Tabelle B-4: Tabellarische Eingabe- und Ergebniswerte für IPE 300, S2-3KE

## B.2 HEA 1000

### B.2.1 GRAPHISCHE DARSTELLUNG

Wie bereits in Kapitel 5.3 beschrieben, finden sich hier für alle 3 Systeme des HEA 1000, die graphischen Darstellungen inklusive Ergebniswerte aus der linearen Beulanalyse (LBA), der materiellen nichtlinearen Analyse (MNA) und der geometrischen und materiellen nichtlinearen imperfekten Analyse (GMNIA). Abbildung B-10 zeigt einen Überblick über die Lage der Graphiken der geometrischen und materiellen nichtlinearen imperfekten Analyse.

#### HEA 1000

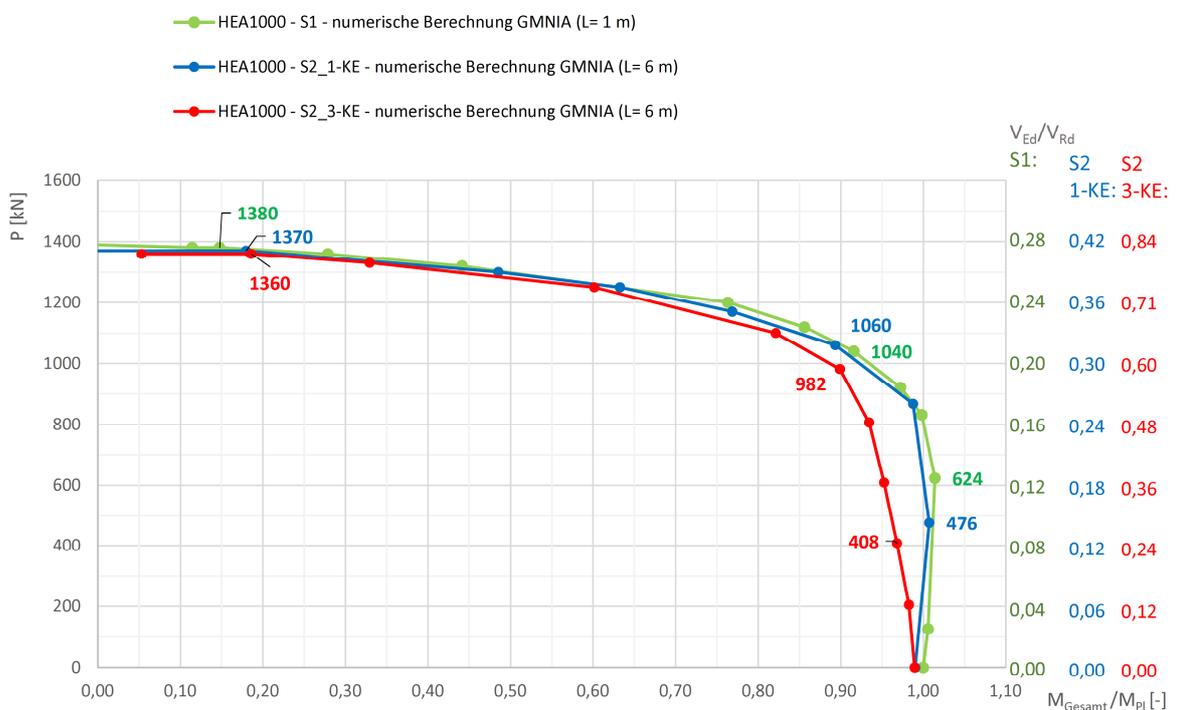


Abbildung B-10: Übersicht der im Detail dargestellten Berechnungspunkte des HEA 1000

### B.2.1.1 SYSTEM S1:

#### Lineare Beulanalyse (LBA):

Die lineare Beulanalyse ergibt bei einer Systemlänge von 1 m als ersten Eigenwert eine kritische Beullast von 9050 kN. Die zugehörige Eigenform ist in Abbildung B-11 dargestellt.

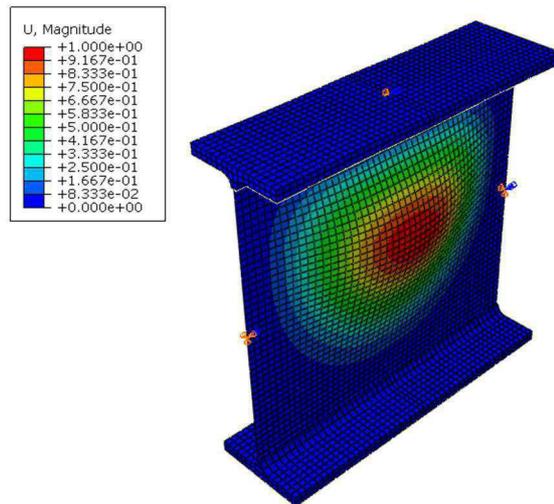


Abbildung B-11: LBA: System S1, Systemlänge=1 m

#### Materielle nichtlineare Analyse (MNA):

Die materielle nichtlineare Analyse ergibt ein plastisches Moment von 3021 kNm, siehe Abbildung B-12.

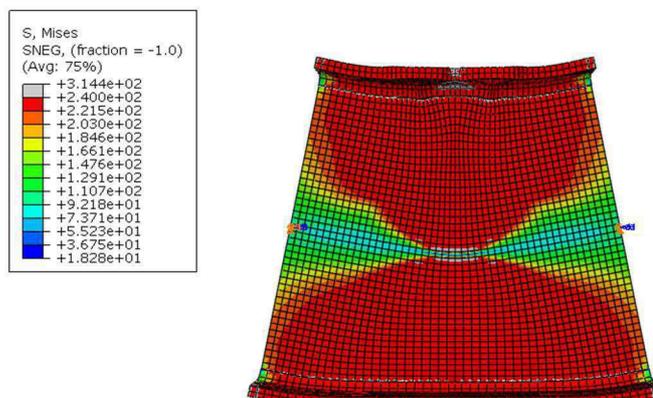


Abbildung B-12: MNA: System S1, Systemlänge=1 m

### Geometrisch und materiell nichtlineare imperfekte Analyse (GMNIA):

Für die geometrisch und materiell nichtlineare imperfekte Analyse wird eine Imperfektion von 4,34 angesetzt. Die maximale, ohne Quersteifen einleitbare Last für den HEA 1000 beträgt 1380 kN. In Abbildung B-13 sind jeweils drei Berechnungspunkte graphisch dargestellt. Die roten Bereiche in Abbildung B-13 stellen die Erreichung der Fließgrenze von  $f_y=235 \text{ N/mm}^2$  dar.

