

GESAMTSTABILITÄTSVERHALTEN GESCHWEISSTER KASTENQUERSCHNITTE UNTER DRUCK UND BIEGUNG



Graz University of Technology
Technische Universität Graz

MASTERARBEIT

von

SIMON HAFNER

Eingereicht an der
Fakultät für Bauingenieurwesen der
Technischen Universität Graz
Institut für Stahlbau

Betreuer:

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

mitbetreuender Assistent:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Taras

Graz, im Juni 2012

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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Kurzfassung:

In dieser Arbeit wird das Gesamtstabilitätsverhalten von Stäben mit geschweißten Kastenquerschnitten unter Druck- und Biegebeanspruchung untersucht. Zu diesem Zwecke werden numerische Traglastberechnungen (GMNIA-Berechnungen, d.h. geometrisch und materiell nichtlineare Analyse mit Imperfektionen) mit Hilfe der FEM-Software ABAQUS durchgeführt und mit den Ergebnissen der Berechnungsformeln aus dem Eurocode 3 (EC3) verglichen. Die Bestimmung der Traglasten erfolgt für stabilitätsgefährdete Einzelstäbe aller Querschnittsklassen, wobei das Hauptaugenmerk auf den beulgefährdeten Querschnitten der Klasse 4 liegt. Bei beulgefährdeten Querschnitten kann es sowohl zum Stabilitätsversagen, a.) auf lokaler Ebene durch Ausbeulen von Querschnittsteilen als auch b.) auf globaler Ebene durch Biegeknicken des Einzelstabes, kommen. Meist liegt eine Interaktion beider Stabilitätsformen vor.

Es erfolgt die schrittweise Erarbeitung und Untersuchung des Einflusses der einzelnen Stabilitätsformen auf die Tragfähigkeit der untersuchten Stäbe. Zuerst werden Untersuchungen zur reinen Querschnittstragfähigkeit aufgrund des alleinigen lokalen Stabilitätsverhaltens (Plattenbeulen) durchgeführt. Anschließend erfolgt die Ermittlung der Tragfähigkeit an stabilitätsgefährdeten Einzelstäben unter reiner Druckbeanspruchung sowie unter Druck- und Biegebeanspruchung. In beiden Fällen werden dabei sowohl beidseits gelenkige als auch beidseits eingespannte Stäbe untersucht.

Die Vergleiche der ermittelten Tragfähigkeiten mit den Tragfähigkeiten des Eurocodes (EC3) zeigen große zusätzliche Tragreserven auf, die vorwiegend von der ungenutzten teilweisen plastischen Querschnittstragfähigkeit und der plastischen Rotationskapazität auch sehr schlanker Querschnitte herrühren.

Im Brückenbau werden beulgefährdete Kastenquerschnitte oftmals für Gurte und Diagonalen von Hauptträgern in Fachwerkbauweise eingesetzt. Für die Knickbemessung des Fachwerkträgers stellt sich hierbei die Frage, mit welcher Systemberechnung (gelenkige oder biegesteife Modellierung der Knoten) die Berechnung der Schnittkräfte erfolgen soll, sowie welche Knicklängen für druckbeanspruchte Füllstäbe angenommen werden sollen (Systemlänge oder reduzierte Knicklänge infolge Endeinspannung in die Gurte). Anhand eines Beispiels erfolgt die Anwendung unterschiedlicher Ansätze nach Eurocode mit anschließendem Vergleich mit den Ergebnissen einer numerischen Traglastberechnung am Gesamt-Fachwerkssystem.

Abstract:

In this thesis, the local and global buckling resistance of welded hollow sections under compression and bending is investigated. For this purpose the load-carrying behaviour is analyzed by means of numerical studies (GMNIA-Analyses, i.e. Geometrical and Materially Non-linear Analyses with Imperfections) using the FEM-Software ABAQUS. The results of the numerical studies are compared with the design rules of the Eurocode. The determination of the load-carrying capacity of buckling members is carried out for members of all cross section classes. However, the main object is to investigate welded hollow section members with local buckling behaviour (class 4 sections). For these members, an interaction of local and global buckling behaviour has to be considered.

The influence on the buckling resistance of the individual buckling mechanisms is studied step by step. First, numerical studies of the cross-section resistance are carried out by taking account of the local buckling behaviour. After that, the load-carrying behaviour for buckling of columns under pure compression is determined. Finally, the buckling resistance of members under compression and bending is studied in detail. For these numerical studies the members are either simply supported (hinged ends) or rotationally fixed at both ends.

The comparisons between the GMNIA results and the rules of the Eurocode indicate the presence of high load reserves. This behaviour can be attributed to the partially plastic load-carrying and rotational capacity present also in slender cross-sections.

For bridge structures, hollow section members with local buckling behaviour are often used for chords and diagonals of main truss girders. For the buckling resistance assessment of truss girders, the issue of the accurate computation of the internal forces (hinge or rigid joints) has to be solved. Furthermore, for the assessment of the diagonal members, the proper buckling length (real length or reduced length, due to the restraint provided by the chords) has to be determined.

Additionally, as an example, different design rules and approaches of the Eurocode are compared for a member in a truss girder. The approaches are also compared with the results of a numerical calculation of the ultimate load carrying capacity of the same member in a truss girder.

Danksagung:

An dieser Stelle möchte ich meinem Hauptbetreuer, Prof. Dr. Harald Unterweger, danken, der mir ermöglichte, diese Arbeit am Institut für Stahlbau zu schreiben. Auch die sehr ansprechenden Vorlesungen während des Studiums werden mir in Erinnerung bleiben.

Ein großer Dank geht auch an meinen Mitbetreuer Dr. Andreas Taras. Neben seiner Unterstützung und seinen Ideen, haben mir auch die vielen Diskussionen während der Erstellung dieser Arbeit sehr geholfen.

Des Weiteren möchte ich allen Mitarbeitern des Instituts für Stahlbau für ihre Hilfe und das freundliche Arbeitsklima bedanken. Auch meinem Studienkollegen, Zoltán Fehér, möchte ich für die Diskussionen und gegenseitigen Anregungen während der Durchführung dieser Arbeit Danke sagen.

Zum Schluss möchte ich mich bei meiner Freundin Kerstin für ihre große Geduld, Verständnis und Unterstützung bedanken sowie auch bei meiner Familie, speziell bei meiner Mutter, für die Motivation und finanzielle Unterstützung während meines gesamten Studiums.

Inhaltsverzeichnis

TEIL I:	1
1. Einführung und Literaturstudie	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Bisherige Untersuchungen	8
1.3 Zum Stabilitätsverhalten	10
2. Ziel und Umfang der Arbeit	12
3. Nachweisverfahren nach Eurocode - ÖNORM EN 1993-1-1 und ÖNORM EN 1993-1-5	14
3.1 Klassifizierung der Querschnitte	14
3.2 Lokales Stabilitätsversagen bei beulgefährdeten Querschnitten	18
3.3 Globales Stabilitätsversagen bei Druckbeanspruchung (N)	23
3.4 Globales Stabilitätsversagen bei Druck- und Biegebeanspruchung (N+My)	29
4. Methodik	33
TEIL II:	43
5. Festlegung der Querschnittsabmessungen	43
6. Traglastberechnungen zum lokalen Stabilitätsversagen	48
7. Traglastberechnungen (GMNIA) bei Druckstäben (nur N)	53
7.1 Allgemeines	53
7.2 Traglastberechnungen – quadratische Hohlkastenprofile	55
7.2.1 Baustahl S355 - Materialmodell ohne lineare Verfestigung	55
7.2.2 Baustahl S355 – Materialmodell mit linearer Verfestigung	62
7.2.3 Baustahl S235 – Materialmodell ohne bzw. mit linearer Verfestigung	64
7.2.4 Baustahl S460 – Materialmodell ohne bzw. mit linearer Verfestigung	65
7.2.5 Vergleich der unterschiedlichen Materialfestigkeiten	67
7.2.6 Untersuchung für beidseits eingespannte Stütze	68
7.3 Traglastberechnungen für rechteckige Hohlkastenprofile – zentrischer Druck	72
7.3.1 Biegeknicken um y-Achse (starke Achse)	72
7.3.2 Biegeknicken um z-Achse (schwache Achse)	75
7.4 Vergleich zwischen rechteckigen und quadratischen Hohlkastenprofilen – zentrischer Druck	77
8. Traglastberechnungen (GMNIA) bei N+My	79
8.1 Allgemeines	79
8.2 Beidseits gelenkige Lagerung – Belastung N + My	81
8.2.1 Ergebnisse für Normalkraft und konstanter Momentenverlauf:	82

8.2.2	Ergebnisse für Normalkraft und dreiecksförmigen Momentenverlauf:.....	85
8.2.3	Ergebnisse für Normalkraft und durchschlagenden Momentenverlauf:	89
8.3	Stütze beidseits eingespannt.....	93
8.3.1	Ergebnisse für Normalkraft und konstanter Momentenverlauf – beidseitige Einspannung:	96
8.3.2	Ergebnisse für Normalkraft und dreiecksförmigen Momentenverlauf – beidseitige Einspannung	103
8.3.3	Ergebnisse für Normalkraft und durchschlagenden Momentenverlauf – beidseitige Einspannung	110
8.4	Begründung der hohen Momententragfähigkeit für Querschnitte der Klasse 4	117
9.	Tragverhalten eines Fachwerkträgers mit Querschnitten der Klasse 4 – Vergleich mit konventionellen Nachweisen	122
10.	Zusammenfassung, Schlussfolgerung und Ausblick	129
10.1	Zusammenfassung.....	129
10.2	Schlussfolgerung und Ausblick	135
TEIL III:	138
ANNEX A -	Verzeichnisse	138
ANNEX B -	Berechnungen	145
ANNEX C -	Inputfiles.....	154

TEIL I:

1. Einführung und Literaturstudie

1.1 Einleitung

Im Allgemeinen ist das vorrangige Ziel der Tragwerksplanung, mit möglichst geringem Materialeinsatz die Tragfähigkeit der geplanten Konstruktion zu gewährleisten.

Als besonders günstige Querschnittsform bieten sich für diese Anforderungen insbesondere bei großen Drucknormalkräften Hohlkastenquerschnitte an, da sie mit vergleichsweise geringer Querschnittsfläche, aufgrund des großen Abstands der Querschnittsteile zum Gesamtschwerpunkt, eine hohe Biegesteifigkeit aufweisen. Im Stahl- und Stahlverbundbrückenbau werden speziell dünnwandige aus Einzelblechen geschweißte Hohlkastenprofile für die Ausbildung der Bögen bei Bogenbrücken sowie für Gurte und Diagonalen von Hauptträgern in Fachwerkbauweise eingesetzt.

In den folgenden Abbildungen sind Beispiele für die Anwendung von geschweißten Hohlkastenquerschnitten dargestellt. Bei

Bild 1-1 handelt es sich um eine Stahlverbundbrücke mit Fachwerkträgern (Teil einer Schrägseilbrücke) sowie bei Bild 1-2 um eine Stabbogenbrücke mit untenliegender Fahrbahn.



Bild 1-1: Verbundbrücke mit Fachwerkträger als Hauptträger [22] [Foto: Miklos Szabo]



Bild 1-2: Stabbogenbrücke über die Amper [8]

Thema dieser Arbeit ist die Untersuchung des Tragverhaltens gerader Stäbe mit Hohlkastenquerschnitten, wie sie bei Fachwerkträgern im Brückenbau verwendet werden. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf Querschnitten mit dünnwandigen, schlanken Querschnittsteilen, die beulgefährdet sind.

In der Praxis stellt sich bei der Bemessung von Fachwerkträgern mit derartigen dünnwandigen, beulgefährdeten Querschnitten häufig die Frage nach der anzuwendenden Berechnungsmethode. Wegen der einfacheren rechnerischen Handhabbarkeit, erfolgte vor der Verbreitung von Softwareprogrammen für die Systemberechnung die Ermittlung der Schnittkräfte in Fachwerkträgern hauptsächlich über die Modellierung des statischen Systems als ideales Gelenkfachwerk, d.h. durch idealisierte Annahme der Knotenpunkte als Vollgelenke. Aufgrund der Modellierung mit Vollgelenken ergeben sich bei der statischen Berechnung in den jeweiligen Stäben des Tragwerks ausschließlich Druck- und Zugnormalkräfte.

Diese Annahme entspricht jedoch nicht dem tatsächlichen Tragverhalten, da die Knotenbildung überwiegend nicht in Form von Vollgelenken erfolgt. Für Fachwerkträger im Brückenbau mit geschweißten Hohlkastenprofilen weisen die Gurte im Vergleich zu den Diagonalen oft eine höhere Biegesteifigkeit auf, aufgrund dessen für die Nachweisführung der Diagonalen eher von günstigeren, eingespannten Lagerungsbedingungen ausgegangen werden könnte, was gerade bei Druckstäben einen gewissen Vorteil bei den Stabilitätsnachweisen (Biegeknicken) mit sich bringt. Bei Belastung der Fachwerkstrukturen kommt es allerdings auch zur Durchbiegung des Fachwerkträgers und daraus resultierend zu Verdrehungen der Stabachsen an den Knotenpunkten, wodurch insbesondere am Stabanfang und Stabende der Diagonalstäbe zu zusätzlichen Biegebeanspruchungen kommt. Die Durchbiegung des Fachwerkträgers führt auch zu zusätzlichen Biegebeanspruchungen in den Gurten.

Es stellt sich daher die Frage, ob zur „korrekten“ Nachweisführung der Gurte und Diagonalstäbe von Fachwerken diese stets auf Normalkraft und Momentenbeanspruchung nachgewiesen werden sollten, bzw. ob und unter welchen Bedingungen eine Nachweisführung nach der Gelenkfachwerktheorie konservativ und wirtschaftlich ist.

Besonders für Hohlkastenprofile mit Querschnitten der „Klasse 4“ liegen kaum Untersuchungen zu Druck- und Biegebeanspruchung in der Literatur vor. Unter Berücksichtigung der Grundvoraussetzung der Gelenkfachwerkstheorie, wonach die Endbiegemomente in den Stäben aufgrund des lokalen Plastizierens und der sich daraus ergebenden Rotationskapazität für die Stabbemessung (Knicken) vernachlässigt werden können, erscheint eine Klärung des Tragverhaltens - besonders bei den dünnwandigen Klasse 4 Querschnitten - von großer Bedeutung. Dies deshalb, da diese Querschnitte theoretisch über keine Rotationskapazität im plastischen Bereich verfügen.

Es stellt sich dementsprechend auch die Frage, mit welchem Verfahren bzw. mit welchen Randbedingungen und Schnittkräften druckbeanspruchte Diagonalen, bei Ausführung mit geschweißten Hohlkastenprofilen der Querschnittsklasse 4, auf Stabilität nachgewiesen werden sollten.

- Sind bei Anwendung des Ersatzstabverfahrens, mit Herauslösen der Diagonalstäbe aus dem Fachwerk, die Lagerungsbedingungen als Gelenklagerung oder Einspannung anzunehmen?
- Sind nur die Normalkräfte anzusetzen oder zusätzlich auch die Biegemomente infolge der biegesteifen Knoten?
- Ist durch die begrenzte Rotationsfähigkeit der Querschnitte der Klasse 4 überhaupt eine Einspannung als Lagerungsbedingung zulässig?
- Welche Knicklänge muss für den „herausgelösten“ Stab für die Nachweisführung auf Stabilitätsversagen angenommen werden?

Zum besseren Verständnis sind in Bild 1-4 und Bild 1-5 die elastisch berechneten Schnittkraftverläufe für einen Fachwerkträger aus geschweißten Hohlkastenquerschnitten dargestellt. Vereinfacht liegt eine alleinige vertikale Belastung in den Knotenpunkten vor. (siehe Bild 1-5) Für die Bemessung des Fachwerkträgers wird hier der jeweils zweitäußerste druckbeanspruchte Pfosten betrachtet, wobei sich die oben angeführte Frage der Wahl des Berechnungsverfahrens für den Nachweis auf Stabilität stellt.

1. Tragverhalten eines Fachwerkträgers mit Querschnitten der Klasse 4

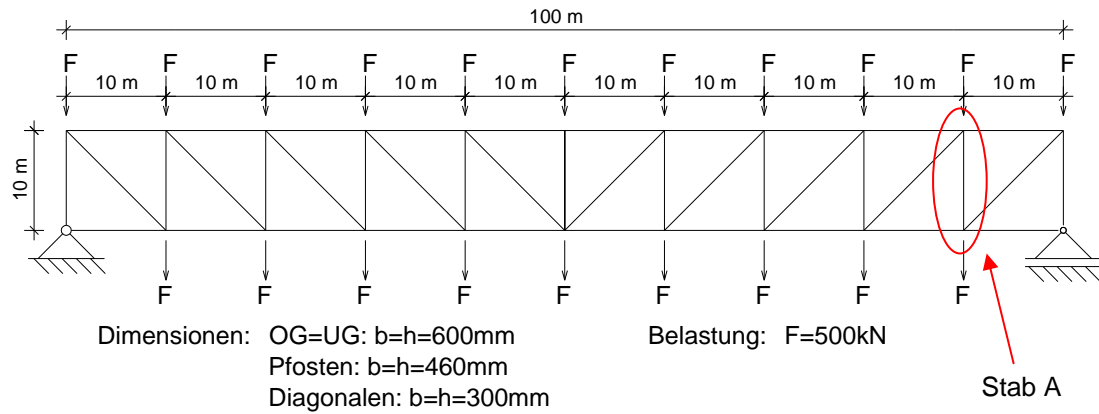


Bild 1-3: Fachwerkträger – Geometrie und Belastung

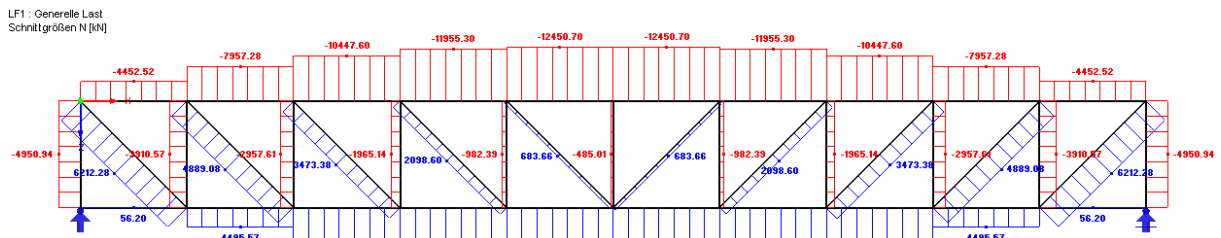


Bild 1-4: Elastische Schnittkraftberechnung eines Fachwerkträgers nach Bild 1-3: Normalkraftbild (N)

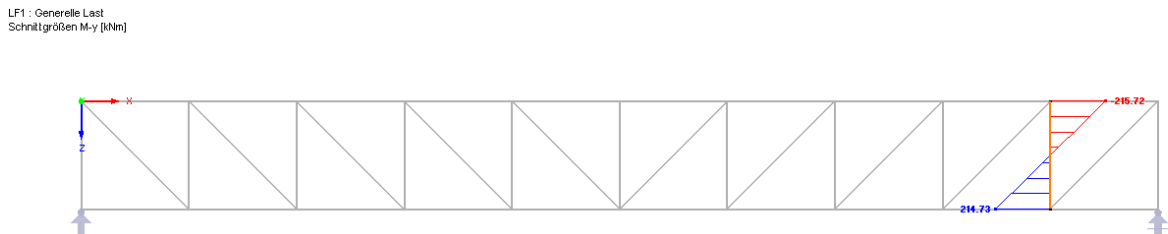


Bild 1-5: Elastische Schnittkraftberechnung eines Fachwerkträgers nach Bild 1-3: Momentenbeanspruchung des Pfostens nahe dem Auflager

1. Tragverhalten eines Fachwerkträgers mit Querschnitten der Klasse 4

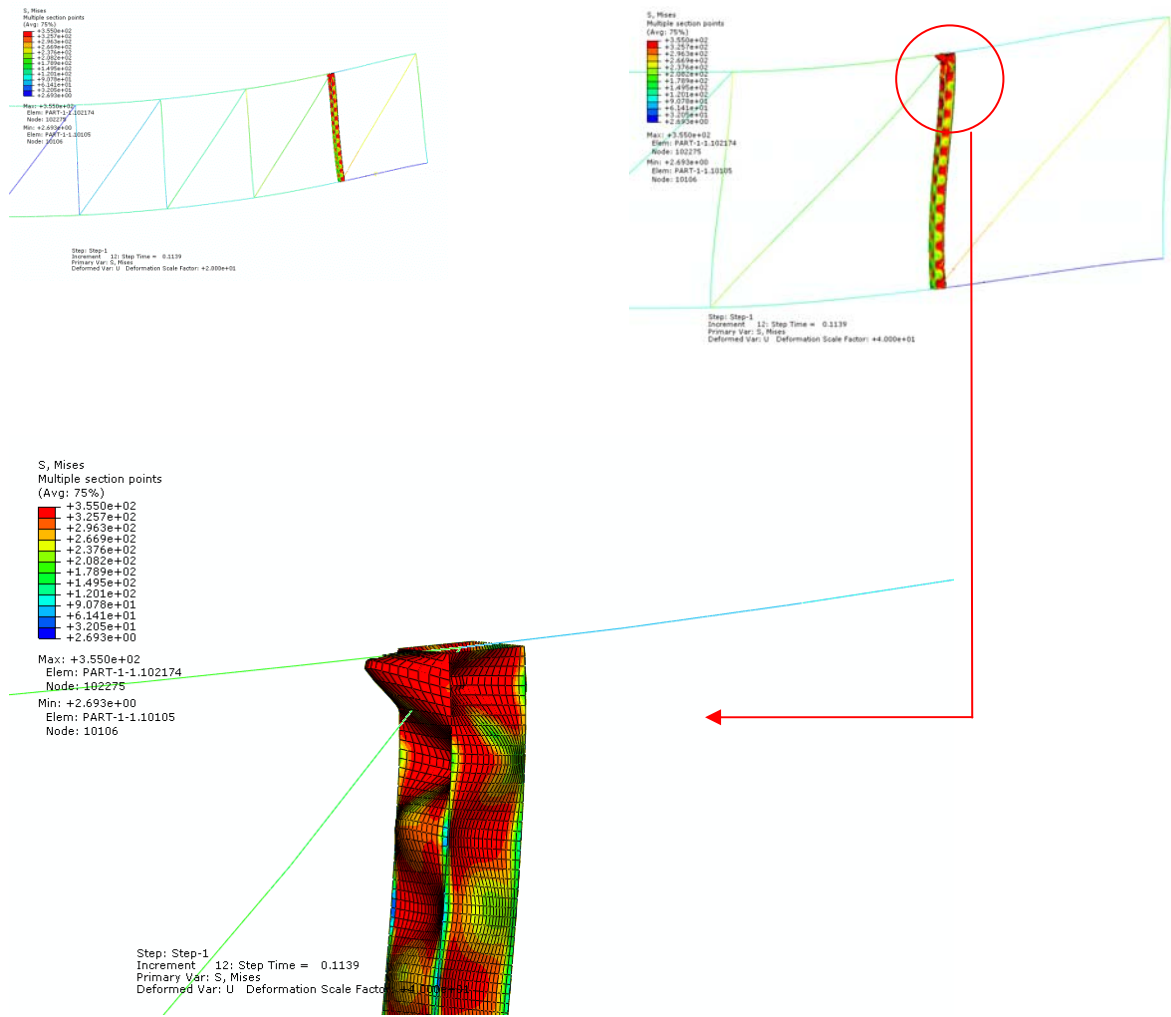


Bild 1-6: GMNIA-Berechnung des Fachwerkträgers - lokale Beanspruchung von Stab A

Wie das Bild 1-6 zeigt, liegt ein sehr komplexes Beanspruchungsbild für den dargestellten Pfostenstab (Stab A) vor, mit globalem Knickversagen, das mit lokalem Beulversagen am oberen Stabende einher geht.

Im Zuge dieser Arbeit wurde ermittelt, ob die in den Normenwerken (Eurocode) vorgeschlagenen Methoden der Bemessung der Druckstrebe mit der tatsächlichen Tragfähigkeit übereinstimmen bzw. welche Sicherheitsreserve durch die vereinfachte Art der Nachweise zu erwarten ist. Dies erfolgte durch Gegenüberstellung mit den Ergebnissen einer numerischen Traglast - bzw. „GMNIA“-Berechnung des kompletten Fachwerkträgers. (siehe Bild 1-6) Dabei bedeutet GMNIA-Analyse, eine geometrisch und materiell nichtlineare Analyse mit Imperfektionen.

Die Frage der tatsächlichen Tragfähigkeit stellt sich besonders auch für die Ermittlung der Resttragfähigkeit im Falle eines Auftretens von außergewöhnlichen Einwirkungen auf das Tragwerk, wie zum Beispiel infolge Brand, Explosion oder Erdbeben. Die Ergebnisse derartiger Traglastberechnungen zur Ermittlung der Tragfähigkeit sind hier exemplarisch in Bild 1-6 angedeutet. Die genauen Berechnungen zu dieser Fragestellung werden in Kapitel 9 detailliert ausgeführt. Vorwegnehmend kann gesagt werden, dass sich bei diesem Beispiel große Tragreserven gegenüber den Normnachweisen zeigten.

In der Arbeit erfolgt die schrittweise Erarbeitung und Untersuchung des Einflusses der einzelnen Tragmechanismen, welche die tatsächliche Tragfähigkeit eines Stabes mit geschweißten Hohlkastenquerschnitten der Klasse 4 unter Druck und einachsiger Biegung beeinflussen. Zuerst erfolgt die Bestimmung der Querschnittstragfähigkeit aufgrund des alleinigen lokalen Stabilitätsverhaltens (Beulen). Anschließend erfolgt die Ermittlung der Tragfähigkeit an Einzelstäben unter reiner Druckbeanspruchung (Überlagerung Knicken + Beulen). Schlussendlich wurden Stäbe mit Druck- und Biegebeanspruchung untersucht, die geschweißte dünnwandige Hohlkastenquerschnitte aufweisen.

Werden Hohlkastenquerschnitte auf alleinigen Druck oder Druck und Biegung beansprucht können prinzipiell (in Abhängigkeit der vorhandenen lokalen Plattenschlankheiten) zwei verschiedene Stabilitätsprobleme auftreten.

- Aufgrund der Druckspannungen im Stab kommt es zum seitlichen Ausweichen der Stabachse und infolge der resultierenden Verformungen zu zusätzlichen Biegebeanspruchungen, wodurch für den Stab bereits ein Versagen vor Erreichen der errechneten Querschnittstragfähigkeit erfolgt. Dieser Versagensfall wird als globales Stabilitätsversagen bezeichnet. Für Hohlkastenquerschnitte liegt immer

ein Biegeknickversagen vor (Biegedrillknickversagen wegen hoher Torsionssteifigkeit nicht maßgebend)

- Weiters kann für dünne Bleche unter Druckspannungen ein seitliches Ausweichen der Einzelbleche, das sogenannte Plattenbeulen, noch vor Erreichen der Streckgrenze auftreten. Man spricht auch vom lokalen Stabilitätsversagen.

Für die Bestimmung der Tragfähigkeit von nicht beulgefährdeten Hohlkastenprofilen (Querschnitte der Klasse 1 bis 3) unter Druckbeanspruchung ist nur das Auftreten von globalem Stabilitätsversagen durch Biegeknicken zu beachten. Der Nachweis erfolgt entweder durch Bestimmung eines Abminderungsfaktors für Biegeknicken auf Grundlage der europäischen Knickspannungslinien nach ÖNORM EN 1993-1-1 [1], oder durch einen Querschnittsnachweis mit Schnittkräften, die nach Theorie 2. Ordnung inkl. Imperfektionen berechnet wurden.

Während für die Nachweisführung von nicht beulgefährdeten Querschnittteilen unter Druckspannungen nur das Auftreten von globalem Stabilitätsversagen durch Biegeknicken zu beachten ist, muss für beulgefährdete Querschnitte (Querschnitte der Klasse 4) die Möglichkeit des Auftretens beider Stabilitätsprobleme berücksichtigt werden. Die Tragfähigkeit ist über die Interaktion der beiden Stabilitätsprobleme durch Anwendung von ÖNORM EN 1993-1-1 [1] und ÖNORM EN 1993-1-5 [2] nachzuweisen.

Dabei ist zuerst, über das Verfahren der wirksamen Breiten, die wirksame Querschnittsfläche nach ÖNORM EN 1993-1-5 [2] zu bestimmen - dies erfasst das lokale Beulversagen. Mit der reduzierten Querschnittsfläche und einer daraus folgenden Modifizierung der Stabschlankheit wird der Nachweis auf Biegeknicken und damit der Nachweis der Gesamttragfähigkeit durch Bestimmung des Abminderungsfaktors entsprechend der Knickspannungslinie nach ÖNORM EN 1993-1-1 [1] ermittelt.

1.2 Bisherige Untersuchungen

In diesem Unterkapitel erfolgt eine Übersicht über bereits durchgeführte Untersuchungen zum Thema dieser Arbeit, dem Gesamtstabilitätsverhalten geschweißter Kastenquerschnitte unter Druck und Biegung.

Zum globalen Stabilitätsversagen für verschiedene Beanspruchungsarten, wie zum Beispiel reine Druckbeanspruchung oder gleichzeitige Druck- und Biegebeanspruchungen, wurden bereits viele Untersuchungen durchgeführt. Das Tragverhalten für nur global stabilitätsgefährdete Querschnitte, wie I-Profile ist relativ gut erforscht. (vgl. [16] [17] [18])

Auch das lokale Stabilitätsproblem des alleinigen Ausbeulens dünnwandiger Querschnittsteile unter Druckbelastung ist für unterschiedliche Schlankheitsgrade und Beanspruchungsarten gut erforscht. Bezüglich der Tragfähigkeit bei Plattenbeulen ist besonders auf die –experimentell ermittelte- Winter-Kurve zu verweisen, die auch der Nachweisführung in ÖNORM EN 1993-1-5 für plattenartige Bauteile zu Grunde gelegt wird. (vgl. [2] [16] [17])

Zur Interaktion dieser beiden Stabilitätsversagen für geschweißte Hohlkastenquerschnitte der Klasse 4, bei Druck- und Biegebeanspruchung, wie sie z.B. bei Stäben in Fachwerkkonstruktionen vorzufinden sind, wurden bisher keine ausreichenden Untersuchungen durchgeführt.

In [21] erfolgten Untersuchungen zur Interaktion von lokalem und globalem Stabilitätsverhalten für geschweißte Hohlkastenprofile. Daraus wurde die sogenannte Q-Faktor Methode entwickelt. Die Berechnung der Tragfähigkeit erfolgt hierbei durch Abminderung über den Reduktionsfaktor Q , der aus den vorhandenen Querschnittsabmessungen des verwendeten Hohlkastenprofils bestimmt wird.

In [9] wurden Untersuchungen des Gesamtstabilitätsversagens an geschweißten Hohlkastenquerschnitten unter zentrischer Druckbeanspruchung untersucht. Das Hauptaugenmerk lag in dieser Arbeit auf der Untersuchung der Interaktion von lokalem und globalem Stabilitätsversagen unter reiner Druckbeanspruchung für Querschnitte der Klasse 4. Hierbei wurden Traglastberechnungen durchgeführt und diese anschließend mit den zulässigen Werten des Eurocodes (EC 3) verglichen.

Es wurde das Nachweisverfahren nach Eurocode schrittweise durchleuchtet und anschließend festgestellt, dass die Nachweisführung nach EC 3 zu unbefriedigenden

Ergebnissen führt. Es wird angeführt, dass durch Berücksichtigung struktureller und lokaler geometrischer Imperfektionen mit dem Verfahren der wirksamen Breiten für reines lokales Stabilitätsversagen gute Ergebnisse erzielt werden. Die Nachweisführung bei alleinigen globalen Stabilitätsversagen mit den europäischen Knickspannungslinien als Grundlage, berücksichtigt ebenfalls strukturelle und geometrische Imperfektionen zur Berechnung der zulässigen Traglasten. Bei Interaktion der beiden Stabilitätsfälle wird somit nach Eurocode der Einfluss der Imperfektionen doppelt berücksichtigt. Das führt zu konservativen Ergebnissen in den Berechnungen der zulässigen Traglasten.

Zusätzlich zur Berücksichtigung der „zweifachen Imperfektionen“ wird angeführt, dass für die Interaktion der beiden Stabilitätsfälle das mechanische Modell nicht konsequent durchgezogen wird. Für den durch Ausbeulen reduzierten Querschnitt erfolgt zwar in der Nachweisführung die Reduzierung der Querschnittsfläche, jedoch wird die in der Schlankheit berücksichtigte Steifigkeit weiterhin mit dem Bruttowert des Trägheitsmomentes verwendet.

Deshalb wird ein Vorschlag der Modifizierung des Nachweises zur Interaktion der beiden Stabilitätsversagen angeführt. Es wird vorgeschlagen nach Berechnung der effektiven Querschnittswerte von geschweißten Hohlkastenquerschnitten der Klasse 4, für den globalen Stabilitätsnachweis die Definition der globalen bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}$ mit einem Modifikationsbeiwert β_{ges} , unter Berücksichtigung der effektiven Querschnittswerte (A_{eff} und I_{eff}) zu ergänzen. Des Weiteren wird vorgeschlagen den Nachweis mit dem Imperfektionsbeiwert α nach Knickspannungslinie (KSPL) a zu führen. (aktuell im Eurocode nach KSPL b)

In [14] wurden Untersuchungen zum Thema des Stabilitätsverhaltens unterschiedlicher Querschnittsformen durchgeführt, wobei unter anderem auch Aussagen über das Verhalten von RHS-Profilen angeführt wurden. Die Querschnittsgeometrien der untersuchten geschweißten Hohlkastenprofile und gewalzten RHS-Profilen, unterscheiden sich kaum. Dementsprechend können die Ergebnisse für RHS-Profile auch für geschweißte Hohlkastenprofile angewandt werden, die besagen, dass für die Berechnung der Tragfähigkeit der Hohlkastenprofile mit den verwendeten Seitenverhältnissen der Querschnitte von 1:1 und 1:2 keine Verdrillung in der Nachweisführung berücksichtigt werden muss. Das bedeutet, dass Biegedrillknicken als Versagensform ausgeschlossen werden kann.

1.3 Zum Stabilitätsverhalten

Bei druckbeanspruchten Bauteilen kommt es aufgrund der Abtriebswirkung der vorhandenen Druckspannungen zu einem Ausweichen senkrecht zur Bauteilachse. Die korrekte Berechnung der tatsächlich auftretenden Spannungen muss daher am verformten System ermittelt werden. Im Gegensatz zur Berechnung am unverformten System (Theorie 1.Ordnung) ist aufgrund der Berechnung am verformten System (Theorie 2.Ordnung) keine Proportionalität zwischen der äußeren Belastung und den daraus resultierenden Beanspruchungen am Querschnitt gegeben. Es kommt zu einer überproportionalen Steigerung der Spannungen und infolgedessen zu einem Versagen des stabilitätsgefährdeten Bauteils vor Erreichen der eigentlichen Querschnittstragfähigkeit. (vgl. [17])

Des Weiteren müssen im Stahlbau traglastmindernde Einflüsse aus strukturellen (Eigenspannungen, Fließgrenzenstreuungen) und geometrischen Imperfektionen (Vorkrümmungen der Stabachse, lokale Vorverformungen von Querschnittsteilen, Schiefstellungen der Stabachse, usw.) für die Ermittlung der tatsächlichen Tragfähigkeiten von Bauteilen berücksichtigt werden.

Als mögliche Stabilitätsfälle können im Stahlbau, wie in [11] beschrieben und in Bild 1-6 dargestellt, unterschieden werden: a.) globales Stabversagen (Biegeknicken, Biegedrillknicken, Drillknicken, Kippen) sowie, b.) auf lokaler Ebene das Ausbeulen von dünnen Querschnittsteilen (Platten- oder Schalenbeulen) auftreten.

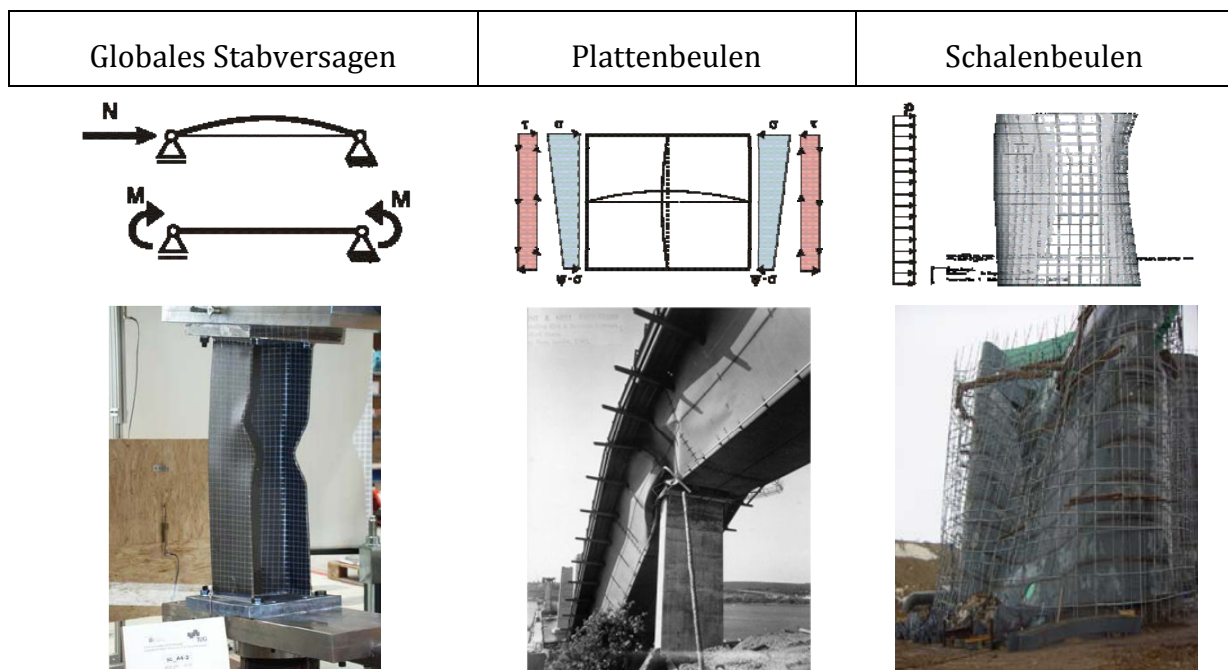


Bild 1-7: Übersicht von Stabilitätsproblemen im Stahlbau

Der Unterschied zwischen den Stabilitätsfällen Biegeknicken und Drillknicken/Biegedrillknicken besteht darin, dass für Stäbe unter Druckbeanspruchung oder Druck- und Biegebeanspruchung bei reinem Biegeknicken das Ausweichen alleine um die starke Achse (y-Achse) oder um die schwache Achse (z-Achse) erfolgt. Hingegen spricht man bei alleiniger Verdrehung der Stabachse bei reiner Druckbeanspruchung vom Drillknicken. Beim Biegedrillknicken liegt ein Ausknicken um die schwache Achse (z-Achse) und gleichzeitiges Verdrehen vor.

Die Art des Auftretens der oben genannten Stabilitätsfälle hängt von der Gestaltung des Querschnittes, der Beanspruchung sowie der Abstützung des Stabes ab. Im Gegensatz zu offenen Querschnitten (z.B.: I-Profil, L-Profil,...), tritt bei geschlossenen, wie die in dieser Arbeit behandelten geschweißten Hohlkastenprofile, bedingt durch die hohe Torsionssteifigkeit, kein Biegedrillknickversagen auf. (vgl. [11])

Zusätzlich zu den angeführten Stabilitätsfällen auf globaler Ebene, kann auf lokaler Ebene für Querschnittsteile unter Druckbeanspruchung mit großem Verhältnis von Blechbreite zu Blechdicke ein seitliches Ausbeulen dieser Querschnittsteile auftreten. Dieser Stabilitätsfall tritt demnach weitgehend unabhängig von der Querschnittsform (geschlossen oder offen) auf und hängt nur von der sogenannten Plattenschlankheit (c/t Verhältnisse) der Einzelbleche sowie deren Lagerungs- und Beanspruchungsverhältnisse ab.

Dementsprechend kann bei Einzelstäben mit geschweißten Hohlkastenquerschnitten unter Druck- und Biegebeanspruchung, a.) ein globales Stabilitätsversagen durch Biegeknicken sowie, b.) ein lokales Stabilitätsversagen durch Plattenbeulen der Einzelbleche, sowie c.) ein gleichzeitiges Auftreten beider Stabilitätslastfälle, eintreten.

2. Ziel und Umfang der Arbeit

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist das Untersuchen des Gesamtstabilitätsverhaltens von geschweißten Hohlkastenprofilen unter Druck- und Biegebeanspruchung.

Während sich für Hohlkastenquerschnitte mit kleinen Plattenschlankheiten der einzelnen Querschnittsteile das Gesamtstabilitätsverhalten auf reines Biegeknicken beschränkt, muss für Kastenquerschnitte mit großen Schlankheiten der Querschnittsteile das mögliche Auftreten und Zusammenwirken von Stabilitätsfällen auf globaler Ebene in Form des Biegeknickens des gesamten Stabes sowie auf lokaler Ebene durch Ausbeulen der einzelnen Querschnittsteile beachtet werden. Besonderes Interesse galt in dieser Arbeit dem Tragverhalten von beulgefährdeten Querschnitten der Querschnittsklasse 4 unter Druck- und Biegebeanspruchung für die eine Interaktion beider Stabilitätslastfälle vorliegt und dem anschließenden Vergleich der ermittelten Traglasten mit den zulässigen Traglasten nach Eurocode [1] [2]. In der Literatur sind für dieses Thema kaum Untersuchungen vorhanden.

Die Traglastberechnungen wurden hauptsächlich in Hinblick auf die Anwendung bei Fachwerkträgern mit geschweißten Hohlkastenprofilen, primär im Brückenbau, durchgeführt.

Die Ausbildung der Querschnitte (Breite bzw. Höhe) erfolgt für große Spannweiten der Fachwerkträger und große Stablängen. Dabei werden die Gurte im Vergleich zu den Diagonalen meist viel steifer ausgeführt (große Höhe des Querschnitts), wodurch für die Diagonalen eine Einspannwirkung an den Stabenden erzielt wird.

Nach der bereits erfolgten Einleitung mit einer Kurzbeschreibung des Themas sowie einer Übersicht über bisherige Arbeiten zu diesem Thema in **Kapitel 1**, folgt nachfolgend in **Kapitel 3** eine Darstellung der Nachweisführung für druckbeanspruchte Einzelstäbe bzw. druck- und biegebeanspruchte Einzelstäbe nach ÖNORM EN 1993-1-1 [1] und ÖNORM EN 1993-1-5 [2].

Zusätzlich zu einer kurzen Einführung in die Methode der finiten Elemente wird in **Kapitel 4** die übersichtliche Darstellung der Grundlagen sowie der Methodik für die Durchführung der numerischen Traglastanalysen mit Hilfe des Software-Pakets ABAQUS angeführt.

In Teil II wurden die durchgeführten Traglastberechnungen beschrieben und analysiert. Als Grundlage zur Untersuchung des Gesamtstabilitätsverhaltens geschweißter Kastenquerschnitte unter Druck und Biegung wurden in **Kapitel 5** Traglastberechnungen mit alleinigen lokalen Stabilitätsversagen durchgeführt. Hierbei

wurden Analysen an (global) sehr gedrungeenen/kurzen Stäben mit verschiedenen großen Plattenschlankheitsgraden und Imperfektionsamplituden durchgeführt und deren Auswirkungen auf die Tragfähigkeit bei Druckbeanspruchung bzw. Druck- und Biegebeanspruchung ermittelt.

In dieser Arbeit erfolgen Traglastberechnungen an Stützen mit quadratischen und rechteckigen Hohlkastenprofilen aller Querschnittsklassen und unterschiedlichen Längen bzw. globaler Schlankheitsgrade. Die Übersicht über die Wahl der untersuchten Querschnittsgeometrien sowie der zugehörigen Stablängen ist in **Kapitel 6** ersichtlich.

In **Kapitel 7** sind die Ergebnisse der Traglastberechnungen an Einzelstäben für reine Druckbeanspruchung dargestellt. Diese erfolgten als Grundlage für die in Kapitel 8 untersuchten Einzelstäbe mit Druck- und zusätzlicher Biegebeanspruchung. Es werden Vergleiche der ermittelten Traglasten für unterschiedliche Werkstoffgesetze geführt. Weiters folgt eine Gegenüberstellung der ermittelten Tragfähigkeiten von quadratischen und rechteckigen Hohlkastenprofilen bei Knicken um die schwache bzw. starke Achse. Alle durchgeführten Traglastberechnungen werden den Traglasten nach Eurocode gegenübergestellt.

Wie schon angeführt, folgen in **Kapitel 8** numerische Traglastberechnungen an Stäben mit Druck- und Biegebeanspruchung. Dabei werden Analysen für drei unterschiedliche Lastfälle mit je einer zentrisch wirkenden Druckkraft und unterschiedlichen Momentenverläufen an Einzelstäben mit beidseitig gelenkiger Lagerung bzw. mit beidseitiger Einspannung als Lagerungsbedingung durchgeführt und mit den zulässigen Traglasten nach Eurocode verglichen.

In **Kapitel 9** wird für einen bestimmten Fachwerkträger aus geschweißten Hohlkastenprofilen die Systemberechnung mit gelenkigen sowie biegesteifen Knoten durchgeführt. Um die Fragestellung der korrekten Nachweisführung für die Bemessung der Druckstreben zu untersuchen, werden diesbezüglich mehrere Varianten untersucht. Einerseits in Hinblick der erfassten Schnittkräfte (nur Normalkraft bzw. Normalkraft + Momentenbeanspruchung) und andererseits bezüglich der zutreffenden Knicklängen. Zusätzlich erfolgt die Ermittlung der tatsächlichen Tragfähigkeit der Druckstreben mit einer GMNIA-Berechnung des Fachwerkträgers. Anschließend wird anhand der ermittelten Tragfähigkeit diskutiert, mit welchen Knicklängen und Schnittkräften die Nachweisführung für Stäbe mit geschweißten Hohlkastenprofilen der Klasse 4 sinnvollerweise erfolgen sollte.

Abschließend werden in **Kapitel 10** nach einer Kurzzusammenfassung der Arbeit, die Schlussfolgerungen dieser Arbeit erläutert.

3. Nachweisverfahren nach Eurocode - ÖNORM EN 1993-1-1 und ÖNORM EN 1993-1-5

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Bemessungsformeln nach ÖNORM EN 1993-1-1 [1] und ÖNORM EN 1993-1-5 [2]. Auf Normalkraft (Druck) bzw. Normalkraft + Moment (Druck und Biegung) beanspruchte Bauteile können mit den Regeln in ÖNORM EN 1993-1-1 nachgewiesen werden. Für beulgefährdete Querschnitte (Querschnitte der Klasse 4) ist zusätzlich noch der Effekt des Plattenbeulens nach ÖNORM EN 1993-1-5 mitzuerfassen.

In diesem Kapitel ist die Vorgangsweise für die Bemessung für stabilitätsgefährdete Einzelstäbe nach den eben genannten Eurocodes, die im Verlauf der Arbeit bei gemeinsamer Nennung als EC 3 bezeichnet werden, erläutert.

3.1 Klassifizierung der Querschnitte

Laut EC 3 erfolgt vor dem eigentlichen Nachweis der Tragfähigkeit die Einteilung der Querschnitte bzw. Querschnittsteile in vier unterschiedliche Querschnittsklassen. Diese sind abhängig vom jeweiligen Verhältnis der Querschnittsbreite zur -dicke, der Abstützung sowie der Spannungsverteilung des Querschnittsteils und der Materialfestigkeit.

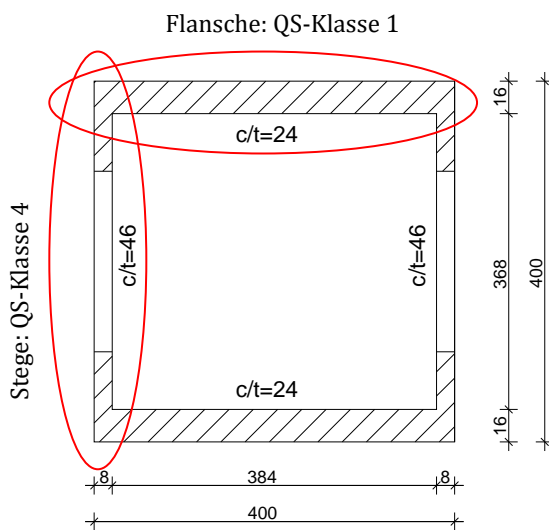
Unterschiedliche Querschnittsklassen werden definiert, da unterschiedliches Verhalten unter Druckspannungen vorliegt. Während bei Querschnittsklasse 1 und 2 eine plastische Spannungsverteilung über den Querschnitt angenommen werden kann, wird bei Querschnittsklasse 3 nur noch von einer elastischen Spannungsverteilung über den Querschnitt ausgegangen. Bei Querschnitten der Klasse 4 wird von einer reduzierten wirksamen Querschnittsfläche ausgegangen bedingt durch örtliches Beulversagen. (vgl. [11])

Die Bestimmung der Querschnittsklasse des Gesamtquerschnittes erfolgt anhand der vorherigen isolierten Klassifizierung der einzelnen Querschnittsteile des zusammengesetzten Querschnittes. Der maßgebende Querschnittsteil ist jener, welcher der höchsten Querschnittsklasse zugeteilt wird und dementsprechend auch die Querschnittsklasse des Gesamtquerschnittes bestimmt. Für die Klassifizierung darf der Spannungszustand am Querschnitt durch Überlagern der Anteile aus Normalkraft und Momentenbeanspruchung ermittelt werden.

Als Beispiel wird an dieser Stelle ein nur druckbeanspruchtes geschweißtes Hohlprofil mit unterschiedlichen Blechdicken angeführt, das sich aus dünnen Stegblechen der Querschnittsklasse 4, sowie aus dicken Flanschblechen, die der Querschnittsklasse 1 zuzuordnen sind, zusammensetzt. Für den Gesamtquerschnitt folgt die Einteilung als Querschnitt der Klasse 4. (siehe

⇒ Gesamtquerschnitt: → Querschnittsklasse 4

Bild 3-1) Die Grenzwerte der Querschnittsklassifizierung sind in Bild 3-2 ersichtlich.



Material: Baustahl S355

Geometrie: Steg $c/t=24$, Flansch $c/t=46$

Flansch: → Querschnittsklasse 1

$$c/t = \underline{24} \leq 33 \cdot \varepsilon = 33 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = \underline{26,8}$$

Steg: → Querschnittsklasse 4

$$c/t = \underline{46} > 42 \cdot \varepsilon = 42 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}} = \underline{34,2}$$

⇒ Gesamtquerschnitt: → Querschnittsklasse 4

Bild 3-1: Beispiel für Klassifizierung eines nur druckbeanspruchten Querschnittes

In der folgenden Abbildung (Bild 3-2) sind die Grenzwerte der Klassifizierung für beidseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile nach ÖNORM EN 1993-1-5 [2] dargestellt, die auch dem

⇒ Gesamtquerschnitt: → Querschnittsklasse 4

Bild 3-1 zugrunde liegen.

Beidseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

Klasse	auf Biegung beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile			
1	$clt \leq 72\varepsilon$	$clt \leq 33\varepsilon$	für $\alpha > 0,5$: $clt \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $clt \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$clt \leq 83\varepsilon$	$clt \leq 38\varepsilon$	für $\alpha > 0,5$: $clt \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $clt \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
3	$clt \leq 124\varepsilon$	$clt \leq 42\varepsilon$	für $\psi > -1$: $clt \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ für $\psi \leq -1^a$: $clt \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

^a Es gilt $\psi \leq -1$ falls entweder die Druckspannungen $\sigma \leq f_y$ oder die Dehnungen infolge Zug $\varepsilon_y > \frac{f_y}{E}$ sind.

Bild 3-2: Definition der Querschnittsklassen nach ÖNORM EN 1993-1-1 [1]

Es sei erwähnt, dass hier die Grenzwerte der Querschnittsklassifizierung nach dem aktuellen Stand der ÖNORM EN 1993-1-1 [1] abgebildet wurde.

Für die Traglastberechnungen in dieser Arbeit werden jedoch die vorgeschlagenen Grenzwerte nach [13] verwendet. (siehe Kapitel 5)

3.2 Lokales Stabilitätsversagen bei beulgefährdeten Querschnitten

Wie schon bei der Darstellung der Querschnittsklassen beschrieben, tritt das (elastische) Ausbeulen eines Querschnittsteiles vor Erreichen der Streckgrenze auf und hängt vom vorhandenen Verhältnis von Breite zu Dicke, der Spannungsverteilung und den Lagerungsbedingungen dieses Querschnittsteiles ab sowie von der Materialfestigkeit. (siehe auch Kapitel 3.1) Beulgefährdete Querschnitte werden der Querschnittsklasse 4 zugeordnet.

In alten nationalen Normenwerken wurde hauptsächlich das Verfahren der „reduzierten Spannungen“ verwendet, bei welchem am Bruttoquerschnitt berechnete Spannungen mit einer –gegenüber der Fließgrenze- reduzierten „Beulspannung“ verglichen werden, welche die Tragfähigkeit im Beulfall wiedergibt. Dieses konservative Verfahren ist nach Einführung der Eurocodes zwar noch gültig, jedoch liegt der Schwerpunkt der ÖNORM EN 1993-1-5 [2] beim Verfahren der wirksamen Breiten, wodurch in Zukunft davon auszugehen ist, dass dieses hauptsächlich Verwendung finden wird. (vgl. [9])

Durch eine im Schwerpunkt wirkende Drucknormalkraft und daraus resultierender konstanter Druckbeanspruchung am gesamten Querschnitt, ergeben sich nur bei Querschnitten mit identen Querschnittsteilen (quadratisches Hohlprofil) für die beiden Berechnungsverfahren idente Ergebnisse. Hingegen entstehen bei anderen Querschnitten sowie bei Beanspruchung durch Druck- und Biegebeanspruchung Unterschiede. Während beim Verfahren der „reduzierten Spannungen“ quasi alle Spannungen am Gesamtquerschnitt reduziert werden, erfolgt mit dem Verfahren der wirksamen Breiten nur eine Abminderung der tatsächlich ausbeulenden Teilbleche des Gesamtquerschnittes. Somit werden mit dem Verfahren der wirksamen Breiten höhere Gesamttragfähigkeiten als mit dem Verfahren der reduzierten Spannungen erreicht.

Das Verfahren der effektiven Breiten nach ÖNORM EN 1995-1-5 [2]

Für aus einzelnen Blechen zusammengesetzte, sowohl gewalzte als auch geschweißte, Querschnitte wie z.B. ein Hohlkastenprofil wird der Gesamtquerschnitt für die Berechnung in die einzelnen Querschnittsteile unterteilt und an diesen das Verfahren der effektiven Breite angewendet.

Obwohl tatsächlich ein gewisser Grad an gegenseitiger Einspannung zwischen den Querschnittsteilen entsteht, wird die Lagerung der Einzelfelder als gelenkig angenommen, wie z.B. auch bei I-Trägern beim Anschluss von dünnen Stegblechen an wesentlich dickere Flanschbleche. Auch bei den in dieser Arbeit untersuchten geschweißten Hohlkastenquerschnitten mit konstanter Dicke entsteht durch die steife Verbindung von Steg- und Gurtblech eine gegenseitige Beeinflussung des Beulverhaltens zwischen den einzelnen Blechen. Die mögliche Einspannwirkung des stärker

beulgefährdeten Querschnittsteiles in die benachbarten Teile bzw. gegenseitige Beeinflussung wird für das Verfahren der effektiven Breiten üblicherweise nicht berücksichtigt.

Dem Nachweis der Tragfähigkeit nach EN ÖNORM 1993-1-1 [1] liegt nicht die Theorie des elastischen Plattenbeulens zu Grunde, sondern es wird die Ermittlung der zulässigen erhöhten Tragfähigkeit anhand der sogenannten „Winter-Kurve“ bestimmt. Nach [16] wurde die Richtigkeit der „Winter-Kurve“ durch Untersuchungen ausreichend bestätigt.

In Bild 3-3 sind die Ergebnisse von Traglastversuchen an unversteiften und versteiften Platten dargestellt und der „Winter-Kurve“ gegenübergestellt. Man erkennt, dass diese – in einer für den konstruktiven Ingenieurbau eher unüblichen Weise- eher einen Mittelwert der tatsächlichen Tragfähigkeiten darstellt als einen unteren Fraktilwert.

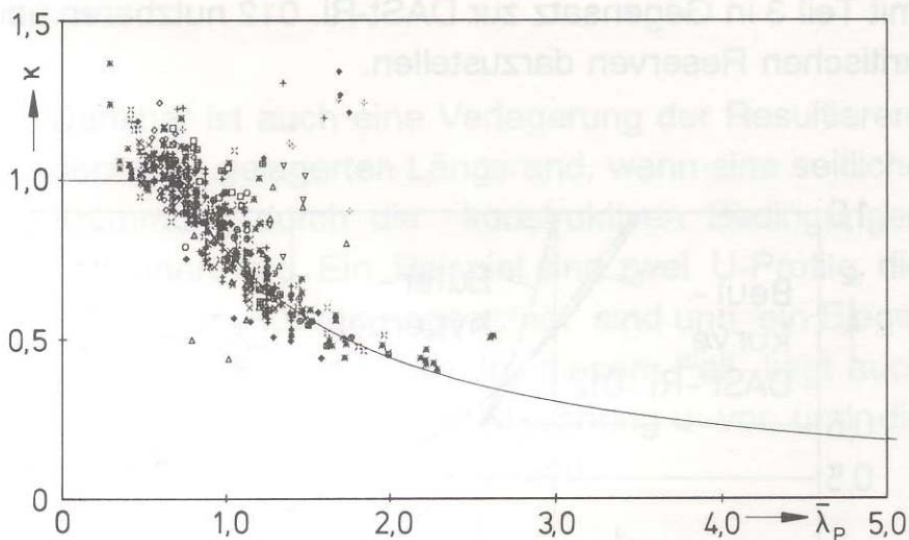


Bild 3-3: Versuchsergebnisse für die Bestimmung der „Winter-Kurve“ [16]

Die mathematische Funktion der „Winter-Kurve“ ist in Gleichung (3.1) ersichtlich:

$$\frac{\sigma_u}{f_y} = \frac{1}{\lambda_p} \cdot \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \quad (3.1)$$

In den folgenden Absätzen wird der Beulnachweis mittels des Verfahrens der wirksamen Breiten nach ÖNORM EN 1993-1-5 [2] beschrieben, jedoch nur jene Abschnitte, die für den Nachweis von geschweißten Hohlkastenprofilen unter Druck- und Biegebeanspruchung maßgebend sind.