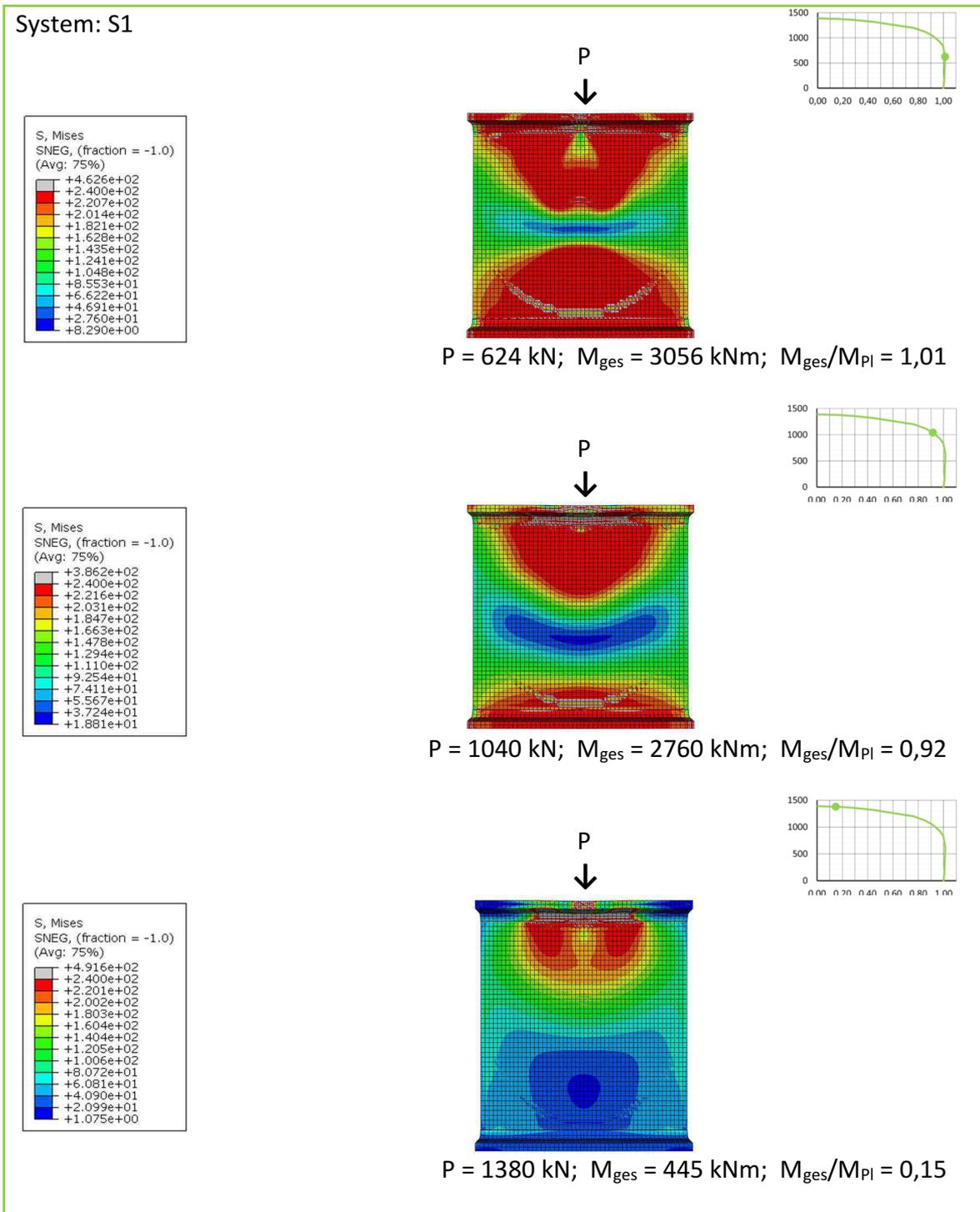


Abbildung B-13: GMNIA-HEA1000: System S1, Systemlänge=1 m

### B.2.1.2 SYSTEM S2:

#### Lineare Beulanalyse (LBA):

Die lineare Beulanalyse ergibt bei einer Systemlänge von 6 m als ersten Eigenwert eine kritische Beullast von 6550 kN. Die zugehörige Eigenform ist in Abbildung B-14 dargestellt.

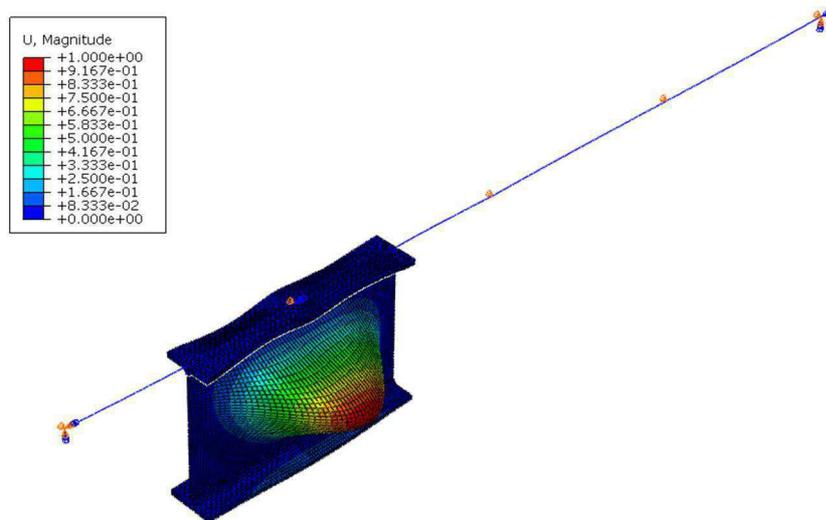


Abbildung B-14: LBA System S2, Systemlänge=6 m

Die lineare Beulanalyse ergibt bei einer Systemlänge von 12 m eine kritische Beullast von 5549 kN. Die zugehörige Eigenform ist in Abbildung B-15 dargestellt.

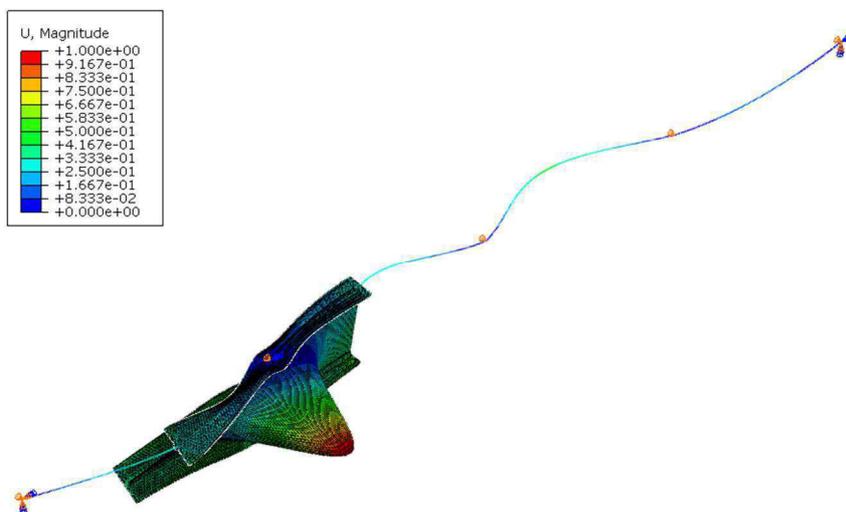


Abbildung B-15: LBA System S2, Systemlänge=12 m

Die lineare Beulanalyse ergibt bei einer Systemlänge von 12 m und einer kontinuierlichen Halterung des Obergurtes als ersten Eigenwert eine kritische Beullast von 5883 kN. Die zugehörige Eigenform ist in Abbildung B-16 dargestellt.

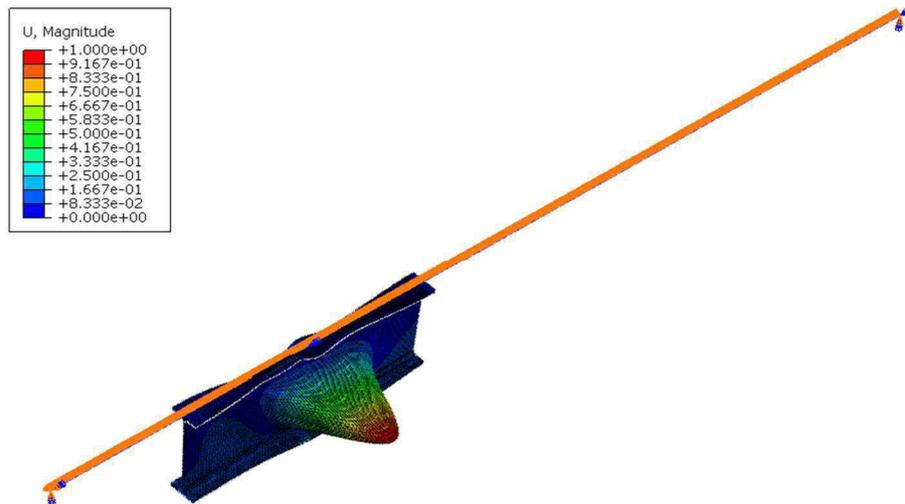


Abbildung B-16: LBA System S2, Systemlänge=12 m, mit Obergurthalterung

Materielle nichtlineare Analyse (MNA):

Die materielle nichtlineare Analyse ergibt ein plastisches Moment von 3017 kNm, siehe Abbildung B-17.

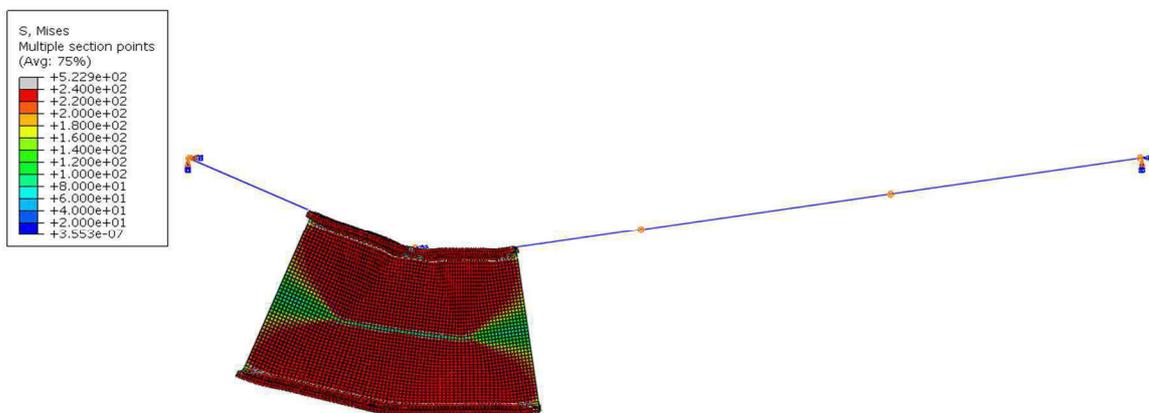


Abbildung B-17: MNA: System S2, Systemlänge=6 m

### Geometrisch und materiell nichtlineare imperfekte Analyse (GMNIA):

Für die geometrisch und materiell nichtlineare imperfekte Analyse wird eine Imperfektion von 4,34 angesetzt. Die maximale, ohne Quersteifen einleitbare Last für den HEA 1000 beträgt 1370 kN. Drei Berechnungspunkte sind hier jeweils für die folgenden zwei Systeme S2-1KE und S2-3KE graphisch dargestellt. Die roten Bereiche in den Abbildungen B-18 und B-19 stellen die Erreichung der Fließgrenze von  $f_y=235 \text{ N/mm}^2$  dar.

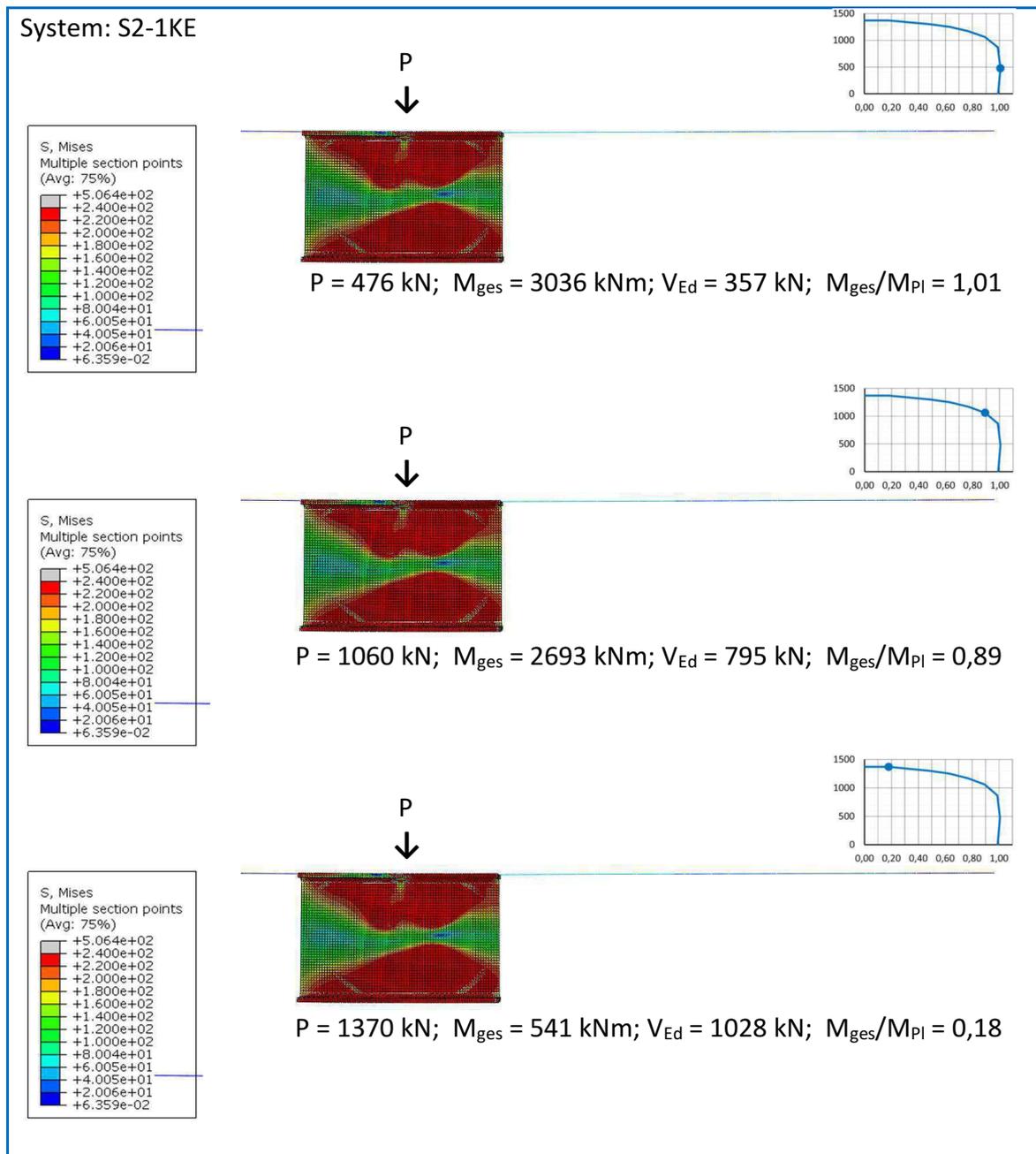


Abbildung B-18: GMNIA-HEA1000: System S2-1KE Systemlänge=6 m

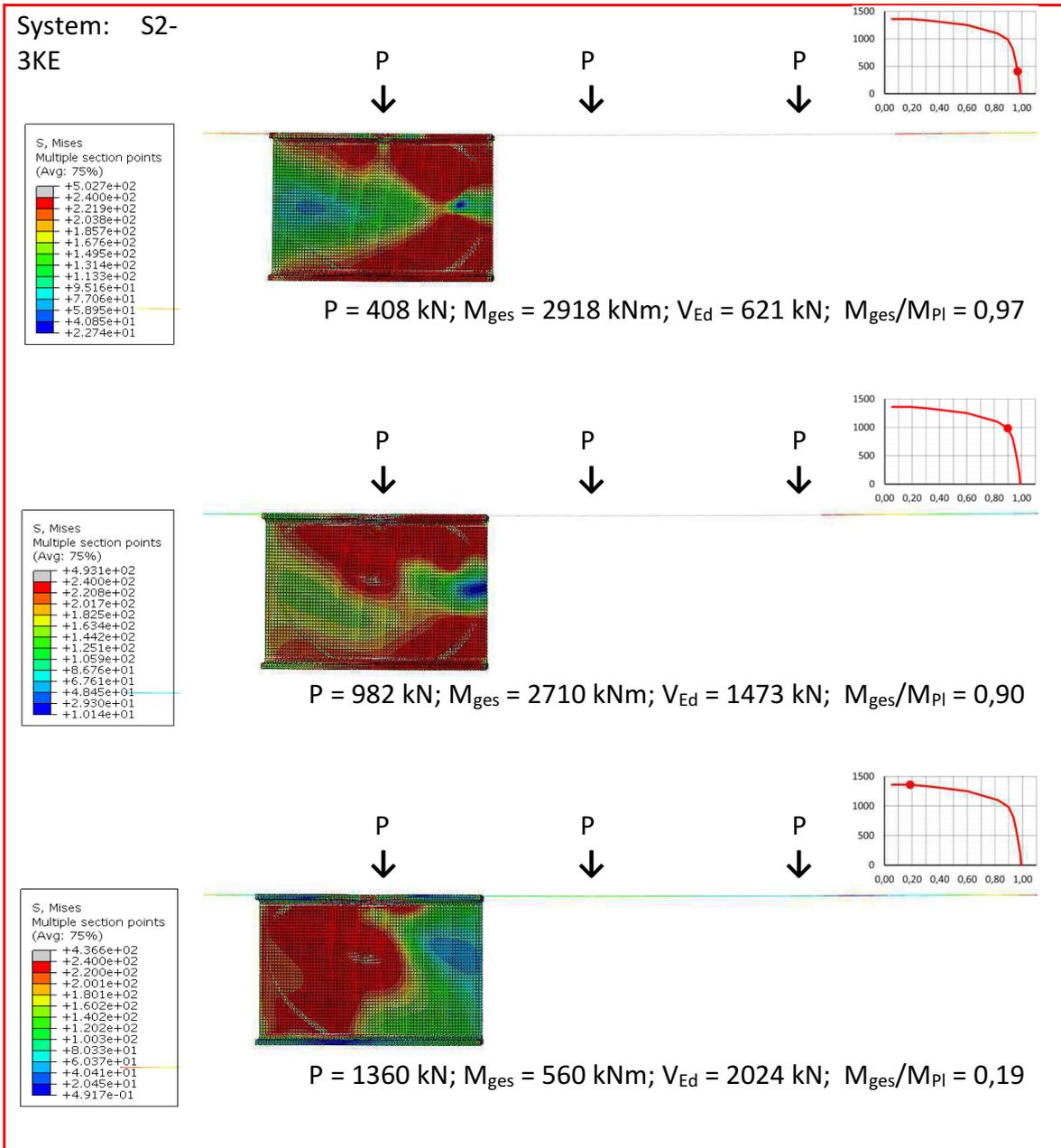


Abbildung B-19: GMNIA-HEA1000: System S2-3KE Systemlänge =6 m

## B.2.2 TABELLARISCHE EINGABEWERTE

Im Folgenden sind die Eingabe- und Ergebniswerte in tabellarischer Form dargestellt.  $M_{\text{extern}}$  ist ein Eingabewert für die Berechnung.  $P$  ist das Ergebnis der FEM-Berechnung. Die restlichen Werte wurden zugehörig berechnet. Siehe dazu Kapitel B.1.2. Dort befindet sich auch eine graphische Darstellung der Systeme.