Wie in Gleichung (3.2) angeführt, erfolgt die Berechnung der resultierenden wirksamen Fläche $A_{c,eff}$ durch Addition der Anteile der einzelnen Querschnittsteile ($A_{c,eff,i}$). $A_{c,eff,i}$ ergibt sich durch mittels Multiplikation der jeweiligen Bruttofläche $A_{c,i}$ mit einem Abminderungsfaktor ρ_i . Der Abminderungsfaktor ρ_i reduziert dabei die Bruttofläche auf die effektive Fläche, jene Fläche die nach Ausfall durch Plattenbeulen noch für die Berechnung der Tragfähigkeit angesetzt werden kann.

$$A_{c,eff} = \sum_i A_{eff,i} = \sum_i \varphi_i \cdot A_i \quad (3.2)$$

Für beidseitig gestützte Querschnittsteile errechnet sich der Abminderungsfaktor wie folgt ($\varphi_i = \varphi$): Dabei stellt ψ das Spannungsverhältnis am Querschnittsteil dar.

$$\rho = 1,0 \quad \text{für } \bar{\lambda} \leq 0,673 \quad (3.3)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,55 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad (3.4)$$

$$\text{Mit: } \bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (3.6)$$

Folgende Formelzeichen wurden für die Formeln (3.3) bis (3.6) verwendet:

ψ Spannungsverhältnis des Querschnittsteils

\bar{b}maßgebende Breite des Beulfeldes (siehe auch QS-Klassifizierung in Bild 3-2: $c = \bar{b}$)

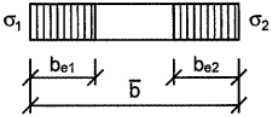
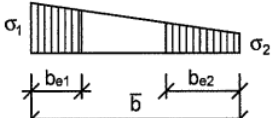
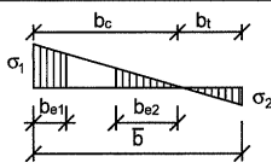
tBlechdicke

k_σ Beulwert in Abhängigkeit vom Spannungsverhältnis ψ und den Lagerungsbedingungen nach Tabelle 3-1

σ_{cr}kritische elastische Beulspannung

In Tabelle 3-1 ist ein Überblick über die Berechnung des Beulwerts k_{σ} , des daraus resultierenden Abminderungsfaktors ρ sowie der Aufteilung der wirksamen Breiten der Einzelbleche, je nach auftretender Spannungsverteilung, für zweiseitig gestützte Querschnittsteile dargestellt.

Tabelle 3-1: Wirksame Breiten und Beulwerte für zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile [2]

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

Bei Anwendung der Formeln (3.2) bis (3.6) sowie Tabelle 3-1 ergeben sich für geschweißte quadratische Hohlkastenprofile mit konstanter Wanddicke je nach vorhandener Spannungsverteilung über den Querschnitt folgende wirksame Querschnitte: (siehe Bild 3-4 und Bild 3-5)

Druckbeanspruchung:

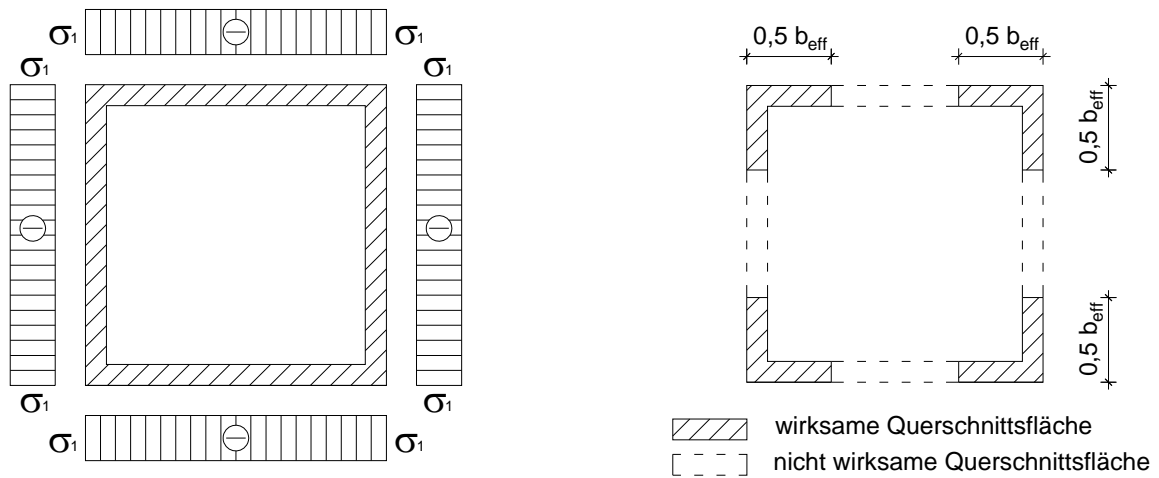


Bild 3-4: wirksame Querschnittsfläche für quadratischen Hohlkasten unter konstanter Druckbeanspruchung, a) Bruttoquerschnitt mit Spannungsverteilung, b) wirksame Querschnittsfläche

Biegebeanspruchung:

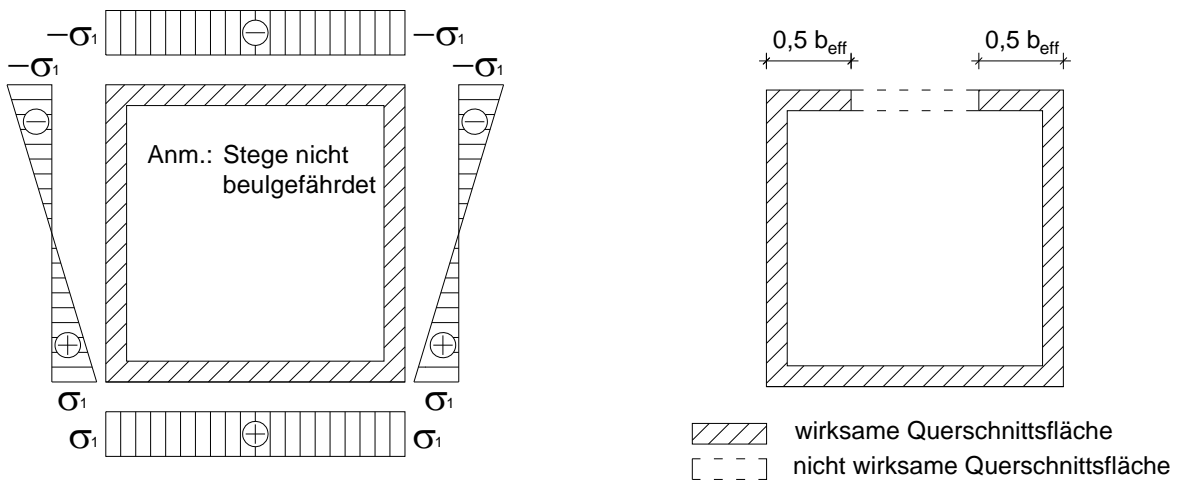


Bild 3-5: wirksame Querschnittsfläche für geschweißten Hohlkasten unter Druck- und Biegebeanspruchung, a) Bruttoquerschnitt mit Spannungsverteilung, b) wirksame Querschnittsfläche

Zu Bild 3-5 ist zu sagen, dass hier keine Beulgefährdung des Steges vorliegt. Aufgrund anderer Spannungsverteilungen mit höheren Druckspannungsanteilen in den Stegen oder sehr schlanken Stegen, kann es sehr wohl auch zu einer Reduzierung der Stegquerschnitte kommen.

3.3 Globales Stabilitätsversagen bei Druckbeanspruchung (N)

Die Hintergründe der Bemessungsformeln der ÖNORM EN 1993-1-1 können über die Differentialgleichung der Biegelinie am gelenkig gelagerten Einzelstab hergeleitet werden. Die detaillierte mathematische Herleitung der Bemessungsformeln ist in Annex B ersichtlich.

Bei der Nachweisführung nach ÖNORM EN 1993-1-5 wird zwischen verdrehweichen Stäben, für die ein Ausweichen aufgrund Biegedrillknickversagens eintritt, und verdrehsteifen Stäben, die durch reines Biegeknicken versagen, unterschieden. Bei geschweißten Hohlkastenprofilen handelt es sich um verdrehsteife Profile, weshalb für diese nur ein Versagen durch reines Biegeknicken auftritt. (vgl. [20])

Grundsätzlich unterscheidet der EC 3, je nach Querschnittsklasse, zwei verschiedene Berechnungsformeln für druckbeanspruchte, verdrehsteife Einzelstäbe. Während für die Querschnittsklassen 1-3 von einem vollplastizierten Querschnitt ausgegangen wird, muss bei Querschnitten der Klasse 4, zufolge Plattenbeulen, eine Abminderung auf die wirksamen Querschnittsflächen berücksichtigt werden.

Die Tragfähigkeit eines auf Druck beanspruchten Einzelstabes muss im Allgemeinen folgende Gleichung erfüllen:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.7)$$

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit $N_{b,Rd}$ für druckbeanspruchte Bauteile ermittelt sich je nach Querschnittsklasse wie folgt:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad \text{für Querschnitte der Klasse 1, 2 und 3} \quad (3.8)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad \text{für Querschnitte der Klasse 4} \quad (3.9)$$

Zu beachten ist, dass der Abminderungsfaktor χ in Gleichung (3.8) und (3.9) differiert infolge unterschiedlicher Formulierung der Schlankheit $\bar{\lambda}$ (vgl. Gleichung (3.12) und (3.13))

Um der Eigenschaft der Querschnittsklasse 4, des Ausbeulens vor Erreichen der Streckgrenze, Rechnung zu tragen, wird eine Unterscheidung bei der Berechnung des Tragwiderstands von Bauteilen mit Querschnitten dieser Klasse gemacht. Im Gegensatz zum Nachweis für die restlichen Querschnittsklassen, kann für die Berechnung des Tragwiderstands nur die „nicht ausgebeulte Querschnittfläche“ berücksichtigt werden.

Die Berechnung darf nach der Methode der effektiven Breite erfolgen. (siehe [2] bzw. Kapitel 3.2)

Wie bereits in Kapitel 1.3 erwähnt, entstehen bei Druckbelastung eines Bauteils durch das seitliche Ausweichen der Stabachse zusätzliche Abtriebskräfte und daraus resultierende Zusatzmomente, sogenannte Momente 2.Ordnung. Des Weiteren resultieren aus den vorhandenen geometrischen bzw. strukturellen Imperfektionen (Vorverformung, Schiefstellung,... bzw. Eigenspannungen, Fließgrenzenstreuungen,...) zusätzliche traglastmindernde Einflüsse für stabilitätsgefährdete Bauteile.

Der Abminderungsfaktor χ berücksichtigt in den Gleichungen (3.8) und (3.9) die Abminderung der Tragfähigkeit durch die oben beschriebenen Effekte. Die Bestimmung des Parameters χ erfolgt nach EC 3 für die vorhandene globale bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}$ über die sogenannten „europäischen Knickspannungslinien“.

Je nach Querschnittsgeometrie, Materialfestigkeit und Art der Herstellung (gewalzte oder geschweißte Profile) variieren die Effekte aus strukturellen Imperfektionen (Eigenspannungen) sehr stark und haben unterschiedlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit. Deshalb wurden verschiedene Knickspannungslinien eingeführt, die diese Effekte abdecken und in der Nachweisführung berücksichtigen sollen. Da jedoch eine Festlegung von Knickspannungslinien für jede Art von Querschnittsgeometrie, Materialfestigkeit und Herstellungsart zu einer Vielzahl von unterschiedlichen Linien geführt hätte, wurden zunächst vier unterschiedliche Knickspannungslinien definiert (a-d). Diesen Linien werden die häufig im Bauwesen verwendeten Querschnittsgeometrien, inklusive Materialfestigkeit und Herstellungsart, zugewiesen. Erst im Laufe der Zeit, durch Entwicklung höherer Materialfestigkeiten mit geringeren Eigenspannungen, wurde eine weitere Knickspannungslinie (a₀) definiert.

Die folgende Abbildung (Bild 3-6) zeigt die Zuordnung von verschiedenen Querschnittsgeometrien und Materialfestigkeiten zu den definierten Knickspannungslinien nach ÖNORM EN 1993-1-1 [1]. Um eine Anwendung des nachfolgend angeführten Formelapparates (Gleichung (3.10) bis (3.15)) zu ermöglichen, sind in Tabelle 3-2 die zugehörigen Imperfektionswerte ebenfalls angeführt.

3. Tragverhalten eines Fachwerkträgers mit Querschnitten der Klasse 4

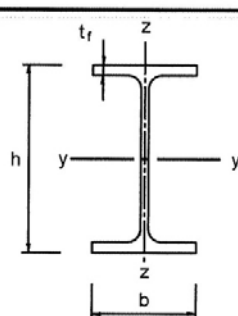
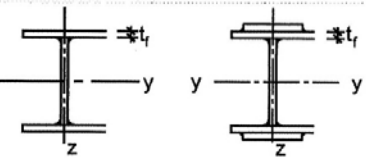

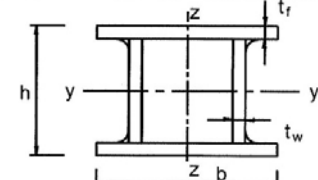
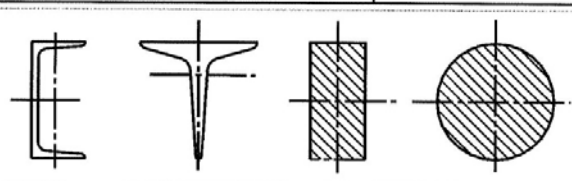
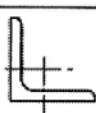
Querschnitt	Begrenzungen	Ausweichen rechtwinklig zur Achse	Knicklinie		
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
gewalzte I-Querschnitte 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a b	a ₀ a ₀
		$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	b c	a a
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	a a
		$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	d d	c c
Geschweißte I-Querschnitte 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	b c	
	$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	c d	c d	
Hohl-quer-schnitte 	warmgefertigte	jede	a	a ₀	
	kaltgefertigte	jede	c	c	
Geschweißte Kastenquerschnitte 	allgemein (außer den Fällen der nächsten Zeile)	jede	b	b	
	dicke Schweißnähte: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	jede	c	c	
U-, T- und Voll- querschnitte 		jede	c	c	
L- Querschnitte 		jede	b	b	

Bild 3-6: Bestimmung der Knickspannungslinie für geschweißte Hohlkastenprofile [1]

Die in dieser Arbeit verwendeten geschweißten Hohlkastenprofile sind, wie in Bild 3-6 ersichtlich, der Knickspannungslinie b zuzuordnen.

Tabelle 3-2: Imperfektionsbeiwerte der EKSL (Europäische Knickspannungslinien) nach [1]

Knicklinie	a ₀	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Nach Bestimmung der zugehörigen Knickspannungslinie für das verwendete Querschnittsprofil bzw. die vorliegende Materialfestigkeit, kann mit Hilfe von Tabelle 3-2 der zugehörige Imperfektionswert ermittelt werden. Für geschweißte Hohlkastenprofile mit Knickspannungslinie b ist der Imperfektionswert mit α=0,34 festgelegt.

Mittels des Imperfektionswertes α wird mit den folgenden Gleichungen (3.10) bis (3.15) der Abminderungsbeiwert χ bestimmt:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad (3.10)$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (3.11)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad \text{für Querschnitte der Klasse 1, 2 und 3} \quad (3.12)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}} \quad \text{für Querschnitte der Klasse 4} \quad (3.13)$$

$$\text{mit } \lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \cdot \varepsilon \quad (3.14)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad f_y \text{ in N/mm}^2 \quad (3.15)$$

Für die Formeln (3.10) bis (3.15) gelten folgende Formelzeichen:

L_{cr}..... Knicklänge des Stabes in der betrachteten Knickebene

i..... Trägheitsradius des Bruttoquerschnitts für die maßgebende Knickebene

λ₁..... Schlankheit zur Bestimmung des Schlankheitsgrads λ̄

Neben der Berechnung des Abminderungsbeiwerts über die Formeln (3.10) bis (3.15), kann auch eine Bestimmung des Beiwerts über Bild 3-7 erfolgen.

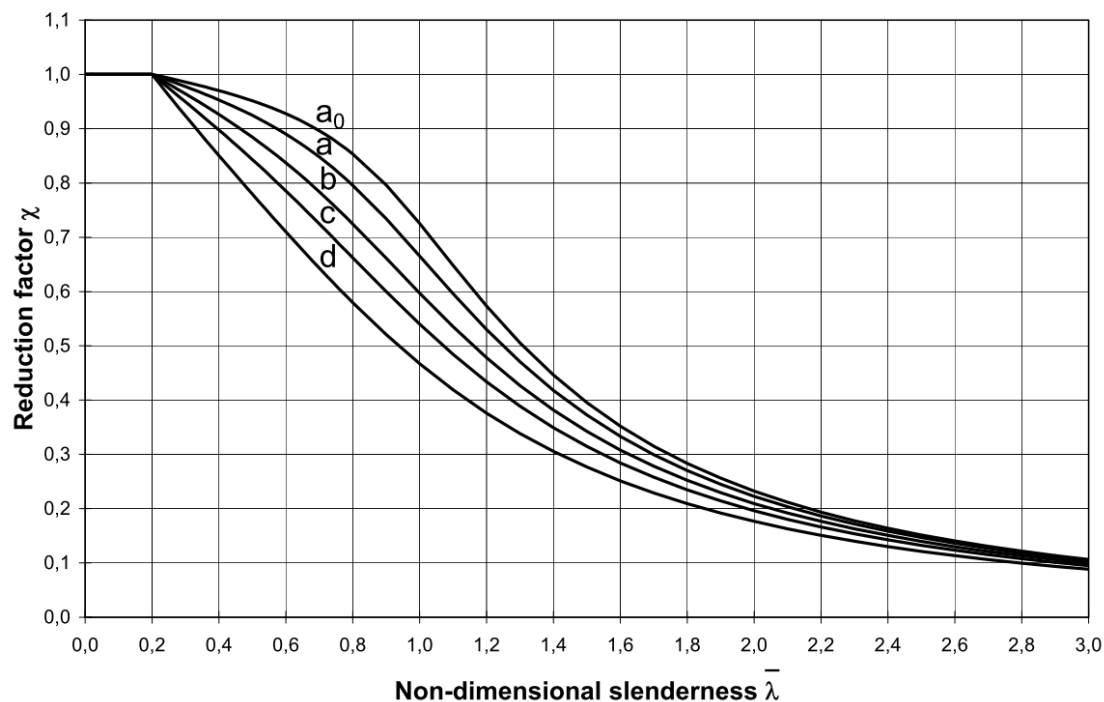


Bild 3-7: EKSL – europäische Knickspannungslinien [5]

Hervorzuheben ist, dass Querschnitte der Klasse 4 eine reduzierte Schlankheit $\bar{\lambda}$ und damit einen höheren Abminderungsfaktor χ gegenüber allen anderen Querschnittsklassen aufweisen.

Kommentar zur Interaktion zwischen lokalem und globalem Stabilitätsversagen bei Querschnitten der Klasse 4

Zusammenfassend folgen hier Anmerkungen, wie die gemeinsame Berücksichtigung von lokalem und globalem Stabilitätsversagen für beulgefährdete Querschnitte erfolgt.

Im Gegensatz zur Berechnung der Beanspruchbarkeit für Querschnitte der Klassen 1 bis 3 über Formel (3.8), werden beulgefährdete Querschnitte (Querschnittsklasse 4) nach Formel (3.9) berechnet. Der Unterschied zwischen diesen Formeln liegt in der berücksichtigten Querschnittsfläche. Für die Querschnittsklassen 1 bis 3 wird die Bruttoquerschnittsfläche A maßgebend, während bei Querschnittsklasse 4 die wirksame Querschnittsfläche A_{eff} eingesetzt wird.

Ebenfalls wird für Querschnitte der Klasse 4 die globale bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}$ nach Formel (3.13) berechnet, gegenüber den anderen Querschnittsklassen nach Formel (3.12). Die Umrechnung auf die bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}$ für Querschnitte der Klasse 4 wird laut Eurocode [2] mit dem Faktor $\sqrt{A_{\text{eff}}/A}$ erzielt.

Da dieser Faktor laut Definition kleiner als 1 ist, wird eine Abminderung der globalen bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}$ von Querschnitten der Klasse 4 im Vergleich zu Querschnitten der Klasse 1 bis 3 bewirkt. Daraus resultierend ergibt sich für den Tragfähigkeitsnachweis eine günstige Erhöhung des Abminderungsfaktors χ bei Querschnittsklasse 4.

Bei näherer Betrachtung von Formel (3.13), der Berechnung der globalen bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}$ von Querschnitten der Klasse 4, kann festgestellt werden, dass, im Gegensatz zur Berücksichtigung der wirksamen Querschnittsfläche A_{eff} , für das Trägheitsmoment bzw. den Trägheitsradius weiterhin der Bruttowert verwendet wird. Da keine Abminderung auf das eigentlich wirksame Trägheitsmoment bzw. den Trägheitsradius erfolgt, wird das mechanische Modell der wirksamen Breiten für die komplette Nachweisführung nicht konsequent angewandt (siehe auch [9]).

Begründet ist dieses Vorgehen jedoch dadurch, dass die erhöhte Schlankheit $\bar{\lambda}$ bzw. der erhöhte Abminderungsfaktor χ die zu geringe Querschnittsfläche A_{eff} kompensiert (zu hohe Reduktion auf der „Biegezugseite“ im maßgebenden Querschnitt in Stabmitte).

3.4 Globales Stabilitätsversagen bei Druck- und Biegebeanspruchung (N+My)

In diesem Kapitel folgen Erklärungen zum Nachweisverfahren nach ÖNORM EN 1993-1-1 für Einzelstäbe bei Druck- und einachsiger Momentenbeanspruchung M_y . Als Interaktionsverfahren wurde in dieser Arbeit das Verfahren der Methode 2 laut Annex B angewendet.

Im Gegensatz zur Unterscheidung zwischen zwei Berechnungsformeln bei reiner Druckbeanspruchung (siehe Kapitel 3.3), unterscheidet der EC 3 für den Stabilitätsnachweis von Stäben unter Druck- und Biegebeanspruchung zwischen drei Berechnungsformeln. Hierbei wird den Querschnitten der Klassen 1 und 2 eine plastische, den Querschnitten der Klasse 3 eine elastische sowie den Querschnitten der Klasse 4 eine reduzierte elastische Spannungsverteilung über den Querschnitt zugrunde gelegt.

Laut EC 3 wird bei der Nachweisführung zwischen verdrehsteifen und verdrehweichen Stäben unterschieden, wobei für diese jeweils unterschiedliche Bemessungsformeln angegeben werden. Bei verdrehweichen Stäben tritt zusätzlich zum Biegeknicken noch eine Verdrillung um die Stabachse auf, wodurch das Ausweichen durch Biegedrillknicken bestimmt oder zumindest beeinflusst wird. (vgl. [20])

Geschweißte Hohlkastenprofile werden den verdrehsteifen Stäben zugeordnet und es tritt nur Versagen durch Biegeknicken auf.

Grundsätzlich muss immer die Möglichkeit des Versagens sowohl um die starke Achse (y-y) als auch um die schwache Achse (z-z) überprüft werden. Bei quadratischen Hohlkastenprofilen ist allerdings aufgrund der Querschnittsgeometrie nur ein Nachweis für Biegeknicken in der Wirkungsebene des Biegemoments zu führen.

An dieser Stelle werden ausschließlich jene Nachweise angeführt, die für die Bestimmung der Tragfähigkeit von geschweißten doppelt symmetrischen Hohlkastenprofilen auf Druck- und einachsiger Biegebeanspruchung M_y notwendig sind.

Folgende Interaktionsformeln sind in ÖNORM EN 1993-1-1 für die Nachweisführung bei Beanspruchung durch $N + M_y$ angegeben und müssen erfüllt werden:

$$\text{Nachweis um die y-y Achse: } \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} \leq 1,0 \quad (3.16)$$

$$\text{Nachweis um die z-z Achse: } \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} \leq 1,0 \quad (3.17)$$

Für die Formeln (3.16) und (3.17) gelten die Ausdrücke $N_{Rk}=f_y \cdot A_i$ und $M_{y,Rk}=f_y \cdot W_i$ je nach vorhandener Querschnittsklasse laut der in Tabelle 3-3 aufgelisteten Werte. Anzumerken ist, dass bei doppelsymmetrischen Querschnitten keine Verschiebung der Schwertschse bei Querschnitten der Klasse 4 bei reiner Druckbeanspruchung. (somit $\Delta M_{y,Ed}=0$)

Tabelle 3-3: Werte für N_{Rk} und $M_{y,Rk}$

Klasse	1	2	3	4
A_i	A	A	A	A_{eff}
W_y	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$

Die Vorgehensweise für den ersten Teil der Nachweisführung, die Berücksichtigung der Anteile aus Normalkraftbeanspruchung, erfolgt nach demselben Schema wie in Kapitel 3.3 beschrieben. Dabei wird die Bestimmung des Abminderungsbeiwerts χ mit den Formeln (3.10) bis (3.15) bzw. nach Bild 3-7 durchgeführt.

Für die Interaktion der Anteile aus Normalkraftbeanspruchung und Momentenbeanspruchung wurden für die Nachweise in den Formeln (3.16) und (3.17) Interaktionsbeiwerte k_{ij} für verdrehsteife Bauteile definiert. In EC 3 werden dabei 2 verschiedene Formelapparate zur Ermittlung dieser Interaktionsbeiwerte angegeben, welche jeweils in Annex A bzw. B der Norm EN 1993-1-1 angegeben werden. Nachfolgend werden stets die Regelungen des Annex B berücksichtigt, welcher laut nationalem Anhang ÖNORM B 1993-1-1 für die Anwendung in Österreich empfohlen wird.

In Annex B werden jeweils für Querschnittsklasse 1 und 2 bzw. Querschnittsklasse 3 und 4 unterschiedliche Berechnungsformeln angegeben. (siehe Formel (3.18) bis (3.21))

Klasse 1 und 2:

$$k_{yy} = c_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \leq c_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \quad (3.18)$$

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} \quad (3.19)$$

Klasse 3 und 4:

$$k_{yy} = c_{my} \left(1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \leq c_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) \quad (3.20)$$

$$k_{zy} = 0,8 \cdot k_{yy} \quad (3.21)$$

Die Interaktionsfaktoren k_{yy} wurden eingeführt, um die Anteile aus Normalkraftbeanspruchung mit dem Anteil aus Biegebeanspruchung zu verknüpfen. Sie wurden durch Rückrechnung von GMNIA-Traglastberechnungen ermittelt. Die Berechnung des Faktors k_{yy} erfolgt in Abhängigkeit der globalen bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}_y$, des Abminderungsbeiwerts für Biegeknicken χ sowie dem Ausnutzungsgrad infolge der Normalkraftbeanspruchung. In Gleichung (3.18) und (3.20) gilt der erste Term für $\bar{\lambda}_y \leq 1,0$ und der letztere für $\bar{\lambda}_y > 1,0$.

Zur Berechnung der Interaktionsbeiwerte wird im Falle eines veränderlichen Momentenverlaufs am Stab noch ein Faktor c_{my} für die Berücksichtigung des vorhandenen Momentenverlaufs benötigt. (äquivalenter Momentenbeiwert c_{my} nach Formel (3.22))

Für linearen Momentenverlauf gilt:



$$c_{my} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi \geq 0,4 \quad \text{für } -1 \leq \psi \leq 1 \quad (3.22)$$

In den Nachweisen wird für den Wert der Momentenbeanspruchung immer der Maximalwert des vorhandenen Momentenverlaufs eingesetzt. Daraus folgt, dass bei nicht konstantem Momentenverlauf ohne Beiwert c_{my} ein Überschätzen der Momentenbeanspruchung auftritt, da für den Nachweis die Größe des Momentes an der Stelle des voraussichtlichen Versagens maßgebend ist. Aus diesen Überlegungen erfolgte

die Einführung des äquivalenten Momentenbeiwerts c_{my} zur Berücksichtigung des Momentenverlaufs in der Nachweisführung.

Bei nicht konstantem Momentenverlauf muss zusätzlich auch ein Querschnittsnachweis an der Stelle des maximalen Momentes durchgeführt werden. Als Beispiel für Fälle, bei denen dieser Zusatznachweis maßgebend werden kann, sei hier ein Stab mit durchschlagendem Momentenverlauf und Maximalmoment an den beiden Auflagern angeführt (insbesondere bei geringer Normalkraftbeanspruchung oder kleiner Stabschlankheit)

4. Methodik

In diesem Kapitel erfolgt neben einer kurzen Einführung in die Grundlagen der Methode der finiten Elemente auch eine Darstellung der prinzipiellen Vorgangsweise und Grundlagen der numerischen Traglastberechnungen in den Kapiteln 6, 7 und 8.

Die Durchführung der numerischen Untersuchungen in dieser Arbeit erfolgte mit der Methode der finiten Elemente durch das Software-Paket ABAQUS [4].

Die Methode der finiten Elemente als Näherungsverfahren hat sich, durch den raschen Fortschritt von Rechenleistungen der EDV, zum meistverwendeten Berechnungsverfahren im konstruktiven Ingenieurbau entwickelt.

Wie der Name schon sagt, wird bei der Methode der finiten Elemente das berechnete Tragwerk der dessen Einzelstäbe in kleine Teilbereiche aufgeteilt. Neben den Randbedingungen müssen Übergangsbedingungen definiert werden, um die Verknüpfung der diskretisierten Elemente untereinander realisieren zu können. Aufgrund der Einteilung in kleine Teilbereiche reicht eine Ansatzfunktion mit niedriger Ordnung, zum Beispiel auch mit linearen Funktionen, zur ausreichend genauen Beschreibung des Verhaltens des Gesamtragwerks. Wird die Ansatzfunktion mit derselben Ordnung gewählt, wie die Ordnung der Funktion zur Beschreibung der Geometrie, spricht man von einem isoparametrischen Ansatz. (vgl. [6], [7], [15])

Im Folgenden sind Angaben zur Vorgangsweise und Wahl der Elemente, Randbedingungen, Material und Imperfektionen für die untersuchten Traglastberechnungen angegeben. Beispiele für die verwendeten Inputfiles der ABAQUS Analysen der verschiedenen Traglastuntersuchungen sind im Annex C angeführt.

Wahl der Elemente u. Knotenanzahl:

Da in dieser Arbeit besonderes Interesse an der Interaktion von lokalem Plattenbeulen einzelner Querschnittsteile, und globalem Stabilitätsverhalten bestand, erfolgte die Modellierung der untersuchten Profile mit geschweißtem Hohlkastenquerschnitt für die Traglastberechnungen mittels quadratischen Shell-Elementen mit linearer Ansatzfunktion vom Typ S4R.

In Bild 4-1 ist beispielhaft die graphische Darstellung der FEM-Modellierung eines untersuchten Hohlkastenprofils mit dem Software-Paket ABAQUS abgebildet.

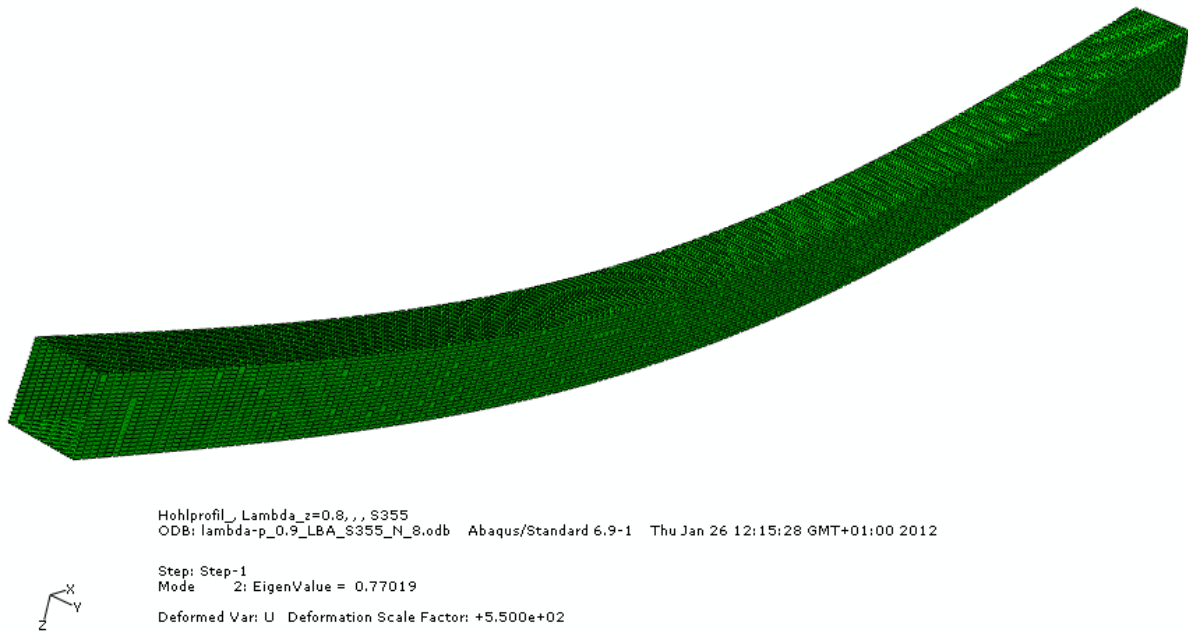


Bild 4-1: FEM-Modellierung für einen untersuchten Hohlprofilstab

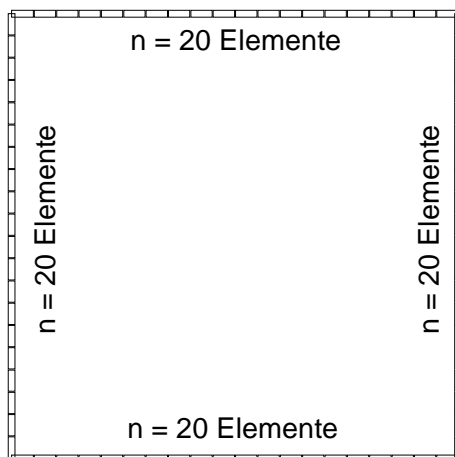


Bild 4-2: FEM-Modellierung – Querschnitt für einen untersuchten Hohlprofilstab

Die Anzahl der Elemente bzw. Knoten in Querrichtung blieb für die gesamten Berechnungen gleich und setzte sich für Stege und Flansche aus jeweils 20 Elementen zusammen. In Längsrichtung hingegen änderte sich die Elementanzahl je nach Länge des untersuchten Stabes, wobei zwischen 200 und 400 Elementen variiert wurde.

Wie in den weiteren Kapiteln ersichtlich, erfolgten alle numerischen Traglastuntersuchungen an Hohlkastenquerschnitten mit konstanter Wandstärke von $t=8\text{mm}$. (siehe Kapitel 6, 7 und 8) Demzufolge wurde die Dicke der Shell-Elemente ebenfalls mit 8mm gewählt.

Randbedingungen:

Die Auflagerbedingungen für die numerischen Untersuchungen entsprachen: a.) beidseitig gelenkige Auflagerung oder b.) beidseitiger starrer Einspannung. Die Abbildung starrer Queraussteifungen an den Stabenden erfolgte durch Modellierung einer biegesteifen Kopplung der Knoten am Stabanfang und Stabende. Das Ebenbleiben der Querschnitte an den Stabenden wurde ebenfalls durch kinematische Kopplungen erreicht.

Zur Realisierung des alleinigen Biegeknickens der rechteckigen Hohlkastenprofile um die starke Achse (y -Achse) in den numerischen Traglastanalysen, muss der Eigenwert für Biegeknicken um die starke Achse kleiner als der aus Biegeknicken um die schwache Achse sein. Das Erfüllen dieser Bedingung wurde künstlich über das Verhindern der Verschiebung in den Viertelpunkten des Stabes in Richtung der y -Achse erzielt.

Für Traglastberechnungen mit Biegeknicken um die schwache Achse (z -Achse) von rechteckigen Hohlkastenprofilen und Biegeknicken für quadratische Profile wurden keine zusätzlichen künstlichen Abstützungen des Stabes modelliert, da der kleinste Eigenwert mit zugehöriger Eigenform der untersuchten Ausweichform entspricht.

Material:

Als Standardmaterial wurde Baustahl S355, mit einer Streckgrenze von $f_y=355 \text{ N/mm}^2$ und einer Zugfestigkeit von $f_u=510 \text{ N/mm}^2$, verwendet. Um Aussagen über den Einfluss von unterschiedlichen Materialfestigkeiten auf die Traglast tätigen zu können, wurden in Kapitel 7 für Einzelstäbe unter Druckbeanspruchung weiters noch Baustahl S235 ($f_y=235 \text{ N/mm}^2$, $f_u=360 \text{ N/mm}^2$) bzw. S460 ($f_y=460 \text{ N/mm}^2$, $f_u=540 \text{ N/mm}^2$) als Material für Traglastberechnungen gewählt. Die entsprechenden Streckgrenzen f_y und Zugfestigkeiten f_u wurden nach EC 3 festgelegt und mit den zusätzlichen Materialeigenschaften E-Modul ($E=210.000 \text{ N/mm}^2$) und Querdehnungszahl ($\nu=0,3$) in der GMNIA-Analyse berücksichtigt.

Den verwendeten Materialien der numerischen Berechnungen wurden zwei unterschiedliche Werkstoffgesetze zu Grunde gelegt. Hierbei handelt es sich um ein Materialverhalten mit elastisch-plastischem Werkstoffverhalten ohne Wiederverfestigung nach Erreichen der Streckgrenze f_y (Bild 4-3 a) bzw. elastisch-plastischem Werkstoffverhalten mit linearer Wiederverfestigung nach Erreichen der Streckgrenze f_y (Bild 4-3 b).

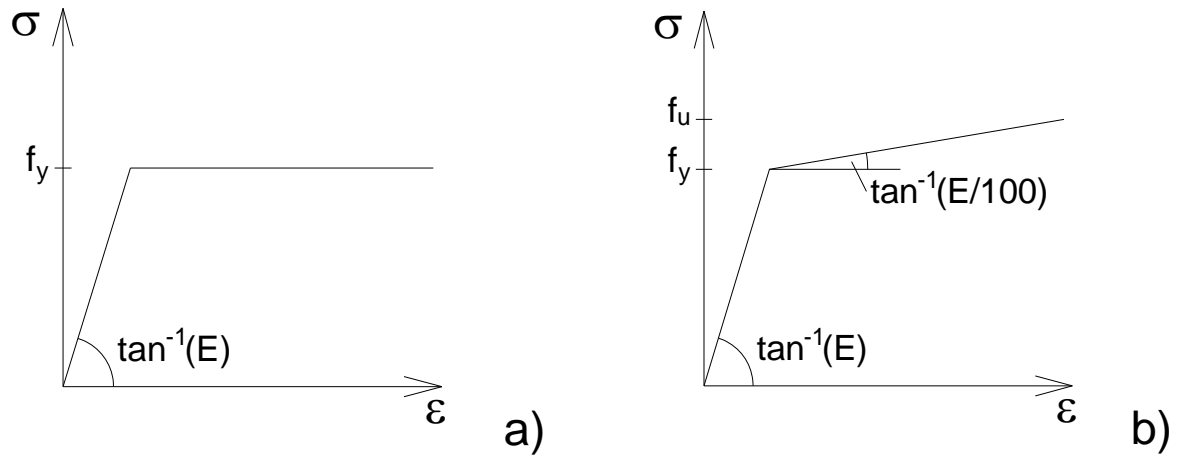


Bild 4-3: Verwendete Werkstoffgesetze, a) elastisch-plastisch ohne Wiederverfestigung, b) elastisch-plastisch mit linearer Wiederverfestigung [2]

Strukturelle Imperfektionen:

Bei Herstellung der Hohlkastenprofile durch das Verbinden der Querschnittsbleche durch Schweißen, entstehen Erwärmungen im Bereich der Schweißnähte. Die kühleren Bereiche in Blechmitte verhindern ein Ausdehnen der erwärmten Querschnittsteile in den Eckbereichen. Diese Eckbereiche werden bei anschließender Abkühlung gedehnt, wodurch hier Zugspannungen und daraus folgend Druckspannungen in Blechmitte entstehen. (vgl. [11])

Nach EC 3 sollten für numerische Traglastberechnungen mit der Methode der finiten Elemente strukturelle Imperfektionen (Eigenspannungen) berücksichtigt werden.

In Bild 4-4 folgt die Darstellung der gewählten Eigenspannungsverteilung für geschweißte Hohlkastenprofile nach [10], wobei als Grundlage das Verhältnis $b/t=40$ und kleine Schweißnähte angenommen wurde.

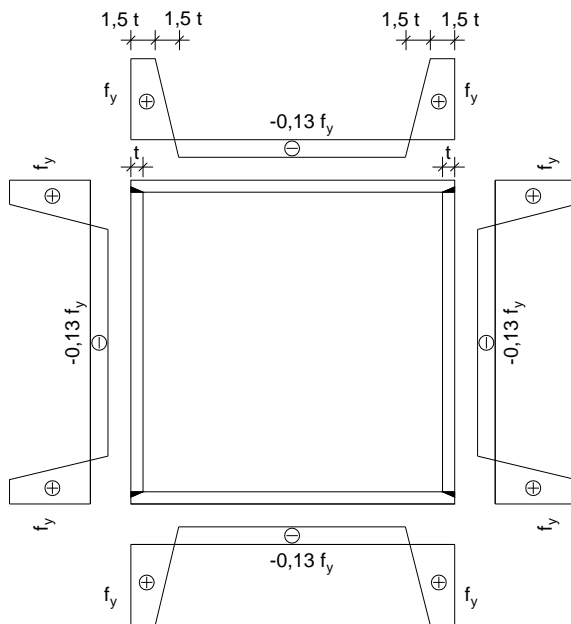


Bild 4-4: Eigenspannungsverteilung für geschweißte Hohlkastenprofile [10]

Ausgehend von der konstanten Wandstärke t für alle Querschnitte, erfolgte die Anwendung auf die unterschiedlichen Querschnitte durch Anpassung der Breite der „Zugspannungsfläche“ ($1,5t$ in Bild 4-4) mit dem Faktor des vorhandenen b/t -Verhältnisses. z.B.: für $b/t=30$ folgt: $1,5 \cdot t \cdot 30/40 = 1,125 \cdot t$.

Damit bleibt die Höhe der Druckeigenspannungen im Bereich der Blechmitten konstant. Die gewählte Eigenspannungsverteilung wird als Initialspannung den vorhanden 20 Elementen je Querschnittsblech über arithmetische Mittelung der Spannungen nach Bild 4-4 zugeteilt.

Geometrische Imperfektionen:

Neben den strukturellen Imperfektionen, müssen nach EC 3 auch geometrische Imperfektionen in den numerischen Traglastberechnungen mit der Methode der finiten Elemente als Vorverformungen der Einzelstäbe erfasst werden. Diese müssen so angesetzt werden, dass daraus der ungünstigste Einfluss auf die Tragfähigkeit des Stabes resultiert.

Da in dieser Arbeit Untersuchungen des Gesamtstabilitätsverhaltens, mit Interaktion von lokalem und globalem Stabilitätsverhaltens von Einzelstäben durchgeführt werden, erfolgt sowohl eine Berücksichtigung von globalen als auch von lokalen geometrischen Imperfektionen.

Die berücksichtigten Imperfektionsformen sind Eigenform-konform, wobei deren Bestimmung in einem eigenen Berechnungsschritt durchgeführt wird. Die genaue Erklärung zur Vorgangsweise der numerischen Traglastberechnungen wird später angeführt.

Als globale geometrische Imperfektionsform wurde die erste globale Eigenform mit einer maximalen Amplitude von $L/1000$ angesetzt. Dies entspricht den Annahmen, welche auch der Entwicklung der europäischen Knickspannungslinien zugrunde liegen. Diese Annahmen können als statistische Fraktilwerte realer „Toleranzen“ gesehen werden. (vgl. [10])

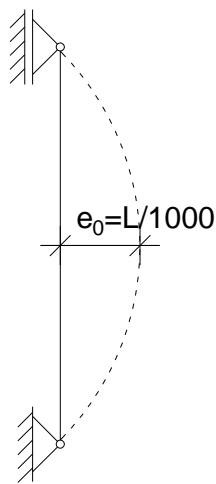
Je nach Berechnungsprozedur werden unterschiedlich große Imperfektionsamplituden für den Ansatz der lokalen Imperfektionen verwendet. Die lokale Imperfektionsform, als maßgebende Beulfigur, entspricht der ersten lokalen Eigenform.

Laut ÖNORM EN 1993-1-5 darf für Traglastberechnungen mit der Methode der finiten Elemente bei Kombination von verschiedenen geometrischen Imperfektionen eine der beiden als Leitimperfektion gewählt werden und dabei die andere Begleitimperfektion auf 70% abgemindert werden.

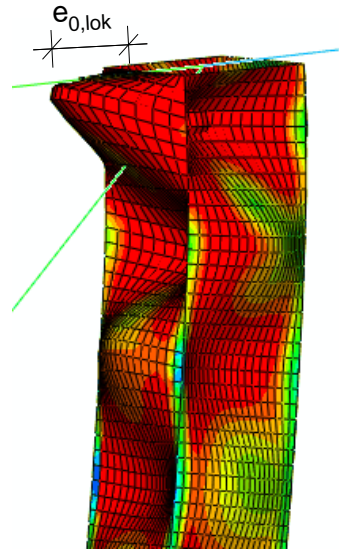
In der Arbeit wurden immer beide Möglichkeiten der Überlagerung untersucht:

- Überlagerung 1: 100% global & 70% lokal
- Überlagerung 2: 70% global & 100% lokal

Globale geometrische Imperfektion:



Lokale geometrische Imperfektion:



- Überlagerung 1:
 $e_{0,lob} + 0,7e_{0,lok}$
- Überlagerung 2:
 $0,7e_{0,lob} + e_{0,lok}$

Bild 4-5: Erfasste geometrische Imperfektionen und deren Überlagerung [10]

Berechnungsvorgang bei den Traglastberechnungen:

Die Ermittlung der Tragfähigkeit der einzelnen Traglastuntersuchungen erfolgte in zwei Schritten:

LBA..... Linear Buckling Analysis

GMNIA.....Geometrically and Materially Non-linear Analysis with Imperfections

In einem ersten Schritt gilt es die geometrischen Imperfektionen zu bestimmen, die als Eigenform-konforme Ausweichform für die nachfolgende GMNIA-Berechnung als Basis der angesetzten Vorverformungen bildet. Die Eigenformen mit den dazugehörigen Eigenwerten werden über eine Eigenwertberechnung (LBA) ermittelt. Die LBA-Berechnung für den Einzelstab gibt Lösungen unter der Annahme eines idealen Systems (Stab ohne Imperfektionen, ideal elastisches Materialverhalten und mittiger Lastangriff).

Für die weiteren Traglastberechnungen muss festgelegt werden, welche der Eigenformen für den untersuchten Lastfall als die maßgebende globale und lokale Eigenform erachtet wird. Diese werden in der nachfolgenden GMNIA-Berechnung vor Beginn der Laststeigerung als Vorverformung entsprechend skaliert und an den jeweiligen untersuchten Einzelstäben angesetzt. Die GMNIA-Berechnung ist eine nicht-lineare Traglastanalyse unter Berücksichtigung von materiellen und geometrischen Imperfektionen an einem Einzelstab oder einem Gesamttragwerk.

Mit Hilfe der Finiten Elemente Methode, unter Berücksichtigung von geometrischen und strukturellen Imperfektionen, kann eine sehr gute Annäherung an die tatsächliche Tragfähigkeit erreicht werden. Die Berechnung erfolgt durch inkrementelles Erhöhen der Belastung des untersuchten Systems bis zum Erreichen eines Maximums der Last-Verformungskurve.

Die GMNIA-Berechnungen erfolgen immer für eine bestimmte Bezugsbelastung, die üblicherweise so gewählt wird, dass sie beim untersuchten Stabilitätsfall *nicht* erreicht wird; z.B. kann bei reinem Biegeknicken unter N ein vielfaches ($1x, 2x, \dots 10x$) der (plastischen) Grenztragfähigkeit $N_{R,k}$ des Querschnitts als Bezugslast verwendet werden. Die gesuchte, sich aus der entsprechenden GMNIA Berechnung ergebende Traglast des imperfekten Stabes errechnet sich dann aus der Multiplikation des erreichten Lastinkrementes (Prozentsatz der Bezugslast) mit der Bezugslast.

Die Berücksichtigung von Eigenspannungen für die Traglastberechnungen mit dem Software-Paket ABAQUS bedeutet, dass vor Beginn der Laststeigerung, zum Zeitpunkt $t=0$, vom Berechnungsprogramm den Elementen ein (eingefrorener) Spannungszustand zugewiesen wird. Dieser Spannungszustand ist allerdings (noch) nicht mit Abtriebstermen verbunden, welche durch die vorgegebenen geometrischen Imperfektionen für Plattenbeulen von Bedeutung sind. Angepasst an die aktuelle Höhe der Belastung ($P_{akt}=v \cdot P_{ref}$) werden intern -angepasst an die vorgegebenen geometrischen Imperfektionen- aus Eigenspannungen zusätzliche Abtriebsterme angesetzt. In Bild 4-6 ist dieser Effekt aus den Abtriebstermen schematisch dargestellt.

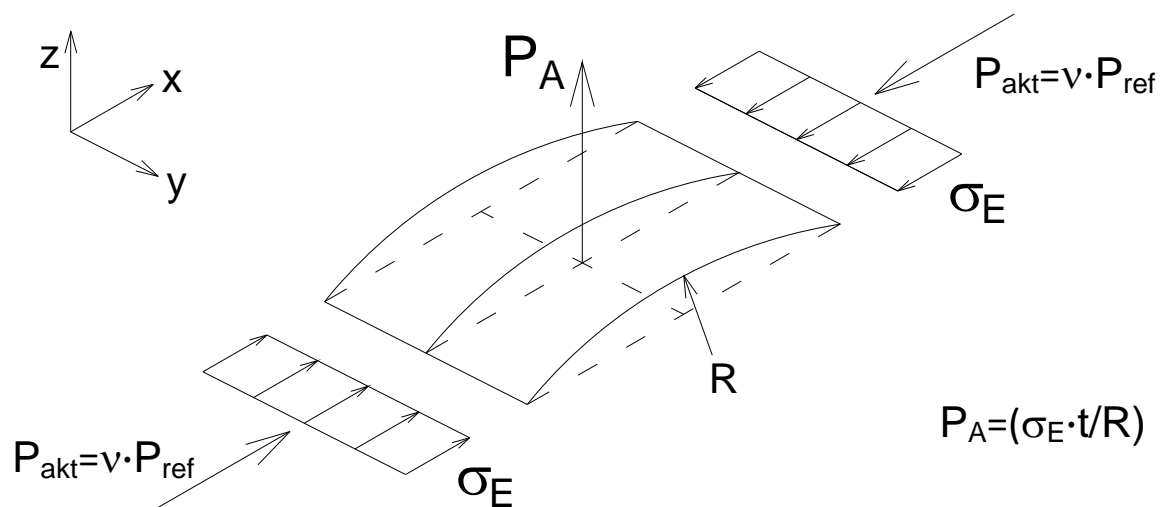


Bild 4-6: Wirkung von Abtriebskräften alleine zufolge (Druck-) Eigenspannung

Je nach Höhe der gewählten Bezugslast erzielt man nur unterschiedliche Höhen für die Abtriebskräfte und damit unterschiedliche Tragfähigkeiten. Grund hierfür ist, dass die (Druck-)Eigenspannungen eine zusätzliche Erhöhung der Abtriebsterme für Plattenbeulen nach sich ziehen und somit einen Einfluss auf das Verformungsverhalten des Ausbeulens senkrecht zur Stabachse haben.

Wegen der oben beschriebenen Effekte stellt sich die Frage, ob und in welchem Ausmaß die Berücksichtigung der zusätzlichen Erhöhung des Ausbeulens durch Eigenspannungen für die Ermittlung der Tragfähigkeit erfolgen muss oder ob dieser Effekt in den Werten der geometrischen lokalen Imperfektionsamplituden bereits berücksichtigt ist.

Da diese Frage in den Hintergrunddokumenten des EC 3 nicht geklärt ist, wurde in dieser Arbeit eine Grenzwertbetrachtung durchgeführt. Als oberer Grenzwert der Tragfähigkeit erfolgte die Berechnung mit einer Prozedur, die durch eine vorgegebene äußere Referenzbelastung mit dem Vielfachen der tatsächlichen Tragfähigkeit den Einfluss der Abtriebskräfte auf das Ausbeulen minimiert. (Berechnungsprozedur 1)

Hingegen berücksichtigt der untere Grenzwert der Tragfähigkeit den Einfluss der Abtriebswirkung der Eigenspannungen in voller Höhe in Form eines vorgeschalteten als zusätzlichen Lastfalles in der Traglastberechnung. (Berechnungsprozedur 2)

- Als Berechnungsprozedur 1 erfolgt die Berechnung des oberen Grenzwertes durch Vorgabe der Referenzbelastung mit dem 100-fachen Faktor der Querschnittstragfähigkeit. Durch die hohe äußere Belastung wird erreicht, dass die errechneten Abtriebskräfte aus den Eigenspannungen in den Elementen möglichst klein bleiben. Die maximale Amplitude der lokalen geometrischen Imperfektionen wird in Kapitel 6 mittels Traglastanalysen an sehr gedrunenen Stäben unter Berücksichtigung von Eigenspannungen derart ermittelt, dass solange variiert wird bis die Traglasten der „Winter-Kurve“ erreicht werden.
- Im Gegensatz dazu wird in der Berechnungsprozedur 2 der untere Grenzwert in ABAQUS mittels zweier nacheinander geschalteten Belastungssteps bestimmt. Im ersten „Step“(Lastfall) wird keine äußere Last für den Berechnungsvorgang berücksichtigt, womit nur Verformungen bedingt durch den vorherrschenden Spannungszustand aufgrund der vorgegebenen Eigenspannungen entstehen. Nach ÖNORM EN 1993-1-5 wird für den Ansatz der geometrischen Imperfektionen eine Amplitude von 80% der geometrischen

Fertigungstoleranzen, die in ÖNORM EN 1090-2 [3] mit $b/125$ bestimmt ist, empfohlen. Somit folgte in dieser Berechnungsprozedur die Wahl der Imperfektionsamplitude der geometrischen lokalen Vorverformungen mit $b/156$, die eindeutig größer ist als der für die Annäherung an die Winter-Kurve erforderliche Ansatz der Imperfektionsamplitude (Darstellung in Kapitel 6). Die äußere Belastung wird in einem zweiten Step mit dem Faktor 1 der plastischen Tragfähigkeit als Referenzlast aufgebracht.

Abschließend sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Berechnungsschritten der beiden Berechnungsprozeduren in folgender Tabelle 4-1 aufgelistet.

Tabelle 4-1: Übersicht der Belastungsschritte für obere/untere Grenzwert der Tragfähigkeit

		Berechnungsprozedur 1	Berechnungsprozedur 2
Belastung (Referenzlast)	Step 1	Referenzlast = Querschnittstragfähigkeit x 100	Eigenspannungen x 1
	Step 2	-	Referenzlast = Querschnittstragfähigkeit
Tragfähigkeit (erm. Laststeigerungsfaktor v_i)		v_1 x Referenzlast	v_2 x Referenzlast

Die in Teil II untersuchten Traglastberechnungen wurden teilweise mit Berechnungsprozedur 1 und/oder Berechnungsprozedur 2 durchgeführt. Die Wahl der Berechnungsprozedur wird in den jeweiligen Kapiteln angeführt.

TEIL II:

5. Festlegung der Querschnittsabmessungen

Nachfolgend werden die geometrischen Abmessungen der in den Kapiteln 6 und 7 behandelten Stäbe und Querschnitte im Detail beschrieben.

Entgegen der Definition der Klassengrenzen bei der Querschnittsklassifizierung laut aktueller ÖNORM EN 1993-1-1, siehe Bild 3-2, erfolgte die Definition der Grenzwerte nach einem neuen Vorschlag, der am Institut für Stahlbau der TU Graz entwickelt wurde [13].

[13] sieht eine Modifizierung der im Eurocode [1] gegebenen Grenzwerte an den Klassengrenzen vor. Die Einteilung erfolgt, nun angewandt auf geschweißte Hohlkastenprofile mit quadratischem Grundriss und konstanter Druckspannung belastet, nach folgendem Schema:

Tabelle 5-1: Querschnittsklassifizierung für beidseitig gestützte Querschnittsteile – Grenzwerte $(c/t)_{\text{grenz}}$

QS-Klasse 1	QS-Klasse 2	QS-Klasse 3	QS-Klasse 4
$c/t \leq 28\varepsilon$	$c/t \leq 34\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	$c/t > 38\varepsilon$

Der Parameter ε berücksichtigt unterschiedliche Materialfestigkeiten in der Berechnung und wird wie folgt berechnet:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad f_y \text{ in N/mm}^2 \quad (5.1)$$

Wie in Tabelle 5-1 ersichtlich und schon in Kapitel 3.1 beschrieben, ist die Klassifizierung der Querschnitte für konstante Druckspannungsverteilung über den Querschnitt neben dem Verhältnis von Blechbreite zu Blechdicke (c/t -Verhältnis) auch von der gewählten Materialfestigkeit abhängig.

Das hat zur Folge, dass ein bestimmtes Profil, je nach vorhandener Materialfestigkeit, einer unterschiedlichen Querschnittsklasse zuzuordnen ist. Als Beispiel wird an dieser Stelle angeführt, dass ein Profil der Querschnittsklasse 1 mit Baustahl S235 ($\varepsilon=1$) mit z.B. $c/t=27$, bei Verwendung von Baustahl S460 ($\varepsilon=0,715$) der Querschnittsklasse 3 zuzuordnen ist.

Da in dieser Arbeit bei konstanter Druckbeanspruchung der Einfluss von unterschiedlichen Materialfestigkeiten auf die Traglast untersucht wurde, war ein Vergleich von Profilen mit fixen Querschnittsabmessungen nicht möglich, sondern es erfolgte ein Vergleich von Profilen mit der gleichen bezogenen Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p$, die nach ÖNORM EN 1993-1-5 bzw. Formel (5.2) zu bestimmen ist.