<b>HEA 1000</b>								
$M_{Pl, \text{Tabelle}} =$	3014 kNm	$W_{Pl, \text{Tabelle}} =$	12824 cm <sup>3</sup>	$\sigma_x =$	235 N/mm <sup>2</sup>			
$A_{vc} =$	18456 mm <sup>2</sup>	$V_{Rd} =$	2504 kN	$W_{y, \text{Ausru.}} =$	12761 cm <sup>3</sup>			

<b>HEA1000 - S1 - numerische Berechnung GMNIA (L= 1 m)</b>								
Spannweite 1 m		Feldlänge: 1,00 m			Elementlänge 1,0 m		V = P * 0,5	
P	$M_{\text{extern}}$	$M_{\text{aus P}}$	$M_{\text{gesamt}}$	$M_{\text{gesamt}}/M_{Pl}$	$\sigma_{x,1}$	$V_{Ed}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$	
[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[-]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN]	[-]	
1390	-350	348	-3	<b>0,00</b>	0,0	695	0,28	
1380	0	345	345	<b>0,11</b>	2,7	690	0,28	
1380	100	345	445	<b>0,15</b>	3,5	690	0,28	
1360	500	340	840	<b>0,28</b>	6,6	680	0,27	
1320	1000	330	1330	<b>0,44</b>	10,4	660	0,26	
1200	2000	300	2300	<b>0,76</b>	18,0	600	0,24	
1120	2300	280	2580	<b>0,86</b>	20,2	560	0,22	
1040	2500	260	2760	<b>0,92</b>	21,6	520	0,21	
921	2700	230	2930	<b>0,97</b>	23,0	461	0,18	
832	2800	208	3008	<b>1,00</b>	23,6	416	0,17	
624	2900	156	3056	<b>1,01</b>	23,9	312	0,12	
126	3000	32	3032	<b>1,01</b>	23,8	63	0,03	
0	3013	0	3013	<b>1,00</b>	23,6	0	0,00	

Tabelle B-5: Tabellarische Eingabe- und Ergebniswerte für HEA 1000, S1

<b>HEA1000 - S2 1-KE - numerische Berechnung GMNIA (L= 6 m)</b>								
Spannweite 6 m		Feldlänge: 1,50 m			Elementlänge 1,5 m		V = P * 0,75	
P	$M_{\text{extern}}$	$A_{\text{aus P}}$	$M_{\text{aus P}}$	$M_{\text{gesamt}}$	$M_{\text{gesamt}}/M_{Pl}$	$\sigma_{x,1(\text{Ausru.})}$	$V_{Ed}$	$V_{Ed}/V_{Rd}$
[kN]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[-]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN]	[-]
1370	-1000	1028	1541	541	<b>0,18</b>	4,24	1028	0,41
1300	0	975	1463	1463	<b>0,49</b>	11,46	975	0,39
1250	500	938	1406	1906	<b>0,63</b>	14,94	938	0,37
1170	1000	878	1316	2316	<b>0,77</b>	18,15	878	0,35
1060	1500	795	1193	2693	<b>0,89</b>	21,10	795	0,32
868	2000	651	977	2977	<b>0,99</b>	23,32	651	0,26
476	2500	357	536	3036	<b>1,01</b>	23,79	357	0,14
0	2985	0	0	2985	<b>0,99</b>	23,39	0	0,00

Tabelle B-6: Tabellarische Eingabe- und Ergebniswerte für HEA 1000, S2-1KE

<b>HEA1000 - S2 3-KE - numerische Berechnung GMNIA (L= 6 m)</b>									
Spannweite 6 m		Feldlänge: 1,50 m			Elementlänge 1,5 m			V = P * 1,50	
P [kN]	M <sub>extern</sub> [kNm]	A <sub>aus P</sub> [kN]	M <sub>aus P</sub> [kNm]	M <sub>gesamt</sub> [kNm]	M <sub>gesamt</sub> /M <sub>Pl</sub> [-]	σ <sub>x,1</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	V <sub>Ed</sub> [kN]	V <sub>Ed</sub> /V <sub>Rd</sub> [-]	
1360	-2900	2040	3060	160	<b>0,05</b>	1,3	2040	0,81	
1360	-2500	2040	3060	560	<b>0,19</b>	4,4	2040	0,81	
1330	-2000	1995	2993	993	<b>0,33</b>	7,8	1995	0,80	
1250	-1000	1875	2813	1813	<b>0,60</b>	14,2	1875	0,75	
1100	0	1650	2475	2475	<b>0,82</b>	19,4	1650	0,66	
982	500	1473	2210	2710	<b>0,90</b>	21,2	1473	0,59	
807	1000	1211	1816	2816	<b>0,93</b>	22,1	1211	0,48	
609	1500	914	1370	2870	<b>0,95</b>	22,5	914	0,36	
408	2000	612	918	2918	<b>0,97</b>	22,9	612	0,24	
205	2500	308	461	2961	<b>0,98</b>	23,2	308	0,12	
0	2982	0	0	2982	<b>0,99</b>	23,4	0	0,00	

Tabelle B-7: Tabellarische Eingabe- und Ergebniswerte für HEA 1000, S2-3KE, L=6 m

<b>HEA1000 - S2 3-KE - numerische Berechnung GMNIA (L= 12m)</b>									
Spannweite 12 m		Feldlänge: 3,00 m			Elementlänge 3,0 m			V = P * 1,50	
P [kN]	M <sub>extern</sub> [kNm]	A <sub>aus P</sub> [kN]	M <sub>aus P</sub> [kNm]	M <sub>gesamt</sub> [kNm]	M <sub>gesamt</sub> /M <sub>Pl</sub> [-]	σ <sub>x,1</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	V <sub>Ed</sub> [kN]	V <sub>Ed</sub> /V <sub>Rd</sub> [-]	
480	-2000	720	2160	160	<b>0,05</b>	1,3	720	0,29	
479	-1000	719	2156	1156	<b>0,38</b>	9,1	719	0,29	
479	-500	719	2156	1656	<b>0,55</b>	13,0	719	0,29	
482	500	723	2169	2669	<b>0,89</b>	20,9	723	0,29	
	1000	0	0	1000	<b>0,33</b>	7,8	0	0,00	
290	1500	435	1305	2805	<b>0,93</b>	22,0	435	0,17	
	2000	0	0	2000	<b>0,66</b>	15,7	0	0,00	
86	2500	129	387	2887	<b>0,96</b>	22,6	129	0,05	
0	2891	0	0	2891	<b>0,96</b>	22,7	0	0,00	

<b>HEA1000 - S2 3-KE - numerische Berechnung GMNIA (L= 12m) Obergurt gehalten</b>									
Spannweite 12 m		Feldlänge: 3,00 m			Elementlänge 3,0 m			V = P * 1,50	
P [kN]	M <sub>extern</sub> [kNm]	A <sub>aus P</sub> [kN]	M <sub>aus P</sub> [kNm]	M <sub>gesamt</sub> [kNm]	M <sub>gesamt</sub> /M <sub>Pl</sub> [-]	σ <sub>x,1</sub> [kN/cm <sup>2</sup> ]	V <sub>Ed</sub> [kN]	V <sub>Ed</sub> /V <sub>Rd</sub> [-]	
1080	-2500	1620	4860	2360	<b>0,78</b>	18,5	1620	0,65	
883	-1500	1325	3974	2474	<b>0,82</b>	19,4	1325	0,53	
689	-500	1034	3101	2601	<b>0,86</b>	20,4	1034	0,41	
592	0	888	2664	2664	<b>0,88</b>	20,9	888	0,35	
495	500	743	2228	2728	<b>0,90</b>	21,4	743	0,30	
299	1500	449	1346	2846	<b>0,94</b>	22,3	449	0,18	
102	2500	153	459	2959	<b>0,98</b>	23,2	153	0,06	
0	3010	0	0	3010	<b>1,00</b>	23,6	0	0,00	

Tabelle B-8: Tabellarische Eingabe- und Ergebniswerte für HEA 1000, S2-3KE, L=12 m

### B.3 PROFIL 1200

#### B.3.1 GRAPHISCHE DARSTELLUNG

Wie bereits in Kapitel 5.4 beschrieben, finden sich hier für alle 3 Systeme des geschweißten Profils 1200 die graphischen Darstellungen inklusive Ergebniswerte aus der linearen Beulanalyse (LBA), der materiellen nichtlinearen Analyse (MNA) und der geometrischen und materiellen nichtlinearen imperfekten Analyse (GMNIA). Abbildung B-20 zeigt einen Überblick über die Lage der Graphiken der geometrischen und materiellen nichtlinearen imperfekten Analyse.