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{c/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} \quad (5.2)$$

Durch Umformung der Gleichung (5.2) kann c/t freigestellt werden:

$$c/t = \bar{\lambda}_p \cdot 28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma} \quad (5.3)$$

Da die c/t -Werte nach Formel (5.3) sowie die Querschnittsklassifizierung nach Tabelle 5-1 vom Materialbeiwert ε abhängig sind, kann durch Gleichsetzung der beiden Formeln, die Grenzwerte der Querschnittsklassifizierung auch über Grenzwerte der Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p$ ausgedrückt werden. Nachfolgend erfolgt, am Beispiel der Querschnittsklasse 1, die Umformung des Grenzwertes der Querschnittsklassifizierung $(c/t)_{\text{grenz}}$ in einen äquivalenten Grenzwert der Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p$.

Grenzwert der Querschnittsklasse 1 nach Tabelle 5-1:

$$c/t \leq 28\varepsilon \quad (5.4)$$

Durch Gleichsetzung der Formeln (5.3) und (5.4) und anschließender Auflösung nach $\bar{\lambda}_p$ erhält man für Querschnittsklasse 1, unabhängig von der Materialfestigkeit, folgenden Grenzwert:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{28}{28,4 \cdot \sqrt{k_\sigma}} \quad (5.5)$$

Dabei ist für reine Normalkraftbelastung der Beulwert k_σ laut ÖNORM EN 1993-1-5 mit $k_\sigma = 4,0$ definiert.

Dieses Vorgehen wird für die restlichen Grenzwerte der Querschnittsklassen ebenfalls angewandt, woraus sich für die Querschnittsklassifizierung folgende Grenzwerte in Abhängigkeit der Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p$ ergeben, die in Tabelle 5-2 aufgelistet sind.

Tabelle 5-2: Querschnittsklassifizierung – schlankheitsabhängige Grenzwerte

QS-Klasse 1	QS-Klasse 2	QS-Klasse 3	QS-Klasse 4
$\bar{\lambda}_p \leq 0,493$	$\bar{\lambda}_p \leq 0,599$	$\bar{\lambda}_p \leq 0,673$	$\bar{\lambda}_p > 0,673$

Die Festlegung der Querschnittsabmessungen der untersuchten Querschnitte erfolgte nach Tabelle 5-3. Es wurden für die Querschnittsklassen 1-3 jeweils ein Querschnitt pro Querschnittsklasse gewählt. Für die Querschnittsklasse 4 wurden mehrere Profile festgelegt, um Aussagen über den Einfluss des Plattenbeulens, abhängig von der Plattenschlankheit, auf das Gesamtstabilitätsverhalten treffen zu können. Querschnitte mit folgenden Plattenschlankheiten wurden, wie in Tabelle 5-3 dargestellt, berechnet.

Tabelle 5-3: Übersicht der verwendeten Querschnitte für die Traglastberechnungen

QS-Klasse 1	QS-Klasse 2	QS-Klasse 3	QS-Klasse 4				
$\bar{\lambda}_p = 0,4$	$\bar{\lambda}_p = 0,55$	$\bar{\lambda}_p = 0,635$	$\bar{\lambda}_p = 0,7$	$\bar{\lambda}_p = 0,9$	$\bar{\lambda}_p = 1,1$	$\bar{\lambda}_p = 1,3$	$\bar{\lambda}_p = 1,5$

Die Berechnung der Querschnittsabmessungen erfolgte über die gewählten Plattenschlankheiten in Tabelle 5-3 mittels Formel (5.2), wobei für alle Profile die Wandstärke $t = 8$ mm gewählt wurde.

Nachfolgend wird die Herleitung der geometrischen Abhängigkeit der globalen bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}$ gezeigt. Laut Formel (3.12) wird die globale bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}$ wie folgt berechnet:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad (5.6)$$

Der Trägheitsradius i ist laut Formel (5.7) zu bestimmen, wobei für die Berechnung des Trägheitsmomentes J der Term $2 \cdot t^3 \cdot b / 12$ vernachlässigt wird, da $2 \cdot t^3 \cdot b / 12$ im Vergleich mit den anderen Termen sehr klein ist. Weiters gilt für quadratische Hohlkastenprofile $b=h$.

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \frac{t \cdot b^3}{12} + 2 \cdot b \cdot t \cdot (h/2)^2}{2 \cdot b \cdot t + 2 \cdot h \cdot t}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \frac{t \cdot b^3}{3}}{4 \cdot b \cdot t}} = \sqrt{\frac{b^2}{6}} \quad (5.7)$$

Formel (5.7) eingesetzt in Formel (5.6) ergibt folgenden Zusammenhang:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{\sqrt{\frac{b^2}{6}}} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{L_{cr}}{b} \cdot \frac{\sqrt{6}}{\lambda_1} \quad (5.8)$$

wobei λ_1 nach ÖNORM EN 1993-1-1 wie folgt definiert ist:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \varepsilon = 76,41 \quad \text{für S355} \quad (5.9)$$

Durch Einsetzen von Formel (5.9) in Formel (5.8) ist nun das geometrische Verhältnis L_{cr}/b in Abhängigkeit der globalen bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}$ für Baustahl S355 in Formel (5.10) gegeben zu:

$$\frac{L_{cr}}{b} = \frac{\lambda_1}{\sqrt{6}} \cdot \bar{\lambda} = \frac{76,41}{\sqrt{6}} \cdot \bar{\lambda} = 31,19 \cdot \bar{\lambda} \quad (5.10)$$

Wie in Formel (5.8) und Formel (5.10) ersichtlich, ist die globale bezogene Schlankheit für eine bestimmte Materialgüte nur vom Verhältnis L_{cr}/b abhängig.

Zusammenfassend kann für quadratische Hohlkastenprofile folgendes festgestellt werden:

- globale bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}$ ist abhängig von: L_{cr}/b
- lokale bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ ist abhängig von: b/t

Die Festlegung der untersuchten globalen bezogenen Schlankheiten $\bar{\lambda}$ in Kapitel 8 erfolgte anhand von realistischen L/b -Verhältnissen. Es wurden die in folgender Auflistung dargestellten Schlankheiten mit den dazugehörigen L/b -Werten gewählt.

Für Querschnittsklasse 4 müssen nach Formel (3.13) die Schlankheiten mit dem Faktor $\sqrt{A_{eff}/A}$ multipliziert werden. Besonders für Querschnitte mit großen bezogenen Plattenschlankheiten $\bar{\lambda}_p$ resultiert eine deutliche Reduzierung der globalen bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}$, wodurch eine Verlängerung des Stabes erforderlich ist, um die ursprüngliche Schlankheit $\bar{\lambda}$ einzuhalten. Somit ist auch eine Erhöhung des L/b -Verhältnisses erforderlich. Besonders für große globale bezogene Schlankheiten $\bar{\lambda}$ resultieren daraus Stäbe mit unrealistischen L/b -Verhältnisse. Deshalb wurde für die Traglastanalyse für Querschnitte der Klasse 4 auf Druck- und Biegebeanspruchung die gewählte Stablänge mit den für Querschnittsklasse 2 und 3 festgelegten L/b -Verhältnissen berechnet und anschließend die tatsächliche globale bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}$ über Formel (3.13) ermittelt.

In folgender Tabelle sind die L/b -Verhältnisse der untersuchten Stäbe angegeben.

Tabelle 5-4: Übersicht gewählte L/b -Verhältnisse für Druck-und Biegebeanspruchung

beids. Gelenklagerung		beids. Einspannung	
$\bar{\lambda}$	$\frac{L}{b} = \frac{L_{cr}}{b} = 31,19 \cdot \bar{\lambda}$	$\bar{\lambda}$	$\frac{L}{b} = \frac{2 \cdot L_{cr}}{b} = 2 \cdot 31,19 \cdot \bar{\lambda}$
0,5	$31,19 \cdot 0,5 = 15,6$	0,25	$2 \cdot 31,19 \cdot 0,25 = 15,6$
1,0	$31,19 \cdot 1,0 = 31,2$	0,5	$2 \cdot 31,19 \cdot 0,5 = 31,2$
1,5	$31,19 \cdot 1,5 = 46,8$	0,75	$2 \cdot 31,19 \cdot 0,75 = 46,8$

Anm.: Ein Stab der Länge L und der Querschnittsbreite b weist bei beidseitiger Einspannung nur die halbe Schlankheit $\bar{\lambda}$ auf.

6. Traglastberechnungen zum lokalen Stabilitätsversagen

Um Aussagen über den Einfluss des lokalen Beulens auf das Gesamtstabilitätsverhalten treffen zu können, werden nachfolgend -als erster Schritt- Untersuchungen an sehr gedrungene Stäben ($l \sim 5 \cdot b$) mit quadratischem Hohlkastenprofil als Querschnitt durchgeführt. Ziel dieser Berechnungen ist, die Auswirkungen unterschiedlicher Ansätze struktureller und geometrischer Imperfektionen auf lokaler Ebene auf die Tragfähigkeit darzustellen und darauffolgend die Amplitude zur Berücksichtigung lokaler Imperfektionen bei Berechnungen des Gesamtstabilitätsverhaltens festzulegen. Als geometrische Imperfektion wurde hier nur die 1.Eigenform für lokales Stabilitätsversagen bei der GMNIA-Berechnung angesetzt. Die globale geometrische Imperfektion wurde nicht berücksichtigt, da globales Stabilitätsversagen für die untersuchten kurzen Stäbe auszuschließen ist. Die GMNIA-Analyse erfolgte für quadratische Hohlkastenprofile mit Plattenschlankheiten $0,1 < \bar{\lambda}_p < 2,0$.

Für die Berechnungen zum lokalen Stabilitätsversagen wurde Baustahl S355 ($f_y = 355 \text{ N/mm}^2$, $f_u = 510 \text{ N/mm}^2$) mit linearer Verfestigung nach Erreichen der Streckgrenze f_y gewählt (siehe Bild 4-3 b).

Die Belastung der Querschnitte erfolgte sowohl mit einer zentrischen Druckkraft, die als Referenzwert der plastischen Querschnittstragfähigkeit N_{pl} des Querschnittes entspricht, als auch mit einer reinen Biegebeanspruchung, mit der elastischen Querschnittstragfähigkeit M_{el} des Querschnittes als Referenzlast.

Die beiden Berechnungsprozeduren (in Kapitel 4 genauer beschrieben) berücksichtigen die vorhandenen Eigenspannungen (strukturelle Imperfektionen) auf unterschiedliche Weise. Die Auswirkungen auf die Beultragfähigkeit werden für beide Berechnungsprozeduren ermittelt und nachfolgend dargestellt.

Die ermittelten GMNIA-Traglasten wurden in Diagramme mit jenen des Eurocode gegenübergestellt (Konzept der effektiven Breiten, siehe Kapitel 3.2). Während auf der x-Achse (Abszisse) nachfolgend die berechneten Plattenschlankheiten aufgetragen werden, sind die Traglasten bezogen auf die Querschnittstragfähigkeit ($N_{b,r}/N_{pl}$ bzw. $M_{b,r}/M_{el}$) als y-Achse (Ordinate) einzuzeichnen.

In jedem Diagramm werden jeweils die GMNIA-Analysen für die Belastungsfälle, a.) konstante Druckspannungen über den Querschnitt (GMNIA-Druck) bzw. b.) reine Biegebeanspruchung M_y (GMNIA-Biegung) mit den „Traglasten“ nach

ÖNORM EN 1993-1-5 für konstante Druckbeanspruchung (EC 3-Druck) bzw. reine Biegebeanspruchung (EC 3-Biegung) dargestellt. (Es gilt jeweils $y_{M,0}=1,0$)

Der Nachweis nach EC 3 erfolgt durch Ermittlung der wirksamen Flächen für jeden Querschnittsteil des Gesamtquerschnittes und anschließender Berechnung des wirksamen Gesamtquerschnitts (siehe Kapitel 3.2). Bei den hier untersuchten quadratischen Hohlprofilen konstanter Wanddicke ergibt sich bei Druckbeanspruchung eine Reduktion aller Bleche, während bei Biegung nur der gedrückte Gurt auf die effektiven Breiten reduziert werden muss (Stege sind beulsicher). Dadurch liegt immer eine konstante Druckbeanspruchung am einzelnen Querschnittsteil vor, sodass die „Winter-Kurve“ (vgl. Bild 3-3) unmittelbar angewendet wird. Bei Druckbeanspruchung ist alleine A_{eff} , bei Biegebeanspruchung alleine W_{eff} für die Tragfähigkeit nach Eurocode maßgebend.

Besonderes Augenmerk wird auf den Vergleich der konstanten Druckspannungen genommen, da für einen quadratischen Hohlkastenquerschnitt alle Teilbleche dieselbe Geometrie besitzen und infolgedessen auch dieselben Abminderungen aufgrund von Plattenbeulen erfahren. (identische Beulgefährdung aller Querschnittsteile)

Durch Vergleich der Traglasten des FE-Modells mit dem EC 3 konnte festgestellt werden, mit welcher lokalen geometrischen Imperfektion (Amplitudenwerten e_0) die Traglasten der „Winter-Kurve“ für einen quadratischen Hohlkastenquerschnitt erreicht werden.

Berechnungsprozedur 1:

Der 1. Berechnungsprozedur (als oberer Grenzwert) liegt zu Grunde, dass aus den vorhandenen Eigenspannungen keine Abtriebswirkungen entstehen bedingt durch die berücksichtigten lokalen geometrischen Imperfektionen. (siehe Kapitel 4)

Die Bestimmung der zutreffenden lokalen geometrischen Imperfektionsamplitude für die späteren Gesamtstabilitätsberechnungen erfolgt für diese Berechnungsprozedur durch Annäherung der ermittelten Traglasten an die „Winter-Kurve“.

Es werden jeweils GMNIA-Analysen mit angenommenen lokalen geometrischen Imperfektionen mit $b/400$ bzw. $b/300$ ermittelt. Als Vergleich erfolgt für die beiden Imperfektionsamplituden auch eine zusätzliche Traglastberechnung ohne Berücksichtigung von Eigenspannungen (strukturelle Imperfektionen).

Die Ergebnisse der GMNIA-Berechnungen sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. (siehe Bild 6-1 a bis Bild 6-2 b)

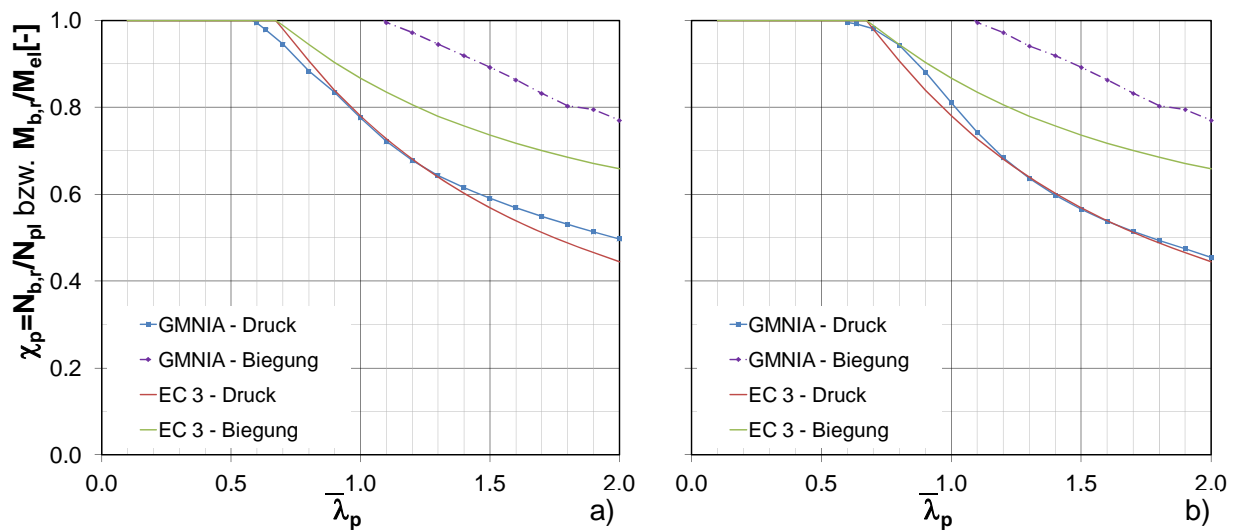


Bild 6-1: GMNIA-Berechnung (Berechnungsprozedur 1) – mit lokaler geometrischer Imperfektion $e_0=b/400$: a) mit Eigenspannungen, b) ohne Eigenspannungen

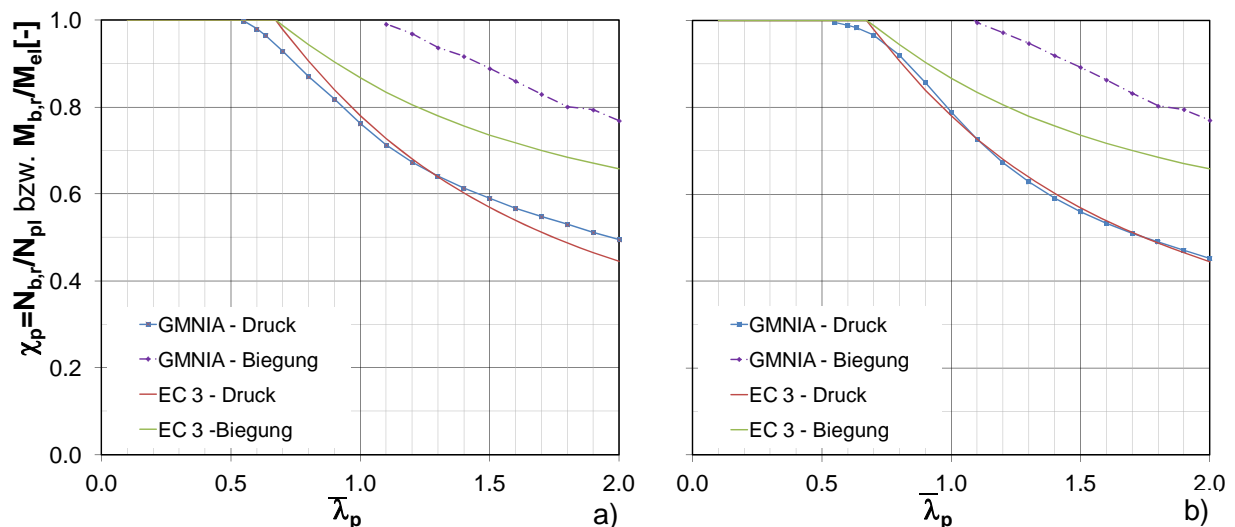


Bild 6-2: GMNIA-Berechnung (Berechnungsprozedur 1) – mit lokaler geometrischer Imperfektion $e_0=b/300$: a) mit Eigenspannungen, b) ohne Eigenspannungen

Im Vergleich zu Bild 6-2 a, zeigen die in Bild 6-1 a abgebildeten Traglasten aufgrund konstanter Druckbeanspruchung (GMNIA-Druck) mit $e_0=b/400$ als maximale Amplitude der lokalen geometrischen Imperfektion inklusive der Berücksichtigung von Eigenspannungen besonders für die untersuchten Querschnitte mit Plattenschlankheiten $\bar{\lambda}_p < 1,5$ eine bessere Annäherung an die Traglasten der „Winter-Kurve“. Dies bestätigt auch den häufig in der Literatur empfohlenen Wert von $e_0=b/400$. [16]

Im Vergleich der Teilbilder a und b zeigt sich auch der geringe Einfluss der Eigenspannungen für größere Plattenschlankheiten ($\bar{\lambda}_p > 1,0$), die bei großer Schlankheit sogar günstig werden.

Aus diesen Gründen werden für die weiteren Berechnungen der 1. Berechnungsprozedur die lokalen geometrischen Imperfektion immer e_0 =mit $b/400$ gewählt.

Die zur Veranschaulichung ebenfalls berechneten Traglasten aufgrund von reiner Biegebeanspruchung erreichen für alle Plattenschlankheiten sehr ähnliche Traglasten und liegen für alle vier GMNIA-Analysen deutlich über den Traglasten nach EC 3. Gründe hierfür sind hauptsächlich die implizite und konservative Annahme einer rein elastischen Spannungsverteilung, bei der Berechnung mit wirksamen Flächen. (siehe Kapitel 8.4)

Die Ermittlung der Momententragfähigkeit $M_{el,eff}$ (in Diagrammen mit „EC 3-Biegung“ bezeichnet) für beulgefährdete Querschnitte nach Eurocode ergibt für alle untersuchten Hohlkastenprofile nach folgendem effektiven Querschnitt.

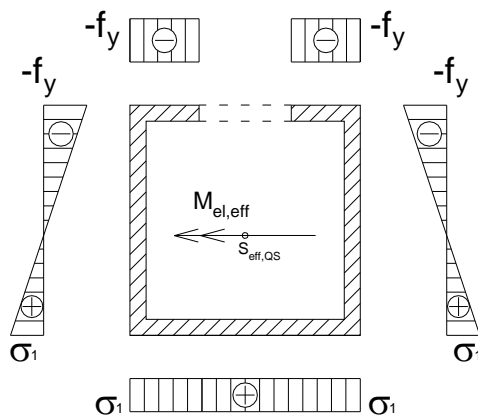


Bild 6-3: Berechnung der Momententragfähigkeit $M_{el,eff}$ für beulgefährdete Hohlkastenprofile

Berechnungsprozedur 2:

Als unterer Grenzwert wird die Traglastbestimmung mit Berechnungsprozedur 2 durchgeführt. Neben der ungünstigen Berücksichtigung der vollen Abtriebswirkung aus den Eigenspannungen an den lokalen geometrischen Imperfektionen, werden letztere mit der größtmöglichen Imperfektionsamplitude, die der aus dem Herstellungsprozess um 20% reduzierten erlaubten lokalen Imperfektion von $b/125$ ($e_0=0,8 \cdot b/125=b/156$) entspricht, angesetzt.

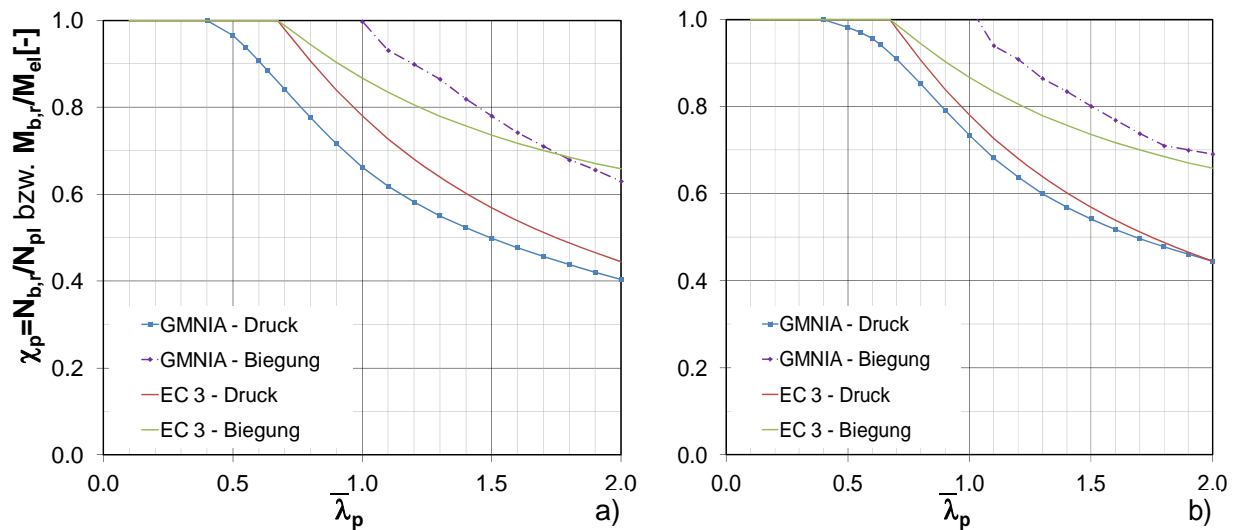


Bild 6-4: GMNIA- Berechnung (Berechnungsprozedur 2) – mit lokaler geometrischer Imperfektion $e_0=b/156$: a) mit Eigenspannungen, b) ohne Eigenspannungen

In Bild 6-4 a und Bild 6-4 b zeigen sich sowohl für Druck- als auch für Biegebeanspruchung durch Berücksichtigung bzw. Nichtberücksichtigung von Eigenspannungen große Unterschiede in den erreichten Traglasten. Auffallend ist hier, dass für reine Druckbeanspruchung inklusive Berücksichtigung der Eigenspannungen die ermittelten Traglasten (GMNIA- Druck) die Werte der „Winter-Kurve“ (EC 3 – Druck) bei weitem nicht erreicht werden.

7. Traglastberechnungen (GMNIA) bei Druckstäben (nur N)

In diesem Kapitel werden -als Grundlage für nachfolgende Untersuchungen mit Druck- und Biegebeanspruchung- Untersuchungen unter reiner Normalkraftbeanspruchung durchgeführt. Die Ergebnisse der simulierten Traglastberechnungen (GMNIA) mit dem Finite-Elemente Programm ABAQUS werden in diesem Kapitel dargestellt und ausgewertet.

7.1 Allgemeines

Es werden quadratische Hohlkastenquerschnitte der Querschnittsklassen 1, 2, 3 und 4, mit unterschiedlich modellierten Materialgesetzen (vgl. Bild 4-3), mit verschiedenen Materialfestigkeiten sowie auch unterschiedlich Ansätzen von Imperfektionen und Wahl der Lagerungsbedingungen, berechnet. Zusätzlich werden auch noch GMNIA-Berechnungen für rechteckige Hohlprofile mit einem Seitenverhältnis von $h:b=2:1$ ermittelt und abschließend ein Vergleich zwischen Hohlkastenprofilen mit quadratischem bzw. rechteckigem Grundriss angestellt.

Der Berechnungsvorgang für Einzelstäbe mit reiner Druckbeanspruchung erfolgte nach Berechnungsprozedur 1. (siehe Kapitel 4)

Bei Querschnittsklasse 4 ist besonders der Einfluss der Interaktion der beiden Stabilitätsfälle -lokal und global- zu berücksichtigen. Rückführend auf diesen Sachverhalt ist laut ÖNORM EN 1993-1-1 für Querschnitte der Querschnittsklasse 4 ein zu den Querschnittsklassen 1 bis 3 differenzierter Tragfähigkeitsnachweis zu führen. Hierbei wird der Bruttoquerschnitt mittels des Verfahrens der effektiven Breiten -wie detailliert in Kapitel 3.2 ausgeführt- abgemindert und mit einer modifizierten Schlankheit der eigentliche Tragfähigkeitsnachweis durchgeführt.

Als Bezugsmaterial wird für alle Traglastberechnungen Baustahl S355 verwendet. Zum Vergleich werden zusätzlich noch Untersuchungen mit Baustahl S235 und S460 durchgeführt.

Die Ergebnisdarstellung in diesem Kapitel erfolgt mittels Diagrammen durch Auftragen der auf die Querschnittstragfähigkeit bezogenen Traglast ($\chi=N_{b,r}/N_{pl}$) als y-Achse (Ordinate), gegenüber der auf der x-Achse (Abszisse) aufgetragenen bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}$ oder, als sogenannte „Rankine-Darstellung“, dem Verhältnis der auf die ideale Knicklast bezogenen Traglast $N_{b,r}/N_{cr}$.

Nach Abschluss der Berechnungen sind die Ergebnisse der GMNIA-Analyse entsprechend den richtigen Bezugswerten auf der Abszisse in den Diagrammen eingetragen. Unter anderem ist es Ziel der Arbeit, einen Vergleich der Ergebnisse der Traglastanalysen zu jenen nach EC 3 durchzuführen. Da nach EC 3, siehe Kapitel 3.3, stabilitätsgefährdete geschweißte Hohlkastenprofile der Knickspannungslinie b zuzuordnen sind, werden die Knickspannungslinien ebenfalls in den Diagrammen eingezeichnet. Die meisten GMNIA-Analysen ergeben Traglasten, die höher sind als die Traglastwerte der Knickspannungslinie b nach EC 3. Um die erhöhten Traglasten im Vergleich mit dem EC 3 besser einordnen zu können, wird als weitere Referenzlinie die Traglast nach Knickspannungslinie a in den Diagrammen eingetragen.

Weiters wird in den Diagrammen, deren Abszissenachse mit der globalen bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}$ definiert ist, zusätzlich die Traglast nach der Verzweigungstheorie („Euler“) dargestellt. Diese beschreibt die Traglast unter Annahme eines idealen Systems (Stab ohne Imperfektionen, ideal elastisches Material und mittiger Lastangriff).

7.2 Traglastberechnungen – quadratische Hohlkastenprofile

In einem ersten Schritt werden Traglastberechnungen (GMNIA) an quadratischen Hohlkastenprofilen durchgeführt. Um den Einfluss der Querschnittsklassen auf die Tragfähigkeit von Hohlkastenprofilen bestimmen zu können, werden die Querschnitte so gewählt, dass mindestens für jede Querschnittsklasse eine Querschnitt vorliegt und damit eine GMNIA-Berechnung durchgeführt wird.

7.2.1 Baustahl S355 - Materialmodell ohne lineare Verfestigung

Erster Teil der GMNIA-Traglastberechnungen sind Berechnungen am Einzelstab mit beidseits gelenkiger Lagerungsbedingung und mit Baustahl S355 ($f_y = 355 \text{ N/mm}^2$, $f_u = 510 \text{ N/mm}^2$) mit bilinearem Materialgesetz ohne plastische Verfestigung nach Berechnungsprozedur 1. (siehe Bild 4-3 a)

Querschnittsklasse 1:

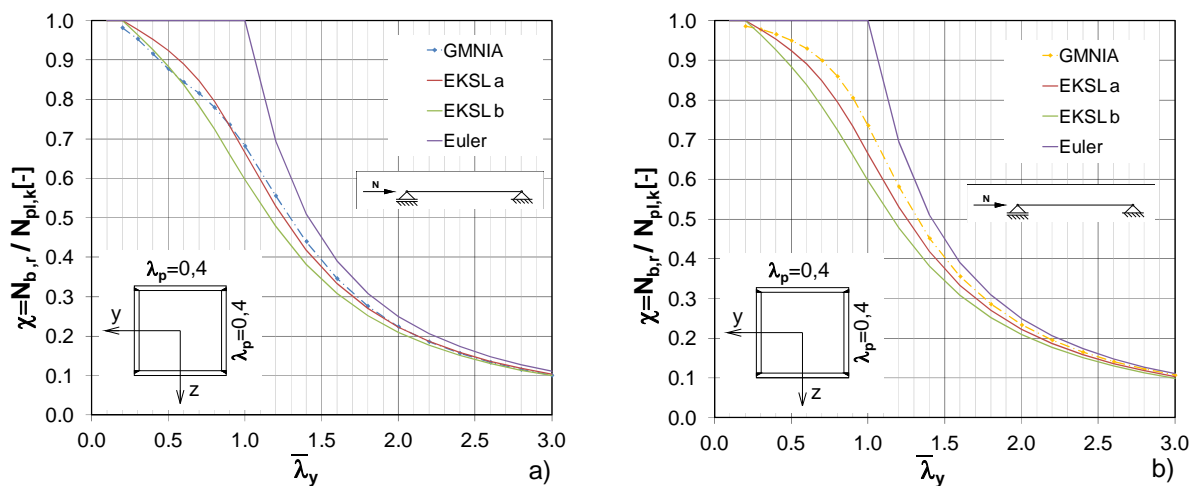


Bild 7-1: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 1 ($\bar{\lambda}_p=0,4$), a) mit, b) ohne Eigenspannungen

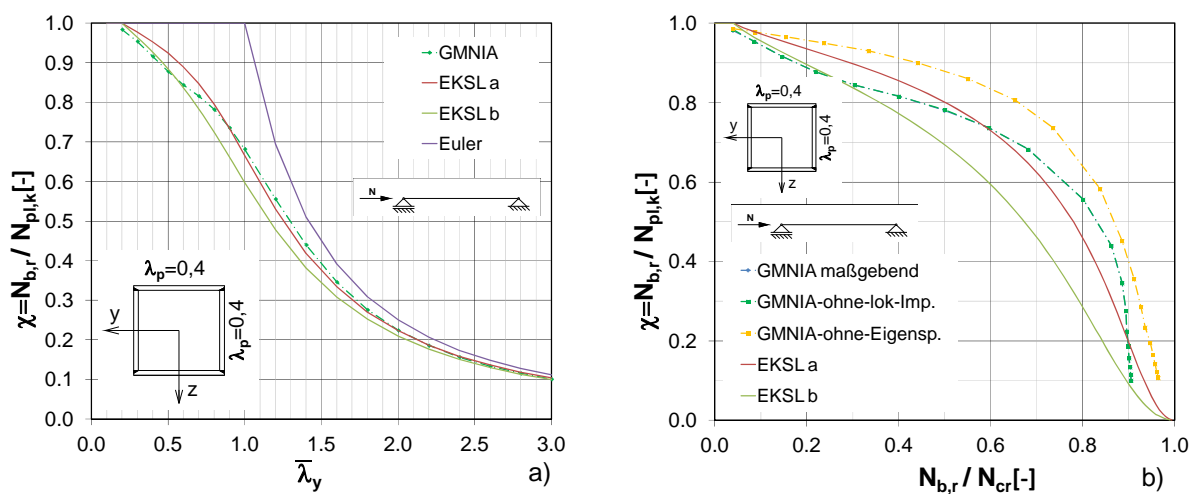


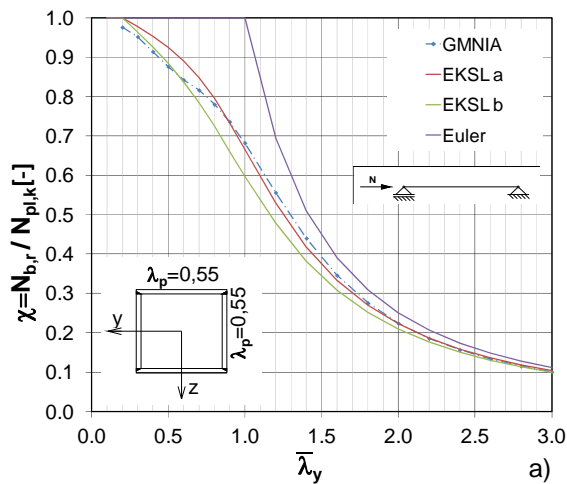
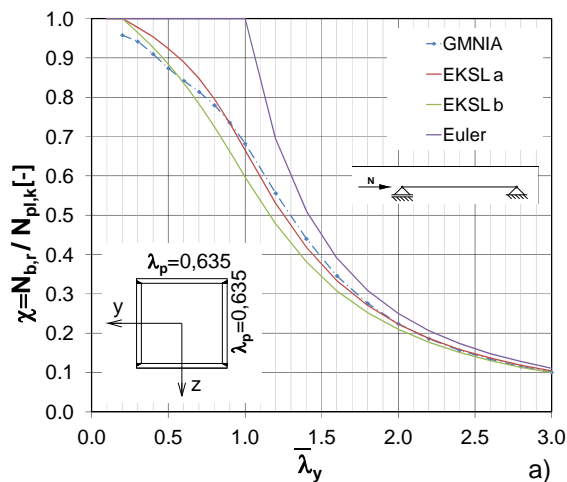
Bild 7-2: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 1 ($\bar{\lambda}_p=0,4$), a) ohne lokale Imperfektionen, b) Vergleich GMNIA-Berechnungen – Referenz/ohne Eigenspannungen/ohne lokale Imperfektion

Das Bild 7-1 und Bild 7-2 zeigen GMNIA-Analysen eines Profils der Querschnittsklasse 1 mit einer bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}_p=0,4$. Das entspricht ungefähr einem Hohlprofil mit den geometrischen Abmessungen 164/164/8mm. Neben Analysen mit der maßgebenden (ungünstigsten) Kombination als Referenzfall unter Berücksichtigung von globalen und lokalen Imperfektionen (100% global + 70% lokal oder 70% global + 100% lokal) und Eigenspannungen (in Bild 7-1 a dargestellt), wurden weitere Analysen getätigt.

Das Bild 7-1 b zeigt die Ergebnisse einer Traglastanalyse ohne Berücksichtigung von Eigenspannungen, jedoch mit lokalen und globalen geometrischen Imperfektionen. Zusätzlich wird noch eine GMNIA-Analyse mit Berücksichtigung von Eigenspannungen und globalen geometrischen Imperfektionen, jedoch ohne Berücksichtigung von lokalen geometrischen Imperfektionen, durchgeführt. Ziel ist es zu bestätigen, dass bei Querschnitten der Klasse 1 die Berücksichtigung von lokalen geometrischen Imperfektionen nahezu keine Beeinflussung auf die Tragfähigkeit bewirkt.

Bei der GMNIA-Analyse in Bild 7-1 a fällt auf, dass die Traglastfunktion für bezogene Schlankheiten bis $\bar{\lambda}_y=1,0$ einen „durchhängenden Bauch“ hat und teilweise sogar leicht unter den Referenzwerten der Knickspannungslinie b des EC 3 liegt, hingegen aber bei höheren Schlankheiten sich der Knickspannungslinie a annähert. Bei Vergleich mit den Ergebnissen ohne Berücksichtigung von Eigenspannungen -in Bild 7-1 b bzw. auch Bild 7-2 b kann festgestellt werden, dass besonders der Effekt des „durchhängenden Bauchs“ im Bereich niedriger bezogener Schlankheiten auf die vorhandenen Eigenspannungen zurückzuführen ist.

Wie in Bild 7-2 b, einer Gegenüberstellung der drei unterschiedlichen GMNIA-Berechnungen mit der „Rankine-Darstellung“, ersichtlich, hat die Nichtberücksichtigung der lokalen geometrischen Imperfektionen keinen Einfluss auf die Traglast –die GMNIA Kurve entspricht (und liegt in der Darstellung daher unterhalb) der GMNIA-Kurve ohne lokaler geometrischer Imperfektion. Ergänzend ist anzuführen, dass bei der „Rankine-Darstellung“ im Falle von Querschnitten der Klasse 4 für N_{cr} immer die ideale Knicklast des Bruttoquerschnitts angesetzt wird.

Querschnittsklasse 2:Bild 7-3: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 2 ($\bar{\lambda}_p=0,55$)**Querschnittsklasse 3:**Bild 7-4: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 3 ($\bar{\lambda}_p=0,635$)

Die Traglastanalysen für Querschnittsklasse 2 mit einem Hohlprofil mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,55$ ($b=219\text{mm}$, $t=8\text{mm}$) und Querschnittsklasse 3 mit einem Hohlprofil mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,635$ ($b=251\text{mm}$, $t=8\text{mm}$) sind in Bild 7-3 und Bild 7-4 dargestellt. Auffallend ist auch hier der Einfluss der Eigenspannungen im Bereich niedriger globaler Schlankheiten. In diesem Schlankheitsbereich erreichen die ermittelten Traglasten nicht die Werte der Knickspannungslinie b. Hingegen nähern sich die GMNIA-Ergebnisse bei größer werdenden Schlankheiten, wie für Querschnittsklasse 1, den Werten der Knickspannungslinie a an.

Querschnittsklasse 4:

Für Querschnittsklasse 4 werden drei verschiedene Hohlkastenprofile mit bezogenen Plattenschlankheiten von $\bar{\lambda}_p=0,7$, $\bar{\lambda}_p=0,9$, $\bar{\lambda}_p=1,1$ und $\bar{\lambda}_p=1,5$, berechnet. Anzuführen ist, dass nun anstatt der globalen bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}_y$ die kleineren Werte $\bar{\lambda}_{y,red}$ für den Vergleich der GMNIA-Ergebnisse verwendet werden müssen (x-Achse).

Während der Querschnitt mit $\bar{\lambda}_p=0,7$ den Übergang von Querschnittsklasse 3 auf Querschnittsklasse 4 repräsentieren soll und somit nur eine sehr kleine Abminderung der Querschnittsfläche durch Plattenbeulen entsteht, tritt bei dem Hohlkastenprofil mit $\bar{\lambda}_p=1,5$ schon eine sehr große Reduktion der Fläche auf.

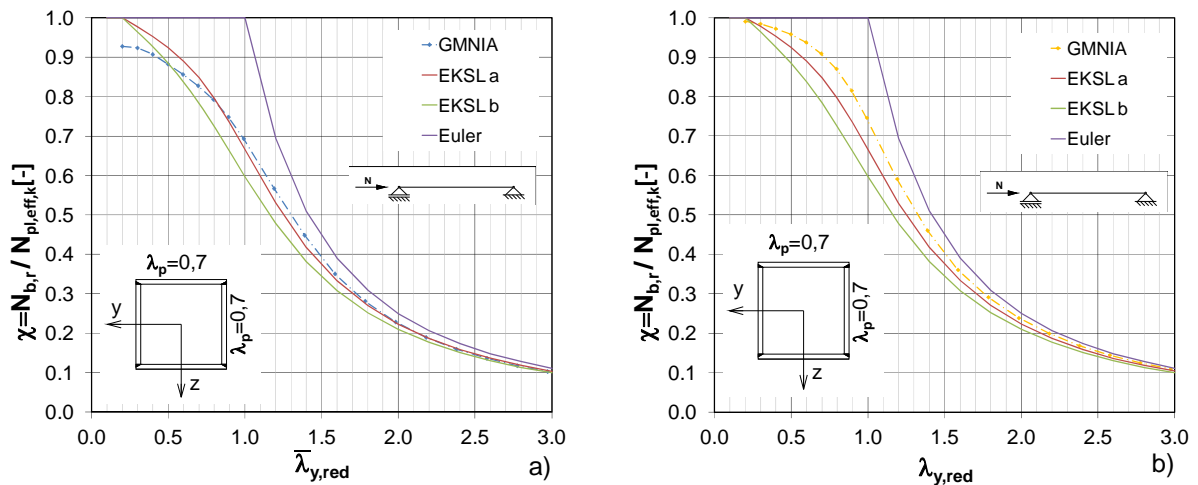


Bild 7-5: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4 ($\bar{\lambda}_p=0,7$), a) maßgebend, b) ohne Eigenspannungen

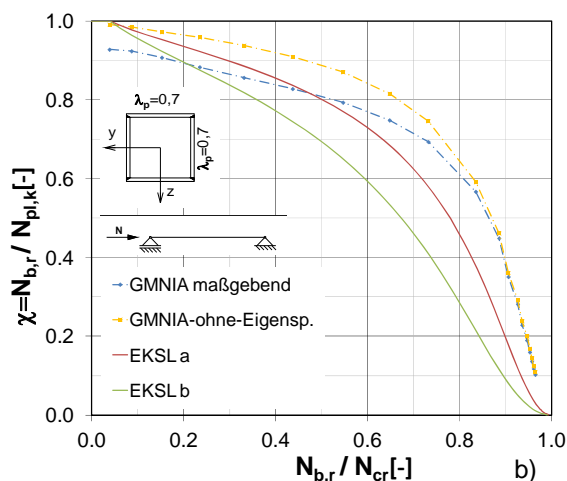


Bild 7-6: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4 ($\bar{\lambda}_p=0,7$) Vergleich – maßgebend/ohne Eigenspannung

Für den Querschnitt mit $\bar{\lambda}_p=0,7$ wird neben der maßgebenden GMNIA-Traglastanalyse, unter Berücksichtigung von Eigenspannungen, lokalen und globalen geometrischen Imperfektionen (Bild 7-5 a), eine GMNIA-Berechnung mit Berücksichtigung von geometrischen Imperfektionen, jedoch ohne Eigenspannung durchgeführt (Bild 7-5 b).

Bild 7-5 a zeigt, im Gegensatz zu den Ergebnisse der Querschnittsklassen 1-3, im niedrigen globalen Schlankheitsbereich keinen „durchhängenden Bauch“. Für niedrige globale bezogene Schlankheiten ($\bar{\lambda}_{y,red} < 0,5$) sind die Traglasten kleiner als die Traglasten der Knickspannungslinie b nach EC 3. Der Vergleich der beiden Analysen mit und ohne Eigenspannungen erfolgte in Bild 7-6 , wobei zu erkennen ist, dass ohne Berücksichtigung der Eigenspannungen deutlich höhere Traglasten im niedrigen globalen Schlankheitsbereich erreicht werden. Bei zunehmendem $N_{b,r}/N_{pl}$ -Verhältnis bzw. höheren globalen Schlankheiten ist eine Annäherung der Traglasten zu beobachten.

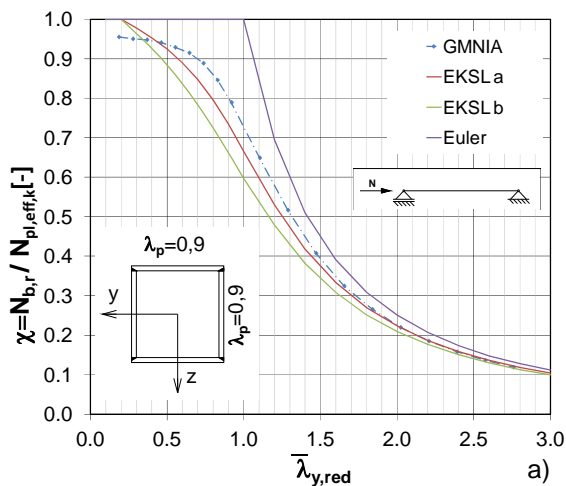


Bild 7-7: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4 ($\bar{\lambda}_p=0,9$)

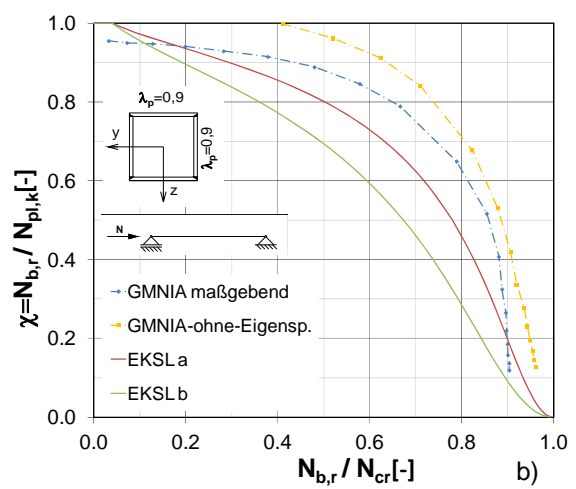
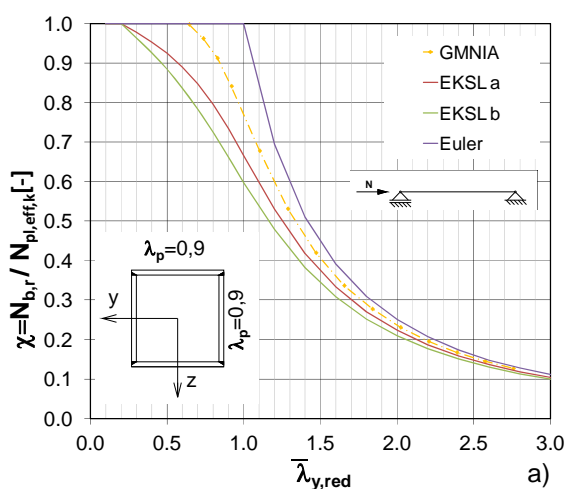


Bild 7-8: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4 ($\bar{\lambda}_p=0,9$), a) ohne Eigenspannungen, b) Vergleich – mit/ohne Eigenspannung

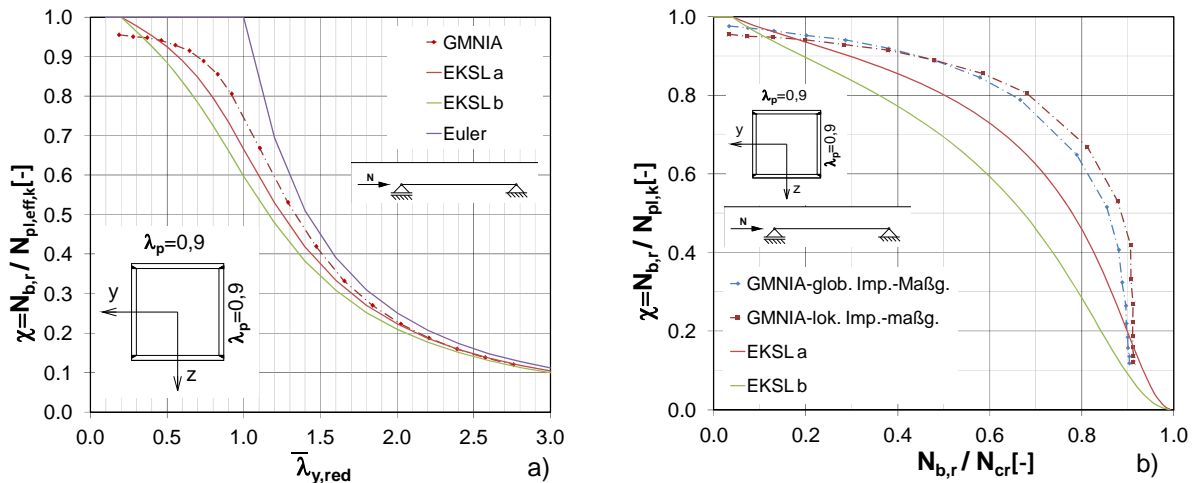


Bild 7-9: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4 ($\bar{\lambda}_p=0,9$), a) lokale Imperfektionen maßgebend (100% lokal + 70% global), b) Vergleich – globale (100% global + 70% lokal)/lokale (100% lokal + 70% global) Imperfektionen maßgebend

Die Darstellung der maßgebenden GMNIA-Traglasten für den Querschnitt mit einer bezogenen Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,9$ erfolgt in Bild 7-7. Für globale bezogene Schlankheiten $\bar{\lambda}_{y,red} < 0,4$ werden laut GMNIA-Berechnung die Traglasten nach EC 3 nicht erreicht. Jedoch ergeben sich für Schlankheiten von $0,5 < \bar{\lambda}_{y,red} < 1,5$ Traglasten, die sogar höher als die Referenzwerte der Knickspannungslinie a laut EC 3 liegen. In Bild 7-8 a sind die Ergebnisse für eine GMNIA-Berechnung ohne Berücksichtigung der Eigenspannungen dargestellt. Im Vergleich zur zutreffenden Traglastberechnung erhält man ohne Eigenspannungen, siehe Bild 7-8 b, eine deutlich erhöhte Traglast.

Da in erster Linie bei Querschnitten der Klasse 4 lokale geometrische Imperfektionen einen großen Einfluss auf die Tragfähigkeit haben, ist es interessant die beiden unterschiedlichen Analysen -lokale oder globale Imperfektion führend- zu vergleichen. Ziel ist es, zu bestimmen für welche globalen Schlankheitsbereiche welche Art, lokal oder global, der geometrischen Imperfektion maßgebend ist. In Bild 7-9 a sind die Ergebnisse der GMNIA-Berechnung mit lokalen geometrischen Imperfektionen als maßgebende Imperfektion ersichtlich. (Überlagerung 100% global + 70% lokal) Über die „Rankine-Darstellung“ werden diese mit den Traglasten mit führenden globalen geometrischen Imperfektion verglichen.

Für den Querschnitt $\bar{\lambda}_p=0,9$ ist festzustellen, dass für globale bezogene Schlankheiten von $\bar{\lambda}_{y,red} < 0,8$ bzw. $N_{b,r}/N_{pl} < 0,5$ die lokalen geometrischen Imperfektionen maßgebend werden und ungünstigere Traglasten liefern. Im Gegensatz dazu sind bei höheren Schlankheiten die globalen geometrischen Imperfektionen maßgebend für die Traglastanalyse. Näherungsweise kann angemerkt werden, dass lokale geometrische Imperfektionen maßgebend sind, wenn für einen Einzelstab mit geschweißtem

Hohlkastenprofil als Querschnitt die lokale bezogene Schlankheit größer als die globale bezogene Schlankheit ($\bar{\lambda}_{y,\text{red}} \leq \bar{\lambda}_p$) ist.

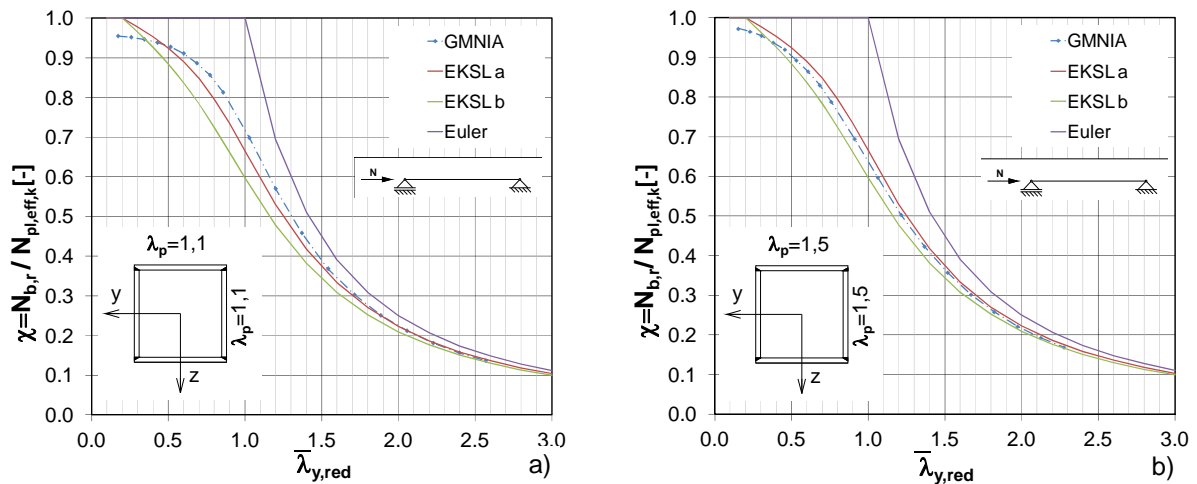


Bild 7-10: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4, a) $\bar{\lambda}_p=1,1$, b) $\bar{\lambda}_p=1,5$

Es werden weitere GMNIA-Traglastberechnungen mit Querschnitten der Klasse 4 durchgeführt. Als Querschnitte werden geschweißte Hohlkastenprofile mit bezogener Plattenschlankheit von $\bar{\lambda}_p=1,1$ bzw. $\bar{\lambda}_p=1,5$ gewählt und die Ergebnisse in Bild 7-10 a bzw. Bild 7-10 b dargestellt. Beim Vergleich der Ergebnisse ist zu sehen, dass bei der Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=1,1$ die Traglasten für Schlankheiten $0,5 < \bar{\lambda}_{y,\text{red}} < 1,5$ knapp höher als die Traglasten der Knickspannungslinie a sind, jedoch bei Steigerung der Plattenschlankheit auf $\bar{\lambda}_p=1,5$ wieder ein Abfall der Traglasten im Bezug zu den Knickspannungslinien zu beobachten ist. Der Grund für dieses Verhalten kann wiederum im unterschiedlichen Einfluss der Eigenspannungen und geometrischen Imperfektionen bei verschiedenen Schlankheitsgraden vermutet werden:

- bei Schlankheiten (global und lokal) von ca. 0,50 bis etwas über 1,00 (also auch bei 1,10) ist der Einfluss dieser Imperfektionen sehr groß und die Berechnungsergebnisse reagieren sehr sensibel auf Änderungen der Imperfektionsamplituden; demnach ist die Berechnungsmethodik des Eurocodes konservativ, da die –in diesem Bereich dominanten– Imperfektionen „doppelt verrechnet“ werden, sowohl im globalen als auch im lokalen Abminderungsfaktor (χ bzw. ρ).
- bei sehr großen (Platten-) Schlankheiten hängt die „effektive“ Breite nur noch marginal von den Eigenspannungen bzw. von der geometrischen Imperfektionsamplitude ab; dementsprechend fällt die „doppelte Verrechnung“ hier weg und die Vorgehensweise des Eurocode verliert wieder an Konservatismus und nähert sich mehr den tatsächlichen Traglasten.

7.2.2 Baustahl S355 – Materialmodell mit linearer Verfestigung

In diesem Unterkapitel wird der Einfluss der Materialverfestigung nach Erreichen der Streckgrenze f_y untersucht. Es wird nun das Materialgesetz nach Bild 4-3 b mit linearer Wiederverfestigung den GMNIA-Traglastberechnungen zu Grunde gelegt. Für jede Querschnittsklasse wurde je ein Profil gewählt und anschließend die Traglastanalysen durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Bild 7-11 a bis Bild 7-14 a dargestellt, und auch jenen ohne Verfestigung gegenübergestellt (nach Bild 4-3 a).

Um den Vergleich mit den Berechnungen ohne Verfestigung besser sichtbar zu machen, werden mittels „Rankine-Darstellung“ in Bild 7-11 b) bis Bild 7-14 b) die Ergebnisse der unterschiedlichen Berechnungen einander gegenübergestellt.

Querschnittsklasse 1:

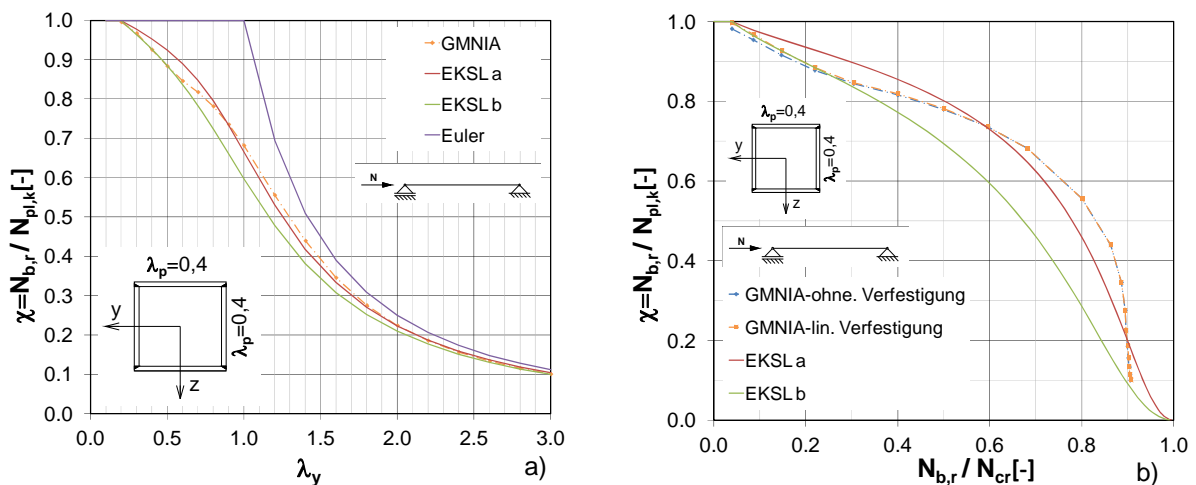


Bild 7-11: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 1 ($\bar{\lambda}_p=0,4$), a) mit linearer Verfestigung, b) Vergleich - mit linearer Verfestigung / ohne Verfestigung

Querschnittsklasse 2:

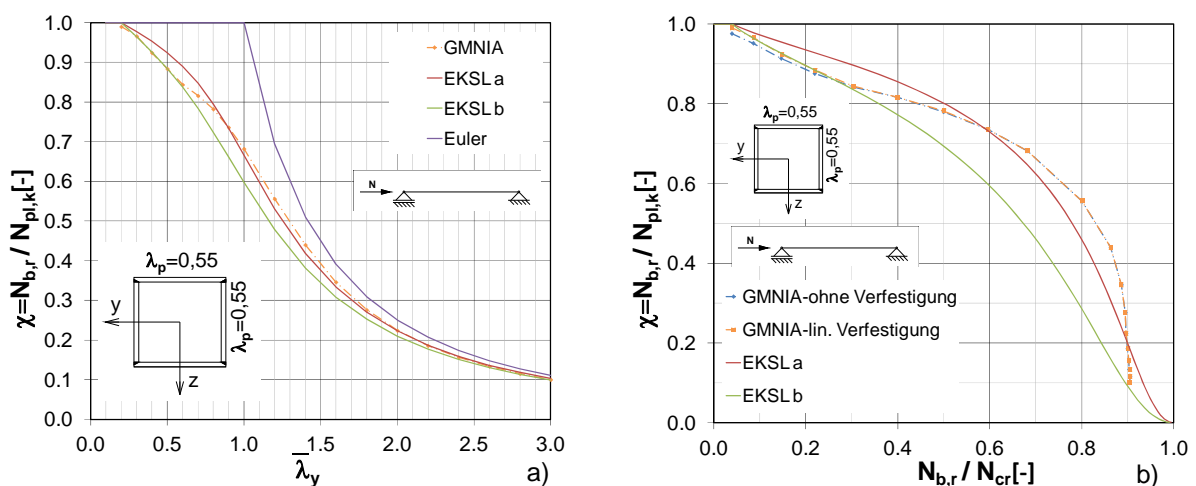


Bild 7-12: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 2 ($\bar{\lambda}_p=0,55$), a) mit linearer Verfestigung, b) Vergleich - mit linearer Verfestigung / ohne Verfestigung

Querschnittsklasse 3:

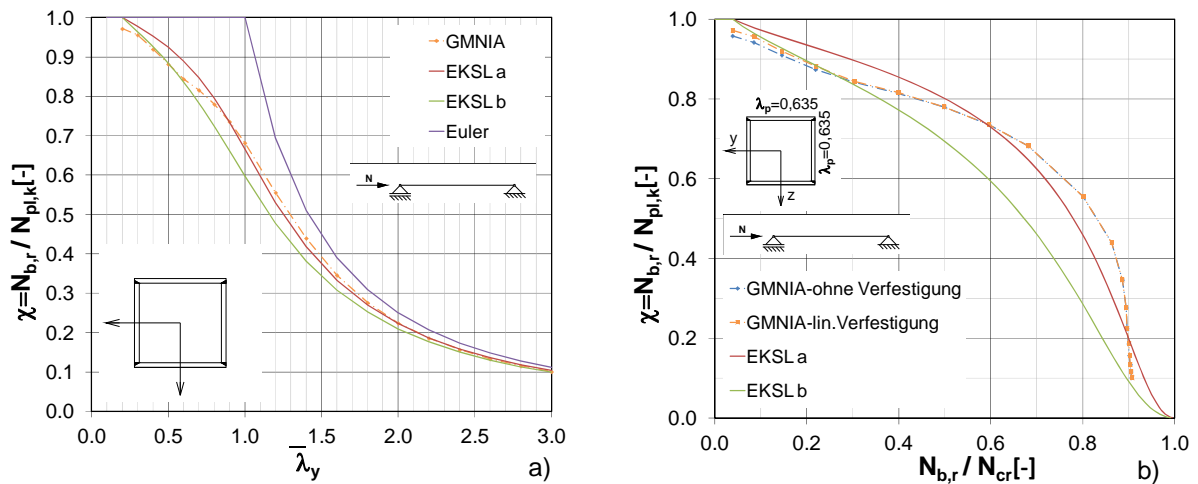


Bild 7-13: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 3 ($\bar{\lambda}_p=0,635$), a) mit linearer Verfestigung, b) Vergleich - mit linearer Verfestigung / ohne Verfestigung

Querschnittsklasse 4:

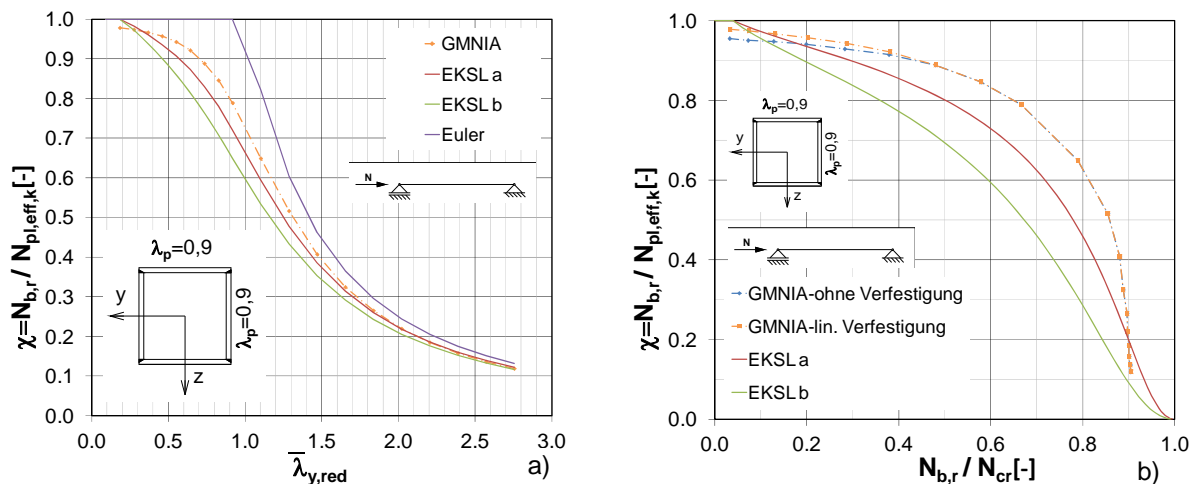


Bild 7-14: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4 reduziert ($\bar{\lambda}_p=0,9$), a) mit linearer Verfestigung, b) Vergleich - mit linearer Verfestigung / ohne Verfestigung

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass zu bei allen Querschnittsklassen die Berücksichtigung der Materialverfestigung nur zu sehr geringen Änderungen der Traglast führt. Es zeigen sich nur im Bereich von niedrigen N_b/N_{cr} -Verhältnissen bzw. kleinen globalen bezogenen Schlankheiten $\bar{\lambda}_y$ geringe Steigerungen der Traglasten durch die Materialverfestigung.

7.2.3 Baustahl S235 – Materialmodell ohne bzw. mit linearer Verfestigung

Neben dem Standardmaterial Baustahl S355 werden auch GMNIA-Analysen mit Baustahl S235 ($f_y = 235 \text{ N/mm}^2$, $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$) berechnet. Für diese Materialgüte werden die Analysen auf zwei unterschiedliche Querschnitte begrenzt. Es wird ein Querschnitt der Klasse 1 ($\bar{\lambda}_p=0,4$) sowie ein beulgefährdeter Querschnitt der Klasse 4 ($\bar{\lambda}_p=0,9$) gewählt. Als Materialgesetz wurden die Berechnungen sowohl ohne Berücksichtigung von Wiederverfestigung (Bild 4-3 a) als auch mit linearer Wiederverfestigung berücksichtigt (Bild 4-3 b).

Querschnittsklasse 1:

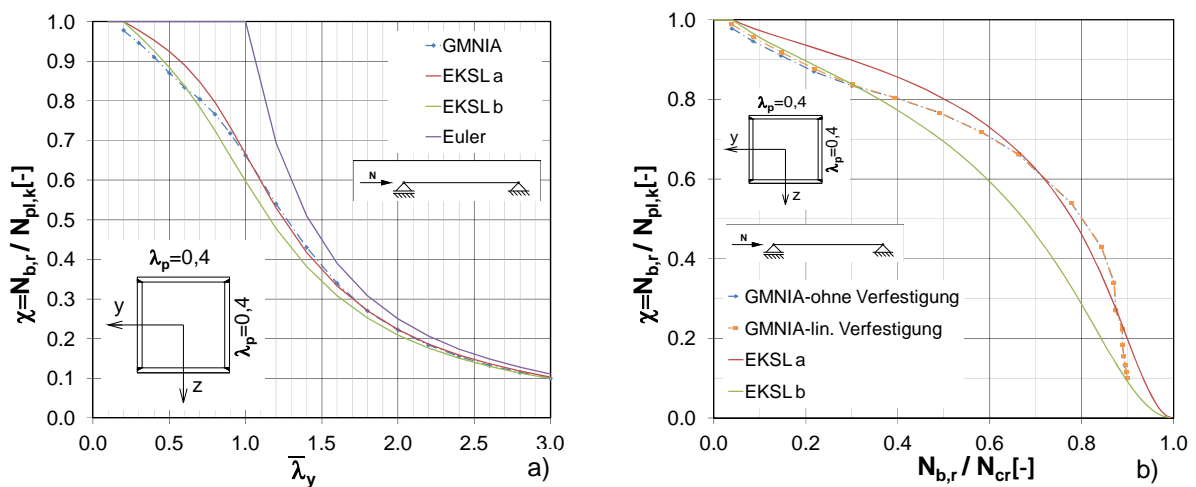


Bild 7-15: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 1 ($\bar{\lambda}_p=0,4$), a) ohne Verfestigung, b) Vergleich mit linearer Verfestigung / ohne Verfestigung

In Bild 7-15 a sind die Traglasten der GMNIA-Berechnung ohne Verfestigung im Vergleich zu den Knickspannungslinien a und b nach EC 3 ersichtlich. Im Bereich von niedrigen bezogenen globalen Schlankheiten sind die Traglasten kleiner als die zulässigen Traglasten der Knickspannungslinie b. Für größere bezogene globale Schlankheiten nähern sich die Ergebnisse der GMNIA-Berechnung den Referenzwerten der Knickspannungslinie a. Im Vergleich mit den Traglasten unter Berücksichtigung linearer Verfestigung nach Erreichen der Streckgrenze ergeben sich nur sehr kleine Unterschiede der Traglasten (Bild 7-15 b).

Auch für Querschnittsklasse 4 (Bild 7-16 a) liegen die Traglasten im Bereich von kleinen bezogenen Schlankheiten ($\bar{\lambda}_{y,red} < 0,5$) unter den zulässigen Traglasten nach EC 3. Für größere Schlankheiten werden sogar die zulässigen Traglasten der Knickspannungslinie a erreicht. Auch für dieses Profil ergeben sich durch Berücksichtigung von linearer Verfestigung nach Erreichen der Streckgrenze praktisch keine Erhöhungen der Traglasten (Vergleich Berechnungen: siehe Bild 7-16 b).

Querschnittsklasse 4:

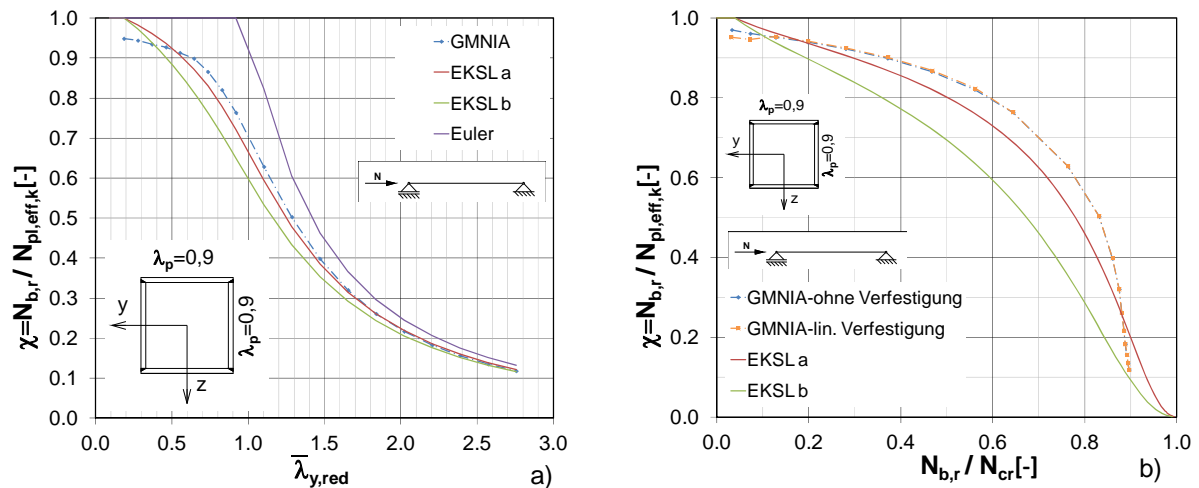


Bild 7-16: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4 reduziert ($\bar{\lambda}_p=0,9$), a) ohne Verfestigung, b) Vergleich - mit linearer Verfestigung / ohne Verfestigung

7.2.4 Baustahl S460 – Materialmodell ohne bzw. mit linearer Verfestigung

Nach Baustahl S235 und dem Standardmaterial Baustahl S355 werden zusätzlich noch GMNIA-Analysen mit Baustahl S460 ($f_y = 460 \text{ N/mm}^2$, $f_u = 540 \text{ N/mm}^2$) durchgeführt. Die Berechnungen werden wiederum auf einen Querschnitt der Klasse 1 ($\bar{\lambda}_p=0,4$) und einen beulgefährdeten Querschnitt der Klasse 4 ($\bar{\lambda}_p=0,9$) begrenzt. Auch hier werden zwei unterschiedliche Materialgesetze, ohne Berücksichtigung von Wiederverfestigung (Bild 4-3 a) bzw. mit linearer Wiederverfestigung (Bild 4-3 b), für die Analysen verwendet.

Querschnittsklasse 1:

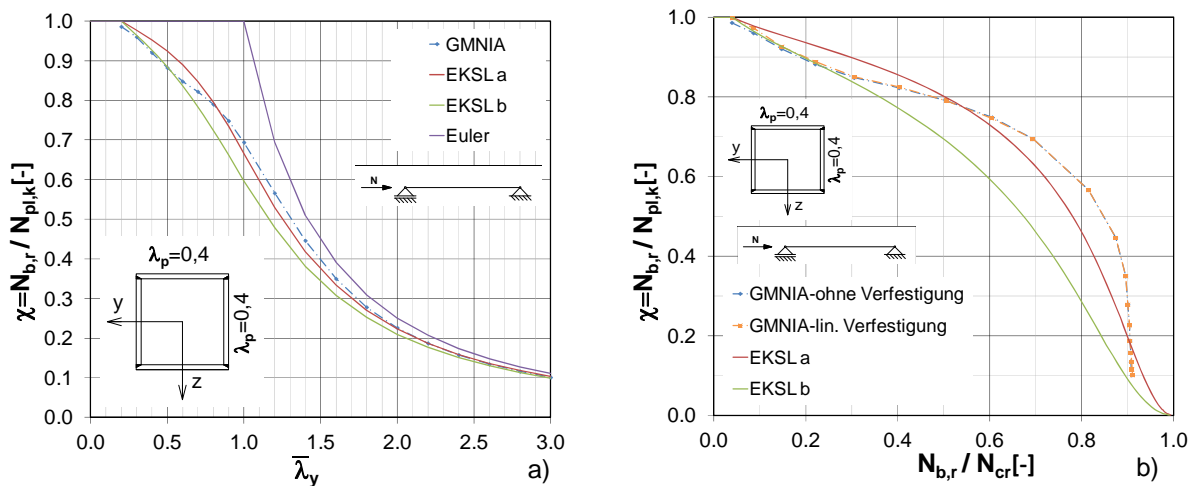


Bild 7-17: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 1 ($\bar{\lambda}_p=0,4$), a) ohne Verfestigung, b) Vergleich - mit linearer Verfestigung / ohne Verfestigung

Querschnittsklasse 4:

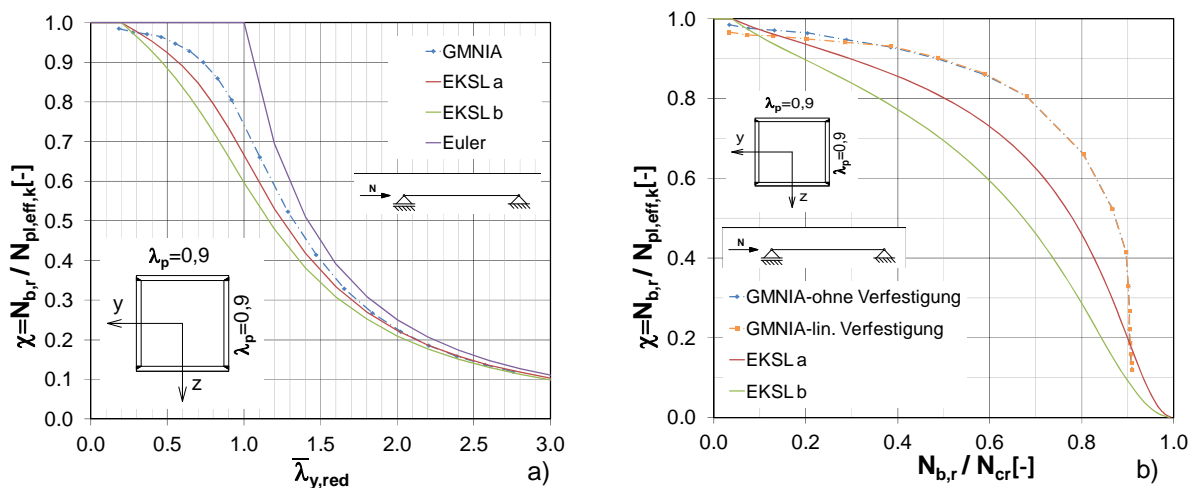


Bild 7-18: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4 reduziert ($\bar{\lambda}_p=0,9$), a) ohne Verfestigung, b) Vergleich - mit linearer Verfestigung / ohne Verfestigung

Während in Bild 7-17 a die Traglasten für Querschnittsklasse 1 (Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,4$) ohne Verfestigung ersichtlich sind, werden in Bild 7-17 b diese Traglasten den Traglasten unter Berücksichtigung von Wiederverfestigung gegenübergestellt. Es ergeben sich wiederum kaum Unterschiede in den erreichten Traglasten. Für niedrige globale bezogene Schlankheiten $\bar{\lambda}_y$ sind die erreichten Traglasten minimal kleiner als die Traglasten laut Knickspannungslinie b nach EC 3. Für höhere $\bar{\lambda}_y$ decken sich die Traglasten der GMNIA-Analyse ziemlich gut mit den Traglasten nach Knickspannungslinie a.

Die Traglasten für $\bar{\lambda}_p=0,9$ (Querschnittsklasse 4), siehe Bild 7-18 a, erreichen nur für sehr kleine globale bezogene Schlankheiten $\bar{\lambda}_{y,red}$ nicht die Traglasten der Knickspannungslinie b. Ab globalen bezogenen Schlankheiten von $0,4 < \bar{\lambda}_{y,red} < 1,5$ übersteigen die erreichten Traglasten der GMNIA-Analyse die Werte der Knickspannungslinie a nach EC 3 sogar deutlich, und nähern sich für hohe globale bezogene Schlankheiten $\bar{\lambda}_{y,red} > 1,5$ der Knickspannungslinie a. Eine Berücksichtigung von linearer Verfestigung nach Erreichen der Streckgrenze ergibt wiederum keine Erhöhung der Traglasten (siehe Bild 7-18 b).

7.2.5 Vergleich der unterschiedlichen Materialfestigkeiten

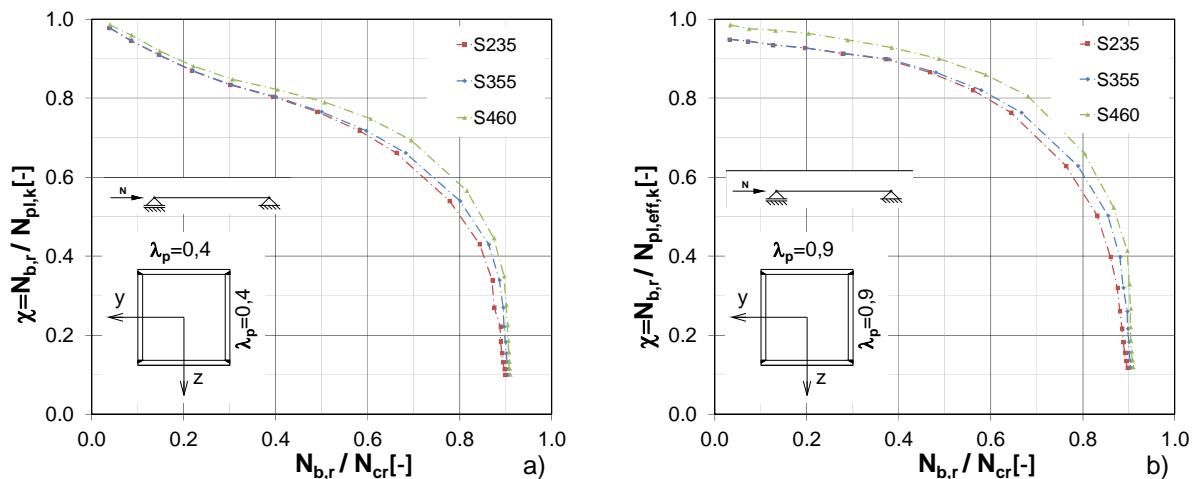


Bild 7-19: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für Baustahl S235, S355 und S460: a) Querschnittsklasse 1 ($\bar{\lambda}_p=0,4$), b) Querschnittsklasse 4 ($\bar{\lambda}_p=0,9$)

In diesem Abschnitt sind die ermittelten bezogenen Traglasten der Stahlsorten S235, S355 und S460 miteinander verglichen. Die Traglasten werden ohne Berücksichtigung linearer Wiederverfestigung nach Erreichen der Streckgrenze einander gegenübergestellt, da eine Berücksichtigung, wie in den vorigen Unterkapiteln ersichtlich, keine nennenswerte Steigerung der Tragfähigkeit ergibt.

Der Vergleich für Querschnittsklasse 1, mit einer Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,4$ in Bild 7-19 a, zeigt besonders für die Baustähle S235 und S355 sehr ähnliche Traglasten. Etwas höhere Traglasten werden bei Verwendung von Baustahl S460, besonders im Bereich von $0,4 < N_{b,r} / N_{cr} < 0,85$, erreicht. Ähnliches Verhalten zeigen auch die Ergebnisse für eine Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,9$, dies liefert einen Querschnitt der Klasse 4 in Bild 7-19 b. Auch hier erreichen die bezogenen Traglasten der Baustähle S235 und S355 ähnliche Werte. Mit Baustahl S460 ergaben sich jedoch demgegenüber kontinuierlich höhere bezogene Traglasten.

7.2.6 Untersuchung für beidseits eingespannte Stütze

Weiteres Interesse besteht darin, zusätzlich zu den beidseitigen gelenkig gelagerten Einzelstäben auch GMNIA-Analysen am Einzelstab mit einer Einspannung durchzuführen und anschließend einen Vergleich mit den gelenkig gelagerten Stäben herzustellen.

Außerdem stellte sich die Frage, ob für einen beidseits eingespannten Einzelstab eine Annahme der globalen geometrischen Vorverformung als Imperfektionsform, die der 1. globalen Eigenform des gelenkig gelagerten Einzelstabes (Form einer Parabel) entspricht, eine Erhöhung oder Verminderung der Traglast zur Folge hat, gegenüber der 1. Eigenform der beidseits eingespannten Stütze.

Als Querschnitte werden wiederum geschweißte Hohlkastenprofile mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,4$ (Querschnittsklasse 1) sowie mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,9$ (Querschnittsklasse 4) unter Verwendung von Baustahl S355 ($f_y = 355 \text{ N/mm}^2$) und ohne die Berücksichtigung von Wiederverfestigung (Bild 4-3 a) betrachtet.

Querschnittsklasse 1:

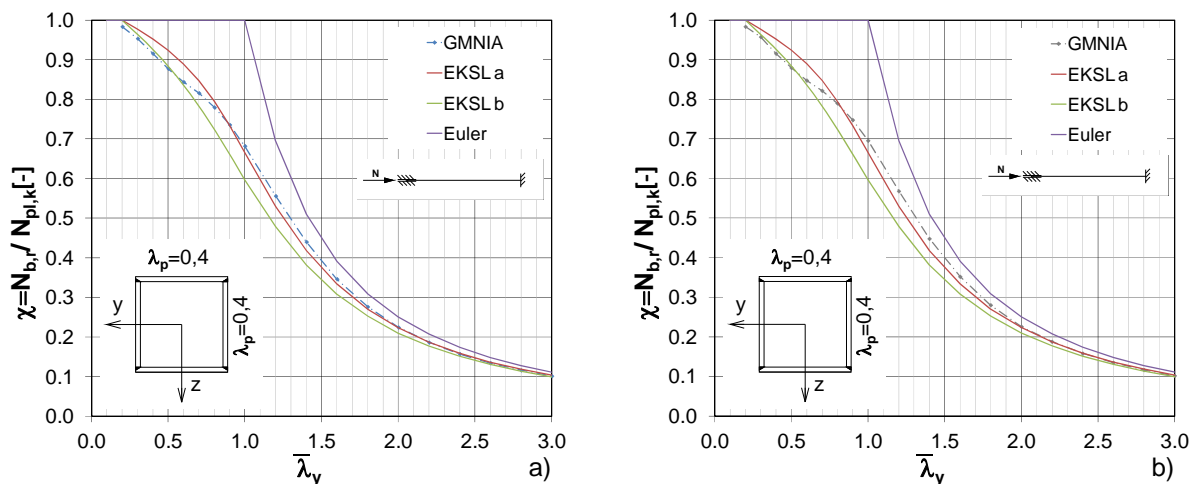


Bild 7-20: GMNIA – Berechnung: Querschnittsklasse 1 ($\bar{\lambda}_p=0,4$): a) globale Imperfektion affin zur 1. Eigenform bei eingespannter Lagerung, b) globale Imperfektion affin zur 1. Eigenform bei Gelenklagerung

Die Traglasten der GMNIA-Analyse für Querschnittsklasse 1 ($\bar{\lambda}_p=0,4$) mit der 1. globalen Eigenform der beidseits eingespannten Stütze als globale geometrische Imperfektion, in Bild 7-20 a dargestellt, liegen für kleine globale bezogene Schlankheiten im Bereich der Knickspannungslinie b und verlaufen für größere globale bezogene Schlankheiten entlang der Knickspannungslinie a. Dieser Verlauf entspricht prinzipiell dem Verlauf, welcher für gelenkig gelagerte Stäbe bestimmt wurde.

Auch die Traglasten unter Berücksichtigung der 1. globalen Eigenform entsprechend eines gelenkig gelagerten Stabes als globale geometrische Imperfektion (Bild 7-20 b) zeigen ähnliche Werte wie die Annahme der Vorverformungen affin zur tatsächlichen 1. globalen Eigenform des Stabes. Dies bedeutet, dass für Querschnitte der Klasse 1 die Form der globalen geometrischen Imperfektionsfigur eine untergeordnete Rolle spielt.

Querschnittsklasse 4:

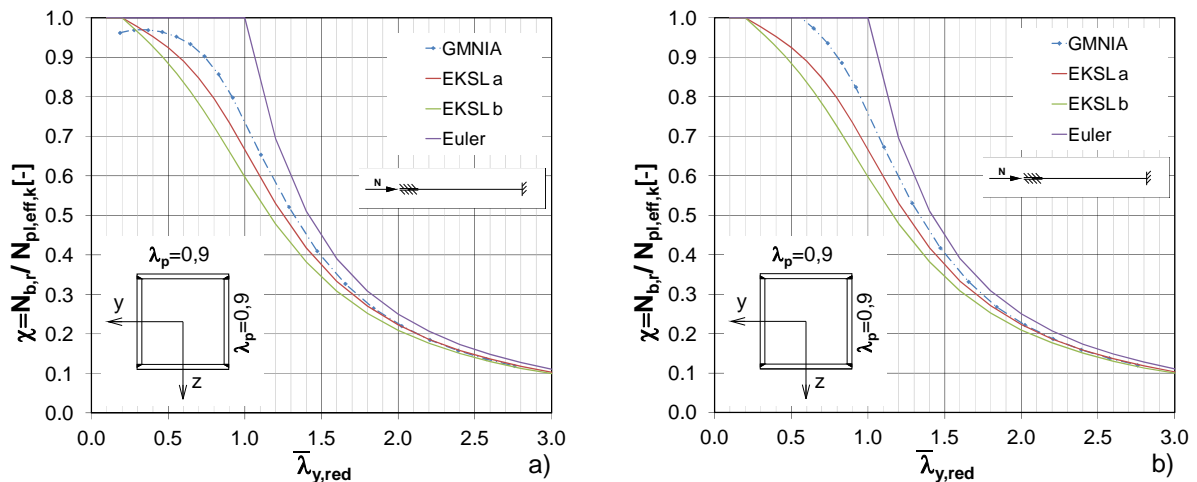


Bild 7-21: GMNIA – Berechnung: Querschnittsklasse 1 ($\bar{\lambda}_p=0,9$): a) globale Imperfektion affin zur 1. Eigenform bei eingespannter Lagerung, b) globale Imperfektion affin zur 1. Eigenform bei Gelenklagerung

Auch die Traglasten für den Querschnitt mit einer Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,9$ (Querschnitt der Klasse 4), unter Annahme der 1. globalen Eigenform des beidseits eingespannten Stabes als globale geometrische Imperfektion (Bild 7-21 a), liegen praktisch im gesamten globalen Schlankheitsbereich über den Werten des Eurocode. (sogar durchgehend über KSPL a)

Bei Berücksichtigung einer globalen Imperfektionsform, die der 1. globalen Eigenform eines beidseits gelenkig gelagerten Stabes entspricht, ergeben sich Traglasten, die deutlich über den Werten der Knickspannungslinie b und a liegen. Dies bedeutet, dass bei den dünnwandigen Profilen eine nicht den Eigenformen entsprechende Form der globalen Imperfektionsfigur -besonders bei niedrigerer globaler Schlankheit- zu einem deutlichen Tragfähigkeitsgewinn führen kann. Es könnte beim hier untersuchten Druckstab sogar der Einfluss der Querschnittsschlankheit (effektive Breiten) vollständig vernachlässigt werden. (Bemessung als Klasse 3 – Querschnitt) Zudem ergibt sich ein längerer Plateaubereich der (vollplastischen) Tragfähigkeit und weiters wird auch die bereits günstigere Knickspannungslinie a noch deutlich überschritten.

Vergleich zwischen beidseits gelenkig gelagerter und eingespannter Stütze

Es folgt der Vergleich der Traglasten der vorigen Berechnungen mit den unterschiedlichen Ansätzen der globalen geometrischen Imperfektionen für einen beidseitig eingespannten Einzelstab sowie zusätzlich mit den GMNIA-Traglasten des beidseitig gelenkig gelagerten Einzelstabes. Dabei wird in beiden Fällen von derselben globalen Schlankheit $\bar{\lambda}_y$ ausgegangen, d.h. der beidseits eingespannte Stab hat jeweils die doppelte Länge des beidseits gelenkig gelagerten Stabes.

In Tabelle 7-1 ist die Übersicht über die eben beschriebenen Fallunterscheidungen in tabellarischer Auflistung ersichtlich.

Tabelle 7-1: Übersicht der berechneten Fälle für Vergleich von gelenkig gelagerter und eingespannter Stütze

	Statisches System/ Imperfektionsform
Fall A	
Fall B	
Fall C	

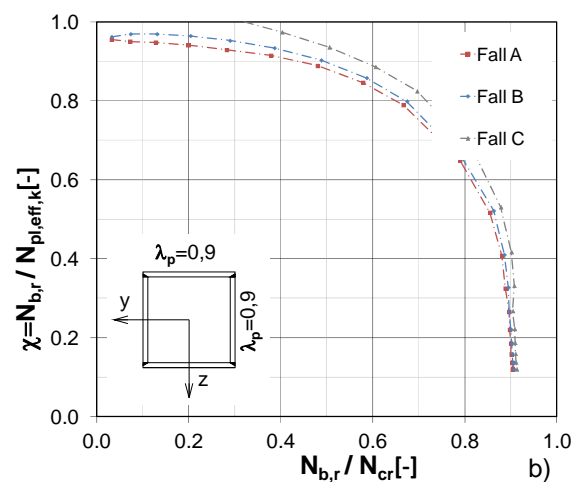
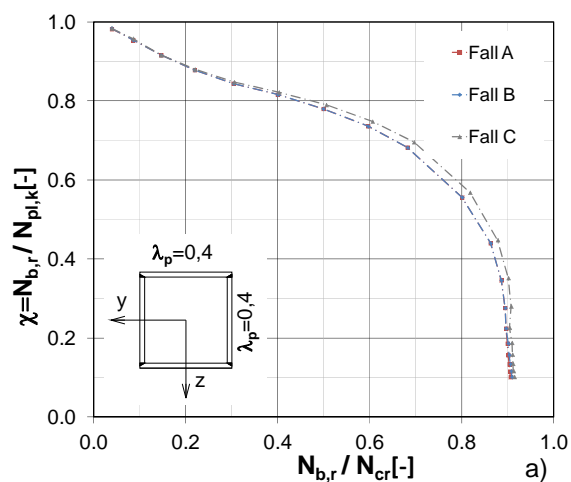


Bild 7-22: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für Baustahl S355: a) Querschnittsklasse 1 ($\bar{\lambda}_p=0,4$), b) Querschnittsklasse 4 ($\bar{\lambda}_p=0,9$)

In Bild 7-22 sind die Ergebnisse für die drei untersuchten Fälle ersichtlich. Während für Querschnittsklasse 1 fast idente Tragfähigkeiten erreicht werden, ist für Querschnittsklasse 4 für Einzelstäbe mit beidseitig eingespannten Randbedingungen und Ansatz einer parabelförmigen globalen Imperfektion die erhöhte Tragfähigkeit gegenüber den anderen Fällen ersichtlich. (Begründung siehe vorige Seite)

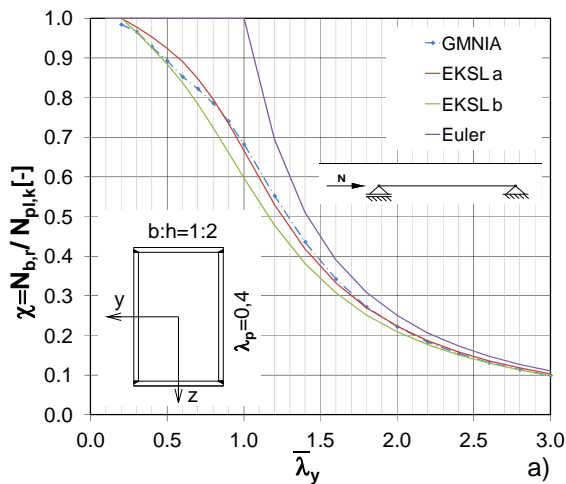
7.3 Traglastberechnungen für rechteckige Hohlkastenprofile – zentrischer Druck

In diesem Kapitel erfolgen GMNIA-Berechnungen an geschweißten Hohlkastenprofilen mit rechteckigem Querschnitt. Das Seitenverhältnis von Breite zu Höhe wird mit $b/h=1:2$ gewählt. Als Material wird Baustahl S355 ($f_y = 355 \text{ N/mm}^2$) verwendet, ohne Berücksichtigung von Wiederverfestigung nach Erreichen der Streckgrenze f_y . Sowohl Biegeknicken um die starke Achse (y-Achse) als auch Biegeknicken um die schwache Achse (z-Achse) wird untersucht. Jeweils fünf unterschiedlich große Profile werden gewählt, wobei die längere Seite (Höhe) für die Klassifizierung unter zentrischem Druck, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, und dadurch für die gewählte Bezeichnung, verantwortlich ist. Gewählt wird ein Querschnitt der Klasse 1 mit $\bar{\lambda}_p=0,4$, ein Querschnitt der Klasse 3 mit $\bar{\lambda}_p=0,635$ sowie drei beulgefährdete Querschnitte der Klasse 4 mit $\bar{\lambda}_p=0,75$, $\bar{\lambda}_p=0,9$ und $\bar{\lambda}_p=1,1$. Für alle untersuchten Querschnitte der Klasse 4 ergeben sich keine Querschnittsreduktion der beiden Gurte ($b=b_{\text{eff}}$). Die Wandstärke wurde für alle Profile mit $t=8\text{mm}$ fixiert.

7.3.1 Biegeknicken um y-Achse (starke Achse)

Für das Biegeknicken um die starke Achse ist anzumerken, dass die für die Biegesteifigkeit um die y-Achse des Hohlkastenprofils hauptsächlich verantwortlichen Gurte einer niedrigeren Querschnittsklasse zuzuordnen sind als die Stege bzw. der Gesamtquerschnitt. Somit kann zum Beispiel für einen Querschnitt der Klasse 4 (z.B. $\bar{\lambda}_p=0,75$) sehr wohl ein Ausbeulen der langen Seitenbleche erfolgen, jedoch nicht an den Gurten. Daraus folgend wird sich dieses Hohlprofil beim globalen Ausknicken um die y-Achse eher wie ein Querschnitt der Klasse 1 verhalten.

Querschnittsklasse 1:



Querschnittsklasse 3:

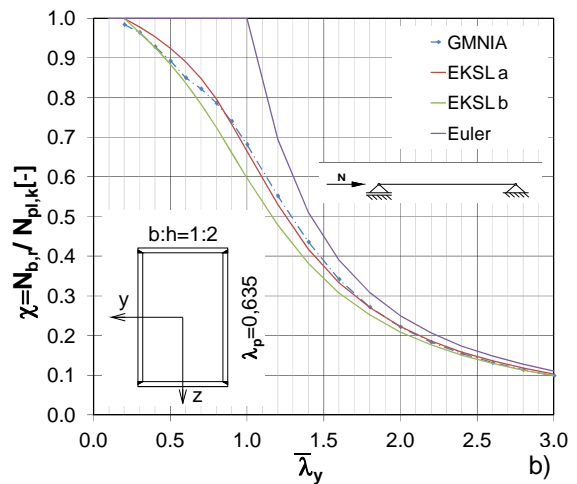


Bild 7-23: GMNIA – Berechnung: a) Querschnittsklasse 1 ($\bar{\lambda}_p=0,4$), b) Querschnittsklasse 3 ($\bar{\lambda}_p=0,635$)

Die Traglasten der GMNIA-Berechnungen für Querschnittsklasse 1 mit $\bar{\lambda}_p=0,4$ (siehe Bild 7-23 a) und Querschnittsklasse 3 mit $\bar{\lambda}_p=0,635$ (siehe Bild 7-23 b) zeigen ein ähnliches Verhalten. Während die Traglasten für kleine und sehr große globale bezogene Schlankheiten ungefähr den Traglasten der Knickspannungslinie b entsprechen, erreichen sie im Bereich mittlerer globaler bezogener Schlankheiten sogar Traglasten, die sich mit den Referenzwerten der Knickspannungslinie a decken.

Querschnittsklasse 4:

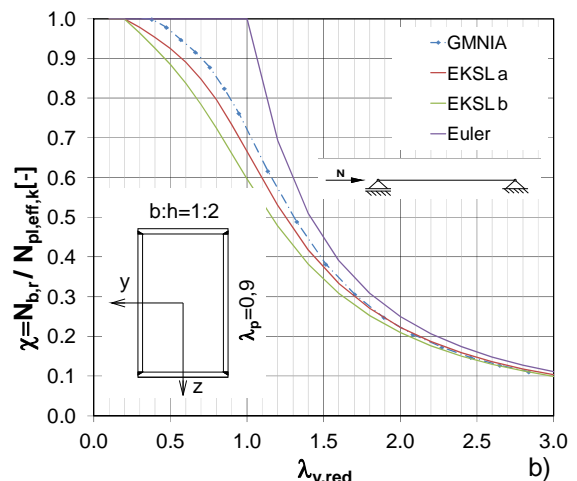
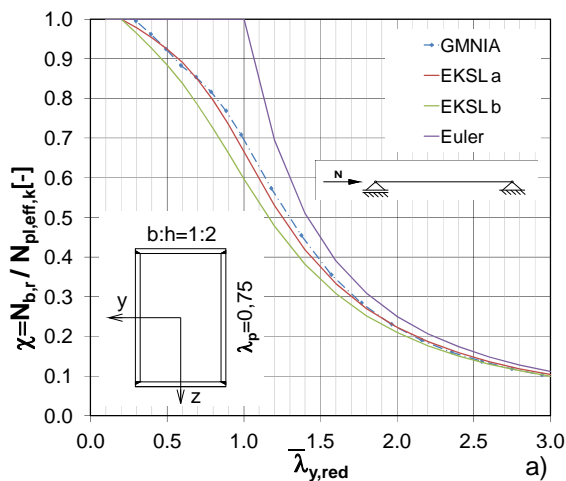


Bild 7-24: GMNIA – Berechnung: Querschnittsklasse 4 mit a) $\bar{\lambda}_p=0,75$, b) $\bar{\lambda}_p=0,9$

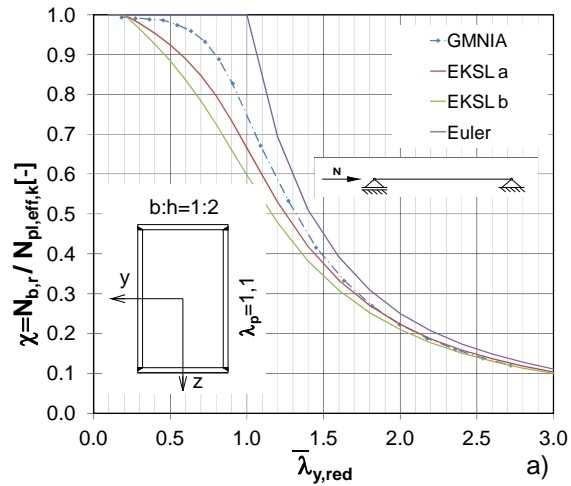


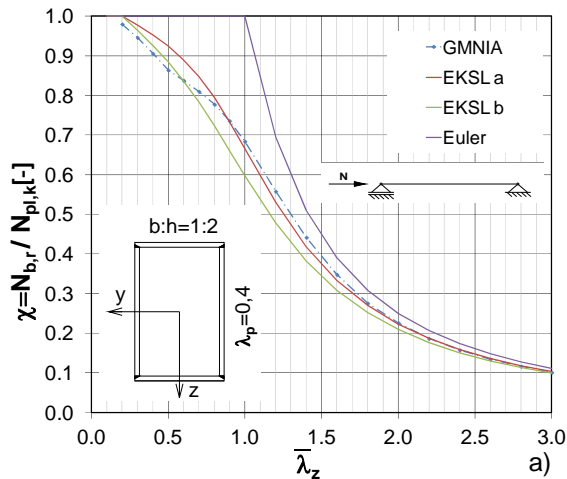
Bild 7-25: GMNIA – Berechnung: Querschnittsklasse 4 mit a) $\bar{\lambda}_p=1,1$

Wie in Bild 7-24 a, Bild 7-24 b und Bild 7-25 a dargestellt, zeigen die GMNIA-Analysen für die Querschnitte der Klasse 4, je nach vorhandener Plattenschlankheit der Querschnitte, Traglasten die ungefähr den Traglasten der Knickspannungslinie a gleichen, wobei für Querschnitte mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,9$ und $\bar{\lambda}_p=1,1$ für kleinere globale bezogene Schlankheiten $0,3 < \bar{\lambda}_{y,red} < 1,5$ die ermittelten Traglasten deutlich über den Werten der Knickspannungslinie a liegen. Die Traglasten in diesem Bereich sind umso höher, je größer die vorhandenen Plattenschlankheiten $\bar{\lambda}_p$ der Querschnitte sind. Grund hierfür ist der oben beschriebene Effekt, dass bei Ausknicken um die y-Achse real zwar ein Ausbeulen von Querschnittsteilen erfolgt, jedoch nur im beschränkten Bereich für die Gurte, die für die Biegesteifigkeit um die y-Achse hauptverantwortlich sind. Nach EC 3 wird dieser Querschnitt jedoch wie ein Querschnitt der Klasse 4 behandelt, wodurch die Nachweise der Tragfähigkeit nach Formel (3.9) und (3.13) geführt werden müssen.

7.3.2 Biegeknicke um z-Achse (schwache Achse)

Im Gegensatz zum Biegeknicke um die starke Achse, bestimmen das Verhalten bei Biegeknicke um die z-Achse (schwache Achse) die schlanksten Querschnittsteile (Stege), die auch für die Einteilung der Querschnittsklasse verantwortlich sind.

Querschnittsklasse 1:



Querschnittsklasse 3:

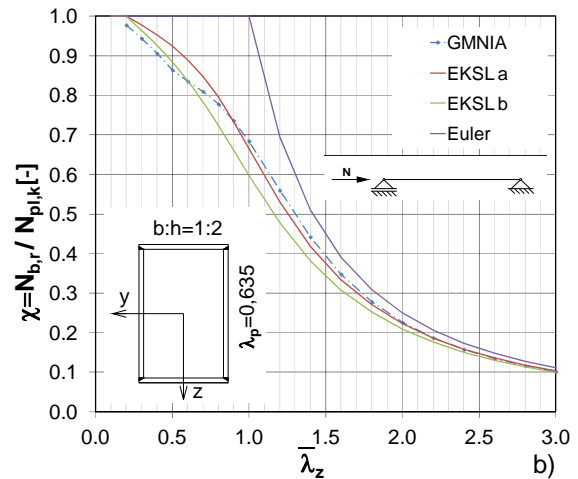


Bild 7-26: GMNIA – Berechnung: a) Querschnittsklasse 1 ($\bar{\lambda}_p=0,4$), b) Querschnittsklasse 3 ($\bar{\lambda}_p=0,635$)

In Bild 7-26 a bzw. Bild 7-26 b sind die Traglasten der GMNIA-Analyse mit den Ergebnissen der Knickspannungslinie a und b nach EC 3 dargestellt. Es zeigen sich für kleine globale bezogene Schlankheiten Traglasten die unter den Werten der Knickspannungslinie b liegen und für größere bezogene Schlankheiten Traglasten die etwa den Traglasten nach Knickspannungslinie a entsprechen.

Querschnittsklasse 4:

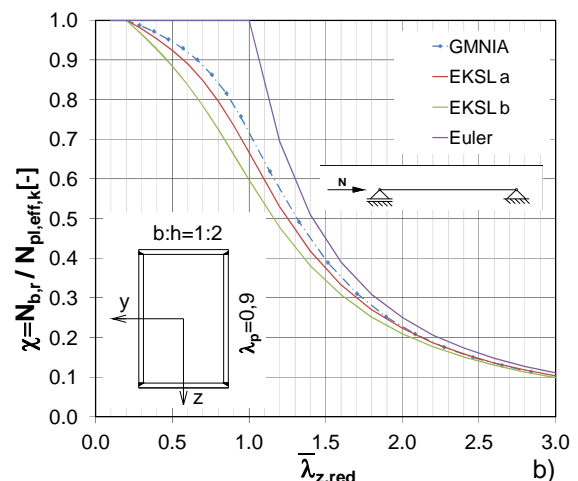
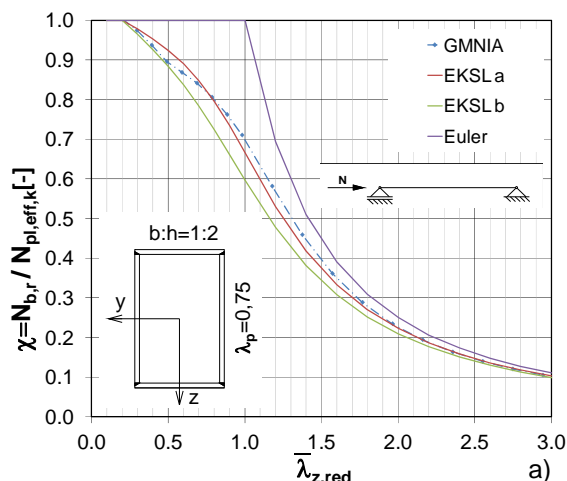


Bild 7-27: GMNIA – Berechnung: Querschnittsklasse 4 mit a) $\bar{\lambda}_p=0,75$, b) $\bar{\lambda}_p=0,9$

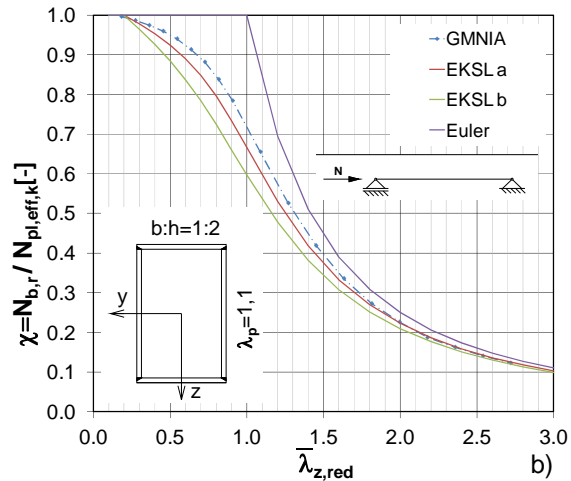


Bild 7-28: GMNIA – Berechnung: Querschnittsklasse 4 mit a) $\bar{\lambda}_p=1,1$

Während sich für einen Querschnitt mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,75$ in Bild 7-27 a ungefähr gleiche Traglasten ergeben, wie jene für Querschnittsklasse 3 (siehe Bild 7-26 b), sind in Bild 7-27 b und Bild 7-28 a höhere Traglasten der GMNIA-Berechnung zu beobachten. Die Tragfähigkeit dieser Querschnitte erreicht für globale bezogene Schlankheiten $\bar{\lambda}_{z,red} < 2,0$ höhere Traglasten als die Werte der Knickspannungslinie a und b nach EC 3.

7.4 Vergleich zwischen rechteckigen und quadratischen Hohlkastenprofilen – zentrischer Druck

Zum Abschluss dieses Kapitels zu GMNIA-Analysen von rein druckbeanspruchten Einzelstäben werden die erreichten Traglasten der verschiedenen untersuchten Querschnitte, d.h. der quadratischen Hohlkastenprofile sowie der rechteckigen Hohlkastenprofile mit Seitenverhältnis 1:2, mit Biegeknicken um die starke und schwache Achse, einander gegenübergestellt, um den Vergleich des unterschiedlichen Tragverhaltens der Querschnitte aufzuzeigen.

Dieser Vergleich wird für einen Querschnitt der Klasse 1 ($\bar{\lambda}_p=0,4$) und für zwei Querschnitte der Klasse 4 ($\bar{\lambda}_p=0,9$ und $\bar{\lambda}_p=1,1$) angestellt.

Querschnittsklasse 1:

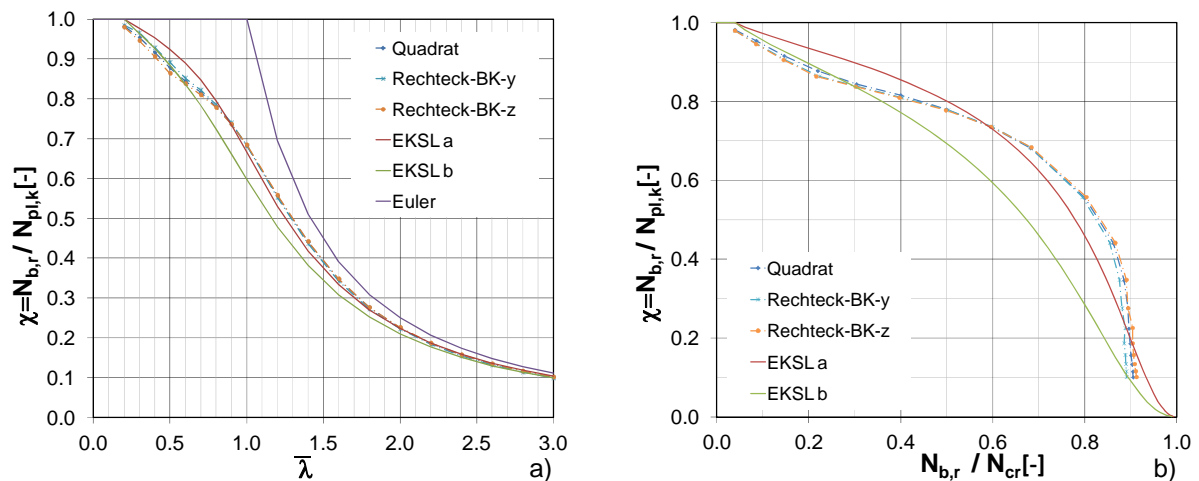


Bild 7-29: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,4$, a) Darstellung über globaler Schlankheit b) Rankine-Darstellung

Wie in Bild 7-29 ersichtlich, erreichen für Querschnittsklasse 1 alle drei unterschiedlichen Querschnittsformen ziemlich idente Traglasten.

Querschnittsklasse 4:

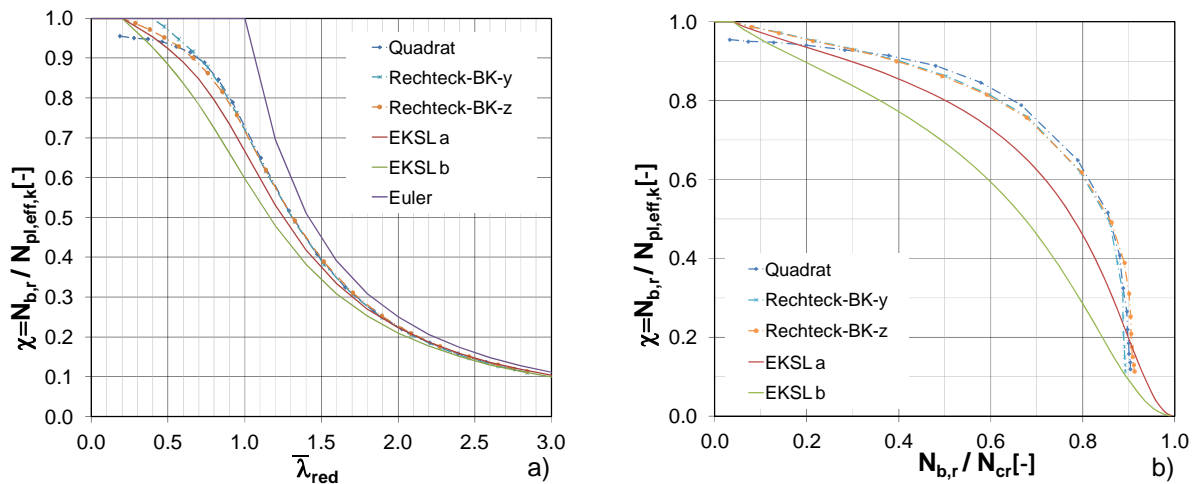


Bild 7-30: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,9$, a) Darstellung über globaler Schlankheit b) Rankine-Darstellung

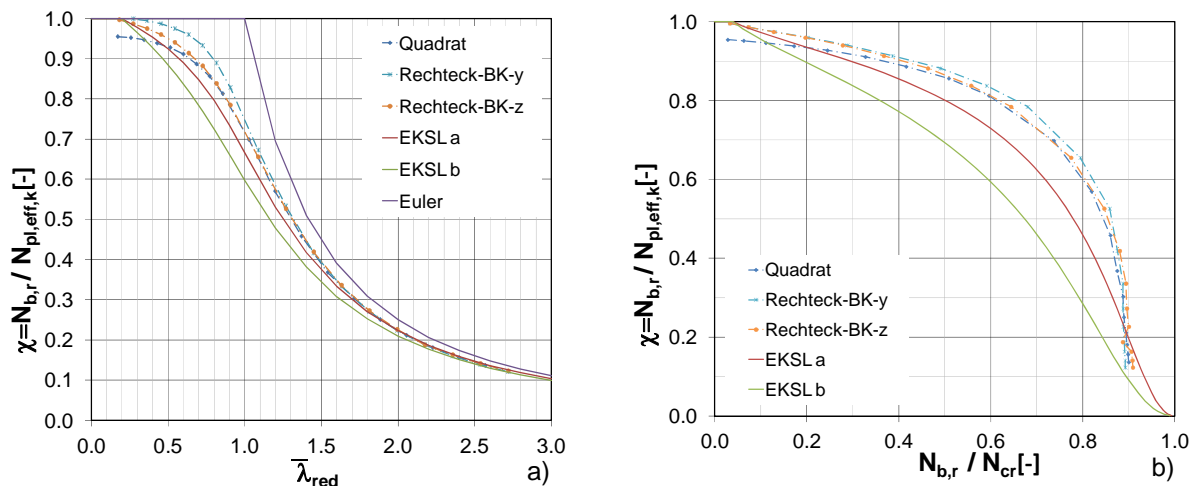


Bild 7-31: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=1,1$, a) Darstellung über globaler Schlankheit b) Rankine-Darstellung

Die Vergleiche für Querschnittsklasse 4 in Bild 7-30 a bis Bild 7-31 b zeigen, dass im Allgemeinen rechteckige Hohlkastenprofile höhere Traglasten erreichen als quadratische Profile. Das ist auf den bereits beschriebenen Effekt zurückzuführen, dass für Rechteckprofile mit Seitenverhältnis 1:2 die Festlegung der Querschnittsklasse über die Plattenschlankheit der längeren Seite erfolgte, womit sich die Bleche der kleineren Seitenlänge (Gurte) wie bei einem nicht beulgefährdeten Querschnitt verhalten ($b_{eff}=b$). Daraus resultiert, dass bei rechteckigen Hohlkastenprofilen, besonders bei Biegeknicken um die starke Achse (y-Achse), eine erhöhte Tragfähigkeit im Vergleich zu quadratischen Hohlkastenprofilen erreicht wird.

8. Traglastberechnungen (GMNIA) bei N+M_y

In diesem Kapitel werden Traglastberechnungen an beidseits gelenkig gelagerten und eingespannten Einzelstäben unter Normalkrafts- und gleichzeitiger Momentenbeanspruchung dokumentiert.

8.1 Allgemeines

Die Betrachtung von Druck- und gleichzeitiger Momentenbeanspruchung M_y an Einzelstäben mit geschweißten Hohlkastenprofilen erfolgt an Querschnitten der Klassen 2, 3 und 4. Im Gegensatz zu den Traglastberechnungen mit reiner Druckbeanspruchung, siehe Kapitel 7, werden die Berechnungen hier auf quadratische Hohlkastenprofile beschränkt. Weiters werden die Berechnungen ausschließlich mit derselben Materialgüte, Baustahl S355 ($f_y = 355 \text{ N/mm}^2$, $f_u = 510 \text{ N/mm}^2$) und mit linearer Wiederverfestigung nach Erreichen der Streckgrenze f_y (siehe Bild 4-3 b), durchgeführt.