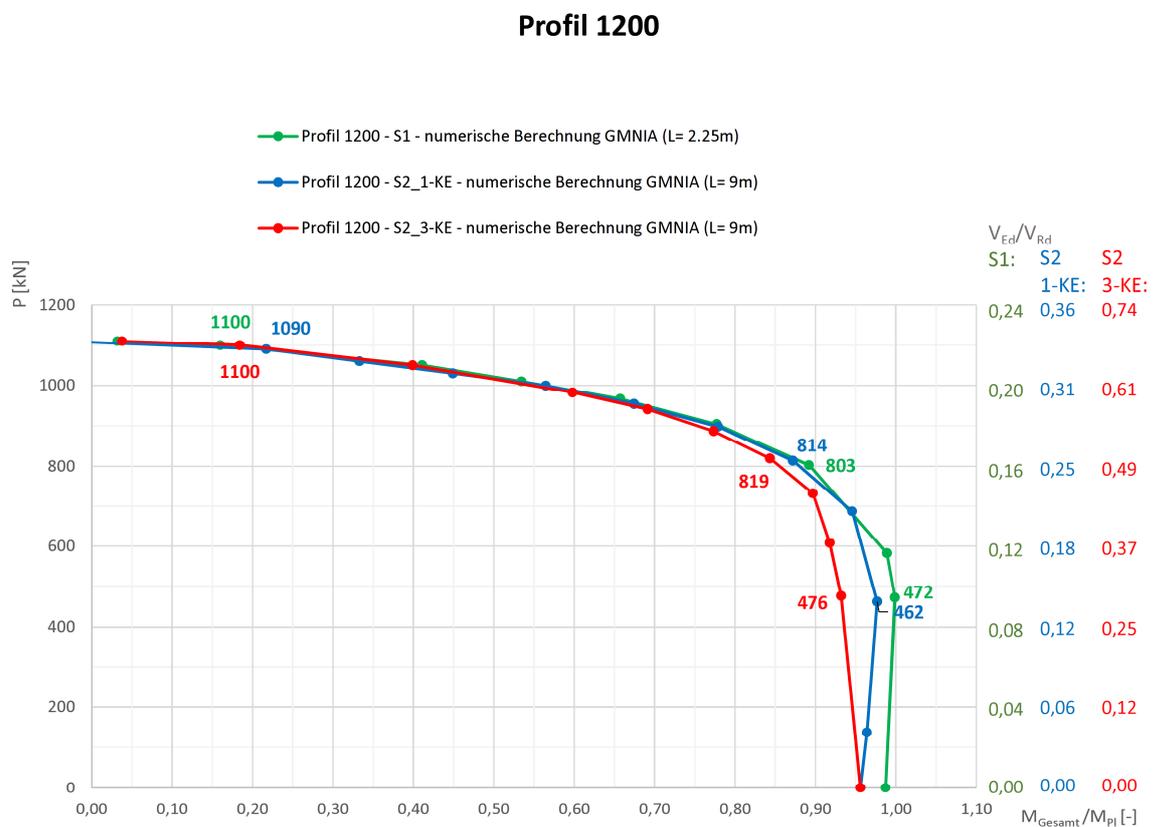


Abbildung B-20: Übersicht der im Detail dargestellten Berechnungspunkte des Profils 1200

### B.3.1.1 SYSTEM S1:

#### Lineare Beulanalyse (LBA):

Die lineare Beulanalyse ergibt bei einer Systemlänge von 2,25 m als ersten Eigenwert eine kritische Beullast von 3484 kN. Die zugehörige Eigenform ist in Abbildung B-21 dargestellt.

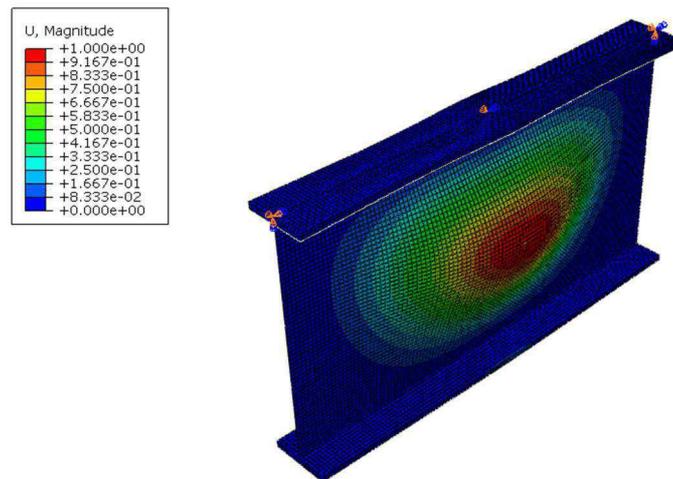


Abbildung B-21: LBA: System S1, Systemlänge=2,25 m

#### Materielle nichtlineare Analyse (MNA):

Die materielle nichtlineare Analyse ergibt ein plastisches Moment von 3870 kNm, siehe Abbildung B-22.

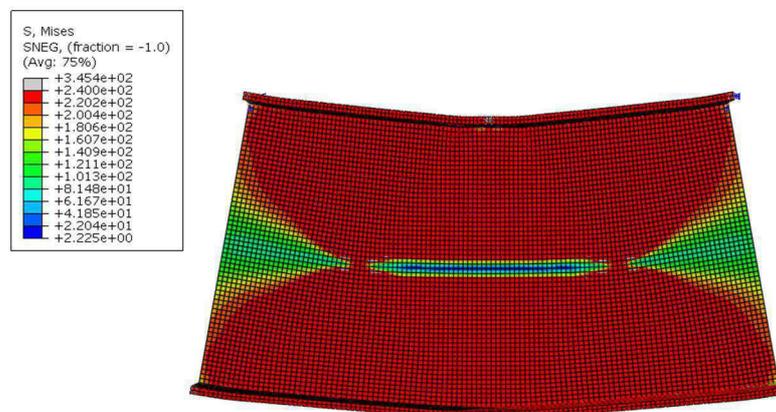


Abbildung B-22: MNA: System S1, Systemlänge=2,25 m

### Geometrisch und materiell nichtlineare imperfekte Analyse (GMNIA):

Für die geometrisch und materiell nichtlineare imperfekte Analyse wird eine Imperfektion von 6 angesetzt. Die maximale, ohne Quersteifen einleitbare Last für das Profil 1200 beträgt 1110 kN. Drei Berechnungspunkte sind hier graphisch dargestellt. Die roten Bereiche in Abbildung B-23 stellen die Erreichung der Fließgrenze von  $f_y=235 \text{ N/mm}^2$  dar.