Um auch Vergleiche mit den GMNIA-Berechnungen aus Kapitel 7 tätigen zu können, erfolgt die Festlegung der Querschnittsabmessungen anhand der gewählten Querschnitte der bereits analysierten Stäbe unter reiner Druckbeanspruchung. Für Querschnittsklasse 4 wurde dabei ein weiterer Querschnitt mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=1,3$ eingeführt, um bessere Rückschlüsse auf die Interaktion von lokalem und globalem Stabilitätsverhalten für unterschiedliche gewählte Plattenschlankheiten im Bereich $0,9 < \bar{\lambda}_p < 1,5$ ziehen zu können. In folgender Tabelle 8-1 sind die berechneten Querschnitte aufgelistet. Die Wandstärke der Hohlkastenprofile wurde wiederum mit $t=8\text{mm}$ festgelegt. Die Querschnittsklasse 1 wurde hingegen bei den nachfolgenden Berechnungen nicht mehr betrachtet, da sich bereits für den reinen Druckfall zeigte, dass keine nennenswerten Unterschiede zur (schlankeren) Klasse 2 bestehen.

Tabelle 8-1: Übersicht der berechneten Querschnitte für Druck- + Biegebeanspruchung

QS-Klasse 2	QS-Klasse 3	QS-Klasse 4			
$\bar{\lambda}_p=0,55$	$\bar{\lambda}_p=0,635$	$\bar{\lambda}_p=0,9$	$\bar{\lambda}_p=1,1$	$\bar{\lambda}_p=1,3$	$\bar{\lambda}_p=1,5$
b=219 mm t=219 mm	b=251 mm t=251 mm	b=349 mm t=349 mm	b=423 mm t=423 mm	b=497 mm t=497 mm	b=571 mm t=571 mm

Wie bereits in Kapitel 5 angeführt, werden die untersuchten globalen bezogenen Schlankheiten $\bar{\lambda}_y$ für realistische L/b-Verhältnisse mit $\bar{\lambda}_y=0,5$, $\bar{\lambda}_y=1,0$ und $\bar{\lambda}_y=1,5$ auf Basis der Bruttoquerschnitte festgelegt und die zugehörigen Stablängen L mit Gleichung (5.10) ermittelt. Daraus resultierend sind für Querschnitte der Klasse 4, aufgrund der fixierten Stablängen L, die geometrischen Schlankheiten $\bar{\lambda}_y$ nach Gleichung (3.13) mit dem Faktor $\sqrt{A_{\text{eff}}/A}$ abzumindern. Die muss auch bei der Darstellung der Ergebnisse beachtet werden.

Neben der bei allen Analysen wirkenden Druckkraft werden jeweils drei unterschiedliche Momentenverläufe gewählt und diese Gesamtlastfälle für Einzelstäbe mit verschiedenen Lagerungsbedingungen (beidseitige gelenkige Lagerung bzw. beidseitige Einspannung), berechnet. (siehe Kapitel 8.2 bzw. Kapitel 8.3).

Der Berechnungsvorgang bzw. die Belastungsschritte (Tabelle 4-1) erfolgten für die beiden statischen Systeme in unterschiedlicher Weise. Die Erläuterung erfolgt für diese einzeln in Kapitel 8.2 bzw. Kapitel 8.3.

Für die Ermittlung der Traglasten nach EC 3 werden je nach Querschnittsklasse drei differenzierte Nachweise, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, angewendet. Während die Nachweisführung für Querschnitte der Klasse 2 bei Biegebeanspruchung von der plastischen Spannungsverteilung über den Querschnitt ausgeht (W_{pl}), wird bei Querschnittsklasse 3 und 4 von einer elastischen Spannungsverteilung über den Querschnitt ausgegangen, wobei für Querschnitte der Klasse 4 die Spannungen anhand der wirksamen Querschnitte berechnet werden. Die Interaktion von lokalem und globalem Stabilitätsversagen, welches bei Querschnitten der Klasse 4 auftritt, wird durch das Verfahren der wirksamen Breiten in der Nachweisführung berücksichtigt.

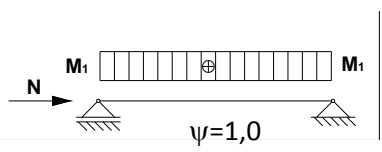
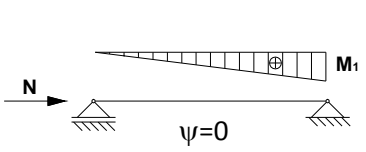
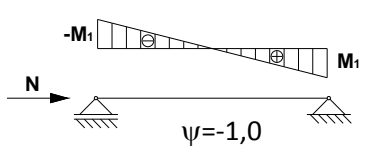
In Abweichung von der Vorgehensweise in Kapitel 7 werden die Ergebnisse der GMNIA-Analyse in diesem Kapitel nur noch mit jenen Traglasten nach EC 3 verglichen, welche sich aus der Interaktionsformel (3.16) bzw. (3.17) aus Abschnitt 3.4 für Druck und einachsige Biegung, mit den Interaktionskoeffizienten aus Gleichungen (3.18) bis (3.21) nach Annex B sowie mit den Abminderungsfaktoren χ_y entsprechend der Knickspannungslinie b ergeben. Letztere (KSPL b) sind stabilitätsgefährdeten geschweißten Hohlkastenprofilen nach EC 3 zuzuordnen (siehe 3.3). In den Diagrammen werden daher die Traglasten der GMNIA-Berechnungen, die Traglasten nach Eurocode 3 – Annex B, sowie die reine Querschnittstragfähigkeit (elastisch oder plastisch) bei $N+M_y$ dargestellt.

8.2 Beidseits gelenkige Lagerung – Belastung N + M_y

Zu Beginn der GMNIA-Berechnungen für Druck- und Biegebeanspruchung werden Einzelstäbe mit beidseitig gelenkigen Auflagerbedingungen berechnet.

Wie in Tabelle 8-1 aufgelistet, erfolgen die Analysen an Querschnitten der Klassen 2, 3 und 4, wobei als Beanspruchung drei Lastfälle mit unterschiedlichen Momentenverläufen nach Tabelle 8-2 -zusätzlich zur zentrischen Druckbeanspruchung- angenommen werden.

Tabelle 8-2: Lastfälle für GMNIA-Berechnungen bei beidseits gelenkiger Lagerung

Normalkraft + konstanter Momentenverlauf	Normalkraft + linearer Momentenverlauf	Normalkraft + durchschlag. Momentenverlauf
		

In Kapitel 4 erfolgte die genaue Erklärung zur Vorgangsweise der zwei in dieser Arbeit angewandten Berechnungsprozeduren, die sich durch Berücksichtigung bzw. Nichtberücksichtigung der Abtriebswirkung aus Eigenspannungen in der Berechnung unterscheiden. Für Einzelstäbe mit Druck- und Biegebeanspruchung bei beidseitig gelenkiger Auflagerung werden mit beiden Berechnungsprozeduren Traglastberechnungen durchgeführt und anschließend die Ergebnisse einander gegenübergestellt.

Die Ergebnisdarstellung in diesem Kapitel erfolgt mittels sogenannter Interaktionsdiagrammen. Dabei wird das Verhältnis der Drucktragfähigkeit zur Querschnittstragfähigkeit ($N_{b,r}/N_{pl,k}$ bzw. $N_{b,r}/N_{pl,eff,k}$) als y-Achse (Ordinate), sowie das Verhältnis der Momententragfähigkeit zur Querschnittstragfähigkeit (je nach Querschnittsklasse, plastisch der elastisch) des Querschnittes ($M_{b,r}/M_{pl,k}$, $M_{b,r}/M_{el,k}$ bzw. $M_{b,r}/M_{el,eff,k}$) als x-Achse (Abszisse) aufgetragen.

In jedem Diagramm sind die ermittelten Traglasten für die drei verschiedenen, in Tabelle 5-4 aufgelisteten, L/b-Verhältnisse und die daraus resultierenden globalen bezogenen Schlankheiten $\bar{\lambda}_y$ für einen bestimmten Querschnitt und einen bestimmten Momentenverlauf dargestellt.

8.2.1 Ergebnisse für Normalkraft und konstanter Momentenverlauf:

Querschnittsklasse 2:

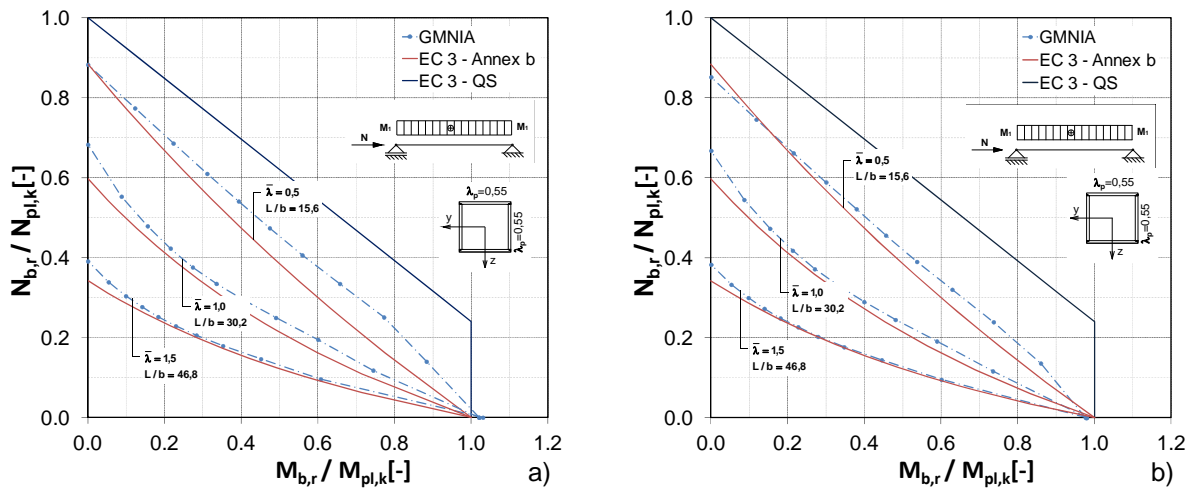


Bild 8-1: Vergleich GMNIA – Berechnung QS-Klasse 2: $\bar{\lambda}_p=0,55$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2

In Bild 8-1 a und Bild 8-1 b sind die Ergebnisse für Querschnittsklasse 2 mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,55$ für die beiden Berechnungsprozeduren dargestellt. Als Bezug dient die plastische Querschnittstragfähigkeit. Bei Vergleich der beiden Berechnungsmethoden sieht man kaum Unterschiede in den erreichten Traglasten der GMNIA-Analysen, woraus ein geringer Einfluss der beiden unterschiedlichen Berechnungsprozeduren für Querschnittsklasse 2 abgeleitet werden kann. Die Traglasten liegen fast ausschließlich über den Traglasten des Eurocodes entsprechend der Interaktionsformel nach Annex B in EC 3.

Querschnittsklasse 3:

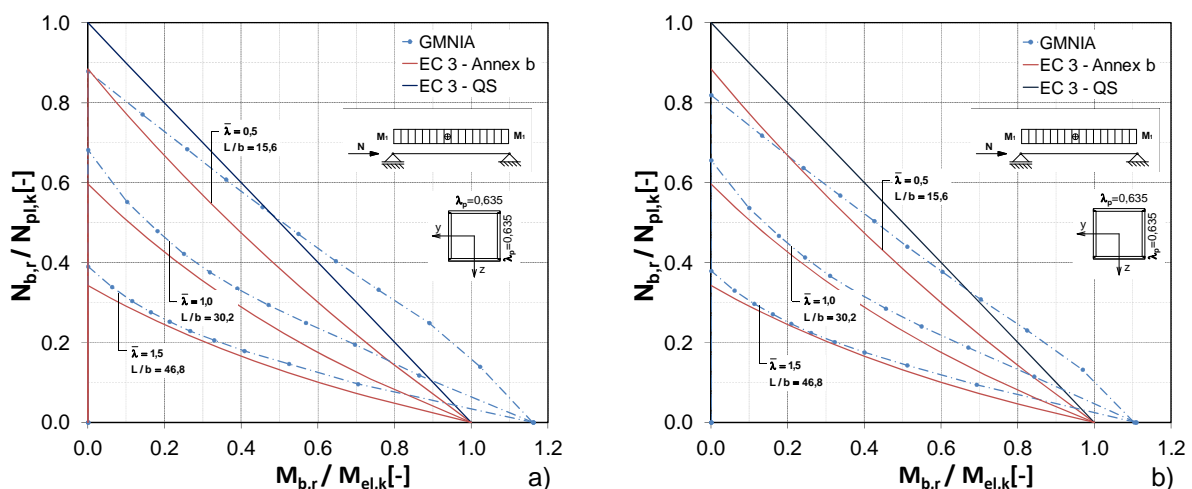


Bild 8-2: Vergleich GMNIA – Berechnungen QS-Klasse 3: $\bar{\lambda}_p=0,635$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2

Für den Querschnitt mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,635$ (Querschnittsklasse 3) sind die ermittelten Tragfähigkeiten in Bild 8-2 a und Bild 8-2 b für die beiden Berechnungsverfahren abgebildet. Hier kann schon ein größerer Unterschied, vorwiegend für den Bereich um $\bar{\lambda}_y=0,5$, zwischen den GMNIA-Traglasten der beiden Diagramme festgestellt werden. Besonders auffallend sind hier zudem die deutlich höheren Traglasten bei reiner Biegebeanspruchung ($N_{b,r}/N_{pl,k} = 0$), die deutlich über die elastische Biegetragfähigkeit des Querschnitts $M_{el,k}$ hinausreichen. Die Traglasten nach EC 3 – Annex B werden größtenteils überschritten.

Querschnittsklasse 4:

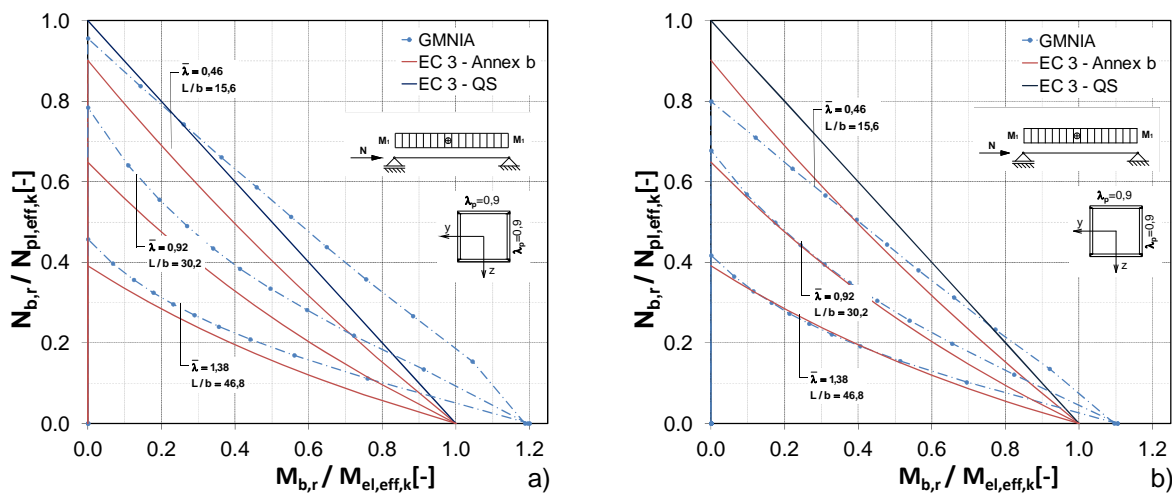


Bild 8-3: Vergleich GMNIA – Berechnungen QS-Klasse 4: $\bar{\lambda}_p=0,9$, a) Berechnungsverfahren 1, b) Berechnungsverfahren 2

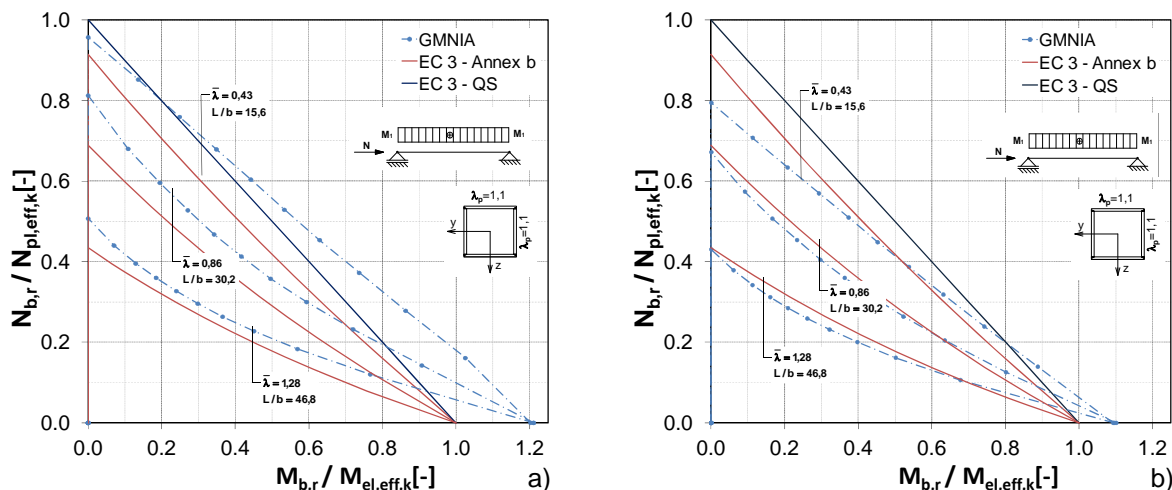


Bild 8-4: Vergleich GMNIA – Berechnungen QS-Klasse 4: $\bar{\lambda}_p=1,1$, a) Berechnungsverfahren 1, b) Berechnungsverfahren 2

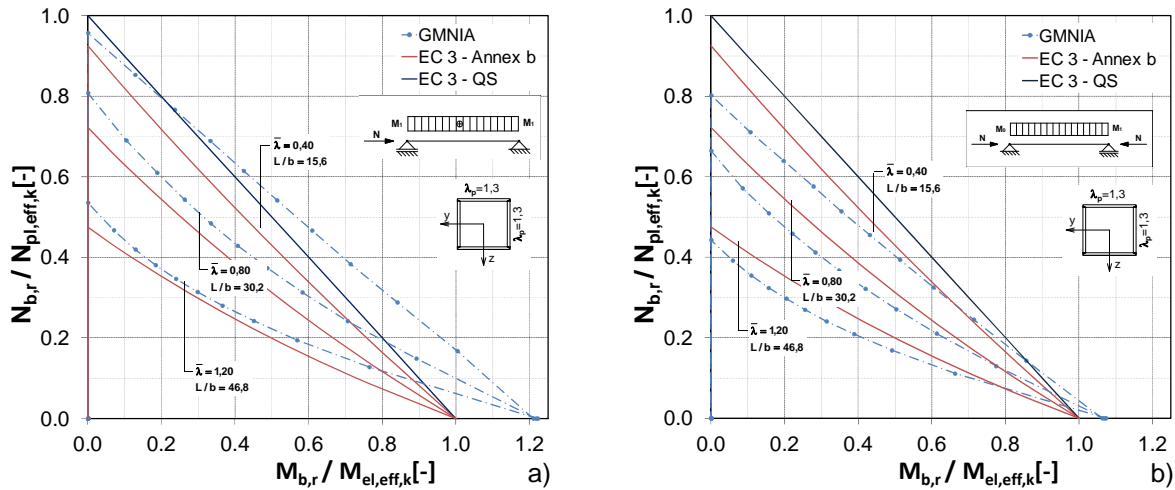


Bild 8-5: Vergleich GMNIA – Berechnungen QS-Klasse 4: $\bar{\lambda}_p=1,3$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2

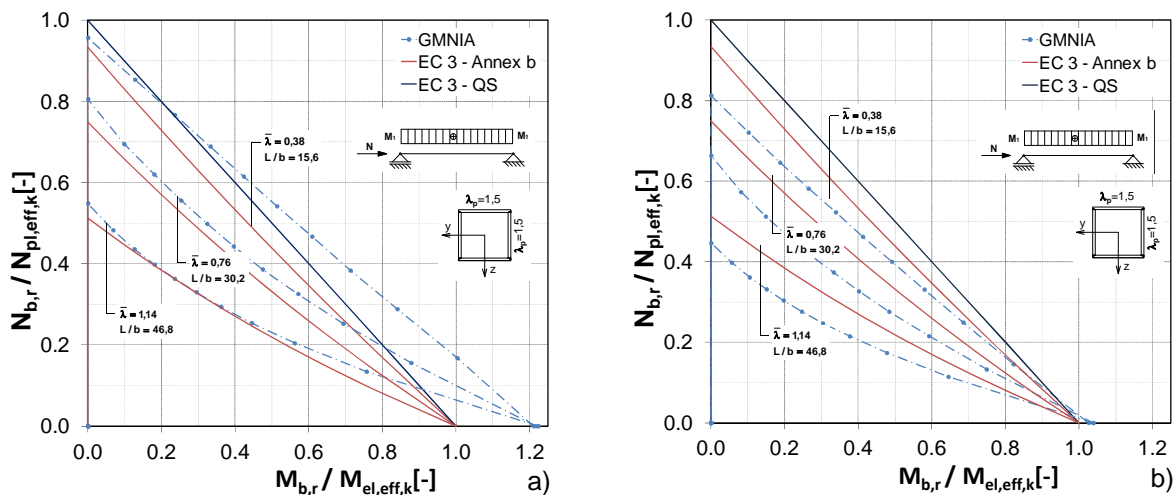


Bild 8-6: Vergleich GMNIA – Berechnungen QS-Klasse 4: $\bar{\lambda}_p=1,5$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2

In Bild 8-3 a bis Bild 8-6 b sind die Ergebnisse der Berechnungen mit den gewählten unterschiedlichen Querschnitten der Klasse 4 (Plattenschlankheiten mit $\bar{\lambda}_p=0,9$, $\bar{\lambda}_p=1,1$, $\bar{\lambda}_p=1,3$ und $\bar{\lambda}_p=1,5$) ersichtlich. Es zeigt sich folgendes: je größer die vorhandene Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p$ ist, desto größere Unterschiede ergeben sich für die berechneten Traglasten der GMNIA-Analysen der beiden unterschiedlichen Berechnungsprozeduren. Auch im Vergleich zur vorausgesetzten Knickspannungslinie b nach EC 3 nehmen die Traglasten bei größer werdenden Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p$ ab.

Während mit Berechnungsprozedur 1 die Traglasten über den EC3-Werten liegen, werden mit Berechnungsprozedur 2 vor allem für Stäbe mit großer Normalkraftbeanspruchung und kleiner Momentenbeanspruchung GMNIA-Traglasten erreicht, die deutlich kleiner als die Referenzwerte nach EC 3 sind.

Auch für Querschnittsklasse 4 sind, besonders für Berechnungsprozedur 1, bei reiner Biegebeanspruchung ($N_{b,r}/N_{pl,eff,k}=0$) die ermittelten Traglasten mit GMNIA-Analyse höher als die berechnete Biegetragfähigkeit, ermittelt über die wirksamen Flächen des Querschnitts, $M_{el,eff,k}$. Nach Berechnungsprozedur 1 kann der Tragfähigkeitsunterschied hier bis über 20% reichen.

8.2.2 Ergebnisse für Normalkraft und dreiecksförmigen Momentenverlauf:

Querschnittsklasse 2:

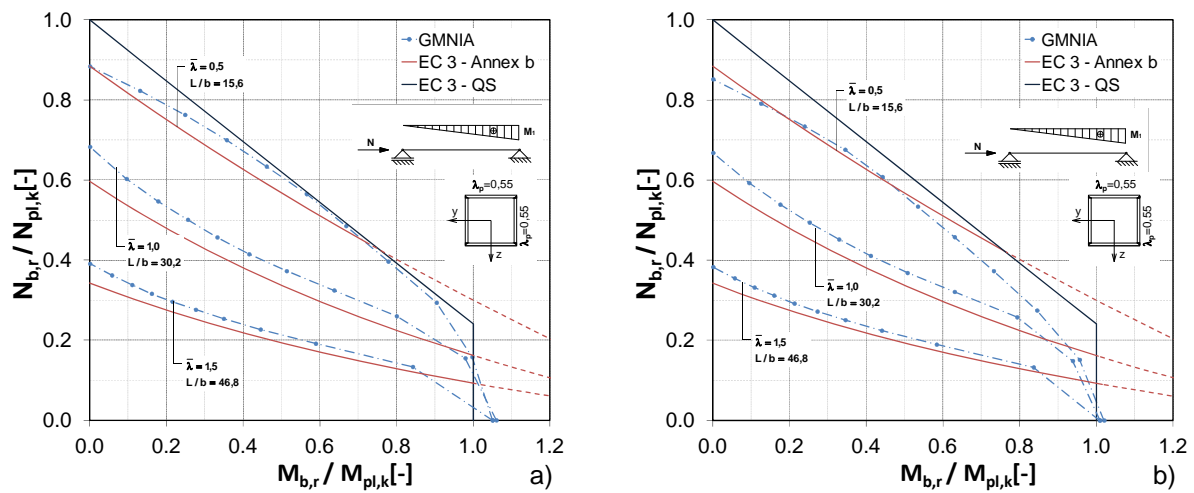


Bild 8-7: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,55$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2

Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse für beide Berechnungsprozeduren und Querschnittsklasse 2 mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,55$ sind in Bild 8-7 a und Bild 8-7 b ersichtlich. Besonders für die globale bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_y=0,5$ ergeben sich größere Unterschiede in den erreichten Traglasten der einzelnen Berechnungsprozeduren. Ausgenommen von großen $M_{b,r}/M_{pl,k}$ -Werten für Berechnungsprozedur 2 sind die Traglasten auf Basis der Knickspannungslinie b nach EC 3 eingehalten.

Querschnittsklasse 3:

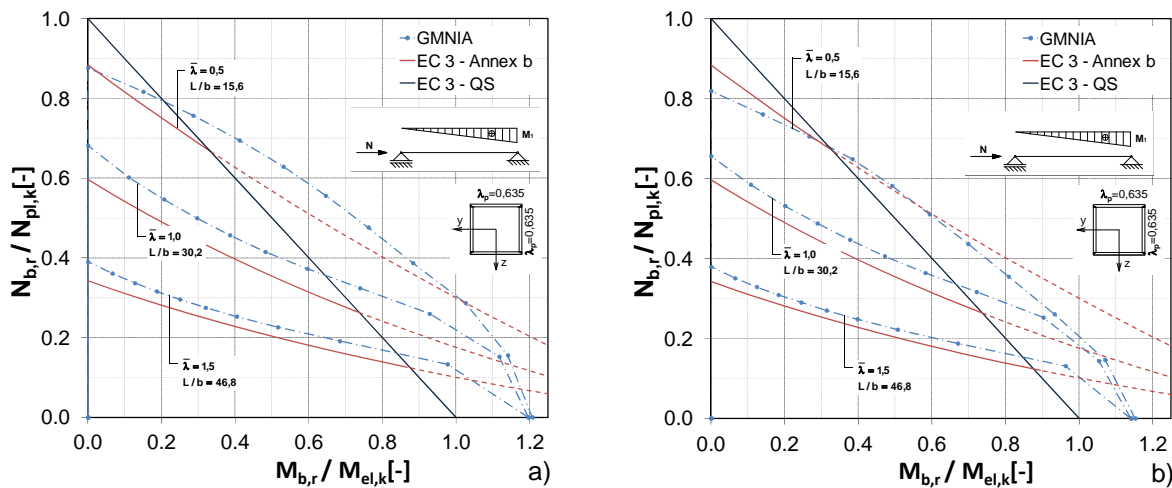


Bild 8-8: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,635$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2

Auch bei Vergleich der Ergebnisse der beiden Berechnungsprozeduren für Querschnittsklasse 3 ($\bar{\lambda}_p=0,635$), siehe Bild 8-8 a und Bild 8-8 b, erkennt man für die globalen bezogenen Schlankheiten $\bar{\lambda}_y=1,0$ und $\bar{\lambda}_y=1,5$, im Gegensatz zu $\bar{\lambda}_y=0,5$, kaum Unterschiede der erreichten Traglasten, ausgenommen für sehr große $M_{b,r}/M_{pl,k}$ -Werte.

Auffallend ist hier besonders, dass bei reiner Biegebeanspruchung ($N_{b,r}/N_{pl,eff,k} = 0$) bei beiden Berechnungsprozeduren, merklich höhere Biegetragfähigkeiten erreicht werden als der elastischen Biegetragfähigkeit des Querschnittes entspricht.

Querschnittsklasse 4:

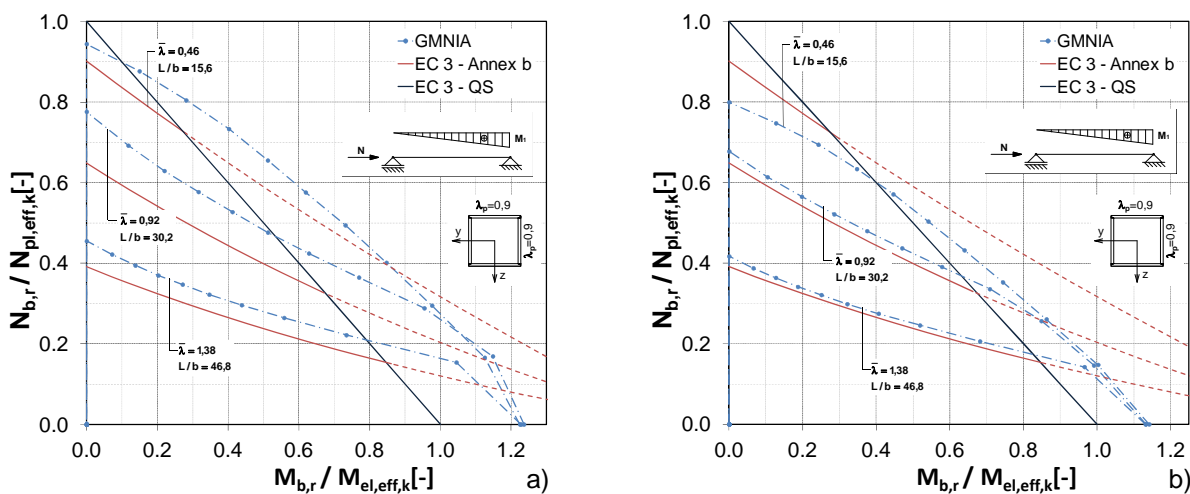


Bild 8-9: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\bar{\omega}=0,9$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2

8. Tragverhalten eines Fachwerkträgers mit Querschnitten der Klasse 4

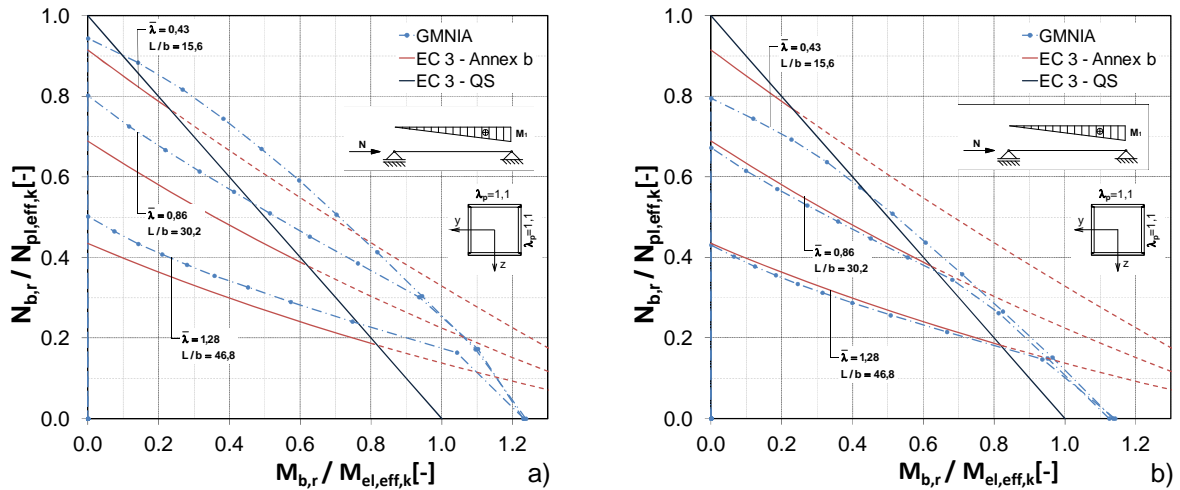


Bild 8-10: Vergleich GMNIA - Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=1,1$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2

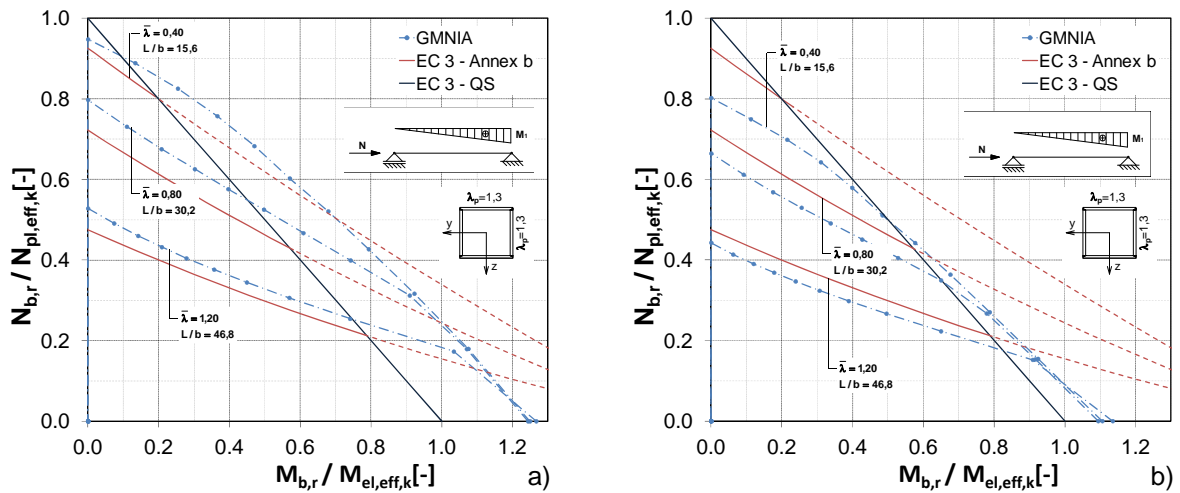


Bild 8-11: Vergleich GMNIA - Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=1,3$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2

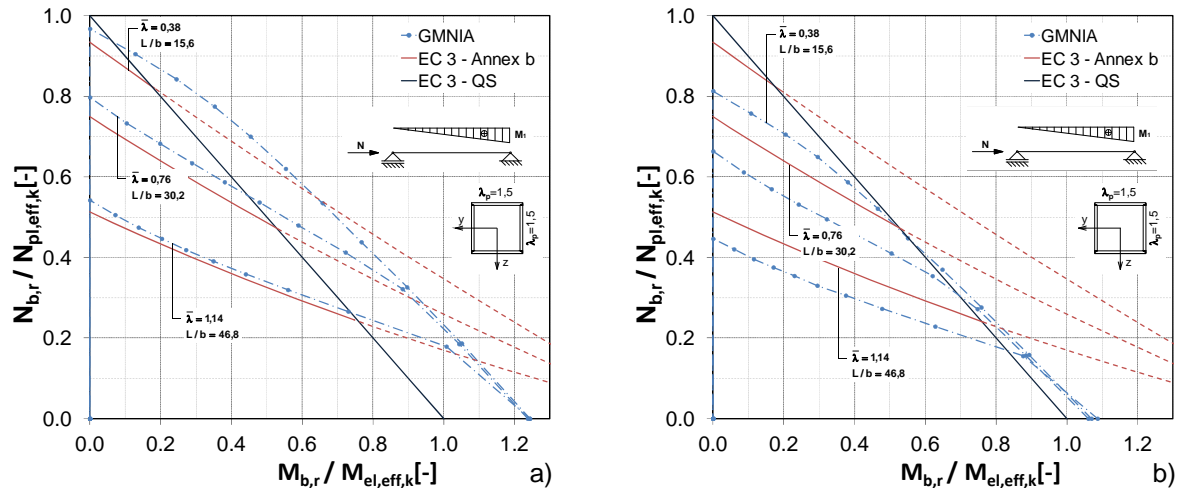


Bild 8-12: Vergleich GMNIA - Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=1,5$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2

Die Ergebnisse der Traglastberechnung der beiden Berechnungsprozeduren für die Querschnitte der Klasse 4 mit den Plattenschlankheiten $\bar{\lambda}_p=0,9$, $\bar{\lambda}_p=1,1$, $\bar{\lambda}_p=1,3$ und $\bar{\lambda}_p=1,5$ sind in Bild 8-9 bis Bild 8-12 dargestellt.

Sowohl für Berechnungsprozedur 1 als auch für Berechnungsprozedur 2, wenn auch weniger deutlich, ergeben sich bei reiner Biegebeanspruchung $N_{b,r}/N_{pl,eff,k}=0$ höhere Traglasten der GMNIA-Analyse als die über wirksame Querschnittsflächen berechneten Biegetragfähigkeiten $M_{el,eff,k}$.

Wie für Einzelstäbe mit konstantem Momentenverlauf (siehe Kapitel 8.2.1) sind bei Querschnitten der Klasse 4, je größer die vorhandene Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p$ ist, umso größere Unterschiede der Traglasten der beiden Berechnungsprozeduren zu beobachten, was insbesondere für die GMNIA-Traglasten mit der kleinsten gewählten globalen bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}_y$ gilt.

Mit Berechnungsprozedur 1 werden Traglasten erreicht, die höher als die Referenzwerte nach EC 3 sind, sich jedoch für größere Plattenschlankheiten $\bar{\lambda}_p$ den Eurocode-Traglasten annähern. Die GMNIA-Analysen mit Berechnungsprozedur 2 ergeben Traglasten, die teilweise weit unter den Traglasten nach EC 3 liegen

8.2.3 Ergebnisse für Normalkraft und durchschlagenden Momentenverlauf:

Querschnittsklasse 2:

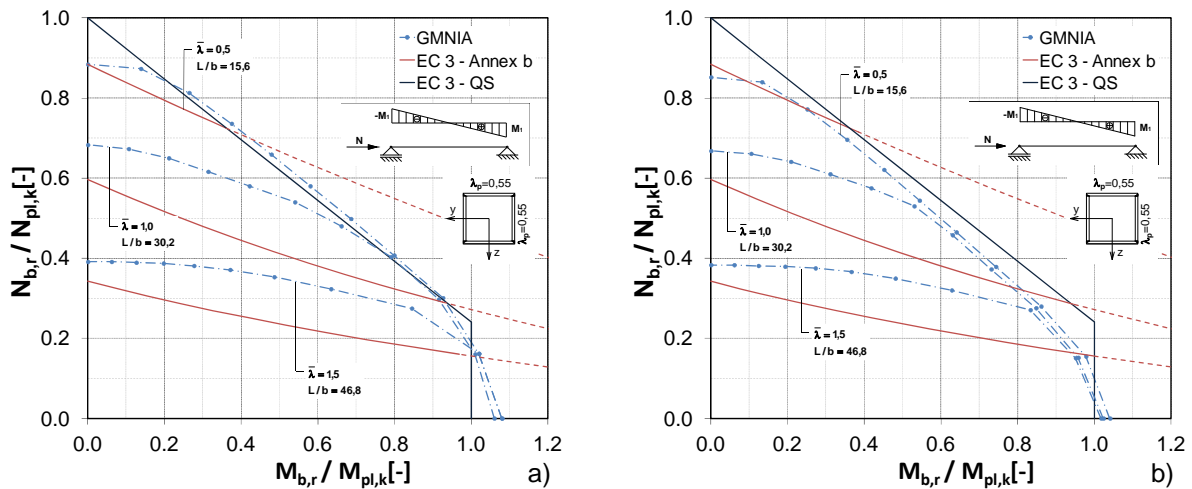


Bild 8-13: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p = 0,55$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2

In Bild 8-13 a und Bild 8-13 b sind die Ergebnisse für Querschnittsklasse 2 mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p = 0,55$ für die beiden Berechnungsprozeduren abgebildet.

Während der Vergleich der Traglasten der beiden Berechnungsprozeduren mit der globalen Schlankheit $\bar{\lambda}_y = 1,5$ nur kleine Unterschiede in den erreichten Traglasten zeigt, sind für die Traglasten für die globale Schlankheit $\bar{\lambda}_y = 0,5$ schon größere Unterschiede zu erkennen.

Im Vergleich zu den Traglasten nach EC 3 erreichen die GMNIA-Analysen, vor allem für die Schlankheiten $\bar{\lambda}_y = 1,0$ und $\bar{\lambda}_y = 1,5$ bei beiden Berechnungsprozeduren sowie für $\bar{\lambda}_y = 0,5$ mit Berechnungsprozedur 1 besonders für hohe Normalkraftbeanspruchungen, deutlich höhere Traglasten.

Querschnittsklasse 3:

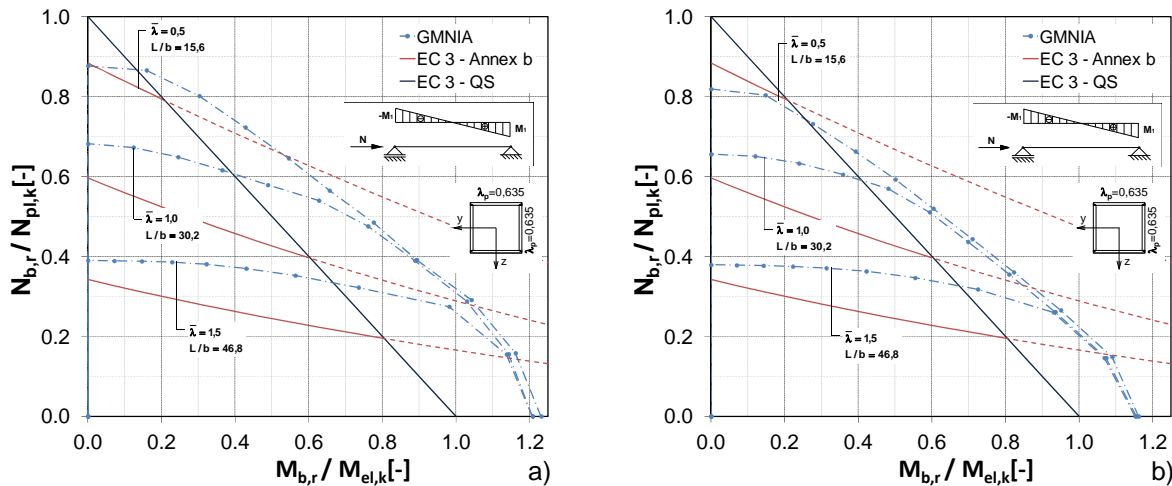


Bild 8-14: Vergleich GMNIA - Berechnungen: $\bar{\lambda}_y=0,635$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2

Der Vergleich der Ergebnisse in Bild 8-14 a und Bild 8-14 b zeigt hauptsächlich für $\bar{\lambda}_y=0,5$ unterschiedliche Traglasten der beiden Berechnungsprozeduren. Für die globalen bezogenen Schlankheiten $\bar{\lambda}_y=1,0$ und $\bar{\lambda}_y=1,5$ zeigen sich nur für hohe Biegebeanspruchungen ($N_{b,r}/N_{pl,k}$ gering) größere Unterschiede in den erreichten Traglasten der GMNIA-Analyse.

Bei Gegenüberstellung der Traglasten auf Basis der Knickspannungslinie b nach EC 3 mit den ermittelten Traglasten der GMNIA-Berechnung ist ersichtlich, dass, ausgenommen für Berechnungsprozedur 2 und hoher Druckbeanspruchung für $\bar{\lambda}_y=0,5$, die Traglasten der GMNIA-Analyse diese Werte übertreffen.

Querschnittsklasse 4:

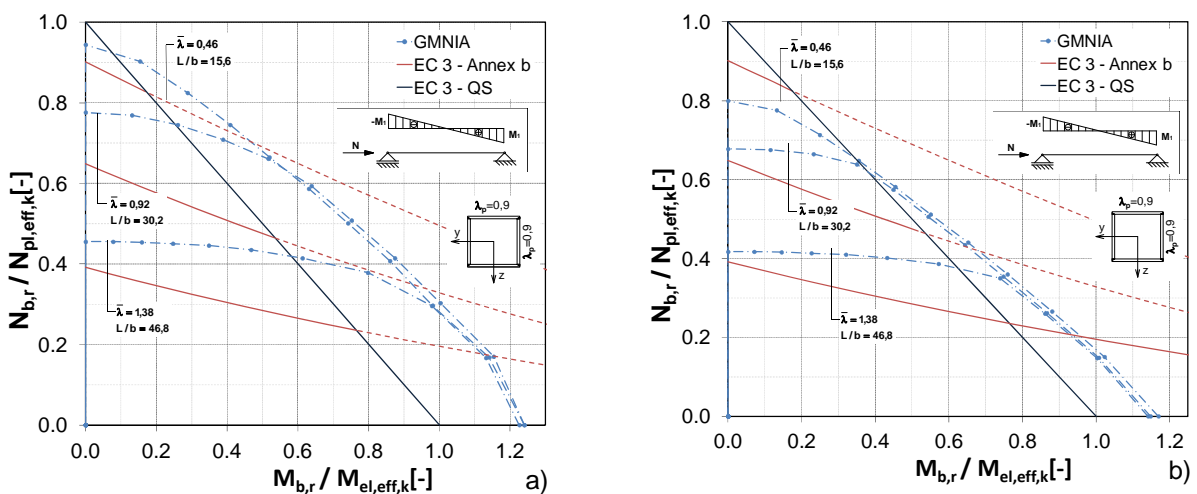


Bild 8-15: Vergleich GMNIA - Berechnungen: $\bar{\lambda}_y=0,9$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2

8. Tragverhalten eines Fachwerkträgers mit Querschnitten der Klasse 4

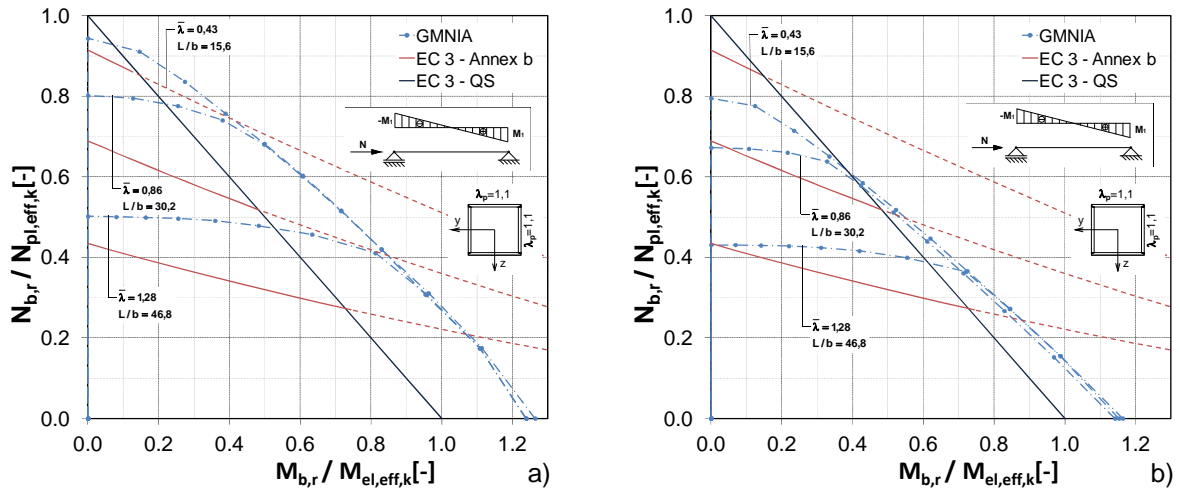


Bild 8-16: Vergleich GMNIA - Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=1,1$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2

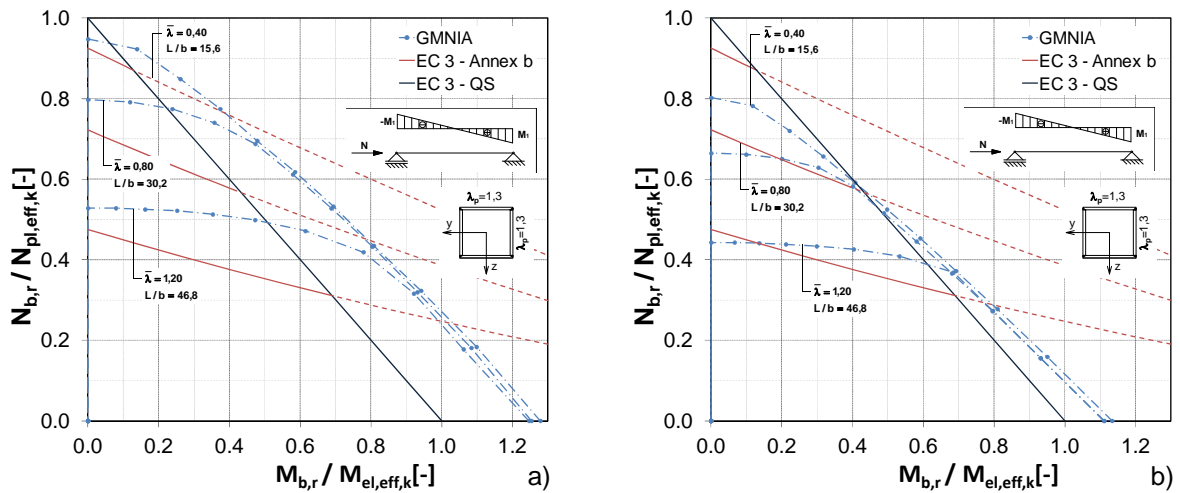


Bild 8-17: Vergleich GMNIA - Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=1,3$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2

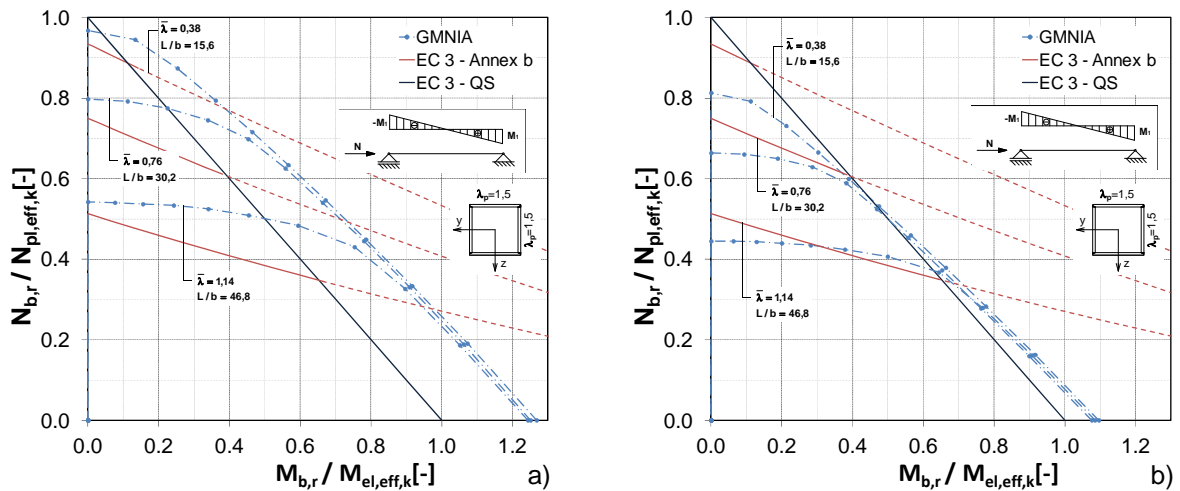


Bild 8-18: Vergleich GMNIA - Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=1,5$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2

In Bild 8-15 a bis Bild 8-18 b sind die erreichten GMNIA-Traglasten für beide Berechnungsprozeduren für Querschnitte der Klasse 4 mit den Plattenschlankheiten $\bar{\lambda}_p=0,9$, $\bar{\lambda}_p=1,1$, $\bar{\lambda}_p=1,3$ und $\bar{\lambda}_p=1,5$ abgebildet.

Die Unterschiede der erreichten Traglasten der beiden Berechnungsprozeduren sind wiederum umso größer, je größer die vorhandene Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p$ ist. Besonders auffallend sind die Unterschiede auch hier wieder bei reiner Biegebeanspruchung ($N_{b,r}/N_{pl,k}=0$) bzw. für sehr hohe Druckbeanspruchungen

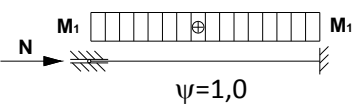
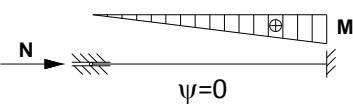
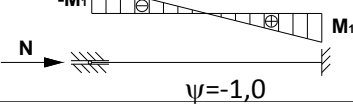
Die Traglasten der GMNIA-Analyse für Berechnungsprozedur 1 sind auffallend höher als die Traglasten nach EC 3. Im Gegensatz dazu nähern sich die erreichten Traglasten der Berechnungsprozedur 2, für größer werdende Plattenschlankheiten $\bar{\lambda}_p$, den Referenzwerten nach EC 3 an. Für die kleinste untersuchte globale bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_y$ sind die Traglasten für Querschnitte der Klasse 4 um einiges kleiner als die Werte nach EC 3.

8.3 Stütze beidseits eingespannt

In diesem Kapitel erfolgt die Auswertung der Ergebnisse für Einzelstäbe mit beidseitiger Einspannung unter Druck- und Biegebeanspruchung.

Die in Tabelle 8-1 aufgelisteten Querschnitte werden für die Traglastberechnungen gewählt und mit drei verschiedenen Lastfällen untersucht. Die drei Lastfälle unterscheiden sich durch die jeweiligen (elastisch berechneten) Momentenverläufe über die Stablänge und sind in Tabelle 8-3 dargestellt.

Tabelle 8-3: Lastfälle für GMNIA-Berechnungen mit beidseitigen Einspannung

Normalkraft + konstanter Momentenverlauf	Normalkraft + linearer Momentenverlauf	Normalkraft + durchschlag. Momentenverlauf
 <p>$\psi=1,0$</p>	 <p>$\psi=0$</p>	 <p>$\psi=-1,0$</p>

Für die GMNIA-Analysen der Einzelstäbe auf Druck- und Biegebeanspruchung mit beidseitiger Einspannung erfolgte die Ermittlung der Traglasten durchgehend mit der konservativeren Berechnungsprozedur 2 (siehe Kapitel 4).

Im Gegensatz zu den Traglastberechnungen an Stäben mit gelenkigen Lagerungsbedingungen, an denen die gewünschten Beanspruchungsverläufe durch Aufbringen von äußeren Lasten bzw. Momenten an den Auflagern erfolgt, kann bei Einzelstäben mit beidseitiger Einspannung aufgrund der hier vorliegenden Einspannung keine äußere Last in den Auflagern aufgebracht werden. (bewirkt nur Reaktion in den Endenspannungen) Um eine Normalkraft in den Einzelstab einbringen zu können, wurde am linkseitigen Auflager die Auflagerverschiebung in Richtung der Stabachse (x-Achse) zugelassen. Die gewünschten Biegebeanspruchungen müssen für diese GMNIA-Analysen über Endverdrehungen der Auflager in den Stab eingebracht werden.

Es sollte dabei beachtet werden, dass diese Vorgehensweise bei rein elastischer Berechnung völlig äquivalent einem Aufbringen äußerer Biegemomente wäre. Bei plastischer Berechnung –entsprechend dem realen Tragverhalten– ist dies allerdings nicht der Fall: nach Erreichen der Streckgrenze in einzelnen Fasern des Querschnitts nimmt die Biegesteifigkeit bei Endverdrehung deutlich ab, wodurch kein linearer Zusammenhang mehr zwischen Verdrehung und Biegemoment vorliegt. Trotzdem wird die Vorgehensweise über Aufbringung einer Verdrehung gewählt: diese entspricht ja

auch dem –gerade bei Füllstäben eines Fachwerkes- tatsächlich vorliegenden Fall einer Zwängungsbeanspruchung (keine unmittelbare Belastung am Stab selbst).

In einem ersten Berechnungsgang wird für jeden Querschnitt und jeden berechneten Lastfall eine GMNIA-Analyse mit reiner Auflagerverdrehung –entsprechend dem gewünschten Momentenverlauf- durchgeführt, um die Endverdrehung des Einzelstabes an den Auflagern ermitteln zu können, bei welcher die Traglast (definiert als maximale Biegetragfähigkeit in den Auflagerknoten) erreicht wird.

Nach Bestimmung dieser Maximalverdrehung an den Lagerungsbedingungen des Systems für die drei Momentenverläufe, wurde in weiteren GMNIA-Analysen, zusätzlich zu dieser Maximalverdrehung, auch eine Normalkraftbeanspruchung aufgebracht.

In diesem Kapitel erfolgt die Ergebnisdarstellung ebenfalls wieder mit Interaktionsdiagrammen, jedoch sind hier pro Diagramm jeweils die Traglasten für einen bestimmten Querschnitt und Momentenverlauf sowie für eine globale bezogene Schlankheit dargestellt (z.B. Querschnitt: Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=1,3$, Beanspruchungsart: Normalkraft + konstanter Momentenverlauf bei elastischer Berechnung, globale bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}=1,0$).

Als y-Achse (Ordinate) wird wiederum das Verhältnis der Drucktragfähigkeit zur Querschnittstragfähigkeit ($N_{b,r}/N_{pl,k}$ bzw. $N_{b,r}/N_{pl,eff,k}$) aufgetragen. Im Gegensatz zu Kapitel 7 wird auf der x-Achse (Abszisse), das Verhältnis der aufgetragenen Verdrehung an den Stabenden aus der GMNIA-Analyse zu einer definierten Bezugsverdrehung ($\phi_{b,r}/\phi_{pl,k}$, $\phi_{b,r}/\phi_{el,k}$ bzw. $\phi_{b,r}/\phi_{el,eff,k}$) aufgetragen. Letzte Werte werden analytisch durch Rückrechnung über die elastischen Steifigkeitskoeffizienten für den entsprechenden Momentenverlauf bei Ansatz der Querschnittstragfähigkeit erhalten. Die Werte $\phi_{pl,k}$, $\phi_{el,k}$ und $\phi_{el,eff,k}$ unterscheiden sich daher nur im Verhältnis der Momententragfähigkeiten $M_{pl,k}$, $M_{el,k}$ und $M_{el,eff,k}$.

Neben den zulässigen Traglasten nach EC 3 (wobei die beidseitige Einspannung bei der Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_y berücksichtigt wurde), wird auch noch die Traglast nach EC3 für beidseits gelenkig gelagerte Stäbe bei vorausgesetzter Stablänge in den Diagrammen eingezeichnet (grüne Linie).

Grund hierfür ist, einen Vergleich der Traglasten für beide unterschiedlichen Systeme (Lagerung gelenkig oder eingespannt) nach EC 3 tätigen zu können. In der Praxis erfolgt oft der Nachweis der Füllstäbe eines Fachwerks als Stab mit beidseits gelenkiger

Lagerung. Im Stahlbau, besonders bei geschweißter Ausbildung der Knoten, verhalten sich die Knoten eher biegesteif. Aufgrund der Verformungen des Fachwerkträgers, kommt es zu Zwängungen der Füllstäbe und daraus resultierend zu Biegebeanspruchungen an den Stäben.

Wie bereits in Kapitel 1.1 angeführt, gilt es die Frage des richtigen Verfahrens der Bestimmung der Tragfähigkeit der druckbeanspruchten Füllstäbe nach EC 3 zu ermitteln. Neben dem Verfahren mit Berücksichtigung der Biegemomente und gleichzeitiger Berechnung des Abminderungsfaktors χ_y mit der Knicklänge eines beidseits gelenkig gelagerten Stabes oder eines Stabes mit beidseitiger Einspannung, gibt es auch das Konzept des Fachwerks als Gelenkfachwerk zu betrachten, sodass keine Biegemomente entstehen. (Nachweis zentrischer Druck alleine). Dies setzt jedoch zumindest Querschnitte der Klasse 2 voraus.

Durch die in den nachfolgenden Diagrammen eingezeichnete, strichlierte horizontale Linie kann für druckbeanspruchte Füllstäbe das Potential der Tragfähigkeit bei zusätzlichen Verdrehungen der Stabenden abgeschätzt werden. Weiters entspricht dies auch den Ergebnissen nach Eurocode für eine Betrachtung als reines Gelenkfachwerk. (nur N, beidseits gelenkige Lagerung) Die Ermittlung für welche Zusatzrotationen der Stabenden die Tragfähigkeit noch gewährleistet ist, kann über den Schnittpunkt der horizontalen strichlierten Linie mit den ermittelten GMNIA-Traglasten abgelesen werden.

Sind aufgrund der Modellierung der Knoten als biegesteife Anschlüsse die zulässigen Rotationen der Stabenden überschritten, ist die Bemessung mit dem Gelenkfachwerk als das weniger konservative Verfahren zu betrachten. Treten durch die Biegebeanspruchungen an den Stabenden keine Überschreitungen der zulässigen Rotationen auf, wird durch das Verfahren der Bemessung mit dem Gelenkfachwerk eine ungünstigere Tragfähigkeit erreicht.

Die beschriebenen globalen bezogenen Schlankheiten $\bar{\lambda}_y$ der nachfolgenden Traglastuntersuchungen beziehen sich immer auf die Schlankheit des beidseitig eingespannten Stabes. (Berechnung von $\bar{\lambda}_y$ mit Knicklänge $L_{cr}=0,5 \cdot L$)

8.3.1 Ergebnisse für Normalkraft und konstanter Momentenverlauf – beidseitige Einspannung:

Querschnittsklasse 2:

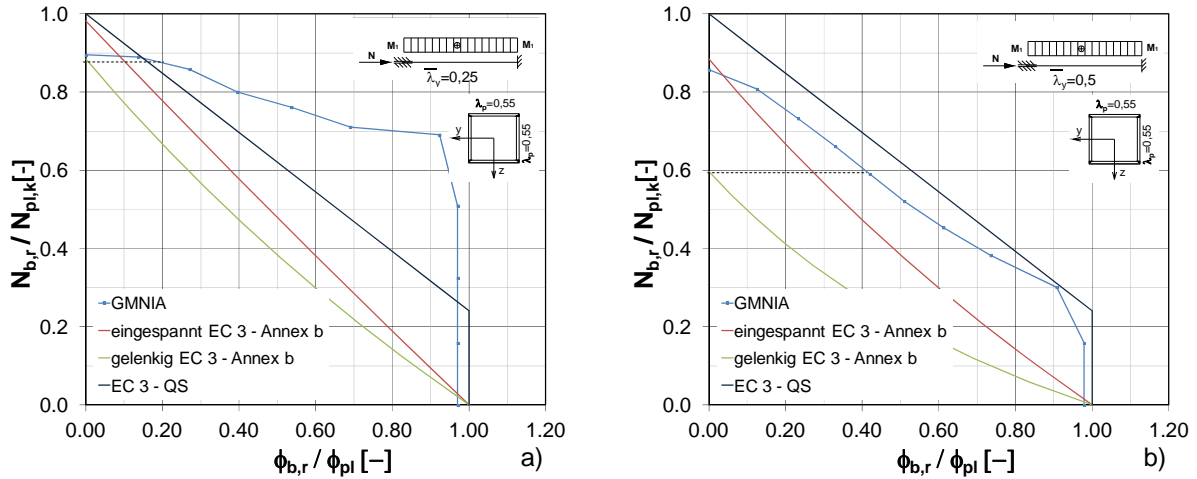


Bild 8-19: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,55$, a) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y=0,25$ ($L/b=15,6$), b) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y=0,5$ ($L/b=30,2$)

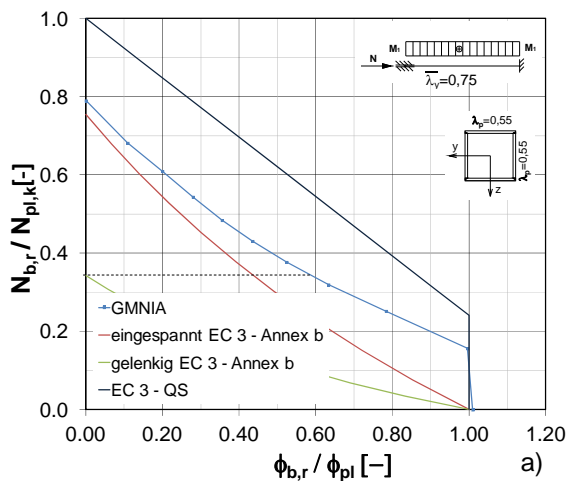


Bild 8-20: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,55$, a) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y=0,75$ ($L/b=46,8$)

Die Ergebnisse für Querschnittsklasse 2 ($\bar{\lambda}_p=0,55$) mit Endbeanspruchungen unter Druck- und Biegebeanspruchung sind in Bild 8-19 bis Bild 8-20 dargestellt. Außer bei reiner Druckbeanspruchung ($\phi_{b,r}/\phi_{pl}=0$) ergeben sich für die GMNIA-Analyse höhere Traglasten als die eingetragenen Ergebnisse nach Eurocode EC 3. Hervorzuheben ist, dass bei den Traglastberechnungen (GMNIA-Analysen) die vorgegebenen Drehwinkel ϕ_{br} mit etwa $\phi_{br} \sim \phi_{pl}$ beschränkt wurde. Dies bedeutet, dass für $\phi_{br} > \phi_{pl}$ sehr wohl Drucktragfähigkeiten vorliegen, die jedoch im Diagramm nicht dargestellt sind.

Besonders für die globalen bezogenen Schlankheiten $\bar{\lambda}_y=0,5$ und $\bar{\lambda}_y=0,75$ zeigt sich, dass für zusätzliche Rotationen der Stabenden die Tragfähigkeit noch gewährleistet ist. Allerdings ist eine Berechnung nach dem Konzept der Gelenkfachwerkstheorie (Nachweis nur N, beidseits gelenkige Lagerung) auch bei Querschnittsklasse 2 nur dann sicher, wenn sichergestellt werden kann, dass gewisse Endrotationen der Druckstreben nicht überschritten werden. Zum Beispiel darf für $\bar{\lambda}_y=0,5$ nur eine Rotation der Stabenden von ca. $0,40 \cdot \phi_{pl}$ vorhanden sein.

Querschnittsklasse 3:

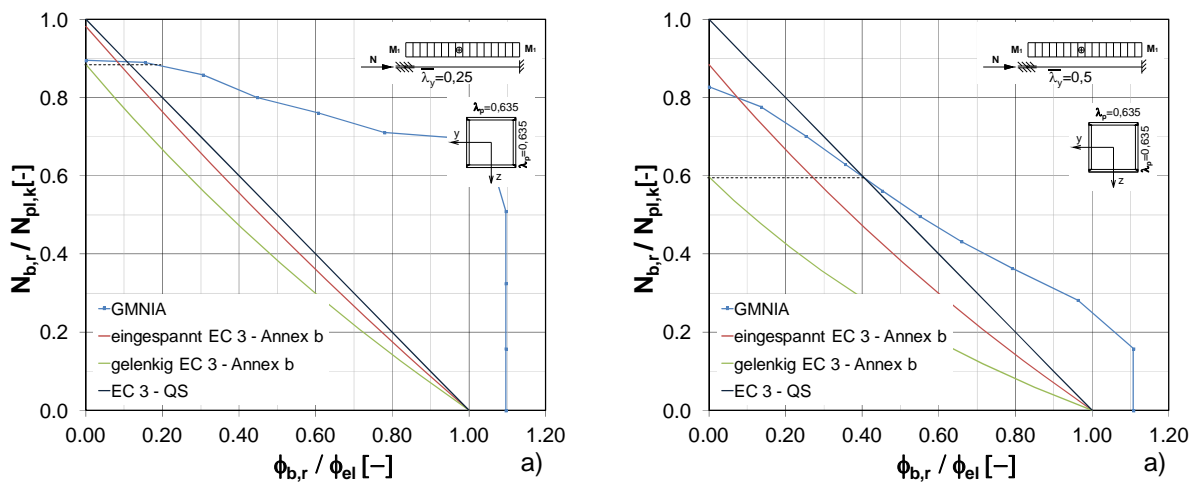


Bild 8-21: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,635$, a) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y=0,25$ ($L/b=15,6$), b) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y=0,5$ ($L/b=30,2$)

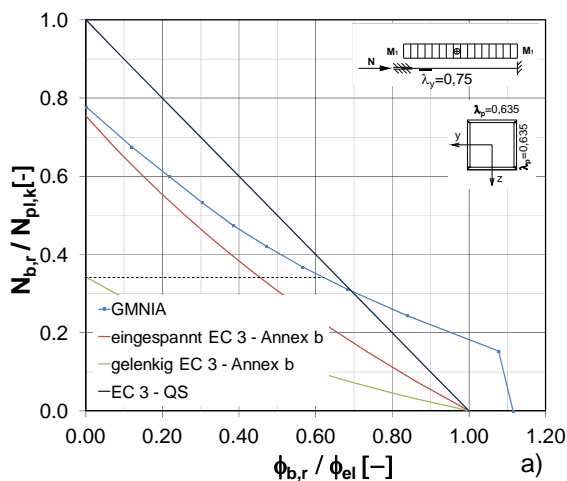


Bild 8-22: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,635$, a) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y=0,75$ ($L/b=46,8$)

In Bild 8-21 bis Bild 8-22 sind die Ergebnisse der GMNIA-Berechnungen für ein Hohlkastenprofil mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,55$ (Querschnittsklasse 3) ersichtlich. Die vorgegebene Verdrehung der GMNIA-Analyse $\phi_{b,r}$ wurde höher als die zulässige Querschnittsverdrehung ϕ_{el} gewählt, wobei noch größere Werte $\phi_{b,r}$ hier nicht näher

untersucht wurden. Auch für Querschnittsklasse 3 zeigt sich für größere bezogene Schlankheiten $\bar{\lambda}_y=0,5$ und $\bar{\lambda}_y=0,75$ eine Gewährleistung der Tragfähigkeit für zusätzliche Verdrehungen der Stabenden. Die zulässigen Verdrehungen sind wiederum über den Schnittpunkt der horizontalen strichlierten Linie mit den GMNIA-Traglasten abzulesen. (z.b.: bei $\bar{\lambda}_y=0,75$ muss $\phi_{b,r} \leq 0,6 \cdot \phi_{el}$ sein)

Querschnittsklasse 4:

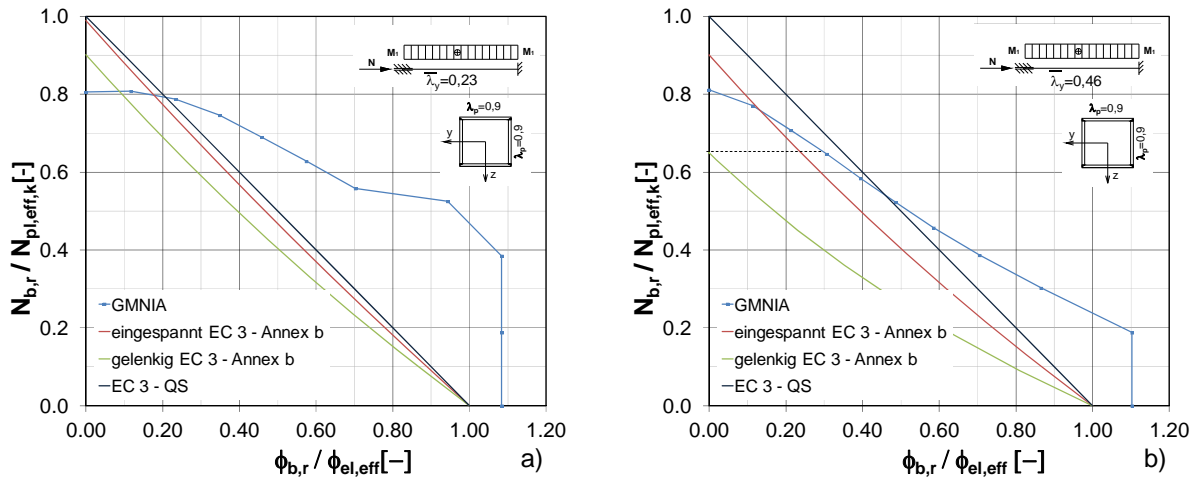


Bild 8-23: GMNIA - Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,9$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red}=0,23$ ($L/b=15,6$), b) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red}=0,46$ ($L/b=30,2$)

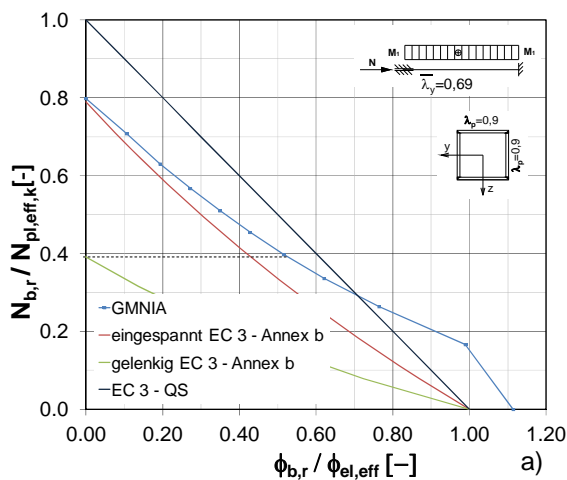


Bild 8-24: GMNIA - Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,9$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red}=0,69$ ($L/b=46,8$)

8. Tragverhalten eines Fachwerkträgers mit Querschnitten der Klasse 4

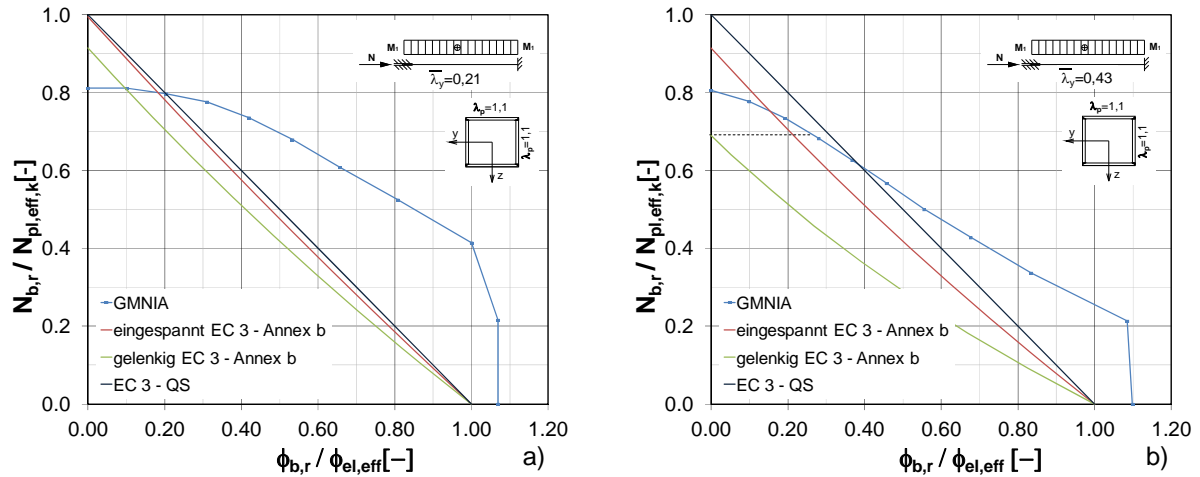


Bild 8-25: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p = 1,1$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,21$ ($L/b = 15,6$), b) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,43$ ($L/b = 30,2$)

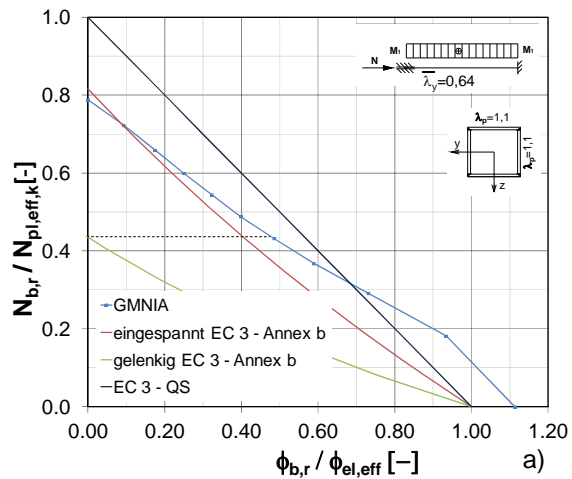


Bild 8-26: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p = 1,1$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,64$ ($L/b = 46,8$)

8. Tragverhalten eines Fachwerkträgers mit Querschnitten der Klasse 4

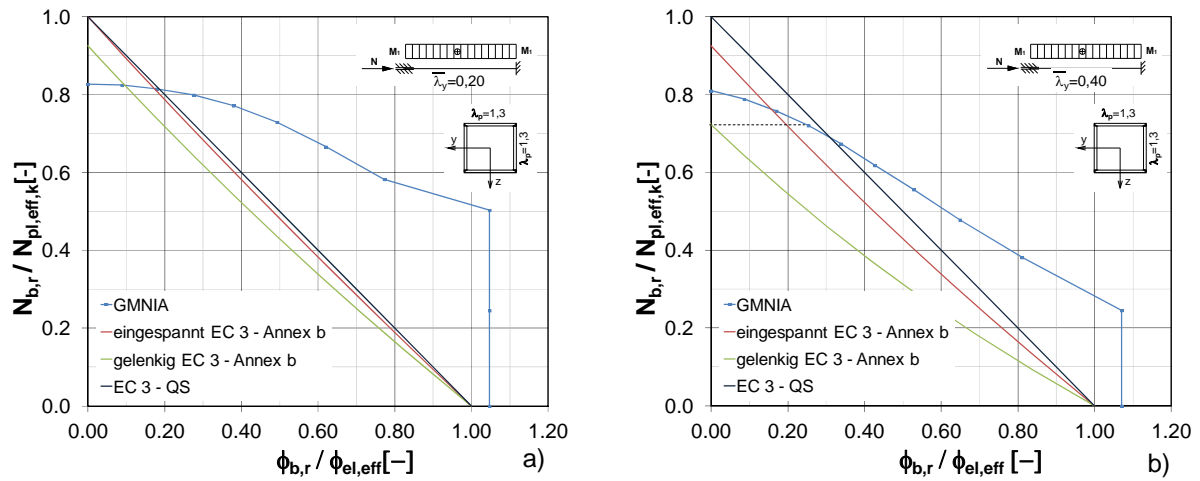


Bild 8-27: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=1,3$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red}=0,20$ ($L/b=15,6$), b) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red}=0,40$ ($L/b=30,2$)

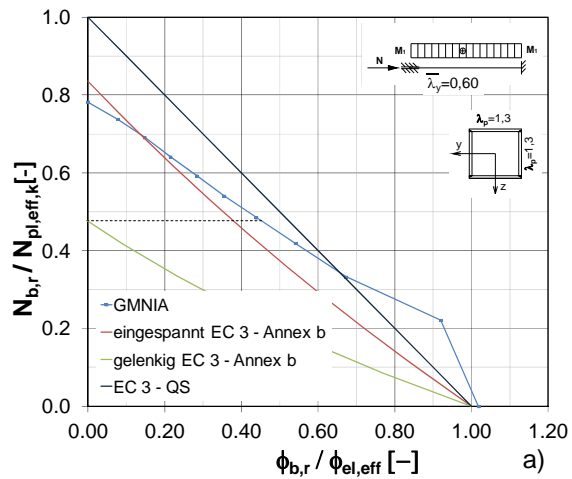


Bild 8-28: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=1,3$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red}=0,60$ ($L/b=46,8$)

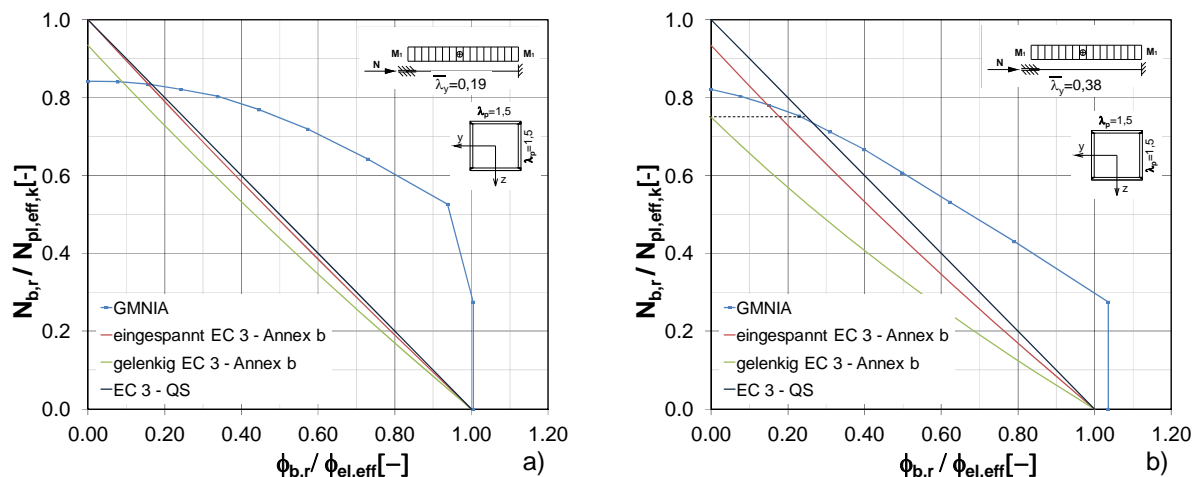


Bild 8-29: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p = 1,5$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,19$ ($L/b = 15,6$), b) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,38$ ($L/b = 30,2$)

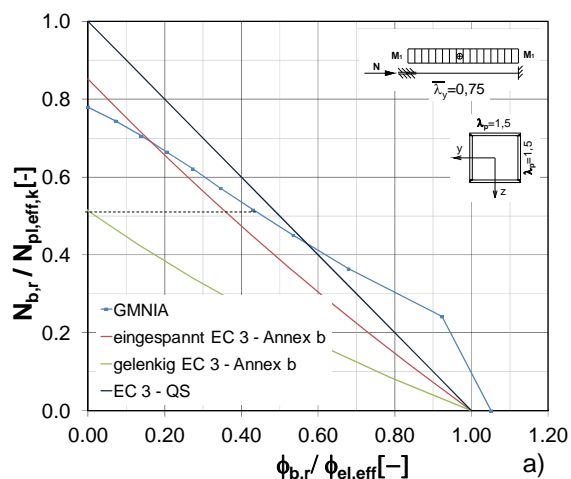


Bild 8-30: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p = 1,5$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,57$ ($L/b = 46,8$)

Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse eines beidseitig eingespannten Einzelstabes mit Druck- und konstanter Momentenbeanspruchung für Querschnitte der Klasse 4 mit den Plattenschlankheiten $\bar{\lambda}_p = 0,9$, $\bar{\lambda}_p = 1,1$, $\bar{\lambda}_p = 1,3$ und $\bar{\lambda}_p = 1,5$ sind in Bild 8-23 bis Bild 8-30 abgebildet.

Auch hier ist hervorzuheben, dass die vorgegeben Winkel $\phi_{b,r}$ in etwa auf die Werte $\phi_{el,eff}$ beschränkt sind. Auch darüber hinaus liegen noch Drucktragfähigkeiten vor, die jedoch hier nicht dargestellt sind.

Da die Berechnungen in diesem Abschnitt mit Berechnungsmethode 2 durchgeführt werden, ist daran zu erinnern, dass es sich bei dieser Methode um die unteren Grenzwerte der Tragfähigkeit handelt. Besonders für dünnwandige Querschnitte wurde bereits in Kapitel 8.2 die niedrigere Tragfähigkeit gegenüber dem EC 3 gezeigt.

Ausgenommen für hohe Druckbeanspruchung und gleichzeitig geringer Biegebeanspruchung übertreffen die Traglasten der GMNIA-Analyse die Werte der Eurocodeberechnung mit den Interaktionskoeffizienten nach Annex B in EC 3.

Wiederum ist festzustellen, dass für größere bezogene Schlankheiten $\bar{\lambda}_{y,red}$ die Tragfähigkeit für zusätzliche Rotationen der Stabenden sichergestellt ist. Jedoch ist die Berechnung nach der Gelenkfachwerkstheorie nur auf der sicheren Seite, wenn die Endrotationen bestimmte Grenzwerte einhalten. Zum Beispiel muss für einen geschweißten Hohlkastenquerschnitt mit $\bar{\lambda}_p=1,5$ und globaler bezogener Schlankheit von $\bar{\lambda}_{y,red}=0,57$ die Rotation mit $\phi_{b,r} \leq 0,425 \cdot \phi_{el,eff}$ beschränkt werden.

8.3.2 Ergebnisse für Normalkraft und dreiecksförmigen Momentenverlauf – beidseitige Einspannung

Querschnittsklasse 2:

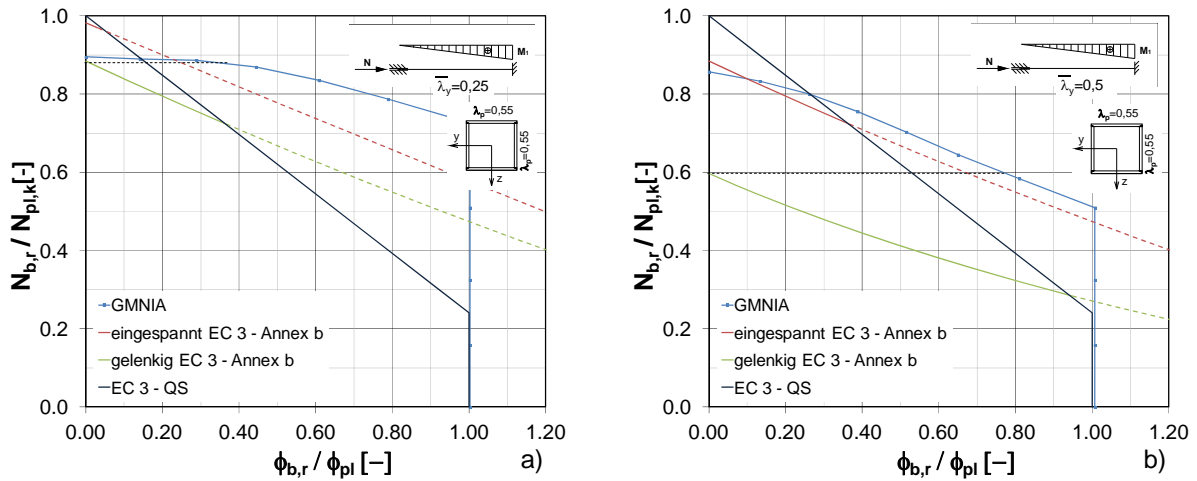


Bild 8-31: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p = 0,55$, a) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y = 0,25$ ($L/b = 15,6$), b) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y = 0,5$ ($L/b = 30,2$)

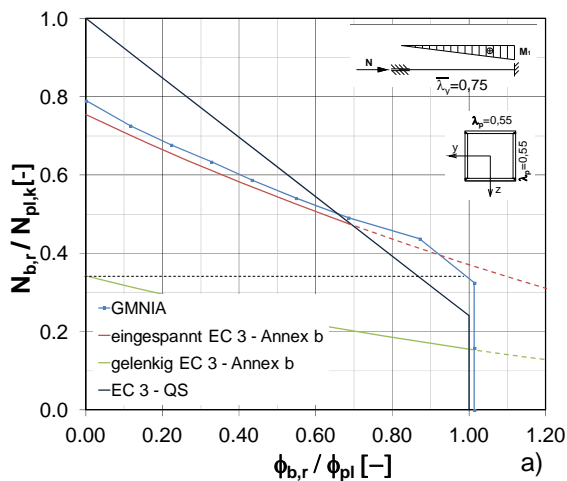


Bild 8-32: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p = 0,55$, a) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y = 0,75$ ($L/b = 46,8$)

In Bild 8-31 bis Bild 8-32 sind die Ergebnisse der Traglastberechnungen für einen Querschnitt der Klasse 2 mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p = 0,55$ mit linearem Momentenverlauf abgebildet.

Die vorgegebenen Rotationen der Stabenden wurden mit $\phi_{b,r} \sim \phi_{pl}$ festgelegt, wobei auch für größere Verdrehungen $\phi_{b,r}$ Drucktragfähigkeiten vorliegen. Auch bei dreieckigem Momentenverlauf zeigt sich für die globalen bezogenen Schlankheiten $\bar{\lambda}_y = 0,5$ und $\bar{\lambda}_y = 0,75$ die Gewährleistung der Tragfähigkeit bei zusätzlichen Rotationen der Stabenden.

Bei Vergleich mit den eingetragenen Werten mit Interaktionskoeffizienten nach EC 3 für gelenkige Lagerung ist wiederum das hohe Potential der Berechnung mit eingespannten Lagerungsbedingungen festzustellen. Die Berechnung nach der Gelenkfachwerkstheorie ist nur dann das konservative Berechnungsverfahren, wenn sichergestellt wird, dass bestimmte zulässige Endrotationen der Stabenden der Druckstreben eingehalten werden. Für einen Einzelstab mit $\bar{\lambda}_y=0,5$, berechnet mit Knicklänge $L_{cr}=0,5 \cdot L$, darf eine Rotation der Stabenden von ca. $0,80 \cdot \phi_{pl}$ nicht überschritten werden.

Querschnittsklasse 3:

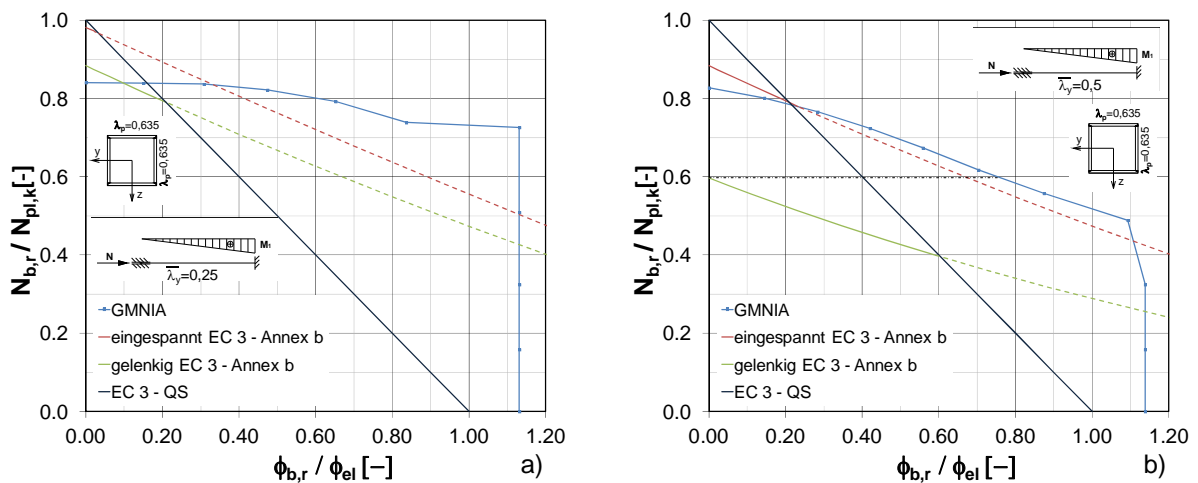


Bild 8-33: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,635$, a) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y=0,25$ ($L/b=15,6$), b) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y=0,5$ ($L/b=30,2$)

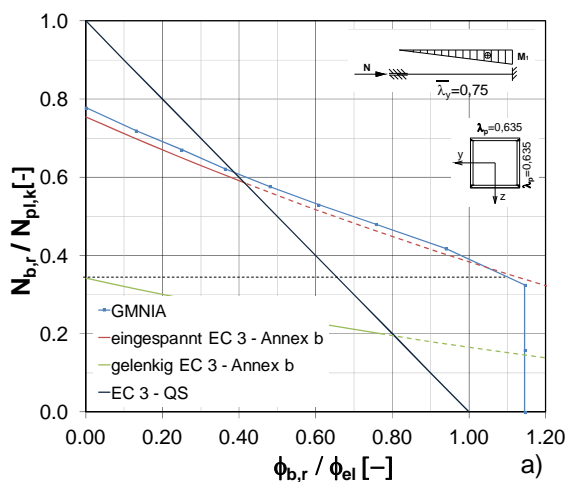


Bild 8-34: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,635$, a) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y=0,75$ ($L/b=46,8$)

Für Querschnittsklasse 3, mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,635$, sind die Ergebnisse der GMNIA-Traglastberechnungen in Bild 8-33 bis Bild 8-34 dargestellt. Die ermittelte Verdrehung $\phi_{b,r}$ der GMNIA-Analysen für reine Biegebeanspruchung ($N_{b,r}/N_{pl,k}=0$) ist für alle globalen bezogenen Schlankheiten $\bar{\lambda}_y$ viel höher als die zulässige

Querschnittsverdrehung ϕ_{el} . Für $\bar{\lambda}_y=1,0$ und $\bar{\lambda}_y=1,5$ sind die ermittelten Traglasten fast gleich groß wie die zulässigen Traglasten nach Annex B in EC 3.

Über den Schnittpunkt der horizontalen strichlierten Linie mit den ermittelten Traglasten der GMNIA-Analyse ist besonders für die globalen bezogenen Schlankheiten $\bar{\lambda}_y=0,5$ und $\bar{\lambda}_y=0,75$ wiederum ersichtlich, dass für zusätzliche Rotationen der Stabenden die Tragfähigkeit weiterhin gewährleistet ist. Allerdings ist für Querschnittsklasse 3 eine Berechnung nach der Gelenkfachwerkstheorie nur dann auf der sicheren Seite, wenn gewisse Endrotationen der Druckstreben eingehalten werden. Zum Beispiel darf für $\bar{\lambda}_y=0,5$ eine Rotation der Stabenden von ca. $0,80 \cdot \phi_{el}$ nicht überschritten werden.

Querschnittsklasse 4:

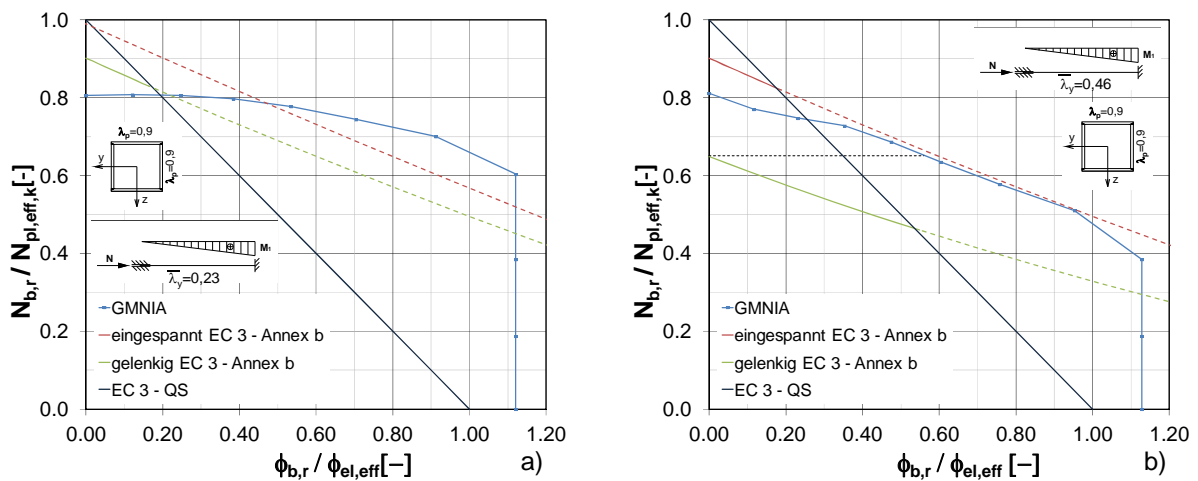


Bild 8-35: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,9$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red}=0,23$ ($L/b=15,6$), b) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red}=0,46$ ($L/b=30,2$)

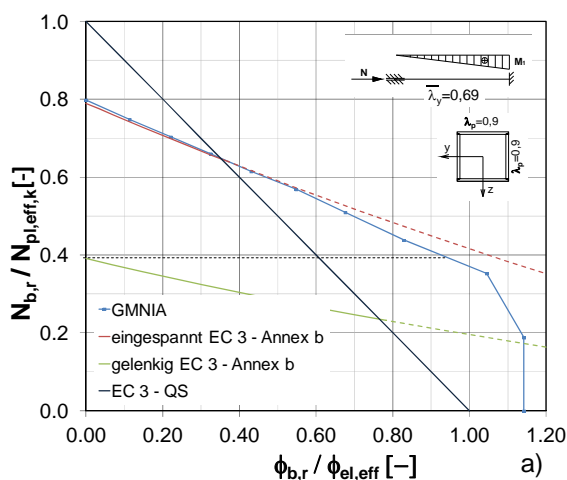


Bild 8-36: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,9$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red}=0,69$ ($L/b=46,8$)

8. Tragverhalten eines Fachwerkträgers mit Querschnitten der Klasse 4

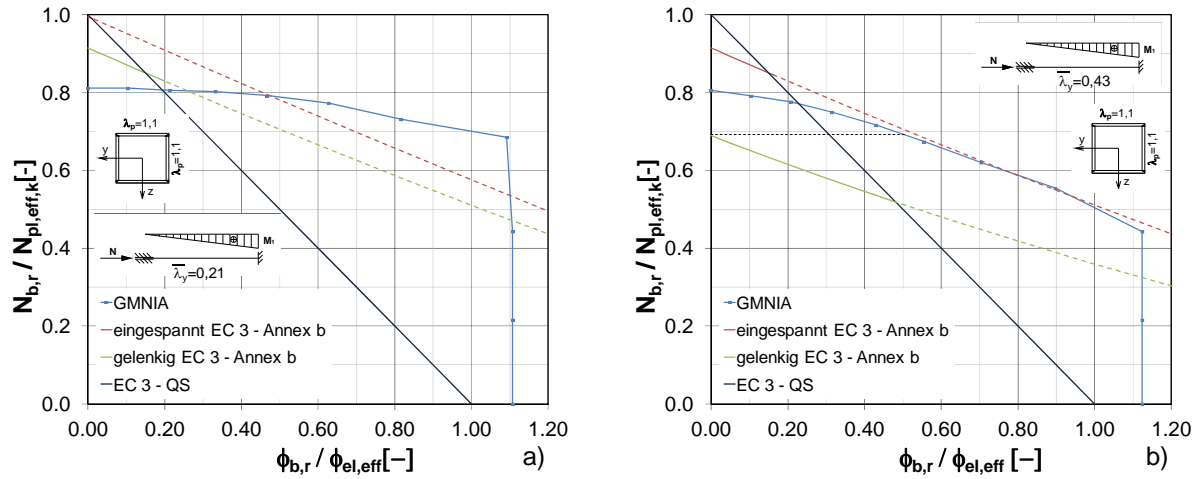


Bild 8-37: GMNIA - Berechnungen: $\bar{\lambda}_p = 1,1$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,21$ ($L/b = 15,6$), b) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,43$ ($L/b = 30,2$)

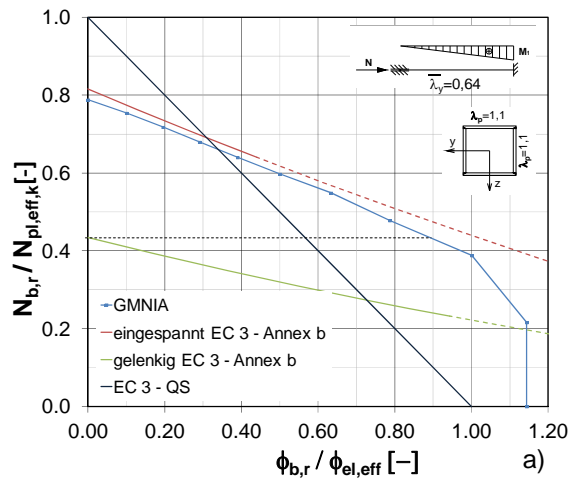


Bild 8-38: GMNIA - Berechnungen: $\bar{\lambda}_p = 1,1$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,64$ ($L/b = 46,8$)

8. Tragverhalten eines Fachwerkträgers mit Querschnitten der Klasse 4

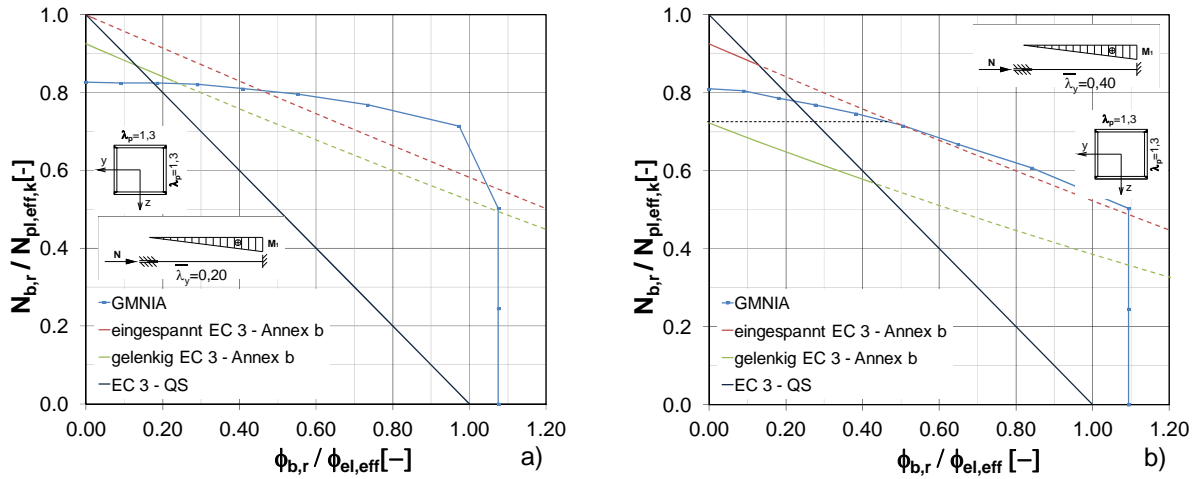


Bild 8-39: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p = 1,3$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,20$ ($L/b = 15,6$), b) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,40$ ($L/b = 30,2$)

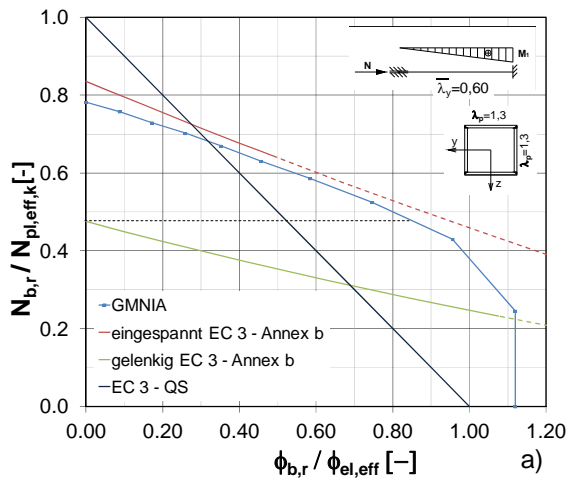


Bild 8-40: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p = 1,3$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,60$ ($L/b = 46,8$)

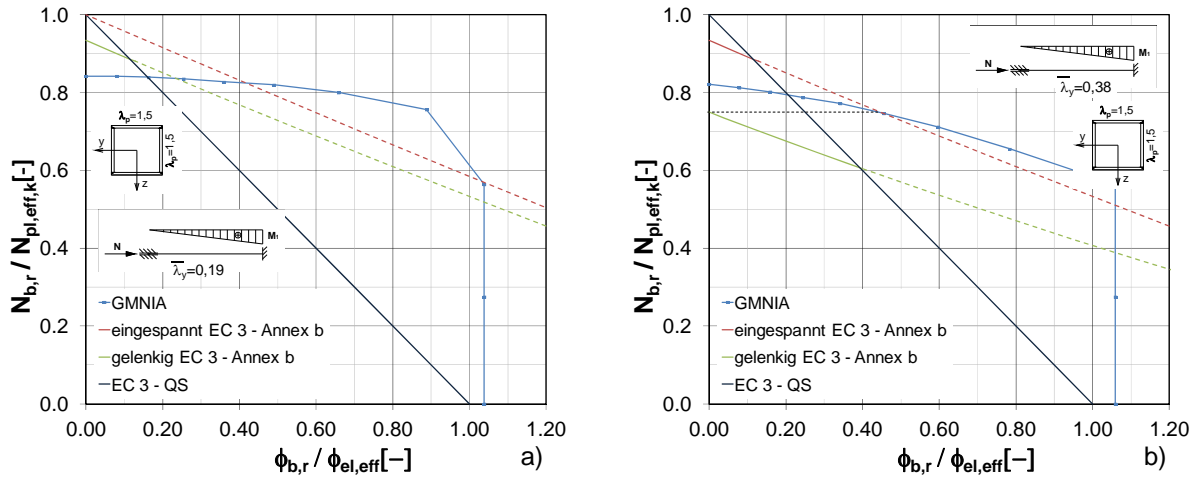


Bild 8-41: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p = 1,5$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,19$ ($L/b = 15,6$), b) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,38$ ($L/b = 30,2$)

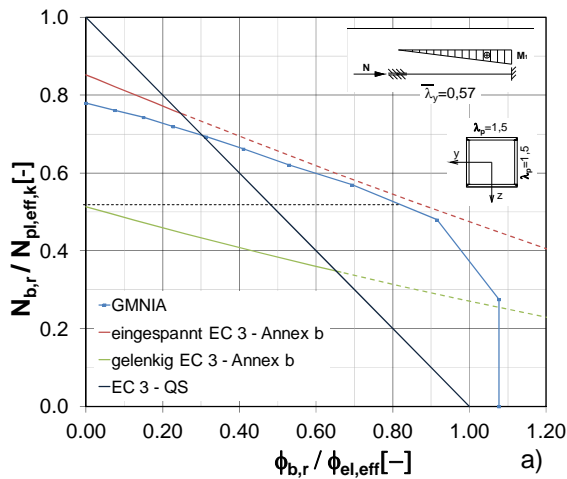


Bild 8-42: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p = 1,5$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,57$ ($L/b = 46,8$)

In Bild 8-35 bis Bild 8-42 sind die Ergebnisse der Traglastberechnungen für die Querschnitte mit Plattenschlankheiten $\bar{\lambda}_p = 0,9$, $\bar{\lambda}_p = 1,1$, $\bar{\lambda}_p = 1,3$ und $\bar{\lambda}_p = 1,5$ (Querschnittsklasse 4) dargestellt. Für hohe Druckbeanspruchungen und gleichzeitig geringe Momentenbeanspruchungen werden die Traglasten der Berechnung mit Interaktionskoeffizienten nach Annex B in EC 3 nicht erreicht. Besonders für größere $\bar{\lambda}_{y,red}$ zeigt sich auch für Querschnitte der Klasse 4 mit Druckbeanspruchung und dreiecksförmigem Momentenverlauf das große Potential der Modellierung von Einspannungen als beidseitige Lagerungsbedingungen.

Auch für Querschnittsklasse 4 zeigt sich, dass für größere bezogene Schlankheiten $\bar{\lambda}_{y,\text{red}}$ die Tragfähigkeit bei zusätzlichen Rotationen der Stabenden sichergestellt ist. Die Berechnung nach der Gelenkfachwerkstheorie ist jedoch nur dann auf der sicheren Seite, wenn bestimmte Rotationen der Stabenden der Druckstreben nicht überschritten werden. Diese Rotationen sind über den Schnittpunkt der horizontalen strichlierten Linie mit den GMNIA-Traglasten zu bestimmen und dürfen z.B. für einen Hohlkastenquerschnitt mit $\bar{\lambda}_p=1,5$ und globaler bezogener Schlankheit von $\bar{\lambda}_{y,\text{red}}=0,38$ nicht größer als $0,425 \cdot \phi_{\text{el,eff}}$ sein.

8.3.3 Ergebnisse für Normalkraft und durchschlagenden Momentenverlauf – beidseitige Einspannung

Querschnittsklasse 2:

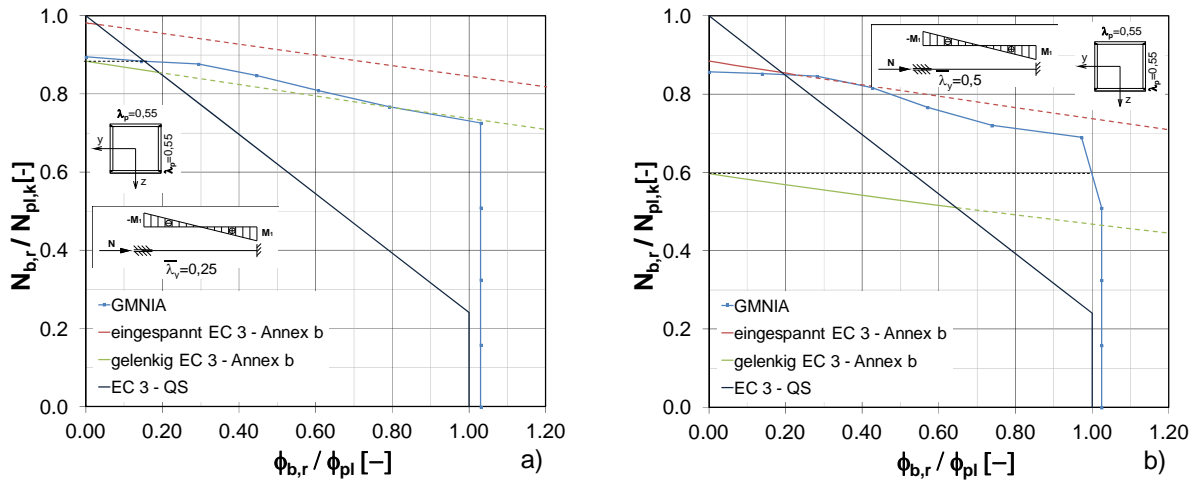


Bild 8-43: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,55$, a) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y=0,25$ ($L/b=15,6$), b) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y=0,5$ ($L/b=30,2$)

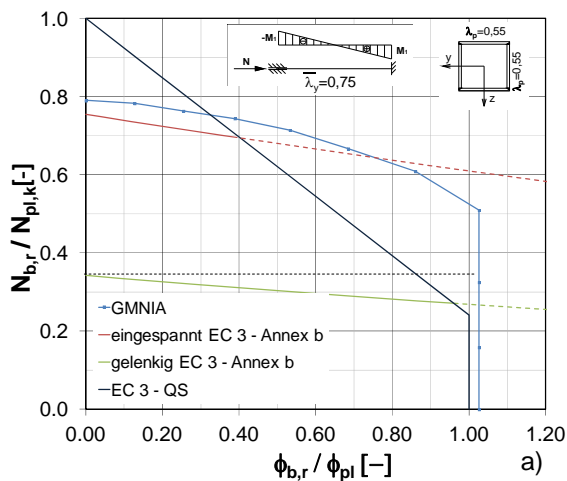


Bild 8-44: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,55$, a) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y=0,75$ ($L/b=46,8$)

Die ermittelten Traglasten der GMNIA-Analyse für einen quadratischen Hohlkastenquerschnitt mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,55$ (Querschnittsklasse 2) sind in Bild 8-43 bis Bild 8-44 abgebildet.

Besonders für die globalen bezogenen Schlankheiten $\bar{\lambda}_y=0,5$ und $\bar{\lambda}_y=0,75$ zeigt sich, dass für zusätzliche Rotationen der Stabenden die Tragfähigkeit noch gewährleistet ist. Hervorzuheben ist, dass bei den Traglastberechnungen (GMNIA-Analysen) die vorgegebenen Drehwinkel ϕ_{br} mit etwa $\phi_{br} \sim \phi_{pl}$ beschränkt wurde. Dies bedeutet, dass für $\phi_{br} > \phi_{pl}$ sehr wohl Drucktragfähigkeiten vorliegen, die jedoch im Diagramm nicht dargestellt sind. Allerdings ist eine Berechnung nach der Gelenkfachwerkstheorie auch

bei Querschnittsklasse 2 nur dann sicher, wenn sichergestellt werden kann, dass gewisse Endrotationen nicht überschritten werden. Im Vergleich zu den anderen Momentenverläufen zeigt sich für diesen Momentenverlauf eine viel höhere Rotationsfähigkeit.

Querschnittsklasse 3:

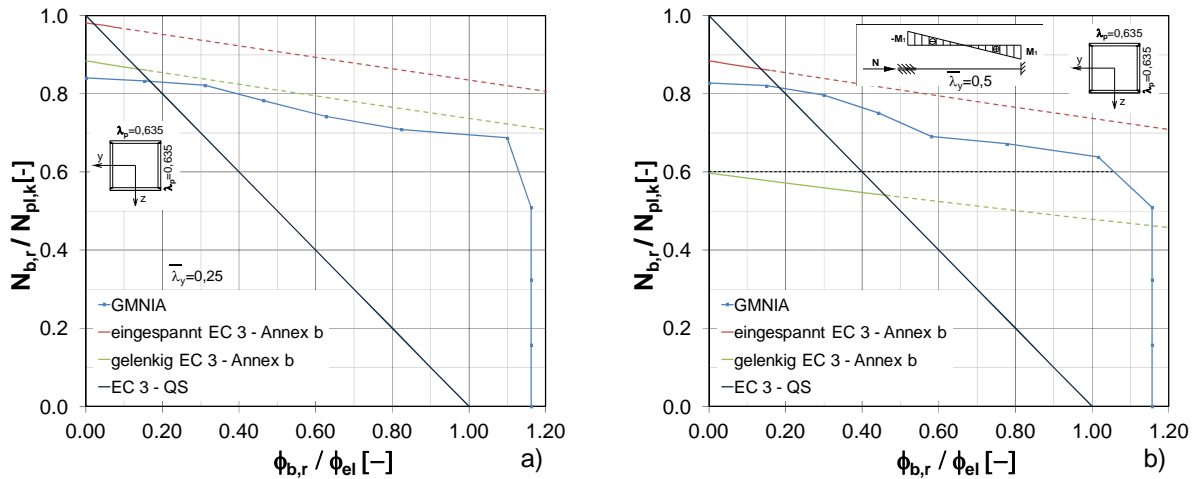


Bild 8-45: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,635$, a) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y=0,25$ ($L/b=15,6$), b) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y=0,5$ ($L/b=30,2$)

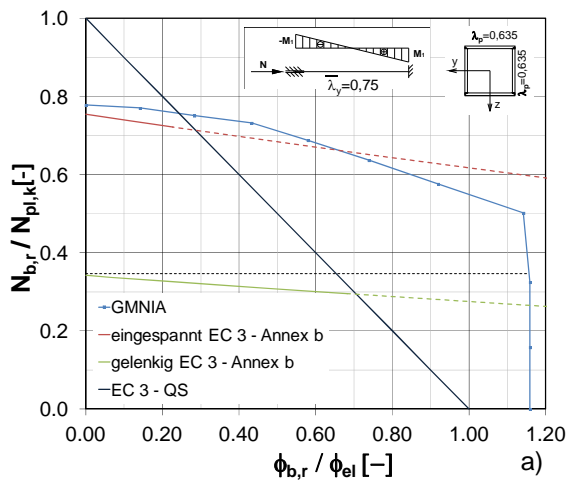


Bild 8-46: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=0,635$, a) globale Schlankheit: $\bar{\lambda}_y=0,75$ ($L/b=46,8$)

In Bild 8-45 bis Bild 8-46 sind die Ergebnisse der GMNIA-Analyse für Querschnittsklasse 3 mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=0,635$ dargestellt.

Die Traglasten der Berechnung nach Eurocode mit Interaktionskoeffizienten nach Annex B in EC 3 sind für GMNIA-Berechnungen, mit Ausnahme bei großen Druckbeanspruchungen für die globale bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_y=0,25$, eingehalten. Auch für Querschnittsklasse 3 zeigt sich für die globalen bezogenen Schlankheiten $\bar{\lambda}_y=0,50$ und $\bar{\lambda}_y=0,75$, dass bei zusätzlichen Rotationen der Stabenden die Tragfähigkeit

weiterhin sichergestellt ist. Die Berechnung der Gelenkfachwerktheorie ist nur dann das konservative Berechnungsverfahren, wenn sichergestellt wird, dass bestimmte zulässige Endrotationen der Druckstreben eingehalten werden.