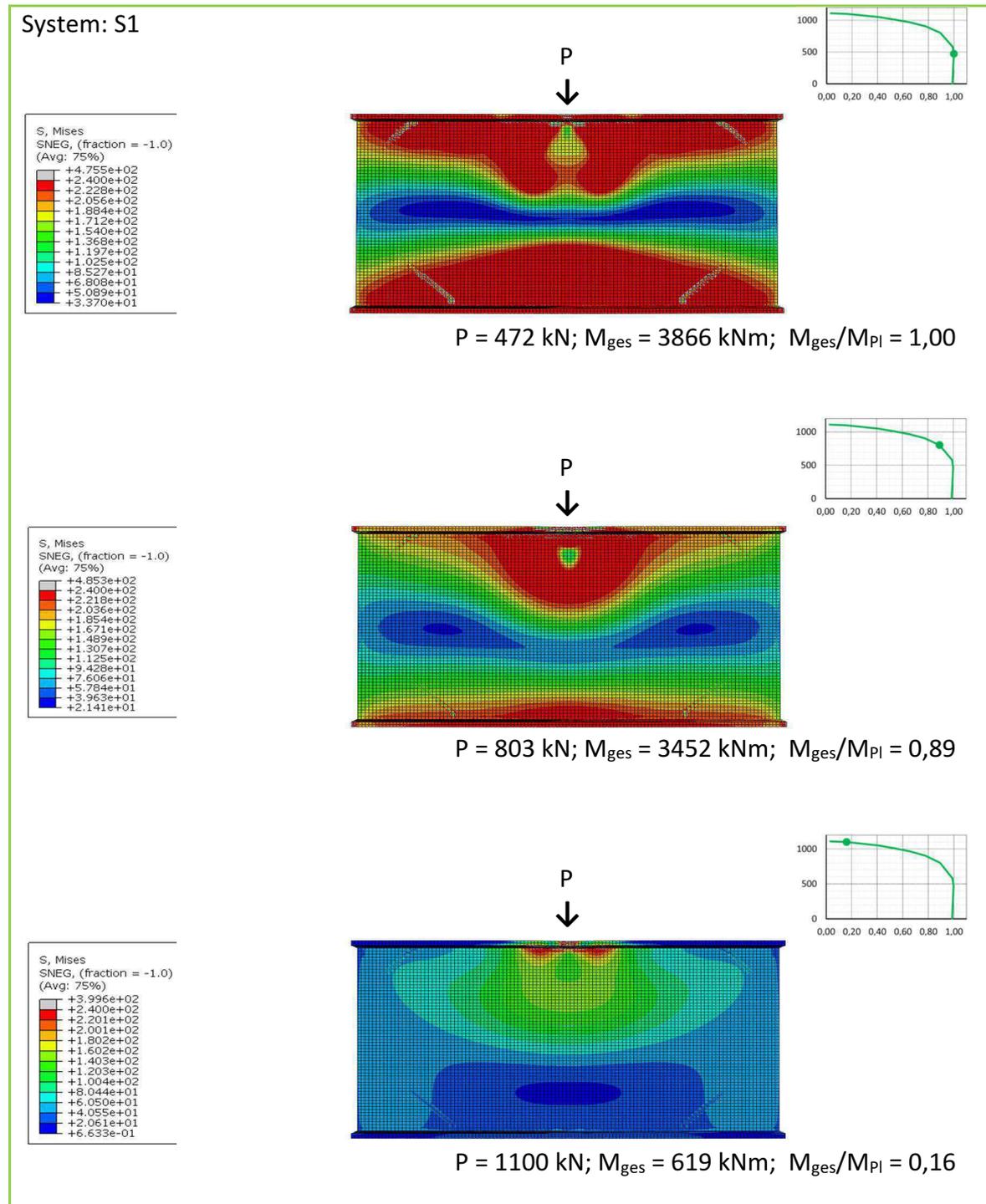


Abbildung B-23: GMNIA-Profil1200: System S1, Systemlänge=2,25 m

### B.3.1.2 SYSTEM S2:

#### Lineare Beulanalyse (LBA):

Die lineare Beulanalyse ergibt bei einer Systemlänge von 9 m als ersten Eigenwert eine kritische Beullast von 3207 kN. Die zugehörige Eigenform ist in Abbildung B-24 dargestellt.

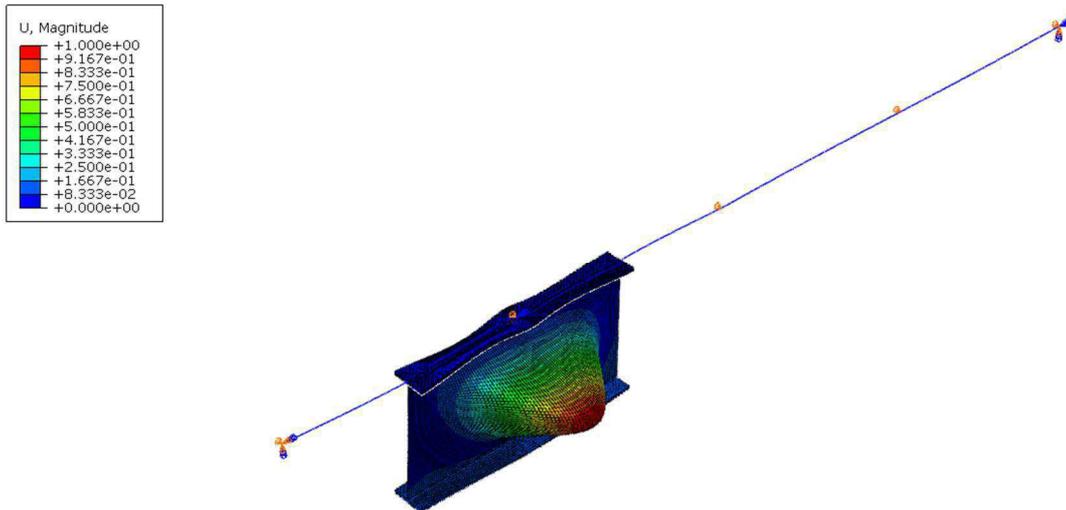


Abbildung B-24: LBA System S2, Systemlänge=9 m

Die lineare Beulanalyse ergibt bei einer Systemlänge von 9 m und einer kontinuierlichen Halterung des Obergurtes als ersten Eigenwert eine kritische Beullast von 3271 kN. Die zugehörige Eigenform ist in Abbildung B-25 dargestellt.

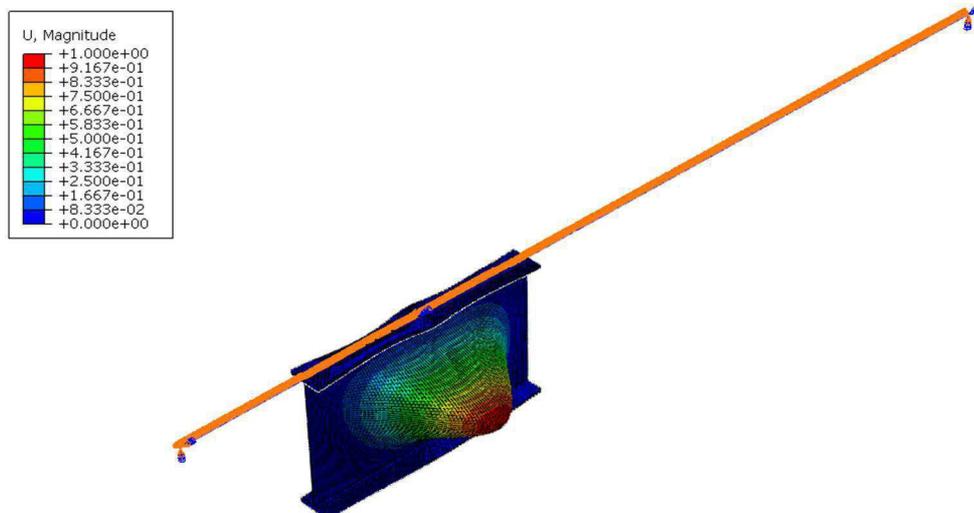


Abbildung B-25: LBA System S2, Systemlänge=9 m, mit Obergurthalterung

### Materielle nichtlineare Analyse (MNA):

Die materielle nichtlineare Analyse ergibt ein plastisches Moment von 3870 kNm, siehe Abbildung B-26.

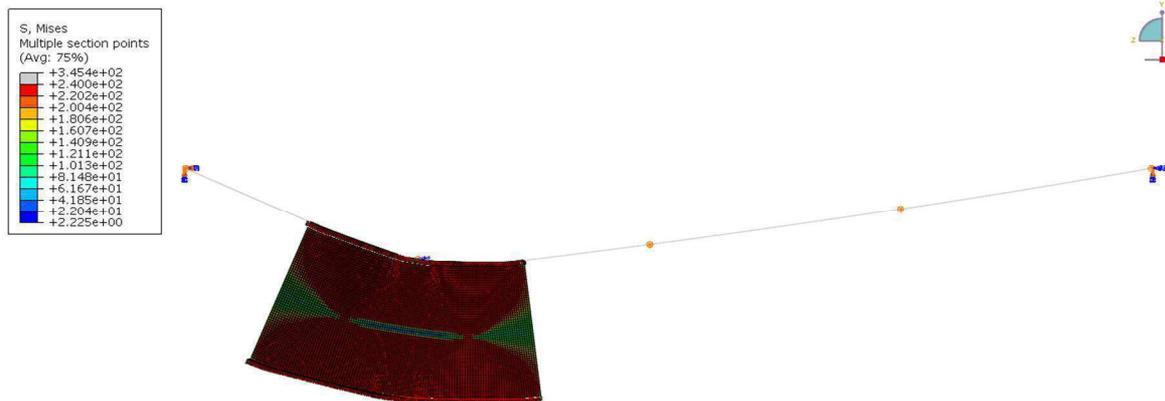


Abbildung B-26: MNA: System S2, Systemlänge=9 m

### Geometrisch und materiell nichtlineare imperfekte Analyse (GMNIA):

Für die geometrisch und materiell nichtlineare imperfekte Analyse wird eine Imperfektion von 6 angesetzt. Die maximale, ohne Quersteifen einleitbare Last für das Profil 1200 beträgt 1110 kN. Drei Berechnungspunkte sind hier jeweils für die folgenden zwei Systeme graphisch dargestellt. Die roten Bereiche in Abbildung B-27 stellen die Erreichung der Fließgrenze von  $f_y=235 \text{ N/mm}^2$  dar.

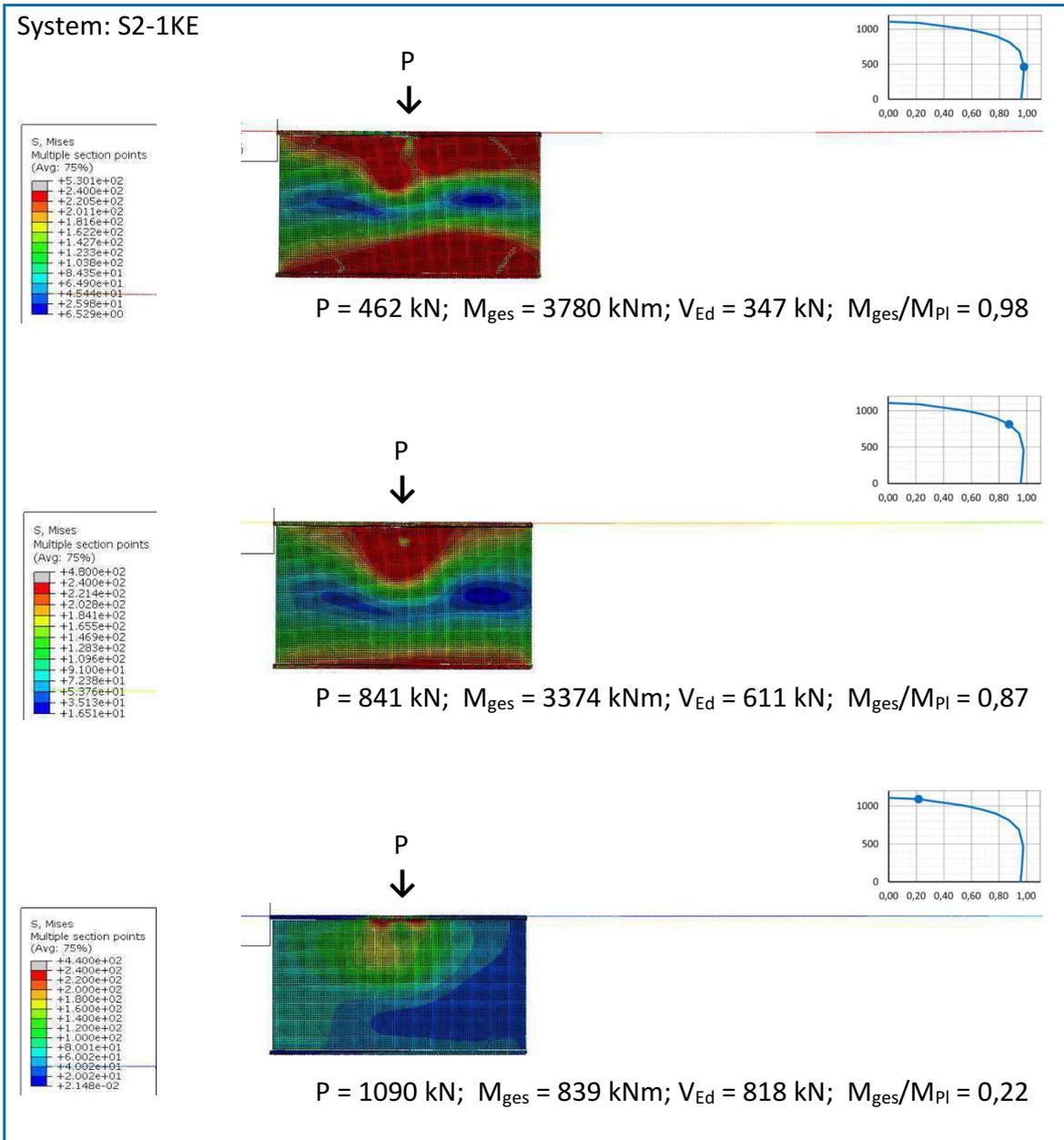


Abbildung B-27: GMNIA-Profil1200: System S2-1KE Systemlänge=9 m

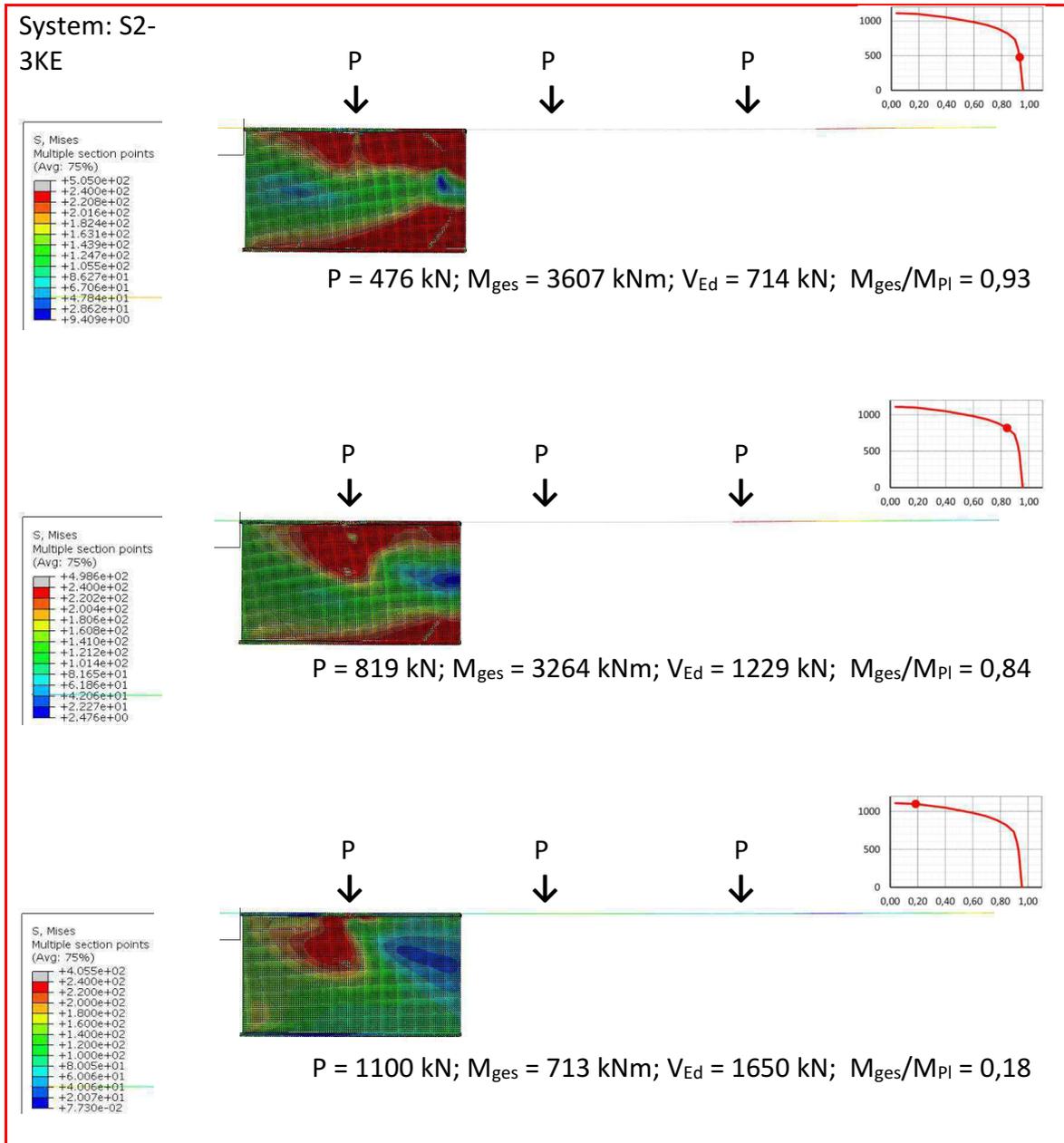


Abbildung B-28: GMNIA-Profil1200: System S2-3KE Systemlänge =9 m

### B.3.2 TABELLARISCHE EINGABEWERTE

Im Folgenden sind die Eingabe- und Ergebniswerte in tabellarischer Form dargestellt.  $M_{\text{extern}}$  ist ein Eingabewert für die Berechnung.  $P$  ist das Ergebnis der FEM-Berechnung. Die restlichen Werte wurden zugehörig berechnet. Siehe dazu Kapitel B.1.2. Dort befindet sich auch eine graphische Darstellung der Systeme.