Querschnittsklasse 4:

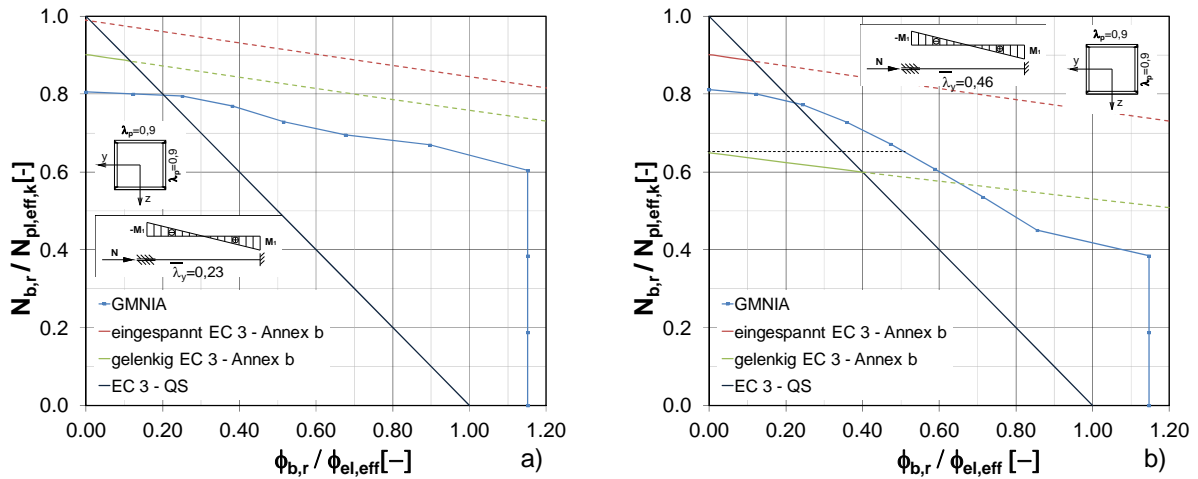


Bild 8-47: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p = 0,9$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,23$ ($L/b = 15,6$), b) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,46$ ($L/b = 30,2$)

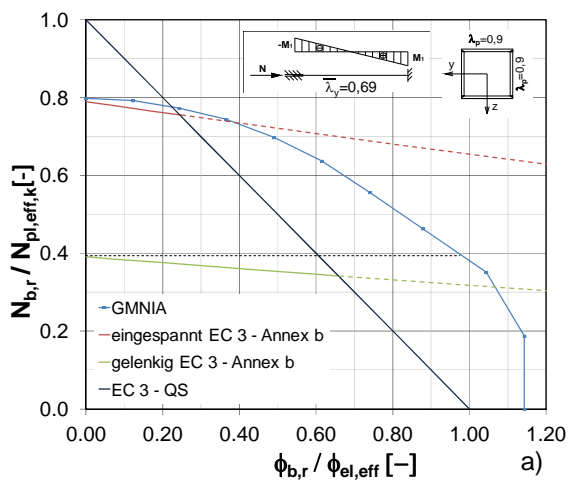


Bild 8-48: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p = 0,9$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,69$ ($L/b = 46,8$)

8. Tragverhalten eines Fachwerkträgers mit Querschnitten der Klasse 4

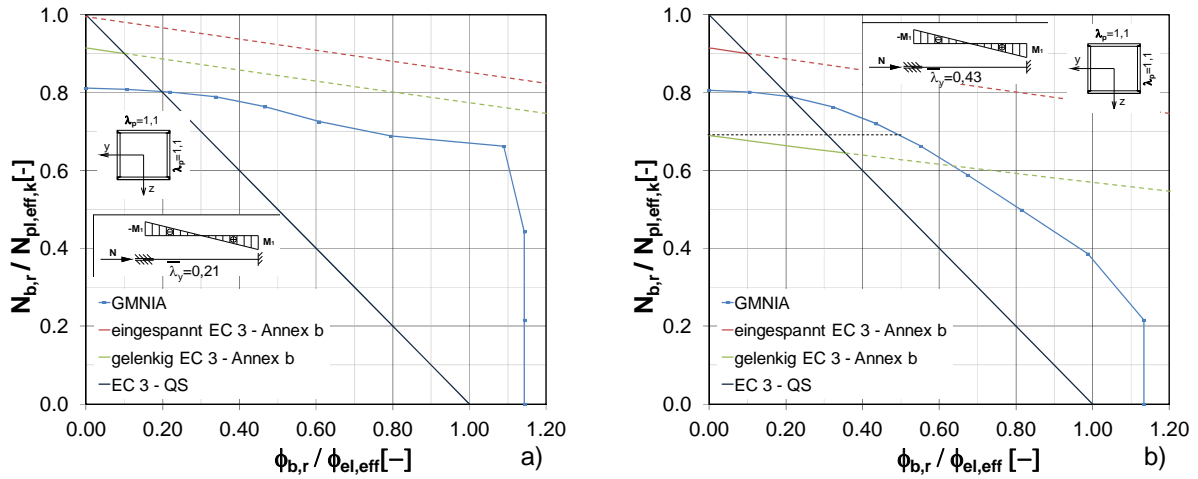


Bild 8-49: GMNIA - Berechnungen: $\bar{\lambda}_p = 1,1$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,21$ ($L/b = 15,6$), b) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,43$ ($L/b = 30,2$)

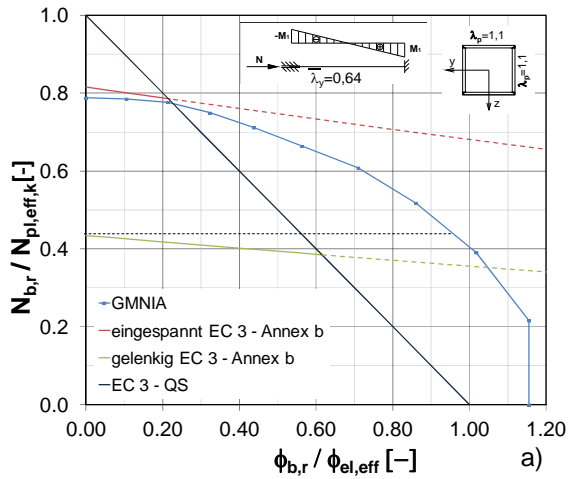


Bild 8-50: GMNIA - Berechnungen: $\bar{\lambda}_p = 1,1$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red} = 0,64$ ($L/b = 46,8$)

8. Tragverhalten eines Fachwerkträgers mit Querschnitten der Klasse 4

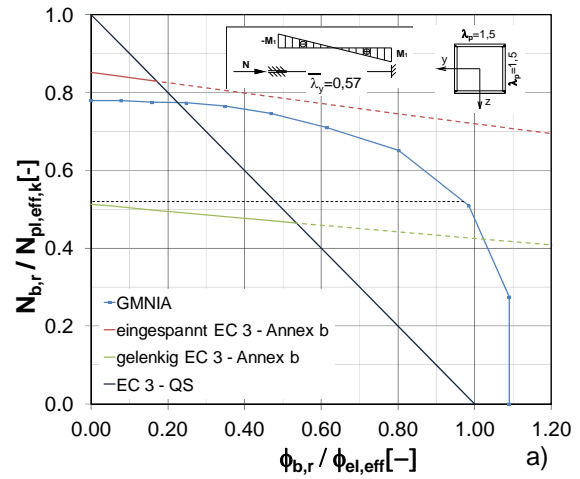
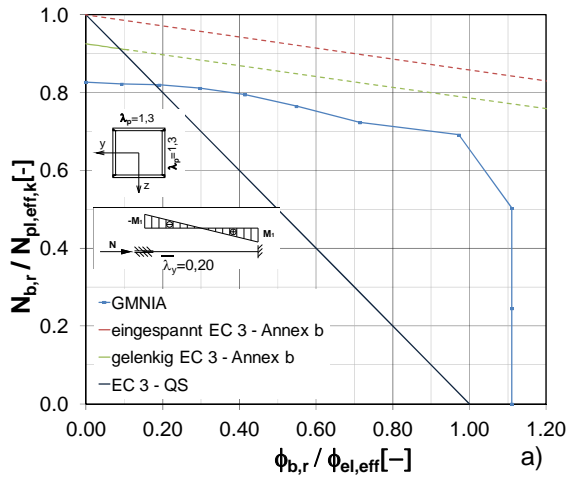


Bild 8-51: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=1,3$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red}=0,20$ ($L/b=15,6$), b) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red}=0,40$ ($L/b=30,2$)

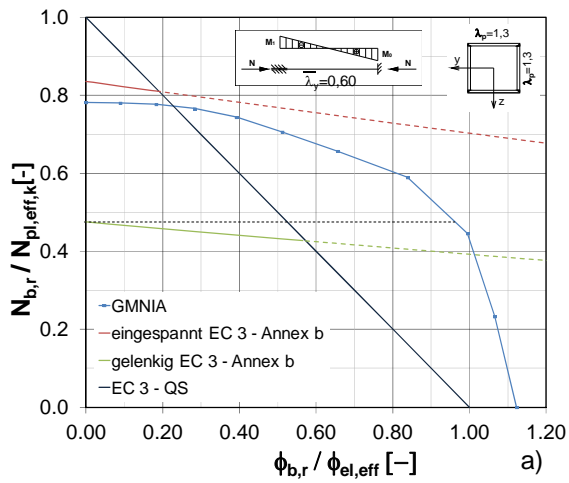


Bild 8-52: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=1,3$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red}=0,60$ ($L/b=46,8$)

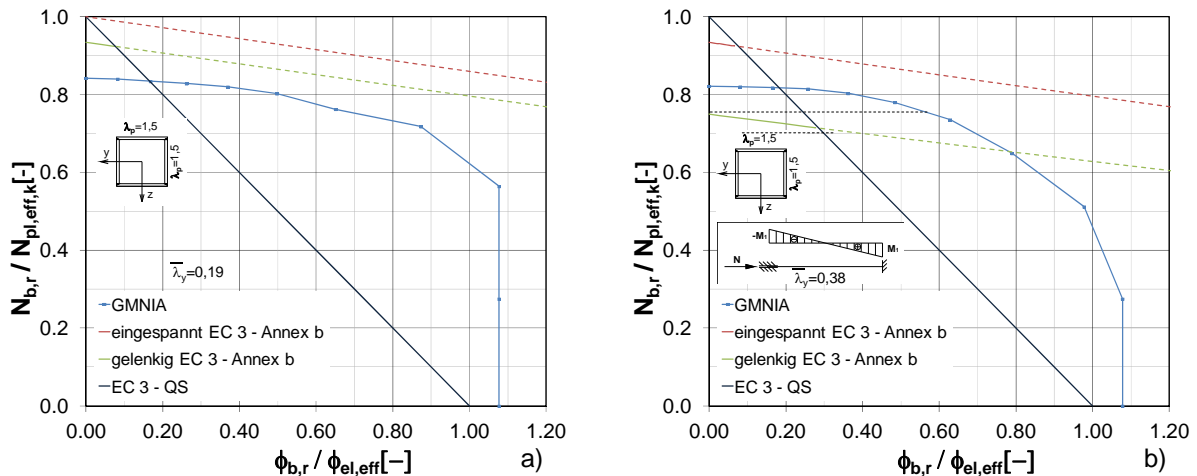


Bild 8-53: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=1,5$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red}=0,19$ ($L/b=15,6$), b) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red}=0,38$ ($L/b=30,2$)

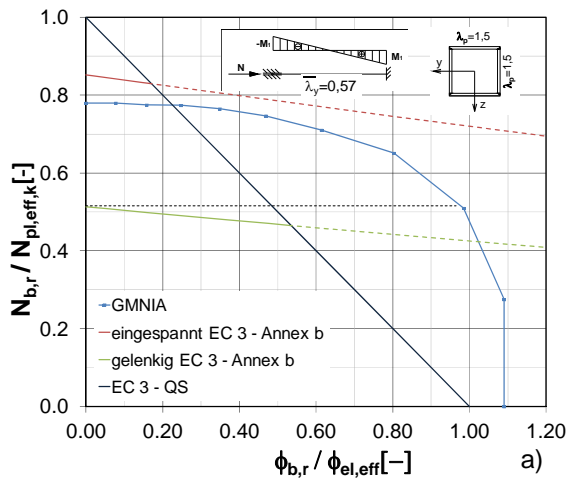


Bild 8-54: GMNIA – Berechnungen: $\bar{\lambda}_p=1,5$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\bar{\lambda}_{y,red}=0,57$ ($L/b=46,8$)

Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse für Querschnitte der Klasse 4 mit den untersuchten Plattenschlankheiten $\bar{\lambda}_p=0,9$, $\bar{\lambda}_p=1,1$, $\bar{\lambda}_p=1,3$ und $\bar{\lambda}_p=1,5$ sind in Bild 8-47 bis Bild 8-54 dargestellt.

Es ist daran zu erinnern, dass die Ermittlung der Traglasten in diesem Kapitel mit Berechnungsprozedur 2 durchgeführt wurden, die den unteren Grenzwert der Tragfähigkeit der geschweißten Hohlkastenquerschnitte repräsentiert. Besonders für dünnwandige Querschnitte wurden bereits in Kapitel 8.2 die niedriger Tragfähigkeiten gegenüber dem Eurocode (EC 3) gezeigt.

Für hohe Druckbeanspruchungen und gleichzeitig geringe Momentenbeanspruchungen werden die Traglasten nach Eurocode mit den Interaktionskoeffizienten nach Annex B in EC 3 nicht erreicht. Die vorgegebenen Verdrehungen $\phi_{b,r}$ der GMNIA-Analyse wurden höher als die Querschnittsverdrehungen $\phi_{el,eff}$ gewählt. Es liegen auch für höhere Verdrehungen $\phi_{b,r}$ Drucktragfähigkeiten vor, die jedoch hier nicht näher untersucht wurden. Dies ist wiederum auf den in Kapitel 8.4 näher beschriebenen Einfluss der angenommenen elastischen Spannungsverteilung über die effektiven Querschnittsflächen für Querschnitte der Klasse 4 zurückzuführen. Die tatsächliche Spannungsverteilung könnte mit teilplastischer Verteilung über den Querschnitt berücksichtigt werden.

Da es bei Belastung eines Fachwerkträgers aufgrund der Durchbiegung zu Verdrehungen der Stabachsen kommt, resultieren daraus Biegemomente M_y in den Stabenden der Druckstreben. Demzufolge tritt bei Druckstreben von Fachwerkträgern – ohne direkte Belastung – genau der Schnittkraftverlauf dieses Lastfalls mit durchschlagendem Momentenverlauf ($\psi=-1$) und zentrischer Druckkraft auf.

Über den Schnittpunkt der horizontalen strichlierten Linie mit den ermittelten Traglasten der GMNIA-Analyse ist besonders für größere globale bezogene Schlankheiten $\bar{\lambda}_{y,red}$ wiederum ersichtlich, dass bei Auftreten von zusätzlichen Endrotationen der Stäbe die Tragfähigkeit weiterhin gewährleistet ist. Allerdings ist eine Berechnung nach der Gelenkfachwerkstheorie auch bei Querschnittsklasse 4 nur dann richtig, wenn sichergestellt werden kann, dass gewisse Endrotationen der Druckstreben nicht überschritten werden. Zum Beispiel darf für einen Hohlkastenquerschnitt mit $\bar{\lambda}_p=0,9$ und globaler bezogener Schlankheit $\bar{\lambda}_{y,red}=0,46$ nur eine Rotation der Stabenden von ca $0,60 \cdot \phi_{el,eff}$ vorhanden sein.

8.4 Begründung der hohen Momententragfähigkeit für Querschnitte der Klasse 4

Wie bereits in Kapitel 3.2 beschrieben, ist für die Nachweisführung nach ÖNORM EN 1993-1-5 für Querschnitte der Klasse 4 das Verfahren der effektiven Breiten anzuwenden. Für diese Querschnitte erfolgt bei den druckbeanspruchten Querschnittsteilen ein Ausbeulen, wodurch der Gesamtquerschnitt für die Nachweisführung auf die wirksamen Querschnittflächen reduziert werden muss. Dabei wird von einer elastischen Spannungsverteilung über den Querschnitt ausgegangen. Wie jedoch bei der GMNIA-Analysen in den Kapiteln 8.2 und 8.3 und sowie auch schon in Kapitel 6 ersichtlich, besitzen Querschnitte der Klasse 4 bei reiner Biegebeanspruchung eine deutlich höhere Tragfähigkeit. Bei Betrachtung der graphischen Darstellung der Ergebnisse von durchgeführten GMNIA-Berechnungen mit der Methode der finiten Elemente im Vergleich zur Berechnung nach EC 3, kann man feststellen, dass primär die Annahme einer elastischen Spannungsverteilung zu konservativen Ergebnissen des Eurocodes führt. Dies deshalb, da auch bei Klasse-4 Querschnitten ein gewisses Plastizieren des wirksamen Querschnitts zu beobachten ist, das zu höherer Querschnittstragfähigkeit führt.

Ein Ansatz, um diese zusätzliche Tragfähigkeit, die aus den nicht voll ausgenutzten angrenzenden, nicht beulgefährdeten Querschnittsteilen herrührt, berücksichtigen zu können, wäre, auch bei der Methode der effektiven Breiten von der plastischen Querschnittstragfähigkeit des effektiven Querschnitts auszugehen.

Nachfolgend werden daher die Ergebnisse der effektiven elastischen Querschnittstragfähigkeit bei reiner Biegebeanspruchung unter Annahme der elastischen Spannungsverteilung nach Eurocode mit der ergänzenden Annahme einer plastischen Spannungsverteilung verglichen. Die detaillierten Berechnungen für die beiden vorausgesetzten Spannungsverteilungen sind in Annex C ersichtlich.

Als Beispiel wird ein quadratischer Hohlkastenquerschnitt mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=1,5$ gewählt. Während in Bild 8-55 a die Querschnittsabmessungen mit der Gesamthöhe und Gesamtbreite $b=h=570,56$ mm und einer vorhandenen Wandstärke von $t=8$ mm dargestellt sind, werden die, mittels der Methode der effektiven Breiten nach ÖNORM EN 1993-1-5, ermittelten wirksamen Querschnittsflächen in Bild 8-55 b abgebildet.

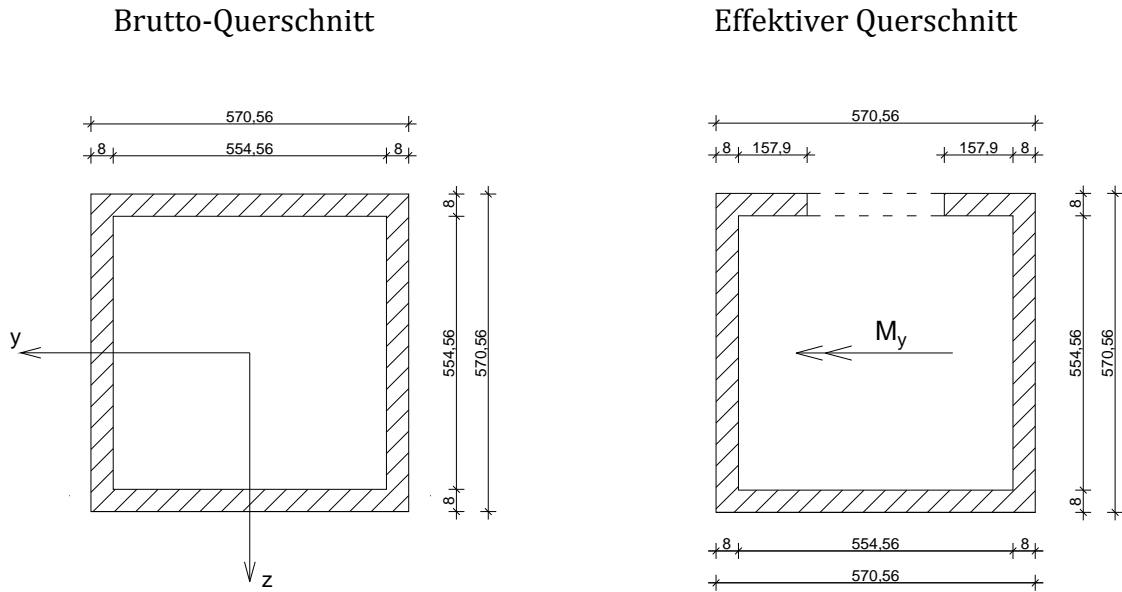


Bild 8-55: a) Brutto-Querschnitt für Hohlkastenprofil mit $\bar{\lambda}_p=1,5$, b) effektiver Querschnitt für reine Biegebeanspruchung M_y

Die beiden verglichenen Spannungsverteilungen für den effektiven Querschnitt nach Bild 8-55 b sind in Bild 8-56 a, elastische Spannungsverteilung, bzw. Bild 8-56 b, plastische Spannungsverteilung, dargestellt.

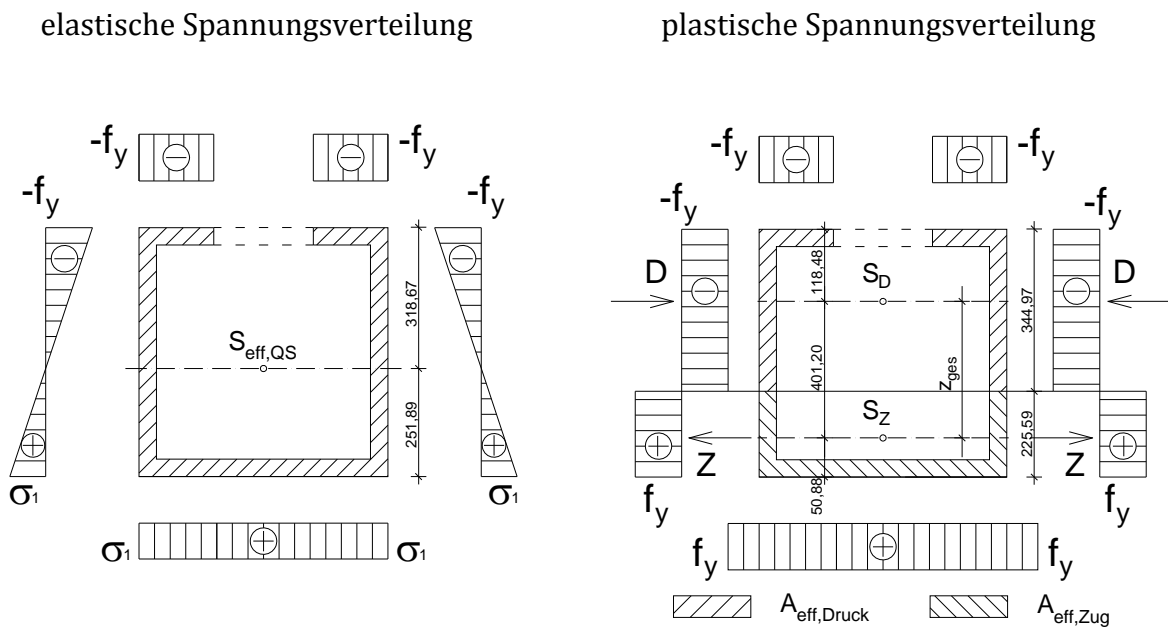


Bild 8-56: Spannungsverteilung aus M_y für wirksamen Querschnitt: a) elastische Spannungsverteilung, b) plastische Spannungsverteilung

Berechnung der elastischen Momententragfähigkeit des Bruttoquerschnittes - Referenzlösung:

Tabelle 8-4: Querschnittswerte – Bruttoquerschnitt mit elastischer Spannungsverteilung

$A = 18.002 \text{ mm}^2$	$J_y = 949.720.000 \text{ mm}^4$
$-W_{y,o} = W_{y,u} = J_y / z_{s,u} = 3.329.000 \text{ mm}^3$	$-z_{s,o} = z_{s,u} = 285,28 \text{ mm}$

In Formel (8.2) erfolgte die Berechnung elastischen Momententragfähigkeit durch Multiplikation des Widerstandsmoments $W_{y,u}$ mit der vorhandenen Streckgrenze f_y .

$$M_{el} = W_{y,u} \cdot f_y = 1.181.820.989 \text{ Nmm} = 1.181,2 \text{ kNm} \quad (8.1)$$

Berechnung der Momententragfähigkeit mit wirksamen Breiten nach ÖNORM EN 1993-1-5 mit elastischer Spannungsverteilung (Bild 8-56 a):

Tabelle 8-5: Querschnittswerte – wirksame Breiten mit elastischer Spannungsverteilung

$A_{eff} = 16.092 \text{ mm}^2$	$J_{y,eff} = 940.650.000 \text{ mm}^4$
$W_{y,o,eff} = J_{y,eff} / z_{s,o,eff} = -2.450.000 \text{ mm}^3$	$z_{s,o,eff} = -318,67 \text{ mm}$
$W_{y,u,eff} = J_{y,eff} / z_{s,u,eff} = 3.099.000 \text{ mm}^3$	$z_{s,u,eff} = 251,89 \text{ mm}$

In Formel (8.2) erfolgt die Berechnung der effektiven Querschnittstragfähigkeit durch Multiplikation des ungünstigsten Widerstandsmoments $W_{y,o,eff}$ mit der vorhandenen Streckgrenze f_y .

$$M_{el,eff} = W_{y,o,eff} \cdot f_y = 869.649.203 \text{ Nmm} = 869,6 \text{ kNm} \quad (8.2)$$

Berechnung der Momententragfähigkeit mit wirksamen Breiten mit plastischer Spannungsverteilung (Bild 8-56 b):

Tabelle 8-6: Querschnittswerte – wirksame Breiten mit plastischer Spannungsverteilung

Querschnitt unter Druck:	Querschnitt unter Zug:
$A_{eff,Druck} = 8.046 \text{ mm}^2$	$A_{eff,Zug} = 8.046 \text{ mm}^2$
$z_{s,Druck} = 118,48 \text{ mm}$ (von oberen Rand)	$z_{s,Zug} = 50,88 \text{ mm}$ (von unteren Rand)
$D = A_{eff,Druck} \cdot f_y = -2.856.304,9 \text{ N} = -2.856,3 \text{ kN}$	$Z = A_{eff,Zug} \cdot f_y = 2.856.304,9 \text{ N} = 2.856,3 \text{ kN}$

Um $M_{pl,eff}$ ermitteln zu können, erfolgt zuerst die Berechnung der Größe der Flächen unter Druck- bzw. Zugspannungen. Da keine Normalkraft vorliegt gilt: $A_{eff,Druck}=A_{eff,Zug}=A_{eff}/2$. Für die Spannungsresultierenden gilt: $D=Z=(A_{eff}/2) \cdot f_y$. Die Berechnung der Momententragfähigkeit wird durch Multiplikation der Spannungsresultierenden $D=Z$ mit deren Abstand z_{ges} (Schwerpunktsabstand der Flächen unter Zug- und Druckspannungen nach (Formel (8.3)) ermittelt. (siehe Formel (8.4))

$$z_{ges} = h_{Profil} - z_{s,Druck} - z_{s,Zug} = 401,20 \text{ mm} \quad (8.3)$$

$$M_{pl,eff} = f_y \cdot A_{eff,Druck} \cdot z_{ges} = 1.145.956.127 \text{ Nmm} = 1.146,0 \text{ kNm} \quad (8.4)$$

Verhältnis von $M_{pl,eff}$ zu $M_{el,eff}$:

$$\frac{M_{pl,eff}}{M_{el,eff}} = \frac{1.146,0 \text{ kNm}}{869,6 \text{ kNm}} = 1,318 \quad (8.5)$$

Somit würde sich bei reiner Biegebeanspruchung, ausgehend vom behandelten idealen Fall der vollplastischen Spannungsverteilung über die wirksame Querschnittsfläche, im Vergleich zur elastischen Tragfähigkeit, eine Erhöhung der Querschnittstragfähigkeit um den Faktor 1,318 ergeben.

Bei Vergleich des berechneten Faktors nach Formel (8.5) mit den ermittelten Traglasten der GMNIA-Analyse bei reiner Biegebeanspruchung mit Querschnitten der Klasse 4 in den Kapiteln 6 und 8 kann festgestellt werden, dass es bei Annahme einer vollplastischen Spannungsverteilung bzw. der plastischen Querschnittstragfähigkeit des effektiven Querschnitts zu einer Überschätzung der Tragfähigkeit kommt – tatsächlich wird also etwa ein Mittelwert aus den beiden ausgeführten Tragfähigkeiten erreicht. Daraus folgend könnte für Querschnitte der Klasse 4 von einer teilplastischen Spannungsverteilung über den Querschnitt -als realistische Spannungsverteilung- ausgegangen werden. Weitere Untersuchungen in dieser Richtung wären aber jedenfalls erstrebenswert.

**Berechnung der Tragfähigkeit mittels GMNIA-Analyse (Berechnungsprozedur 1)
nach Bild 6-1 a:**

Aus Bild 6-1 a ergibt sich für ein quadratisches Hohlkastenprofil mit Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p=1,5$ folgende Querschnittstragfähigkeit:

$$M_{b,r} = \chi_p \cdot M_{el} \approx 0,89 \cdot M_{el} = 0,89 \cdot 1.181,2 = 1.051,3 \text{ kNm} \quad (8.6)$$

$$\frac{M_{b,r}}{M_{el,eff}} = \frac{1.051,3 \text{ kNm}}{869,6 \text{ kNm}} = 1,209 \quad (8.7)$$

Bei reiner Biegebeanspruchung ergibt der Vergleich der ermittelten Tragfähigkeit durch eine GMNIA-Analyse mit der elastischen Tragfähigkeit der effektiven Querschnittsfläche eine Erhöhung um den Faktor 1,209. Somit ist für Querschnitte der Klasse 4 eine teilplastische Spannungsverteilung über den effektiven Querschnitt zu beobachten.

9. Tragverhalten eines Fachwerkträgers mit Querschnitten der Klasse 4 – Vergleich mit konventionellen Nachweisen

In diesem Kapitel erfolgt für einen sehr weitgespannten Fachwerkträger aus geschweißten Hohlkastenquerschnitten die Bemessung bzw. die Nachweise nach Eurocode mit Vorgehensweisen. Anhand einer GMINA-Traglastanalyse wird bestimmt, welcher dieser Ansätze am besten das tatsächliche Tragverhalten abbildet. Das Bild 9-1 zeigt den untersuchten Fachwerkträger mit einer Stützweite $L_{ges}=100m$ und einer Bauhöhe von $h=10m$, sowie die gewählten Bezeichnungen.

Wie bereits in den Kapiteln 1.1 und 8.4 beschrieben, stellt sich die Frage der Wahl der richtigen Randbedingungen bei der Bestimmung der Tragfähigkeit von druckbeanspruchten Füllstäben nach EC 3. Die einfachste Methode (Variante V1) stellt die Berechnung der Schnittkräfte mit der Gelenkfachwerkstheorie (Modellierung der Knoten als Vollgelenke) dar. Als Schnittkräfte ergeben sich bei alleiniger Belastung in den Fachwerkknoten ausschließlich Normalkräfte in den Fachwerksstäben, wobei für diese Vorgehensweise der Stabilitätsnachweis der Druckstreben unter alleiniger Normalkraft mit der Knicklänge für beidseits gelenkige Lagerung (Systemlänge L_i) geführt wird.

Um das tatsächliche Verhalten von Fachwerkträgern aus geschweißten Hohlkastenquerschnitten abzubilden, sollte jedoch von biegesteifen Knotenausbildungen ausgegangen werden. Dadurch kommt es aufgrund von Zwängungen zu Endrotationen der Streben und demzufolge zu Momentenbeanspruchungen der Stäbe. Für dieses Berechnungsmodell wird der Stabilitätsnachweis der maßgebenden Druckstrebe sowohl mit der Knicklänge eines beidseits gelenkig gelagerten Stabes (Variante 3) als auch mit der Knicklänge eines Stabes mit beidseitiger Einspannung (Variante 2) durchgeführt. In beiden Fällen liegen Beanspruchungen aus $N+M_y$ vor.

Zur Veranschaulichung der eben beschriebenen Möglichkeiten der Bestimmung der Tragfähigkeit eines druckbeanspruchten Füllstabes eines Fachwerkträgers (Variante 1-3), erfolgt die Anwendung für den Fachwerkträger nach Bild 9-1. Der maßgebende Stab für die Bestimmung der Tragfähigkeit dieses Fachwerkträgers ist der Druckpfosten 2 nahe dem Auflager. (rote Markierung)

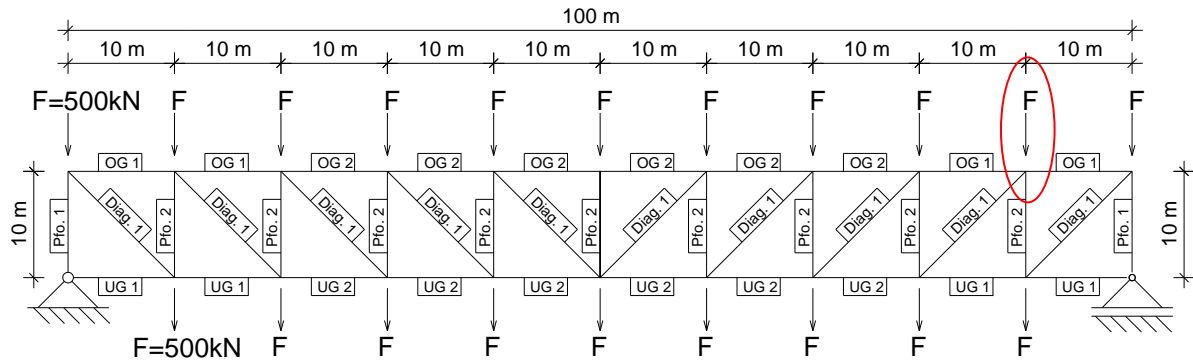


Bild 9-1: Beispiel Fachwerkträger – Übersicht Geometrie und Bezeichnung der Stäbe

Die einzelnen Stäbe des Fachwerkträgers aus geschweißten Hohlkastenquerschnitten haben folgende Dimensionen:

Tabelle 9-1: Beispiel Fachwerkträger – Dimensionen der Stäbe

OG1/UG1	OG2/UG2	Pfo. 1	Pfo. 2	Diag. 1
$h=b=600\text{mm}$	$h=b=600\text{mm}$	$h=b=460\text{mm}$	$h=b=460\text{mm}$	$h=b=300\text{mm}$
$t=20\text{mm}$	$t=40\text{mm}$	$t=20\text{mm}$	$t=10\text{mm}$	$t=25\text{mm}$

Vereinfachend weisen alle Diagonalstäbe denselben Querschnitt auf. Die gewählten statischen Modelle zur Ermittlung der Schnittkräfte sind in Bild 9-2 (Modellierung als Gelenkfachwerk) und Bild 9-3 (Modellierung mit biegesteifer Knotenausbildung) dargestellt. Die Einzellasten sind mit jeweils 500 kN angesetzt worden.

Anm.: Die Systemberechnung des Fachwerkträgers erfolgte linear elastisch mit den Druck- und Biegesteifigkeiten der Bruttoquerschnitte aller Einzelstäbe.

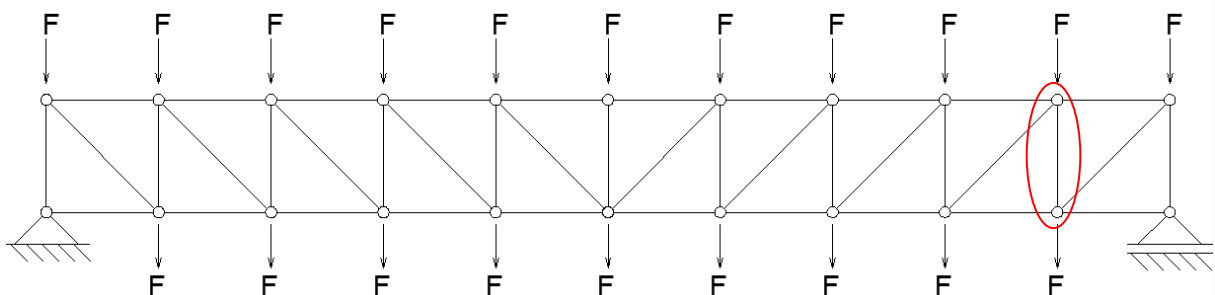


Bild 9-2: Beispiel Fachwerkträger – statische Modellierung als Gelenkfachwerk ($F=500\text{kN}$)

9. Tragverhalten eines Fachwerkträgers mit Querschnitten der Klasse 4

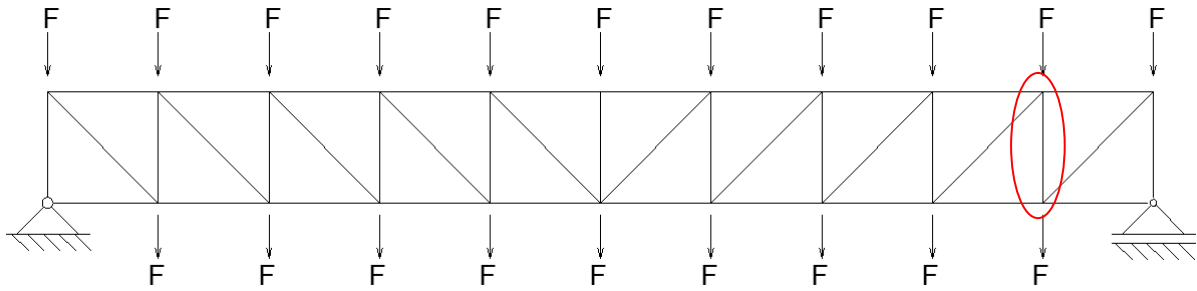


Bild 9-3 a: Beispiel Fachwerkträger – statische Modellierung mit biegesteifen Knotenausbildung sowie Schnittkrafteergebnisse ($F=500\text{ kN}$)

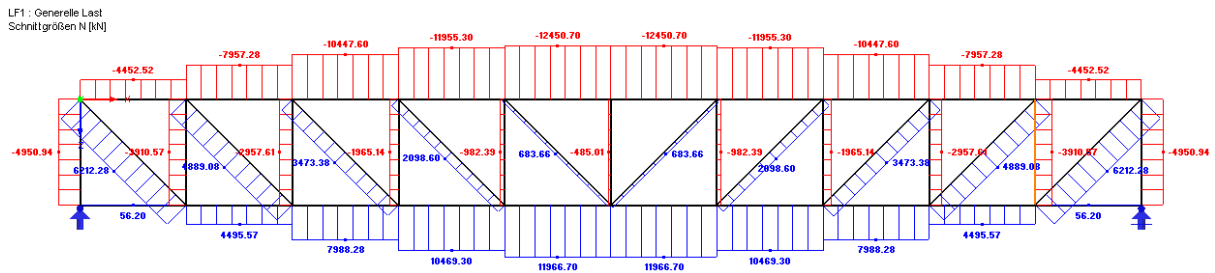


Bild 9-4 b: Schnittkrafteergebnisse N_i

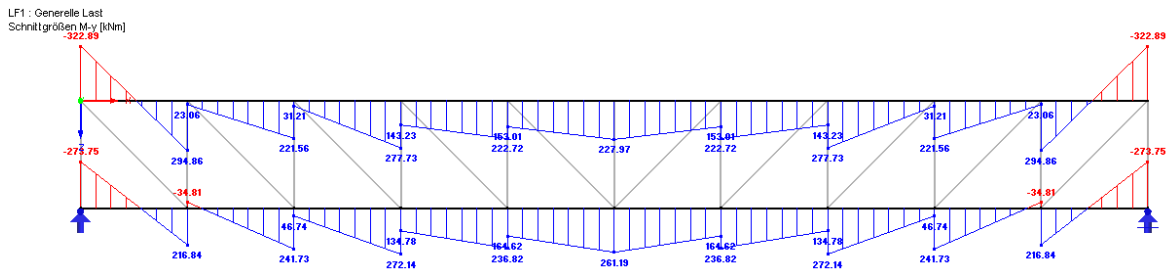


Bild 9-5 c: Schnittkrafteergebnisse $M_{y,i}$ - Gurte

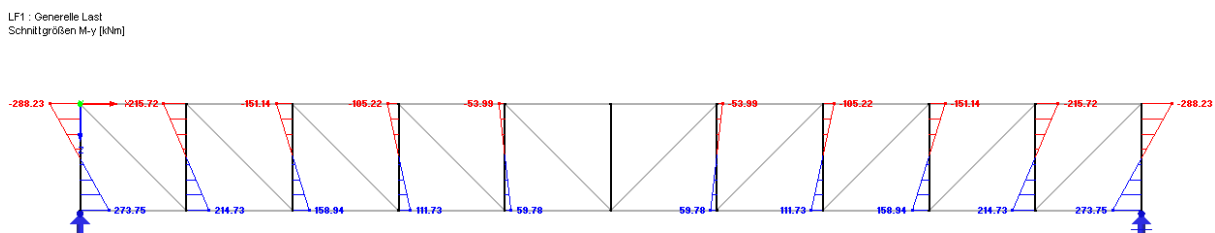
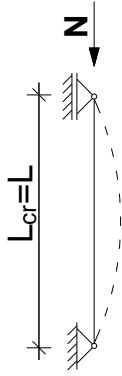
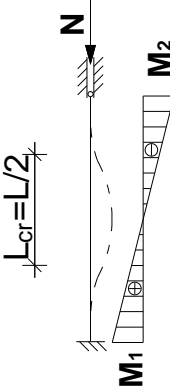
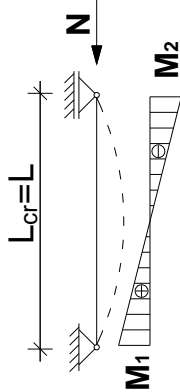


Bild 9-6 d: Schnittkrafteergebnisse $M_{y,i}$ - Pfosten

Mit den berechneten Schnittkräften der beiden Modellierungen des Fachwerkträgers, erfolgt nachfolgend die Bemessung der maßgebenden Druckstrebe des Fachwerkträgers

(Pfosten 2) mit den drei sich aufgrund von Schnittkräften und Knicklängen unterscheidenden Nachweisvarianten. (siehe Tabelle 9-2 , Variante 1-3)

Tabelle 9-2: Darstellung der drei untersuchten Vorgehensweisen beim Stabnachweis nach Eurocode

Variante 1	Variante 2	Variante 3
 <p>N alleine</p>		

Anm.: Die tatsächliche Knicklänge des Pfostens 2 beträgt: $L_{cr} = 0,57 \cdot L$, aus einer Eigenwertberechnung am Fachwerkträger mit biegesteifen Knoten

Tabelle 9-3: Geometrie und Material; effektive Querschnittswerte für Pfosten 2:

$L_i = 10 \text{ m}$	$E = 210.00 \text{ kN/mm}^2$
$A_{eff} = 146,26 \text{ cm}^2$ (N alleine)	$f_y = 35,5 \text{ kN/mm}^2$
$W_{y,eff} = 2.335,46 \text{ cm}^3$ (M_y alleine)	$\varepsilon = 0,814$
$I_{eff} = 56.299,16 \text{ cm}^4$	$\gamma_{M1} = 1,0$

Tabelle 9-4: Schnittkräfte (für $F=500 \text{ kN}$) und Knicklängen für Pfosten 2:

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
$N_{ed} =$	-4.000 kN	-3.911 kN	-3.911 kN
$M_{y,1,Ed} =$	-	214,73 kNm	214,73 kNm
$M_{y,2,Ed} =$	-	-215,72 kNm	-215,72 kNm
$\psi = M_{y,1,Ed} / M_{y,2,Ed}$	-	~ -1	~ -1
$L_{cr} =$	10 m	5 m	10 m

Mit den errechneten Querschnittswerten und Schnittkräften aus Tabelle 9-3 und Tabelle 9-4 ist für die drei untersuchten Vorgehensweisen folgender Nachweis zu führen: (vgl. Gleichung (3.16)). Bei Variante 1 entfällt der Momententerm.

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,2,Ed}}{M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,0$$

Tabelle 9-5: Stabilitätsnachweise – Normalkraftanteil:

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
$\bar{\lambda} =$ (Gleichung (3.13)) – KSPL b	0,579	0,289	0,579
$\phi =$ (Gleichung (3.10)) – KSPL b	0,732	0,557	0,732
$\chi =$ (Gleichung (3.11))	0,848	0,968	0,848
$N_{Rk} = A_{eff} \cdot f_y =$	5192 kN	5192 kN	5192 kN
$\eta_N = \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} =$	0,909	0,778	0,888

Tabelle 9-6: Stabilitätsnachweise – Momentenanteil:

$c_{my} =$ (Gleichung (3.22))	-	0,4	0,4
$k_{yy} =$ (Gleichung (3.20))	-	0,454	0,523
$M_{y,Rk} = W_{y,eff} \cdot f_y =$	-	829,1kNm	829,1kNm
$\eta_M = k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} =$	-	0,118	0,136

Tabelle 9-7: Stabilitätsnachweise - gesamt

$\eta = \eta_N + \eta_M = \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} =$	0,909	0,896	1,024
--	--------------	-------	--------------

Besonders für druckbeanspruchte Stäbe mit durchschlagendem Momentenverlauf ($\psi = -1$) – wie hier vorliegend- kann auch der Querschnittsnachweis an den Stabenden der maßgebende Nachweis zur Bestimmung der Tragfähigkeit sein.

$$\eta_{QN} = \frac{N_{Ed}}{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{W_{eff,y,min} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

Tabelle 9-8: Querschnittsnachweis :

$\eta_{QN} =$	0,770	1,013	1,013
	(nur N)	(N+M _y)	(N+M _y)

Der maßgebende Nachweis für jede der untersuchten Varianten ist in Tabelle 9-7 bzw. Tabelle 9-8 mit „fetten“ Zahlen geschrieben.

Nach Überprüfung der Tragfähigkeit der Druckstrebe mit den drei unterschiedlichen Bemessungsverfahren, erfolgt mittels einer GMNIA-Traglastberechnung die Ermittlung der tatsächlichen Tragfähigkeit des Fachwerkträgers. Die GMNIA-Analyse wird mit Berechnungsprozedur 1 (siehe Kapitel 4) durchgeführt.

Die vorhandenen Spannungen (Vergleichsspannungen) am oberen Stabende sind bei Erreichen der rechnerischen Traglast in Bild 9-7 graphisch dargestellt. Man erkennt die nahezu vollständige plastische Ausnutzung des Querschnitts am Stabende.

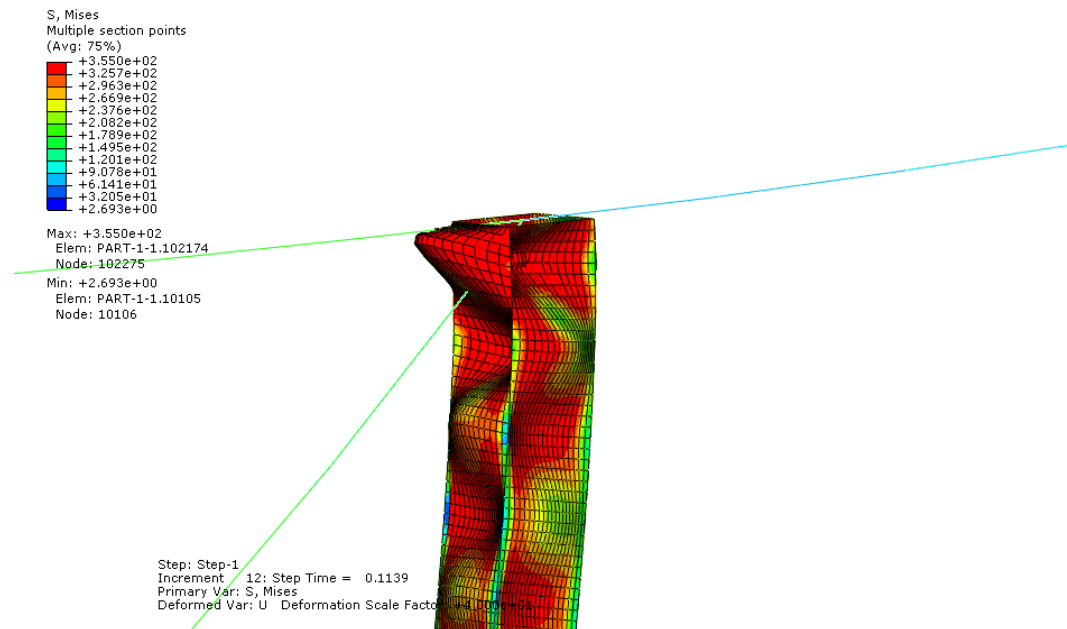


Bild 9-7: Beispiel Fachwerkträger – GMNIA-Berechnung; Normalspannungsverteilung bei der Traglast

Aus der Ermittlung der tatsächlichen Tragfähigkeit mit der GMNIA-Berechnung erhält man bezogen auf die Referenzlast nach Bild 9-3 a mit $F=500\text{kN}$ für den Fachwerkträger einen Traglastfaktor von $\nu=1,14$. Dabei limitiert der Pfostenstab 2 die Tragfähigkeit und ist an dessen Stabenden vollständig ausgenutzt. ($\eta_{QN}=1,0$)

Für den direkten Vergleich mit den Ergebnissen der untersuchten Nachweisvarianten lässt sich aus der GMNIA-Analyse ein Ausnutzungsgrad $\eta_{GMNIA}=1/\nu=1/1,14=0,877$ ableiten.

Bei Vergleich mit den drei berechneten Bemessungsverfahren (Variante 1, Variante 2 und Variante 3) ist festzustellen, dass alle Verfahren in diesem Fall konservative Ergebnisse für die Bemessung der Druckstrebe des Fachwerkträgers liefern. Für dieses Beispiel wird auf Grundlage der Gelenkfachwerkstheorie und daraus folgender Knicklänge mit gelenkigen Stabenden eine relativ gute Annäherung an die tatsächliche Tragfähigkeit erreicht.

Zusammenfassend folgt aus diesen Berechnungen, dass eine Bemessung der druckbeanspruchten Streben eines Fachwerkträgers mit Variante 3 – inklusive Zwängungsmomenten und Knicklänge beidseits gelenkigen gelagerten Stabes - generell zu sehr konservativen Ergebnissen führt.

10. Zusammenfassung, Schlussfolgerung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde das Gesamtstabilitätsverhalten von geschweißten Hohlkastenquerschnitten auf Druck- und Biegebeanspruchung untersucht. Traglastberechnungen erfolgten mit Querschnitten der Klassen 1-4, wobei besonderes Interesse an den Profilen der Querschnittsklasse 4 und der hier auftretenden Interaktion der globalen und lokalen Stabilitätsfälle (Biegeknicken und Plattenbeulen) bestand. Die ermittelten Traglasten der einzelnen Untersuchungen wurden jeweils mit den zulässigen Traglasten nach EC 3 verglichen.

Diese Untersuchungen wurden auch aufgrund der Fragestellung der richtigen Wahl der statischen Modellierung eines Fachwerkträgers (für den ULS-Zustand) aus geschweißten Hohlkastenprofilen durchgeführt. Besonders bei Fachwerkträgern mit hohen Gurtquerschnitten und schlanken Streben ergeben sich für die Druckstreben, je nach Modellierung der Knoten mit Vollgelenken bzw. biegesteifen Verbindung, unterschiedliche Schnittkräfte und Knicklängen. Für den Stabilitätsnachweis der Streben nach Eurocode wurden durch Vergleich mit der tatsächlichen Tragfähigkeit, ermittelt über eine GMNIA-Traglastanalyse, drei verschiedene Möglichkeiten der Vorgangsweise überprüft.

Um einen besseren Überblick über die Aufgabenstellung, Durchführung der numerischen Traglastberechnungen und Ergebnisse dieser Arbeit zu erhalten, wurde folgende Gleichung gewählt:

Die Arbeit beginnt in **Kapitel 1** mit der Einführung in das untersuchte Thema. Zusätzlich wurde ein Überblick über die bereits durchgeführten Untersuchungen zu diesem Thema sowie Erläuterungen zu den auftretenden Stabilitätsproblemen im Stahlbau angeführt.

In **Kapitel 2** folgte anschließend die Auflistung der Zielsetzung dieser Arbeit, der Durchführung von Traglastenanalysen und der anschließenden Gegenüberstellung mit der Nachweisführung nach Eurocode EC3.

Das **Kapitel 3** gibt eine übersichtliche Darstellung der Nachweisführung nach ÖNORM EN 1993-1-1 und ÖNORM EN 1993-1-5 für die in dieser Arbeit untersuchten Einzelstäbe mit geschweißten Hohlkastenquerschnitten unter Druck- und Biegebeanspruchung. Hierbei muss vor Beginn der eigentlichen Nachweisführung eine Klassifizierung der Querschnitte hinsichtlich ihrer Beulgefährdung erfolgen. Die Zuordnung des

Gesamtquerschnittes in eine der vier Querschnittsklassen (1-4) ist abhängig von Materialgüte, vorhandenem Spannungsverlauf, den Auflagerungsbedingungen und der Geometrie der einzelnen Querschnittsteile.

Je nach Beanspruchungsart werden für die Ermittlung der Tragfähigkeit der jeweiligen Querschnittsklassen unterschiedliche Berechnungsformeln angegeben. Während bei reiner Druckbeanspruchung für Querschnittsklasse 1 bis 3 von einer vollplastischen Spannungsverteilung ausgegangen wird, muss für Querschnitte der Klasse 4 eine Reduzierung der Querschnittsfläche, aufgrund des lokalen Ausbeulens von Querschnittsteilen, vorgenommen werden. Für eine Kombination aus Druck- und Biegebeanspruchung sind für die Querschnittsklassen 1-2, Querschnittsklasse 3 sowie Querschnittsklasse 4, jeweils unterschiedliche Bemessungsformeln angegeben. (Annahme der Spannungsverteilungen über den Querschnitt plastisch, elastisch sowie elastisch am reduzierten Querschnitt)

Zum Abschluss von TEIL I, der die Kapitel 1 bis 4 enthält, erfolgten in **Kapitel 4** Erläuterungen zur Berechnungsmethode der Finiten Elemente sowie zur Durchführung der Traglastberechnungen mit dem Software-Paket ABAQUS. Es erfolgten Angaben zur Modellierung der Einzelstäbe, zur Berücksichtigung der Randbedingungen, zur Elementwahl und Elementanzahl, zu geometrischen und strukturellen Imperfektionen sowie hinsichtlich verwendeter Materialgüten und Materialgesetze.

Durch Berücksichtigung von strukturellen Imperfektionen (Eigenspannungen) in den numerischen Traglastberechnungen wird den Elementen bereits vor Beginn der Belastung ein Spannungszustand zugewiesen. Bei beulgefährdeten Querschnitten erfolgt für schlanke Querschnittsteile unter Druckbeanspruchung ein Ausbeulen senkrecht zur Blechebene. Je nach Höhe der aufgetragenen äußeren Last im Vergleich zu den Eigenspannungen, hat diese Berücksichtigung bei Berechnungen mit ABAQUS einen unterschiedlichen Einfluss auf die erreichte Tragfähigkeit.

Dieser Effekt hat, je nach Höhe der aufgetragenen äußeren Referenzlast, einen unterschiedlichen Einfluss auf die erreichte Tragfähigkeit. Da bei beulgefährdeten Querschnittsteilen (Querschnittsklasse 4) ein Ausweichen senkrecht zur Querschnittsebene erfolgt, werden durch diese Verformungen Abtriebskräfte generiert. Je höher die äußere Referenzlast im Vergleich zu den Eigenspannungen ist, desto mehr wird rechnerisch der Einfluss der Abtriebswirkungen aus den Eigenspannungen unterdrückt.

Es stellt sich die Frage, ob die zusätzlich entstehenden Verformungen durch die Abtriebswirkung der Eigenspannungen in der Berechnung berücksichtigt werden muss oder ob dieser Effekt schon über die berücksichtigte lokale geometrische Imperfektion erfasst ist.

Da diese Fragestellungen im Eurocode, in den zugehörigen Hintergrundberichten und in der Literatur nicht geklärt ist, wurde in dieser Arbeit ein oberer Grenzwert der Tragfähigkeit (Berechnungsprozedur 1) -ohne Berücksichtigung der Abtriebswirkung aus den Eigenspannungen- sowie ein unterer Grenzwert der Tragfähigkeit mit deren Berücksichtigung (Berechnungsprozedur 2) ermittelt.

In Teil II der Arbeit wurden die durchgeführten numerischen Traglastberechnungen behandelt und die Ergebnisse dargestellt und verglichen.

Die in **Kapitel 6** ermittelten Tragfähigkeiten unter zentrischer Normalkraft an sehr gedungenen Stäben mit geschweißten Hohlkastenprofilen wurden mit Hinblick auf die Bestimmung der lokalen geometrischen Imperfektionsamplitude für die Traglastberechnungen zur Ermittlung des Gesamtstabilitätsverhaltens durchgeführt. (hier liegt keine Knickgefährdung vor)

Die Bestimmung der zutreffenden lokalen geometrischen Imperfektionsamplitude für die Berechnungsprozedur 1 erfolgte über Anpassung der errechneten Traglasten an die „Winter-Kurve“, die dem EC 3 für plattenartige Bauteile bei konstanter Druckbeanspruchung am Querschnittsteil als Nachweisformel zu Grunde liegt. Dazu erfolgten Traglastberechnungen unter Berücksichtigung verschiedener Imperfektionsamplituden, wobei unter reiner Druckbeanspruchung mit einer Imperfektionsamplitude von $e_0=b/400$ für lokale bezogene Schlankheiten $\bar{\lambda}_p \leq 1,5$ eine gute Annäherung an die „Winter-Kurve“ erreicht wird. Bei reiner Biegebeanspruchung und Querschnittsklasse 4 werden mitunter Tragfähigkeiten erreicht, die weit über den konservativen Tragfähigkeiten nach EC 3 liegen.

Das Vergleichen der Traglasten nach EC 3 mit den ermittelten Traglasten der Berechnungsprozedur 2 aufgrund reiner Druckbeanspruchung ergibt, dass bei Berücksichtigung der lokalen geometrischen Imperfektionen von $e_0=b/156$ (80% der Fertigungstoleranz) die Traglasten des Eurocodes deutlich nicht erreicht werden.