Profil 1200								
$M_{\text{Pl,Abaqus}}$	3870 kNm			$\sigma_x = 235 \text{ N/mm}^2$				
$A_{\text{vc}}$	18000 mm <sup>2</sup>		$V_{\text{Rd}}$	2442 kN		$W_{\text{y,überg.}} = 14949 \text{ cm}^3$		

Profil 1200 - S1 - numerische Berechnung GMNIA (L= 2.25m)									
Spannweite		2,25 m		Feldlänge:		2,25 m		Elementlänge	2,25 m
								$V = P * 0,5$	
P	$M_{\text{extern}}$	$M_{\text{aus P}}$	$M_{\text{gesamt}}$	$M_{\text{gesamt}}/M_{\text{Pl}}$	$\sigma_{x,1}$	$V_{\text{Ed}}$	$V_{\text{Ed}}/V_{\text{Rd}}$		
[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[-]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN]	[-]		
1110	-500	624	124	0,03	0,8	555	0,23		
1100	0	619	619	0,16	4,1	550	0,23		
1050	1000	591	1591	0,41	10,6	525	0,21		
1010	1500	568	2068	0,53	13,8	505	0,21		
966	2000	543	2543	0,66	17,0	483	0,20		
904	2500	509	3009	0,78	20,1	452	0,19		
803	3000	452	3452	0,89	23,1	402	0,16		
582	3500	327	3827	0,99	25,6	291	0,12		
472	3600	266	3866	1,00	25,9	236	0,10		
0	3820	0	3820	0,99	25,6	0	0,00		

Tabelle B-9: Tabellarische Eingabe- und Ergebniswerte für Profil 1200, S1

Profil 1200 - S2 1-KE - numerische Berechnung GMNIA (L= 9m)									
Spannweite		9 m		Feldlänge:		2,25 m		Elementlänge	2,25 m
								$V = P * 0,75$	
P	$M_{\text{extern}}$	$A_{\text{aus P}}$	$M_{\text{aus P}}$	$M_{\text{gesamt}}$	$M_{\text{gesamt}}/M_{\text{Pl}}$	$\sigma_{x,1(\text{Ausr.})}$	$V_{\text{Ed}}$	$V_{\text{Ed}}/V_{\text{Rd}}$	
[kN]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[-]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN]	[-]	
1110	-2000	833	1873	-127	-0,03	-0,85	833	0,34	
1090	-1000	818	1839	839	0,22	5,61	818	0,33	
1060	-500	795	1789	1289	0,33	8,62	795	0,33	
1030	0	773	1738	1738	0,45	11,63	773	0,32	
999	500	749	1686	2186	0,56	14,62	749	0,31	
954	1000	716	1610	2610	0,67	17,46	716	0,29	
898	1500	674	1515	3015	0,78	20,17	674	0,28	
814	2000	611	1374	3374	0,87	22,57	611	0,25	
687	2500	515	1159	3659	0,95	24,48	515	0,21	
462	3000	347	780	3780	0,98	25,28	347	0,14	
137	3500	103	231	3731	0,96	24,96	103	0,04	
0	3700	0	0	3700	0,96	24,75	0	0,00	

Tabelle B-10: Tabellarische Eingabe- und Ergebniswerte für Profil 1200, S2-1KE

<b>Profil 1200 - S2 3-KE - numerische Berechnung GMNIA (L= 9m)</b>									
Spannweite 9 m		Feldlänge: 2,25 m		Elementlänge 2,25 m		V = P * 1,50			
P	M <sub>extern</sub>	A <sub>aus P</sub>	M <sub>aus P</sub>	M <sub>gesamt</sub>	M <sub>gesamt</sub> /M <sub>pl</sub>	σ <sub>x,1</sub>	V <sub>Ed</sub>	V <sub>Ed</sub> /V <sub>Rd</sub>	
[kN]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[-]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN]	[-]	
1110	-3600	1665	3746	146	<b>0,04</b>	1,0	1665	0,68	
1100	-3000	1650	3713	713	<b>0,18</b>	4,8	1650	0,68	
1050	-2000	1575	3544	1544	<b>0,40</b>	10,3	1575	0,64	
982	-1000	1473	3314	2314	<b>0,60</b>	15,5	1473	0,60	
941	-500	1412	3176	2676	<b>0,69</b>	17,9	1412	0,58	
887	0	1331	2994	2994	<b>0,77</b>	20,0	1331	0,54	
819	500	1229	2764	3264	<b>0,84</b>	21,8	1229	0,50	
732	1000	1098	2471	3471	<b>0,90</b>	23,2	1098	0,45	
608	1500	912	2052	3552	<b>0,92</b>	23,8	912	0,37	
476	2000	714	1607	3607	<b>0,93</b>	24,1	714	0,29	
0	3700	0	0	3700	<b>0,96</b>	24,8	0	0,00	

Tabelle B-11: Tabellarische Eingabe- und Ergebniswerte für Profil 1200, S2-3KE

<b>Profil 1200 - S2 1-KE - numerische Berechnung GMNIA (L= 9m) Obergurt gehalten</b>									
Spannweite 9 m		Feldlänge: 2,25 m		Elementlänge 2,25 m		V = P * 0,75			
P	M <sub>extern</sub>	A <sub>aus P</sub>	M <sub>aus P</sub>	M <sub>gesamt</sub>	M <sub>gesamt</sub> /M <sub>pl</sub>	σ <sub>x,1(Ausr.)</sub>	V <sub>Ed</sub>	V <sub>Ed</sub> /V <sub>Rd</sub>	
[kN]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[-]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN]	[-]	
899	1500	674	1517	3017	<b>0,78</b>	20,18	674	0,28	
817	2000	613	1379	3379	<b>0,87</b>	22,60	613	0,25	
689	2500	517	1163	3663	<b>0,95</b>	24,50	517	0,21	
493	3000	370	832	3832	<b>0,99</b>	25,63	370	0,15	
	3500	0	0	3500	<b>0,90</b>	23,41	0	0,00	
0	3828	0	0	3828	<b>0,99</b>	25,61	0	0,00	

Tabelle B-12: Tabellarische Eingabe- und Ergebniswerte für Profil 1200, S2-1KE, Obergurthalterung

<b>Profil 1200 - S2 3-KE - numerische Berechnung GMNIA (L= 9m) Obergurt gehalten</b>									
Spannweite 9 m		Feldlänge: 2,25 m		Elementlänge 2,25 m		V = P * 1,50			
P	M <sub>extern</sub>	A <sub>aus P</sub>	M <sub>aus P</sub>	M <sub>gesamt</sub>	M <sub>gesamt</sub> /M <sub>pl</sub>	σ <sub>x,1</sub>	V <sub>Ed</sub>	V <sub>Ed</sub> /V <sub>Rd</sub>	
[kN]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[-]	[kN/cm <sup>2</sup> ]	[kN]	[-]	
889	0	1334	3000	3000	<b>0,78</b>	20,1	1334	0,55	
741	1000	1112	2501	3501	<b>0,90</b>	23,4	1112	0,46	
493	2000	740	1664	3664	<b>0,95</b>	24,5	740	0,30	
227	3000	341	766	3766	<b>0,97</b>	25,2	341	0,14	
0	3828	0	0	3828	<b>0,99</b>	25,6	0	0,00	

Tabelle B-13: Tabellarische Eingabe- und Ergebniswerte für Profil 1200, S2-3KE, Obergurthalterung

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