Ziel dieser Arbeit war Traglastberechnungen mit Hohlkastenquerschnitten aller Klassen durchzuführen. Die Festlegung der untersuchten Querschnittsabmessungen, sowohl von rechteckigen als auch von quadratischen Hohlkastenquerschnitten –angepasst an die Grenzwerte der Querschnittsklassifizierung- erfolgte in **Kapitel 5**. In diesem Kapitel wurden auch sinnvolle Stablängen für die GMNIA-Analysen von beidseitig eingespannten Stäben auf Druck- und Biegebeanspruchung bestimmt. Im Zuge dieser Festlegungen wurden folgende geometrische Abhängigkeiten für geschweißte Hohlkastenquerschnitte erkannt:

- globale bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_y$ ist -bei vorausgesetzter konstanter Wanddicke t- abhängig von: L_{cr}/b
- lokale bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_p$ ist abhängig von: b/t des maßgebenden Querschnittsteiles

Die Ergebnisse der untersuchten Traglastanalysen an Einzelstäben unter reiner Druckbeanspruchung, die als Grundlage für die Traglastanalysen auf Druck- und Biegebeanspruchung in Kapitel 7 dienen, sind in **Kapitel 6** dargestellt. Sie sind für alle Berechnungen mit den Traglasten nach EC 3 verglichen worden. Als Berechnungsprozedur wurde hier nur Berechnungsprozedur 1 verwendet. Es erfolgten Traglastberechnungen an Einzelstäben mit quadratischen Hohlkastenprofilen und beidseitig gelenkiger Lagerung. Dabei wurden unterschiedliche Materialgüten, und verschiedene Materialmodelle (mit Berücksichtigung als auch ohne Berücksichtigung von linearer Wiederverfestigung nach Erreichen der Streckgrenze) verwendet sowie anschließend deren Ergebnisse einander gegenübergestellt. Außer für kleine globale bezogene Schlankheiten $\bar{\lambda}_y$ für die eine minimale Erhöhung der Tragfähigkeit festzustellen ist, ergibt die Berücksichtigung von linearer Wiederverfestigung für Einzelstäbe mit konstanter Druckbeanspruchung keine Erhöhung der ermittelten Tragfähigkeit. Überdies zeigten die Traglastanalysen, dass für Hohlkastenprofile der Klasse 4 lokale geometrische Imperfektionen für die Bestimmung der Tragfähigkeit mittels numerischer Berechnungsmethoden angesetzt werden müssen, im Gegensatz zu Querschnittsklasse 1.

Während bei Vergleich der Tragfähigkeiten für verschiedene Materialfestigkeiten im Falle von Querschnitten der Klasse 1 kaum Unterschiede festgestellt werden können, zeigen sich für Querschnittsklasse 4 mit Baustahl S460 etwas erhöhte Tragfähigkeiten.

Weiters erfolgten auch Traglastberechnungen an Einzelstäben mit beidseitiger Einspannung, unter Berücksichtigung von unterschiedlichen globalen geometrischen Imperfektionsformen, und anschließender Gegenüberstellung mit den erreichten Tragfähigkeiten von beidseitig gelenkig gelagerten Einzelstäben. Während für Querschnittsklasse 1 fast idente Tragfähigkeiten erreicht werden, ist für Hohlkastenquerschnitte der Klasse 4 festzustellen, dass für beidseitig eingespannte Einzelstäbe durch den Ansatz einer alternativen parabelförmigen globalen Imperfektion -im Gegensatz zum Verlauf der 1. Eigenform- keine ungünstigen Effekte auf die Tragfähigkeit des Einzelstabes resultieren.

Neben quadratischen Hohlkastenprofilen wurden auch Einzelstäbe mit rechteckigen Hohlkastenprofilen unter reiner Druckbeanspruchung untersucht. Traglastanalysen

wurden bezüglich Biegeknicken um die starke Achse (y-Achse) sowie um die schwache Achse (z-Achse) durchgeführt. Auch hier zeigen sich für Hohlkastenquerschnitte der Klasse 1 ähnliche Tragfähigkeiten –unabhängig ob quadratisch oder rechteckförmig. Hingegen sind für beulgefährdete Hohlkastenquerschnitte der Klasse 4 für kleine globale Schlankheiten $\bar{\lambda}_y$ höhere Traglasten für rechteckige Hohlkastenquerschnitte, besonders bei Biegung um die starke Achse, zu beobachten.

Für alle Traglastuntersuchungen an Einzelstäben mit reiner Druckbeanspruchung kann festgestellt werden, dass, außer für kleine globale Schlankheiten $\bar{\lambda}_y$, die ermittelten Traglasten ziemlich ident sind mit den Traglasten des Eurocodes (EC 3) auf Basis der Knickspannungslinie a sind. Damit liegen höhere Traglasten vor als die aktuellen Werte auf Basis der anzusetzenden Knickspannungslinie b.

Nach den GMNIA-Berechnungen von Einzelstäben mit reiner Druckbeanspruchung, erfolgten in **Kapitel 8** Traglastberechnungen unter Druck- und Biegebeanspruchung M_y . Es wurden Traglastberechnungen mit ausschließlich quadratischen Hohlkastenprofilen der Querschnittsklassen 2-4 und jeweils unterschiedlichen Lagerungsbedingungen, beidseitig gelenkig bzw. beidseitig eingespannt gelagert, analysiert. Hierbei wurde zwischen drei verschiedenen Lastfällen unterschieden, die sich durch verschiedene Momentenverläufe unterscheiden, in Ergänzung zur zentrisch wirkenden Druckkraft. Auch für diese Beanspruchungsart erfolgte der Vergleich der ermittelten Tragfähigkeiten mit den Werten des Eurocodes auf Basis der Knickspannungslinie b.

Für die Einzelstäbe mit beidseitig gelenkigen Lagern erfolgte die GMNIA-Berechnungen mit den beiden Berechnungsverfahren 1 bzw. 2. Es konnte festgestellt werden, dass der Unterschied zwischen den ermittelten Traglasten der beiden Berechnungsverfahren umso höher ist, je größer die Plattenschlankheiten $\bar{\lambda}_p$ der Querschnittsteile des betrachteten Hohlkastenquerschnittes sind. Während mit Berechnungsverfahren 1 die Traglasten auf Basis der Knickspannungslinie b eingehalten und teilweise übertroffen werden, erreichen die Traglasten mit Berechnungsverfahren 2, besonders für kleine globale Schlankheiten $\bar{\lambda}_y$, die Werte auf Basis der Knickspannungslinie b nicht.

Auffallend, vor allem für Querschnittsklasse 3 und 4, sind die hohen Tragfähigkeiten der Einzelstäbe mit beidseitig gelenkigen Lagern unter reiner Biegebeanspruchung im Vergleich zu den ermittelten Querschnittstragfähigkeiten nach EC 3. Grund hierfür ist der konservative Ansatz einer elastischen Spannungsverteilung und der daraus abgeleiteten elastischen Querschnittstragfähigkeit $M_{y,el}$ für Querschnitte der Klassen 3 und 4 nach EC 3. Zur Veranschaulichung erfolgte in diesem Kapitel ein Vergleich der ermittelten Querschnittstragfähigkeiten für einen geschweißten sehr schlanken

Hohlkastenquerschnitt mit $\bar{\lambda}_p=1,5$. Das Ergebnis zeigt, dass eine teilplastische Spannungsverteilung für diese Querschnittsklassen der tatsächlichen Verteilung entsprechen könnte.

Die Traglastberechnungen an Einzelstäben mit beidseitiger Einspannung wurden nur mit Berechnungsprozedur 2, als unterer Grenzwert der Tragfähigkeit, mit den bereits angeführten unterschiedlichen Lastfällen zum Biegemomentenverlauf durchgeführt. Durch die Endeinspannung ist es nicht möglich die gewünschten Momentenverläufe über das Anbringen von Randmomenten an den Stabenden zu erzeugen. Dementsprechend erfolgten die Traglastanalysen durch Aufbringen einer festgelegten Verdrehung der Stabenden und gleichzeitiger Druckbeanspruchung über eine zentrisch angreifende Druckkraft.

Außer für hohe Druckkraft- und kleine Biegebeanspruchungen werden die Traglasten des Eurocodes eingehalten und teilweise sogar, besonders bei hohen Biegebeanspruchungen, deutlich übertroffen.

Durch das zusätzliche Einzeichnen der Traglast auf Basis des Eurocodes für denselben Stab mit beidseitig gelenkiger Lagerung und alleiniger Normalkraftbeanspruchung in den Interaktionsdiagrammen ist vor allem für Einzelstäbe mit größerer globaler Schlankheit $\bar{\lambda}$ das große Momentenpotential (Verdrehungspotential) bei Ausbildung beidseitiger Einspannungen ersichtlich.

Zum Abschluss der numerischen Traglastuntersuchungen erfolgte in **Kapitel 9**, anhand eines weitgespannten Fachwerkträgers aus geschweißten Hohlkastenprofilen mit Diagonalen der Querschnittsklasse 4, die Bestimmung der realen Tragfähigkeit sowie verschiedener Nachweisformate der Druckstreben nach Eurocode. Für die Ermittlung der Schnittkräfte wurde als statisches System sowohl eine gelenkige Ausbildung der Knoten als auch eine biegesteife Ausbildung der Knoten gewählt. Die Bemessung der Tragfähigkeit der Druckstreben nach Eurocode erfolgte neben der Berücksichtigung der Randmomente und gleichzeitiger Wahl der Knicklänge eines gelenkig gelagerten Stabes (Variante 3) bzw. eines Stabes mit beidseitiger Einspannung (Variante 3), auch mit gelenkiger Lagerung mit den Schnittkräften des Gelenkfachwerks (Variante 1). Anschließend erfolgte die Bestimmung der Tragfähigkeit des Fachwerkträgers mit einer GMNIA-Analyse und anschließendem Vergleich mit den drei Bemessungsvarianten nach Eurocode.

Es konnte festgestellt werden, dass für die Bemessung der Druckstreben des untersuchten Fachwerkträgers auch ein Nachweis nach Variante 1, unter N alleine, ausreichen würde.

10.2 Schlussfolgerung und Ausblick

Der Vergleich der tatsächlichen Tragfähigkeiten von Druckstreben eines Fachwerkträgers, ermittelt durch eine GMNIA-Analyse, mit drei unterschiedlichen Bemessungsvarianten für Druckstreben nach Eurocode zeigt, dass die Bemessung in diesem Fall nach EC 3 für alle Bemessungsvarianten konservative Ergebnisse liefert.

Zu Fachwerkträgern ähnlicher Ausführung kann gesagt werden, dass eine Ermittlung der Schnittkräfte nach der Gelenkfachwerktheorie und anschließender Bemessung der Druckstreben mit dem Stabilitätsnachweis unter zentrischer Druckbeanspruchung und der Knicklänge für beidseits gelenkige Lagerung eine relativ gute Annäherung an die tatsächliche Tragfähigkeit der Druckstreben erreicht wird.

Diese Empfehlung kann jedoch nur aufgrund des einen durchgeführten Beispiels in Kapitel 9 für die Bemessung der Druckstreben erfolgen. In weiteren Berechnungen sollte überprüft werden, ob diese Empfehlung auch auf die Bemessung von Füllstäben anderer Fachwerkgeometrien bzw. ganz besonders auf die Bemessung der Gurte übertragen werden kann.

Die Annäherung an die tatsächlichen Traglasten von Einzelstäben mit geschweißten Hohlkastenquerschnitten auf Druck- und Biegebeanspruchung erfolgte in dieser Arbeit schrittweise. Grund hierfür war die Bestimmung des Einflusses der einzelnen Parameter, wie zum Beispiel alleinige Druckbeanspruchung, auf das Gesamtstabilitätsverhalten.

Schon bei Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit an sehr gedrunenen Stäben mit alleiniger lokaler Beulgefährdung ist ersichtlich, dass bei reiner Biegebeanspruchung für geschweißte Hohlkastenquerschnitte der Klasse 3 und 4 deutlich höhere Tragfähigkeiten erreicht werden als auf Basis der Querschnittstragfähigkeit nach Eurocode. Auch für druckbeanspruchte Einzelstäbe mit geschweißten Hohlkastenprofilen sind mit den Bemessungsformeln nach EC 3, im Vergleich zu den ermittelten GMNIA-Traglastenanalysen, fast ausschließlich konservative Ergebnisse zu beobachten.

Aufgrund all dieser Einflüsse sind die konservativen Ergebnisse der Berechnung nach Eurocode (EC 3) für den Grenzzustand der Tragfähigkeit bei Druckstreben eines Fachwerkträgers, an dem neben zentrischer Druckbeanspruchung auch zusätzliche Biegebeanspruchungen durch zusätzliche Endrotation der Stäbe auftreten, zu erklären.

Nach den Ermittlungen der Traglasten unter Druck- und Biegebeanspruchungen mit quadratischen Hohlkastenprofilen, stellt sich die Frage, ob die getätigten Aussagen auch auf geschweißte Hohlkastenprofile mit rechteckigem Grundriss bzw. mit nur einfachsymmetrischen Querschnitt übertragen werden können.

Darüber hinaus ist nach Durchführung ausreichender Untersuchungen für Einzelstäbe mit geschweißten Hohlkastenquerschnitten mit unversteiften Querschnittsblechen, das Gesamtstabilitätsverhalten von Einzelstäben mit geschweißten, *längs ausgesteiften* Hohlkastenquerschnitten auf Druck- bzw. auf Druck- und Biegebeanspruchungen zu untersuchen, da hier unter Umständen eine Kopplung zwischen globalen, lokalen, und „global-lokalen“ Versagensmodi (Knicken, Plattenbeulen und „Steifenknicken“) auftreten kann.

Literaturverzeichnis:

- [1] ÖNORM EN 1993-1-1: Eurocode 3. Bemessung und Kontruktion von Stahlbauten. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, 2006.
- [2] ÖNORM EN 1993-1-5: Eurocode 3. Bemessung und Kontruktion von Stahlbauten. Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile, 2007.
- [3] ÖNORM EN 1090-2: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken. Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken, 2008.
- [4] ABAQUS, v. 6.9, Dassault Systems/Simulia, Providence, RI, USA 2009.
- [5] Boissonade, N., Greiner, R.,Jaspart, J.P., Lindner, J.: Rules for Member Stability in EN 1993-1-1. Background documentation and design guidelines. ECCS Technical Committee – Stability. European Convention for Constructional Steelwork, Brussels 2006.
- [6] Beer, G.: Vorlesungsskriptum - Finite Element, Institut für Baustatik der TU Graz, 2004.
- [7] Beer, G.: Vorlesungsskriptum - Finite Elemente VU. Introduction to nonlinear finite element analysis, Institut für Baustatik der TU Graz, 2004.
- [8] Degée, H., Kuhlmann, U., Detzel, A., Maquoi, R.: Der Einfluss von Imperfektionen in dünnwandigen geschweißten Rechteckquerschnitten unter Druckbeanspruchung, Stahlbau 74 (2008), S.257-265, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2008.
- [9] Detzel, A.: Zum Gesamtstabilitätsverhalten geschweißter Rechteckquerschnitte unter Druckbelastung. Dissertation, Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart, 2006.

- [10] ECCS: Ultimate Limit State Calculation of Sway Frames with Rigid Joints. Editor: Vogel , U., European Convention for Constructional Steelwork, Brussels 1984.
- [11] Greiner, R.: Vorlesungsskriptum - Stahlbau GL, Institut für Stahlbau und Flächentragwerke der TU Graz, 2008.
- [12] Greiner, R., Kettler, M., Lechner, A., Jaspert, J.-P., Boissonnade, N., Bortolotti, E, Weynand, K.; Ziller, Ördor, R.: SEMI-COMP. Plastic Member Capacity of Semi-Compact Steel Sections – a more Economic Design.RFSR-CT-2004-00044. Final Report, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel – RTD, 2008
- [13] Greiner, R., Taras, A.: Proposal for amended rules for member buckling and semi-compact cross-section design. ECCS TC8 - Report No. TC8-2011-11-017, Brussels 2011.
- [14] Kaim, P.: Spatial buckling behaviour of steel members under bending and compression. Dissertation, Institut für Stahlbau, Holzbau und Flächentragwerke der TU Graz, 2004.
- [15] Kindmann, R., Kraus, M.: Finite-Elemente-Methoden im Stahlbau, Verlag Ernst & Sohn, Bochum 2007.
- [16] Lindner, J., Scheer, J., Schmidt, H.: Stahlbauten. Erläuterungen zur DIN 18800 Teil 1 bis 4, Beuth Kommentare, Verlag Ernst&Sohn, Berlin 1994.
- [17] Petersen, C.: Statik und Stabilität der Baukonstruktionen, Verlag Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden 1982.
- [18] Ofner, R.: Traglast von Stäben aus Stahl bei Druck und Biegung. Dissertation, Institut für Stahlbau, Holzbau und Flächentragwerke der TU Graz, Heft 9, 1997.
- [19] Simoes da Silva, L., Simoes, R., Gervásio, H.: Design of Steel Structures. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2010.
- [20] Unterweger, H., Greiner, R.: Vorlesungsskriptum - Stahlbau, Institut für Stahlbau und Flächentragwerke der TU Graz, 2008.
- [21] Usami, T., Fukumoto, Y.: Local And Overall Buckling Of Welded Box Columns. Journal of Structural Engineering, Vol. 108 No.ST3, S.525-542, 1982.
- [22] <http://www.ewtc2.eu/ewtc/project-news/the-east-west-transport-corridor-discussed-by-danish-and-swedish-ministers.aspx>. Datum des Zugriffs: 14.05.2012.

TEIL III:

ANNEX A - Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis:

Bild 1-1: Verbundbrücke mit Fachwerkträger als Hauptträger [22] [Foto: Miklos Szabo].....	1
Bild 1-2: Stabbogenbrücke über die Amper [8]	2
Bild 1-3: Fachwerkträger – Geometrie und Belastung.....	4
Bild 1-4: Elastische Schnittkraftberechnung eines Fachwerkträgers nach Bild 1-3: Normalkraftbild (N).....	4
Bild 1-5: Elastische Schnittkraftberechnung eines Fachwerkträgers nach Bild 1-3: Momentenbeanspruchung des Pfostens nahe dem Auflager.....	4
Bild 1-6: GMNIA-Berechnung des Fachwerkträgers - lokale Beanspruchung von Stab A.....	5
Bild 1-7: Übersicht von Stabilitätsproblemen im Stahlbau	10
Bild 3-1: Beispiel für Klassifizierung eines nur druckbeanspruchten Querschnittes	15
Bild 3-2: Definition der Querschnittsklassen nach ÖNORM EN 1993-1-1 [1]	16
Bild 3-3: Versuchsergebnisse für die Bestimmung der „Winter-Kurve“ [16].....	19
Bild 3-4: wirksame Querschnittsfläche für quadratischen Hohlkasten unter konstanter Druckbeanspruchung, a) Bruttoquerschnitt mit Spannungsverteilung, b) wirksame Querschnittsfläche.....	22
Bild 3-5: wirksame Querschnittsfläche für geschweißten Hohlkasten unter Druck- und Biegebeanspruchung, a) Bruttoquerschnitt mit Spannungsverteilung, b) wirksame Querschnittsfläche.....	22
Bild 3-6: Bestimmung der Knickspannungslinie für geschweißte Hohlkastenprofile [1].....	25
Bild 3-7: EKSL – europäische Knickspannungslinien [5]	27
Bild 4-1: FEM-Modellierung für einen untersuchten Hohlprofilstab	34
Bild 4-2: FEM-Modellierung – Querschnitt für einen untersuchten Hohlprofilstab	34
Bild 4-3: Verwendete Werkstoffgesetze, a) elastisch-plastisch ohne Wiederverfestigung, b) elastisch-plastisch mit linearer Wiederverfestigung [2].....	36
Bild 4-4: Eigenspannungsverteilung für geschweißte Hohlkastenprofile [10]	37
Bild 4-5: Erfasste geometrische Imperfektionen und deren Überlagerung [10]	39
Bild 4-6: Wirkung von Abtriebskräften alleine zufolge (Druck-) Eigenspannung.....	40
Bild 6-1: GMNIA-Berechnung (Berechnungsprozedur 1) – mit lokaler geometrischer Imperfektion $e_0=b/400$: a) mit Eigenspannungen, b) ohne Eigenspannungen	50

Bild 6-2: GMNIA-Berechnung (Berechnungsprozedur 1) – mit lokaler geometrischer Imperfektion $e_0=b/300$: a) mit Eigenspannungen, b) ohne Eigenspannungen	50
Bild 6-3: Berechnung der Momententragfähigkeit $M_{el,eff}$ für beulgefährdete Hohlkastenprofile ..	51
Bild 6-4: GMNIA- Berechnung (Berechnungsprozedur 2) – mit lokaler geometrischer Imperfektion $e_0=b/156$: a) mit Eigenspannungen, b) ohne Eigenspannungen	52
Bild 7-1: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 1 ($\lambda p=0,4$), a) mit, b) ohne Eigenspannungen	55
Bild 7-2: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 1 ($\lambda p=0,4$), a) ohne lokale Imperfektionen, b) Vergleich GMNIA-Berechnungen – Referenz/ohne Eigenspannungen/ohne lokale Imperfektion	55
Bild 7-3: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 2 ($\lambda p=0,55$).....	57
Bild 7-4: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 3 ($\lambda p=0,635$).....	57
Bild 7-5: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4 ($\lambda p=0,7$), a) maßgebend, b) ohne Eigenspannungen.....	58
Bild 7-6: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4 ($\lambda p=0,7$) Vergleich – maßgebend/ohne Eigenspannung.....	58
Bild 7-7: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4 ($\lambda p=0,9$)	59
Bild 7-8: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4 ($\lambda p=0,9$), a) ohne Eigenspannungen, b) Vergleich – mit/ohne Eigenspannung.....	59
Bild 7-9: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4 ($\lambda p=0,9$), a) lokale Imperfektionen maßgebend (100% lokal + 70% global), b) Vergleich – globale (100% global + 70% lokal)/lokale (100% lokal + 70% global) Imperfektionen maßgebend	60
Bild 7-10: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4, a) $\lambda p=1,1$, b) $\lambda p=1,5$	61
Bild 7-11: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 1 ($\lambda p=0,4$), a) mit linearer Verfestigung, b) Vergleich - mit linearer Verfestigung / ohne Verfestigung	62
Bild 7-12: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 2 ($\lambda p=0,55$), a) mit linearer Verfestigung, b) Vergleich - mit linearer Verfestigung / ohne Verfestigung	62
Bild 7-13: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 3 ($\lambda p=0,635$), a) mit linearer Verfestigung, b) Vergleich - mit linearer Verfestigung / ohne Verfestigung.....	63
Bild 7-14: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4 reduziert ($\lambda p=0,9$), a) mit linearer Verfestigung, b) Vergleich - mit linearer Verfestigung / ohne Verfestigung.....	63
Bild 7-15: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 1 ($\lambda p=0,4$), a) ohne Verfestigung, b) Vergleich - mit linearer Verfestigung / ohne Verfestigung	64
Bild 7-16: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4 reduziert ($\lambda p=0,9$), a) ohne Verfestigung, b) Vergleich - mit linearer Verfestigung / ohne Verfestigung.....	65
Bild 7-17: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 1 ($\lambda p=0,4$), a) ohne Verfestigung, b) Vergleich - mit linearer Verfestigung / ohne Verfestigung	66
Bild 7-18: GMNIA-Berechnung – Querschnittsklasse 4 reduziert ($\bar{\lambda}_p=0,9$), a) ohne Verfestigung, b) Vergleich - mit linearer Verfestigung / ohne Verfestigung.....	66

Bild 7-19: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für Baustahl S235, S355 und S460: a) Querschnittsklasse 1 ($\lambda p=0,4$), b) Querschnittsklasse 4 ($\lambda p=0,9$)	67
Bild 7-20: GMNIA – Berechnung: Querschnittsklasse 1 ($\lambda p=0,4$): a) globale Imperfektion affin zur 1. Eigenform bei eingespannter Lagerung, b) globale Imperfektion affin zur 1. Eigenform bei Gelenklagerung.....	68
Bild 7-21: GMNIA – Berechnung: Querschnittsklasse 1 ($\lambda p=0,9$): a) globale Imperfektion affin zur 1. Eigenform bei eingespannter Lagerung, b) globale Imperfektion affin zur 1. Eigenform bei Gelenklagerung.....	69
Bild 7-22: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für Baustahl S355: a) Querschnittsklasse 1 ($\lambda p=0,4$), b) Querschnittsklasse 4 ($\lambda p=0,9$)	70
Bild 7-23: GMNIA – Berechnung: a) Querschnittsklasse 1 ($\lambda p=0,4$), b) Querschnittsklasse 3 ($\lambda p=0,635$)	73
Bild 7-24: GMNIA – Berechnung: Querschnittsklasse 4 mit a) $\lambda p=0,75$, b) $\lambda p=0,9$	73
Bild 7-25: GMNIA – Berechnung: Querschnittsklasse 4 mit a) $\lambda p=1,1$	74
Bild 7-26: GMNIA – Berechnung: a) Querschnittsklasse 1 ($\lambda p=0,4$), b) Querschnittsklasse 3 ($\lambda p=0,635$)	75
Bild 7-27: GMNIA – Berechnung: Querschnittsklasse 4 mit a) $\lambda p=0,75$, b) $\lambda p=0,9$	75
Bild 7-28: GMNIA – Berechnung: Querschnittsklasse 4 mit a) $\lambda p=1,1$	76
Bild 7-29: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,4$, a) Darstellung über globaler Schlankheit b) Rankine-Darstellung.....	77
Bild 7-30: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,9$, a) Darstellung über globaler Schlankheit b) Rankine-Darstellung.....	78
Bild 7-31: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,1$, a) Darstellung über globaler Schlankheit b) Rankine-Darstellung.....	78
Bild 8-1: Vergleich GMNIA – Berechnung QS-Klasse 2: $\lambda p=0,55$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2.....	82
Bild 8-2: Vergleich GMNIA – Berechnungen QS-Klasse 3: $\lambda p=0,635$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2	82
Bild 8-3: Vergleich GMNIA – Berechnungen QS-Klasse 4: $\lambda p=0,9$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2.....	83
Bild 8-4: Vergleich GMNIA – Berechnungen QS-Klasse 4: $\lambda p=1,1$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2.....	83
Bild 8-5: Vergleich GMNIA – Berechnungen QS-Klasse 4: $\lambda p=1,3$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2.....	84
Bild 8-6: Vergleich GMNIA – Berechnungen QS-Klasse 4: $\lambda p=1,5$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2.....	84
Bild 8-7: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,55$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2.....	85
Bild 8-8: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,635$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2.....	86

Bild 8-9: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\overline{\omega}=0,9$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2.....	86
Bild 8-10: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,1$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2.....	87
Bild 8-11: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,3$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2.....	87
Bild 8-12: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,5$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2.....	88
Bild 8-13: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,55$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2.....	89
Bild 8-14: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,635$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2.....	90
Bild 8-15: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,9$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2.....	90
Bild 8-16: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,1$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2.....	91
Bild 8-17: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,3$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2.....	91
Bild 8-18: Vergleich GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,5$, a) Berechnungsprozedur 1, b) Berechnungsprozedur 2.....	91
Bild 8-19: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,55$, a) globale Schlankheit: $\lambda y=0,25$ (L/b=15,6), b) globale Schlankheit: $\lambda y=0,5$ (L/b=30,2).....	96
Bild 8-20: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,55$, a) globale Schlankheit: $\lambda y=0,75$ (L/b=46,8).....	96
Bild 8-21: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,635$, a) globale Schlankheit: $\lambda y=0,25$ (L/b=15,6), b) globale Schlankheit: $\lambda y=0,5$ (L/b=30,2).....	97
Bild 8-22: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,635$, a) globale Schlankheit: $\lambda y=0,75$ (L/b=46,8).....	97
Bild 8-23: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,9$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y,red=0,23$ (L/b=15,6), b) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y,red=0,46$ (L/b=30,2).....	98
Bild 8-24: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,9$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y,red=0,69$ (L/b=46,8).....	98
Bild 8-25: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,1$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y,red=0,21$ (L/b=15,6), b) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y,red=0,43$ (L/b=30,2).....	99
Bild 8-26: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,1$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y,red=0,64$ (L/b=46,8).....	99
Bild 8-27: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,3$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y,red=0,20$ (L/b=15,6), b) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y,red=0,40$ (L/b=30,2).....	100
Bild 8-28: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,3$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y,red=0,60$ (L/b=46,8).....	100

Bild 8-29: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,5$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,19$ (L/b=15,6), b) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,38$ (L/b=30,2)	101
Bild 8-30: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,5$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,57$ (L/b=46,8)	101
Bild 8-31: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,55$, a) globale Schlankheit: $\lambda y=0,25$ (L/b=15,6), b) globale Schlankheit: $\lambda y=0,5$ (L/b=30,2)	103
Bild 8-32: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,55$, a) globale Schlankheit: $\lambda y=0,75$ (L/b=46,8)	103
Bild 8-33: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,635$, a) globale Schlankheit: $\lambda y=0,25$ (L/b=15,6), b) globale Schlankheit: $\lambda y=0,5$ (L/b=30,2)	104
Bild 8-34: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,635$, a) globale Schlankheit: $\lambda y=0,75$ (L/b=46,8)	104
Bild 8-35: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,9$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,23$ (L/b=15,6), b) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,46$ (L/b=30,2)	105
Bild 8-36: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,9$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,69$ (L/b=46,8)	105
Bild 8-37: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,1$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,21$ (L/b=15,6), b) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,43$ (L/b=30,2)	106
Bild 8-38: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,1$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,64$ (L/b=46,8)	106
Bild 8-39: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,3$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,20$ (L/b=15,6), b) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,40$ (L/b=30,2)	107
Bild 8-40: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,3$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,60$ (L/b=46,8)	107
Bild 8-41: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,5$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,19$ (L/b=15,6), b) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,38$ (L/b=30,2)	108
Bild 8-42: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,5$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,57$ (L/b=46,8)	108
Bild 8-43: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,55$, a) globale Schlankheit: $\lambda y=0,25$ (L/b=15,6), b) globale Schlankheit: $\lambda y=0,5$ (L/b=30,2)	110
Bild 8-44: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,55$, a) globale Schlankheit: $\lambda y=0,75$ (L/b=46,8)	110
Bild 8-45: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,635$, a) globale Schlankheit: $\lambda y=0,25$ (L/b=15,6), b) globale Schlankheit: $\lambda y=0,5$ (L/b=30,2)	111
Bild 8-46: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,635$, a) globale Schlankheit: $\lambda y=0,75$ (L/b=46,8)	111
Bild 8-47: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,9$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,23$ (L/b=15,6), b) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,46$ (L/b=30,2)	112
Bild 8-48: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=0,9$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,69$ (L/b=46,8)	112
Bild 8-49: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,1$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,21$ (L/b=15,6), b) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda y, red=0,43$ (L/b=30,2)	113

Bild 8-50: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,1$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda_{y,red}=0,64$ (L/b=46,8)	113
Bild 8-51: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,3$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda_{y,red}=0,20$ (L/b=15,6), b) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda_{y,red}=0,40$ (L/b=30,2)	114
Bild 8-52: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,3$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda_{y,red}=0,60$ (L/b=46,8)	114
Bild 8-53: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,5$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda_{y,red}=0,19$ (L/b=15,6), b) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda_{y,red}=0,38$ (L/b=30,2)	115
Bild 8-54: GMNIA – Berechnungen: $\lambda p=1,5$, a) globale reduzierte Schlankheit: $\lambda_{y,red}=0,57$ (L/b=46,8)	115
Bild 8-55: a) Brutto-Querschnitt für Hohlkastenprofil mit $\lambda p=1,5$, b) effektiver Querschnitt für reine Biegebeanspruchung M_y	118
Bild 8-56: Spannungsverteilung aus M_y für wirksamen Querschnitt: a) elastische Spannungsverteilung, b) plastische Spannungsverteilung.....	118
Bild 9-1: Beispiel Fachwerkträger – Übersicht Geometrie und Bezeichnung der Stäbe	123
Bild 9-2: Beispiel Fachwerkträger – statische Modellierung als Gelenkfachwerk (F=500kN)....	123
Bild 9-3 a: Beispiel Fachwerkträger – statische Modellierung mit biegesteifen Knotenausbildung sowie Schnittkrafteergebnisse (F=500 kN).....	124
Bild 9-4 b: Schnittkrafteergebnisse N_i	124
Bild 9-5 c: Schnittkrafteergebnisse $M_{y,i}$ - Gurte.....	124
Bild 9-6 d: Schnittkrafteergebnisse $M_{y,i}$ - Pfosten	124
Bild 9-7: Beispiel Fachwerkträger – GMNIA-Berechnung; Normalspannungsverteilung bei der Traglast	127
Bild B-1: Spannungsverteilung am Bruttoquerschnitt zur Berechnung der effektiven Querschnittswerte	145
Bild B-2: effektiver Querschnitt für reine Biegebeanspruchung für Hohlkastenprofil mit $\lambda p=1,5$	147
Bild B-3: elastische Spannungsverteilung für wirksamer Querschnitt	147
Bild B-4: plastische Spannungsverteilung für wirksamer Querschnitt.....	149
Bild B-5: effektiver Querschnitt für alleinige Druckbeanspruchung für Hohlkastenprofil mit $\lambda p=1,0$	151
Bild B-6: effektiver Querschnitt für alleinige Druckbeanspruchung für Hohlkastenprofil mit $\lambda p=1,0$	152

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 3-1: Wirksame Breiten und Beulwerte für zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile [2].....	21
Tabelle 3-2: Imperfektionsbeiwerte der EKSL (Europäische Knickspannungslinien) nach [1]..	26

Tabelle 3-3: Werte für N_{Rk} und $M_{y,Rk}$	30
Tabelle 4-1: Übersicht der Belastungsschritte für obere/untere Grenzwert der Tragfähigkeit ...	42
Tabelle 5-1: Querschnittsklassifizierung für beidseitig gestützte Querschnittsteile – Grenzwerte $(c/t)_{\text{grenz}}$	43
Tabelle 5-2: Querschnittsklassifizierung – schlankheitsabhängige Grenzwerte.....	45
Tabelle 5-3: Übersicht der verwendeten Querschnitte für die Traglastberechnungen.....	45
Tabelle 5-4: Übersicht gewählte L/b-Verhältnisse für Druck- und Biegebeanspruchung	47
Tabelle 7-1: Übersicht der berechneten Fälle für Vergleich von gelenkig gelagerter und eingespannter Stütze.....	70
Tabelle 8-1: Übersicht der berechneten Querschnitte für Druck- + Biegebeanspruchung.....	79
Tabelle 8-2: Lastfälle für GMNIA-Berechnungen bei beidseits gelenkiger Lagerung.....	81
Tabelle 8-3: Lastfälle für GMNIA-Berechnungen mit beidseitigen Einspannung.....	93
Tabelle 8-4: Querschnittswerte – Bruttoquerschnitt mit elastischer Spannungsverteilung	119
Tabelle 8-5: Querschnittswerte – wirksame Breiten mit elastischer Spannungsverteilung.....	119
Tabelle 8-6: Querschnittswerte – wirksame Breiten mit plastischer Spannungsverteilung.....	119
Tabelle 9-1: Beispiel Fachwerkträger – Dimensionen der Stäbe	123
Tabelle 9-2: Darstellung der drei untersuchten Vorgehensweisen beim Stabnachweis nach Eurocode.....	125
Tabelle 9-3: Geometrie und Material; effektive Querschnittswerte für Pfosten 2:	125
Tabelle 9-4: Schnittkräfte(für $F=500$ kN) und Knicklängen für Pfosten 2:.....	125
Tabelle 9-5: Stabilitätsnachweise – Normalkraftanteil:	126
Tabelle 9-6: Stabilitätsnachweise – Momentenanteil:.....	126
Tabelle 9-7: Stabilitätsnachweise - gesamt.....	126
Tabelle 9-8: Querschnittsnachweis :	127
Tabelle C-1: Geometrie und Material.....	145

ANNEX B - Berechnungen

Berechnungen für Kapitel 8.4

Tabelle C-1: Geometrie und Material

$h = 570,56 \text{ mm}$	$E = 210.00 \text{ kN/mm}^2$
$b = 570,56 \text{ mm}$	$f_y = 35,5 \text{ kN/mm}^2$
$t = 8 \text{ mm}$	$\varepsilon = 0,814$
	$\gamma_{M1} = 1,0$

Die Berechnungen in diesem Kapitel erfolgen unter reiner Biegebeanspruchung des geschweißten Hohlkastenquerschnitts mit der bezogenen Plattenschlankheit $\bar{\lambda}_p = 1,5$ (Querschnittsklasse 4). Die Bestimmung der Querschnittswerte sollte in mehreren Iterationsschritten erfolgen.

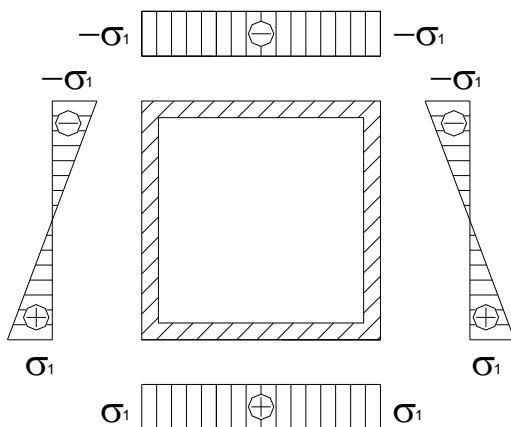


Bild B-1: Spannungsverteilung am Bruttoquerschnitt zur Berechnung der effektiven Querschnittswerte

Ergänzungen zur Berechnung der elastischen Momententragfähigkeit des Bruttoquerschnittes:

Berechnung Flächenschwerpunkt (Nulldurchgang der Spannungsverteilung):

$$z_{s,u} = \frac{\sum A_i \cdot z_{s,u,i}}{\sum A_i} = 285,28 \text{ mm (von unteren Rand)}$$

Berechnung des Trägheitsmomentes:

$$J_y = \frac{b_i \cdot h_i^3}{12} + A_i \cdot z_{s,u,i}^2 = 949.720.000 \text{ mm}^4$$

Ermittlung der Widerstandsmomente am oberen bzw. unteren Rand:

$$-W_{y,o} = W_{y,u} = J_y / z_{s,u} = 3.329.000 \text{ mm}^3$$

Berechnung der Momententragfähigkeit M_{el} des Bruttoquerschnitts mit elastischer Spannungsverteilung:

$$M_{el} = W_{y,u} \cdot f_y = 1.181.820.989 \text{ Nmm} = 1.181,2 \text{ kNm}$$

Bestimmung der effektiven Querschnittswerte:

Anm.: Die Spannungen $\sigma_{x,Ed,1}$ und $\sigma_{x,Ed,2}$ entsprechen einem Spannungsverlauf der bei reiner Biegebeanspruchung auftritt.

	Flansch oben	Steg links + rechts	Flansch unten
$\bar{b} =$	554,56 mm	554,56 mm	554,56 mm
$t =$	8 mm	8 mm	8 mm
$\sigma_{x,Ed,1} =$	-355 N/mm ²	-355 N/mm ²	355 N/mm ²
$\sigma_{x,Ed,2} =$	-355 N/mm ²	355 N/mm ²	355 N/mm ²
$\psi = \sigma_{x,Ed,2} / \sigma_{x,Ed,1}$	1	-1	1

$k_\sigma = (\text{Tabelle 3-1})$	4	23,92	-
$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} =$	1,498	0,613	-
$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$	0,569	1,0	1,0

Nach Ermittlung des effektiven Querschnittes in einem ersten Iterationsschritt, folgt am berechneten effektiven Querschnittswerten als zweiter Schritt mit der veränderten Spannungsverteilung im Steg die erneute Ermittlung der wirksamen Breiten im Steg.

Für diesen Querschnitt, wie für alle verwendeten quadratischen Hohlkastenprofile in dieser Arbeit, muss keine Abminderung des Steges infolge Biegebeanspruchung erfolgen.

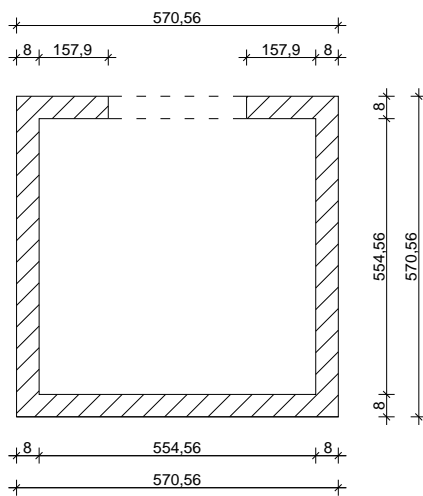


Bild B-2: effektiver Querschnitt für reine Biegebeanspruchung für Hohlkastenprofil mit $\bar{\lambda}_p=1,5$

	Flansch oben	Steg links + rechts	Flansch unten
$b_{\text{eff}}=$	315,8 mm	555 mm	555 mm
$t=$	8 mm	8 mm	8 mm

$$A_{\text{eff}}=8 \cdot [315,8 + 2 \cdot 555 + 555 + 4 \cdot 8] = 16.092 \text{ mm}^2$$

Ergänzungen zur Berechnung mit elastischer Spannungsverteilung:

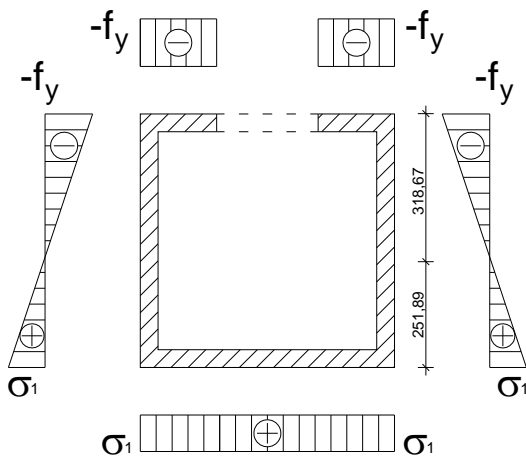


Bild B-3: elastische Spannungsverteilung für wirksamer Querschnitt

Berechnung Flächenschwerpunkt (Nulldurchgang der Spannungsverteilung):

$$z_{s,u,eff} = \frac{\sum A_{eff,Druck,i} \cdot z_{s,u,i}}{\sum A_{eff,Druck,i}} = 251,89 \text{ mm (von unterem Rand)}$$

$$z_{s,o,eff} = h_{\text{Profil}} - z_{s,u,eff} = -318,67 \text{ mm (von oberem Rand)}$$

Berechnung des Trägheitsmomentes:

$$J_{y,eff} = \frac{b_{i,eff} \cdot h_{i,eff}^3}{12} + A_{i,eff} \cdot z_{s,i,eff}^2 = 940.650.000 \text{ mm}^4$$

Ermittlung der effektiven Widerstandsmomente am oberen bzw. unteren Rand:

$$W_{y,u,eff} = J_{y,eff} / z_{s,u,eff} = 3.099.000 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,o,eff} = J_{y,eff} / z_{s,o,eff} = -2.450.000 \text{ mm}^3$$

Berechnung der Momententragfähigkeit $M_{el,eff}$ mit elastischer Spannungsverteilung:

$$M_{el,eff} = W_{y,o,eff} \cdot f_y = 869.649.203 \text{ Nmm} = 869.6 \text{ kNm}$$

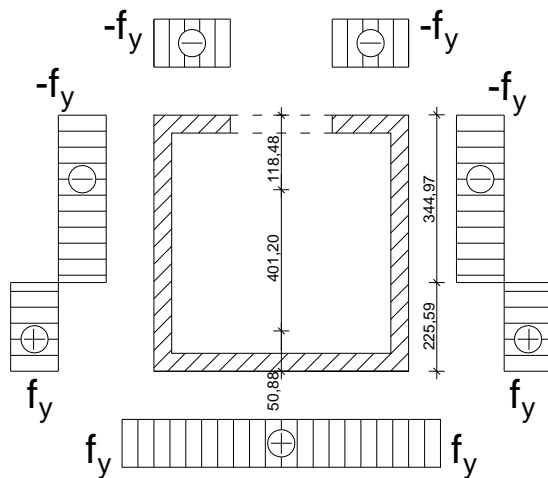
Ergänzungen zur Berechnung mit plastischer Spannungsverteilung:

Bild B-4: plastische Spannungsverteilung für wirksamer Querschnitt

Ermittlung der Fläche unter Zug- bzw. Druckspannungen steht:

$$A_{\text{eff}}/2 = A_{\text{eff,Druck}} = A_{\text{eff,Zug}} = 8.046 \text{ mm}^2$$

Steghöhe unter Zugspannungen steht:

$$h_{\text{Steg,Zug}} = \frac{A_{\text{eff,Zug}} - (b_{\text{Fl}} - 2 \cdot t) \cdot t}{2 \cdot t} = 225,59 \text{ mm (von unteren Rand)}$$

Flächenschwerpunkt der Zugspannungsfläche:

$$z_{\text{S,Zug}} = \frac{\sum A_{\text{eff,Zug},i} \cdot z_{\text{S},i}}{\sum A_{\text{eff,Zug},i}} = 50,88 \text{ mm (von unteren Rand)}$$

Steghöhe unter Druckspannungen steht:

$$h_{\text{Steg,Druck}} = h_{\text{Steg}} - h_{\text{Steg,Zug}} = 344,97 \text{ mm (von oberen Rand)}$$

Flächenschwerpunkt der Druckspannungsfläche:

$$z_{\text{S,Druck}} = \frac{\sum A_{\text{eff,Druck},i} \cdot z_{\text{S},i}}{\sum A_{\text{eff,Druck},i}} = 118,48 \text{ mm (von oberen Rand)}$$

Abstand der Flächenschwerpunkte von Druck- bzw. Zugspannungen:

$$z_{\text{ges}} = h_{\text{Profil}} - z_{\text{S,Druck}} - z_{\text{S,Zug}} = 401,20 \text{ mm}$$

Berechnung der Momenten Tragfähigkeit $M_{pl,eff}$ mit plastischer Spannungsverteilung:

$$M_{pl,eff} = f_y \cdot A_{eff,Druck} \cdot z_{ges} = 1.145.956.127 \text{ Nmm} = 1.146,0 \text{ kNm}$$

Berechnungen für Kapitel 9

Bestimmung der effektiven Querschnittswerte - Normalkraftbeanspruchung:

Anm.: Die Spannungen $\sigma_{x,Ed,1}$ und $\sigma_{x,Ed,2}$ entsprechen einem Spannungsverlauf der bei alleiniger Druckbeanspruchung auftritt.

	Flansch oben	Steg links + rechts	Flansch unten
$\bar{b} =$	440 mm	440 mm	440 mm
$t =$	10 mm	10 mm	10 mm
$\sigma_{x,Ed,1} =$	-355 N/mm ²	-355 N/mm ²	-355 N/mm ²
$\sigma_{x,Ed,2} =$	-355 N/mm ²	-355 N/mm ²	-355 N/mm ²
$\psi = \sigma_{x,Ed,2} / \sigma_{x,Ed,1}$	1	1	1

$k_\sigma = (\text{Tabelle 3-1})$	4	4	4
$\bar{\lambda}_p = \frac{f_y}{\sqrt{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} =$	0,951	0,951	0,951
$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$	0,808	0,808	0,808

Nach Ermittlung des effektiven Querschnittes in einem ersten Iterationsschritt, folgt am berechneten effektiven Querschnittswerten als zweiter Schritt mit der veränderten Spannungsverteilung im Steg die erneute Ermittlung der wirksamen Breiten im Steg.

Für diesen Querschnitt, wie für alle verwendeten quadratischen Hohlkastenprofile in dieser Arbeit, muss keine Abminderung des Steges infolge Biegebeanspruchung erfolgen.

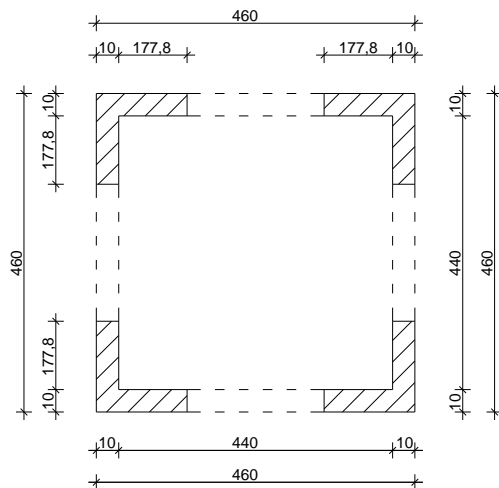


Bild B-5: effektiver Querschnitt für alleinige Druckbeanspruchung für Hohlkastenprofil mit $\bar{\lambda}_p=1,0$

	Flansch oben	Steg links + rechts	Flansch unten
$b_{\text{eff}}=$	355,6 mm	355,6 mm	355,6 mm
$t=$	10 mm	10 mm	10 mm

$$A_{\text{eff}}=10 \cdot [4 \cdot 355,6 + 4 \cdot 10] = 14.626 \text{ mm}^2$$

Bestimmung der effektiven Querschnittswerte - Biegebeanspruchung:

Anm.: Die Spannungen $\sigma_{x,Ed,1}$ und $\sigma_{x,Ed,2}$ entsprechen einem Spannungsverlauf der bei reiner Biegebeanspruchung auftritt.

	Flansch oben	Steg links + rechts	Flansch unten
$\bar{b}=$	440 mm	440 mm	440 mm
$t=$	10 mm	10 mm	10 mm
$\sigma_{x,Ed,1}=$	-355 N/mm ²	-355 N/mm ²	355 N/mm ²
$\sigma_{x,Ed,2}=$	-355 N/mm ²	355 N/mm ²	355 N/mm ²
$\psi=\sigma_{x,Ed,2}/\sigma_{x,Ed,1}$	1	-1	1

$k_{\sigma}=(\text{Tabelle 3-1})$	4	23,92	-
-----------------------------------	---	-------	---

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} =$	0,951	0,389	-
$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0$	0,808	1,0	1,0

Nach Ermittlung des effektiven Querschnittes in einem ersten Iterationsschritt, folgt am berechneten effektiven Querschnittswerten als zweiter Schritt mit der veränderten Spannungsverteilung im Steg die erneute Ermittlung der wirksamen Breiten im Steg.

Für diesen Querschnitt, wie für alle verwendeten quadratischen Hohlkastenprofile in dieser Arbeit, muss keine Abminderung des Steges infolge Biegebeanspruchung erfolgen.

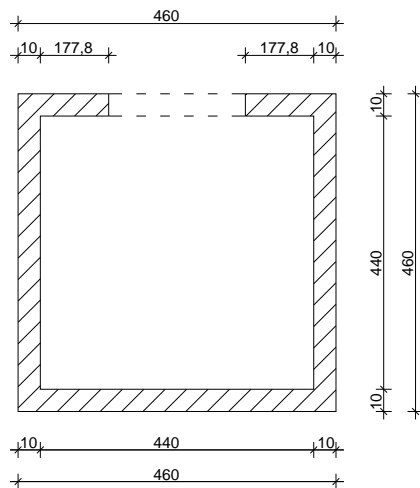


Bild B-6: effektiver Querschnitt für alleinige Druckbeanspruchung für Hohlkastenprofil mit $\bar{\lambda}_p = 1,0$

	Flansch oben	Steg links + rechts	Flansch unten
$b_{\text{eff}} =$	355,6 mm	440 mm	440 mm
$t =$	10 mm	10 mm	10 mm

Berechnung Flächenschwerpunkt (Nulldurchgang der Spannungsverteilung):

$$z_{s,u,\text{eff}} = \frac{\sum A_{\text{eff},i} \cdot z_{s,u,i}}{\sum A_{\text{eff},i}} = 218,94 \text{ mm (von unteren Rand)}$$

$$z_{s,o,\text{eff}} = h_{\text{Profil}} - z_{s,u,\text{eff}} = -214,06 \text{ mm (von oberen Rand)}$$

Berechnung des Trägheitsmomentes:

$$J_{y,\text{eff}} = \frac{b_{i,\text{eff}} \cdot h_{i,\text{eff}}^3}{12} + A_{i,\text{eff}} \cdot z_{s,i,\text{eff}}^2 = 562.991.561 \text{ mm}^4$$

Ermittlung der Widerstandsmomente am oberen bzw. unteren Rand:

$$W_{y,u,\text{eff}} = J_{y,\text{eff}} / z_{s,u,\text{eff}} = 2.571.467 \text{ mm}^3$$

$$W_{y,o,\text{eff}} = J_{y,\text{eff}} / z_{s,o,\text{eff}} = -2.335.463 \text{ mm}^3$$

ANNEX C - Inputfiles

Inputfile für reine Druckbeanspruchung:

```

*PARAMETER
lam_y=1.
*****NOMINAL CALCULATION PARAMETERS
fy=355.
E=210000.
nu =0.3.
fu=510.
SE =355.000.
pi=3.14159265359
h_inp=34.8737
b_inp=34.8737
t=8
L_e0=1000.
b_e0p=400.
*****GEOMETRIC PARAMETERS
bi=b-t
hi=h-t
bi05=bi*0.5
hi05=hi*0.5
Ai=2*b*t+2*(h-2*t)*t
Iyi=2*b*t**3/12+2*b*t*hi05**2+2*(h-2*t)**3*t/12+0
Izi=2*b**3*t/12+0+2*t**3*(h-2*t)/12+2*t*(h-2*t)*bi05**2
iyi=(Iyi/Ai)**0.5
izi=(Izi/Ai)**0.5
lam1=pi*(E/fy)**0.5
L=lam_y*izi*lam1
e0=L/L_e0
bip=b-2*t
e0p=bip/b_e0p * 0.7
*****LOAD PARAMETERS
Npl=Ai*fy*2
*****RESIDUAL STRESS DISTRIBUTION
SE_10=SE*0.953
SE_9=SE*0.058
SE_8=SE*-0.130
SE_7=SE*-0.130
SE_6=SE*-0.130
SE_5=SE*-0.130
SE_4=SE*-0.130
SE_3=SE*-0.130
SE_2=SE*-0.130
SE_1=SE*-0.130
*****
*HEADING
Hohlprofil_ , Lambda_z=1, , , S355
*****
*NODE
**top-left
100101,0.,-<bi05>,-<hi05>
120001,<L>,-<bi05>,-<hi05>
**top-right
100121,0.,<bi05>,-<hi05>
120021,<L>,<bi05>,-<hi05>
**bottom-right
100141,0.,<bi05>,<hi05>

```

```

120041,<L>,<bi05>,<hi05>
**bottom-left
100161,0.,-<bi05>,<hi05>
120061,<L>,<bi05>,<hi05>
**top-left_2
100181,0.,-<bi05>,<hi05>
120081,<L>,<bi05>,<hi05>
****
*NGEN,,NSET=Ntop_left
100101,120001,100
*NGEN,,NSET=Ntop_right
100121,120021,100
*NGEN,,NSET=Nbottom_right
100141,120041,100
*NGEN,,NSET=Nbottom_left
100161,120061,100
*NGEN,,NSET=Ntop_left_2
100181,120081,100
*NFILL,NSET=Ntop
Ntop_left,Ntop_right,20,1
*NFILL,NSET=Nright
Ntop_right,Nbottom_right,20,1
*NFILL,NSET=Nbottom
Nbottom_right,Nbottom_left,20,1
*NFILL,NSET=Nleft
Nbottom_left,Ntop_left_2,20,1
*****ELEMENTS
*Element, type=S4R
100101,100102,100202,100201,100101
*ELGEN,ELSET=Eltop
100101,199,100,100,20,1,1
*****
*Element, type=S4R
100121,100122,100222,100221,100121
*ELGEN,ELSET=Elright
100121,199,100,100,20,1,1
*****
*Element, type=S4R
100141,100142,100242,100241,100141
*ELGEN,ELSET=Elbottom
100141,199,100,100,20,1,1
*****
*Element, type=S4R
100161,100162,100262,100261,100161
*ELGEN,ELSET=Elleft
100161,199,100,100,20,1,1
*****SECTION
*Shell Section, elset=Eltop, material=STEEL
<t>, 5
*Shell Section, elset=Elright, material=STEEL
<t>, 5
*Shell Section, elset=Elbottom, material=STEEL
<t>, 5
*Shell Section, elset=Elleft, material=STEEL
<t>, 5
*****REFERENCE POINTS
*Node
11 , 0., 0., 0.
21 ,<L>, 0., 0.
*****COUPLING
*Nset, nset=Section_I, GENERATE
100101,100181,1

```

```

*Nset, nset=Section_F, GENERATE
120001,120081,1
*Nset, nset=TopLeft, GENERATE
100201,119901,100
*Nset, nset=TopLeft_two,GENERATE
100281,119981,100
*****
*MPC
BEAM,Section_I,11
*MPC
BEAM,Section_F,21
*MPC
TIE, TopLeft , TopLeft_two
*****MATERIAL
*MATERIAL,NAME=STEEL
*ELASTIC
<E>,<nu>
*PLASTIC
<fy>,0.
*****INITIAL
*ELSET,ELSET=IS_10, generate
100101,120001,100
100120,120020,100
100121,120021,100
100140,120040,100
100141,120041,100
100160,120060,100
100161,120061,100
100180,120080,100
*ELSET,ELSET=IS_9, generate
100102,120002,100
100119,120019,100
100122,120022,100
100139,120039,100
100142,120042,100
100159,120059,100
100162,120062,100
100179,120079,100
*ELSET,ELSET=IS_8, generate
100103,120003,100
100118,120018,100
100123,120023,100
100138,120038,100
100143,120043,100
100158,120058,100
100163,120063,100
100178,120078,100
*ELSET,ELSET=IS_7, generate
100104,120004,100
100117,120017,100
100124,120024,100
100137,120037,100
100144,120044,100
100157,120057,100
100164,120064,100
100177,120077,100
*ELSET,ELSET=IS_6, generate
100105,120005,100
100116,120016,100
100125,120025,100
100136,120036,100
100145,120045,100

```

```

100156,120056,100
100165,120065,100
100176,120076,100
*ELSET,ELSET=IS_5, generate
100106,120006,100
100115,120015,100
100126,120026,100
100135,120035,100
100146,120046,100
100155,120055,100
100166,120066,100
100175,120075,100
*ELSET,ELSET=IS_4, generate
100107,120007,100
100114,120014,100
100127,120027,100
100134,120034,100
100147,120047,100
100154,120054,100
100167,120067,100
100174,120074,100
*ELSET,ELSET=IS_3, generate
100108,120008,100
100113,120013,100
100128,120028,100
100133,120033,100
100148,120048,100
100153,120053,100
100168,120068,100
100173,120073,100
*ELSET,ELSET=IS_2, generate
100109,120009,100
100112,120012,100
100129,120029,100
100132,120032,100
100149,120049,100
100152,120052,100
100169,120069,100
100172,120072,100
*ELSET,ELSET=IS_1, generate
100110,120010,100
100111,120011,100
100130,120030,100
100131,120031,100
100150,120050,100
100151,120051,100
100170,120070,100
100171,120071,100
*INITIAL CONDITIONS, TYPE=STRESS
IS_10,<SE_10>
IS_9,<SE_9>
IS_8,<SE_8>
IS_7,<SE_7>
IS_6,<SE_6>
IS_5,<SE_5>
IS_4,<SE_4>
IS_3,<SE_3>
IS_2,<SE_2>
IS_1,<SE_1>
*****GEOMETRICAL IMPERFECTION
*IMPERFECTION, FILE=lambda-p_0.9_LBA_S355_N_10, Step=1
*****global

```

```
1,<e0>
****local
3,<e0p>
*****BOUNDARY CONDITIONS
*BOUNDARY
11,2,4
21,1,4
*****STEP
*Step, NLGEOM,INC=100
*STATIC
0.025, ,0.00001,0.025
*****LOAD
*Clload
11,1,<Npl>
*End Step
```