

Masterarbeit

Studie zum Tragverhalten von Fachwerkträgern mit dünnwandigen Gurtstäben

von

Mario Schneeweiß

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science (Msc) bzw. Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

Eingereicht an der

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

Technische Universität Graz

Graz, im Mai 2015

Betreuer:

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

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Taras

Deutsche Fassung: Beschluss der Curricula Kommission für Bachelor, Master und Diplomstudien vom 10.11.2008

Genehmigung des Senates am 1.12.2008

Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, Mai 2015

Mario Schneeweiß

Englische Fassung:

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other sources/recourses than the ones I have named and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, May 2015

Mario Schneeweiß

Danksagung

Mein erster und ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern Herwig und Astrid Schneeweiß, ohne die mein Studium in dieser Form nicht möglich gewesen wäre. Sie haben mich mit allem, was im Bereich ihres Möglichen war, tatkräftig unterstützt und das verdient größten Respekt, höchste Anerkennung und ewige Dankbarkeit. Weiters möchte ich mich bei meiner Schwester Stefanie Schneeweiß, meinen Großeltern Alfred und Erika Schneeweiß und bei meiner Großmutter Anna Staber für die tatkräftige Unterstützung bedanken.

Besonderer Dank gilt auch meiner Freundin Sandra und meinem Sohn Julian, dass sie mein Studium so geduldig und verständnisvoll ertragen haben. Gleichzeitig muss ich mich aber auch bei ihnen entschuldigen, da sie unter der Woche auf meine Anwesenheit verzichten mussten. Sie haben mich, wie auch der Rest meiner Familie, mit allem was im Bereich ihres Möglichen war, tatkräftig unterstützt, dafür bin ich äußerst dankbar und werde das auch niemals vergessen!

Sehr dankbar bin ich auch dem Institut für Stahlbau mit seinem Vorstand Herrn Univ.-Prof. Dr.techn. Dipl.-Ing. Harald Unterweger für die Möglichkeit des Erarbeitens und das Betreuen meiner Diplomarbeit, sowie Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Taras für die Unterstützung und gute Betreuung.

Nicht fehlen darf natürlich der Dank an all meine, durch das Studium neu gewonnenen Freunde, die mir durch die schwerste Zeit in meinem Studium, nämlich die Freizeit, geholfen haben und so tatkräftig an der Dauer meines Studiums mitwirkten. Dieser Dank gilt vor allem der Supergruppe, Christoph Betschoga und Florian Presslaber. Danke Jungs!

Nicht unerwähnt darf mein langjähriger Wohnungskollege Lukas Görtschacher bleiben. Ihm gebührt, für das unkomplizierte Zusammenleben und die teils lang dauernden und äußerst ausführlichen nächtlichen Gespräche, spezieller Dank. Danke!

Als letztes möchte ich mich noch bei allen hier nicht angeführten Personen bedanken, die an einem positiven Abschluss meines Studiums beteiligt waren.

Study of the Load-Carrying Behaviour of Thin-Walled Truss Members

Abstract

The goal of this thesis was, to get an indication about the accuracy and applicability of the different calculation methods when designing the individual truss members. The Study was related to trusses with thin-walled compression chords (class 3 and 4), which are susceptible to buckling phenomena. The design verification includes the check of the cross-section capacity, with considering of actual Eurocodes ÖNORM EN 1993-1-1; ÖNORM EN 1993-1-1 and ÖNORM EN 1993-1-8 approach this problem marginally. Therefore this Master's thesis should be a first step for a discussion about the possibility to unify calculation procedures for trusses. At the moment there are two different calculation approaches for the design of truss members. In the first approach the truss nodes are considered as rigid in the global analyses, leading to additional bending moments. In the second approach the truss nodes are acting as hinged joints, leading to only axial forces for loading at the joints only. For thin-walled members this approach is not allowed. Therefore the goal of this Master's thesis was to compare these two approaches with the real behaviour, based on a FE - model, for different cases

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	EINFÜHRUNG UND MOTIVATION.....	1
1.2	INHALT UND GLIEDERUNG DER ARBEIT	4
1.3	LITERATUR/NORMEN	6
1.4	SOFTWARE	6
2	TRAGFÄHIGKEIT VON FACHWERKTRÄGERN IM HOCHBAU	7
2.1	EUROCODE NACHWEISE	7
2.1.1	<i>Systemberechnung</i>	7
2.1.2	<i>Querschnittsnachweise</i>	7
a)	Alleinige Drucknormalkraft N	7
b)	Alleinige Biegebeanspruchung M_y	8
c)	Druck und Biegung ($N&M_y$).....	8
2.1.3	<i>Bauteilnachweise - Biegeknicken</i>	9
a)	Biegeknicken aus der Fachwerksebene	9
b)	Biegeknicken in der Fachwerksebene	9
2.1.4	<i>Querschnittsklassifizierung</i>	11
2.1.5	<i>Erfassen des Beulens bei Klasse 4- Querschnitten</i>	13
a)	Abminderungsfaktoren ρ für reduzierte Beultragfähigkeit.....	13
b)	Effektive Querschnittswerte	15
2.2	FE-MODELLE ZUR TRAGLASTERMITTLUNG.....	19
2.2.1	<i>Modellierung der Fachwerksträger</i>	19
2.2.2	<i>Lagerung des Fachwerkträgers</i>	19
2.2.3	<i>Verwendetes Elementnetz</i>	21
2.2.4	<i>Lineare Beulanalyse (LBA)</i>	22
2.2.5	<i>Imperfektionen</i>	24
2.2.6	<i>Geometrische und materielle nichtlineare Analyse mit Imperfektion (GMNIA)</i>	25
3	UNTERSUCHTE SYSTEME	26
3.1	SYSTEM 1 - FACHWERKTRÄGER MIT I-PROFILIEN UND EINGESCHLITZTEM KNOTENBLECH	26
3.1.1	<i>Anlageverhältnisse</i>	26
a)	Flanschdickenvariation	28
b)	Stegdickenvariation	28
c)	Kombinierte Steg- Flanschdickenvariation.....	28
3.1.2	<i>FE-Modellierung von System 1</i>	29
3.1.3	<i>Lagerung des Fachwerkträgers (System 1)</i>	30
3.1.4	<i>FE-Netz im Knotenbereich bei System 1</i>	31

3.1.5	Geometrische Ersatzimperfektionen bei System 1	32
3.1.6	Druckgurt-Tragfähigkeit bei globalem Knicken	34
3.2	SYSTEM 2 - FACHWERKTRÄGER WIE SYSTEM 1 MIT HÖHEREN GURTPROFILIEN	36
3.2.1	Anlageverhältnisse	36
a)	Flanschdickenvariation	38
b)	Stegdickenvariation	39
c)	Kombinierte Steg- Flanschdickenvariation	39
3.2.2	FE-Modellierung von System 2	40
3.2.3	Lagerung des Fachwerkträgers (System 2).....	41
3.2.4	FE-Netz im Knotenbereich bei System 2	41
3.2.5	Geometrische Ersatzimperfektionen bei System 2	42
3.3	SYSTEM 3 - UNVERÄNDERTER FACHWERKTRÄGER MIT HOHLPROFILQUERSCHNITTEN	45
3.3.1	Anlageverhältnisse	45
3.3.2	FE-Modellierung von System 3	47
3.3.3	Lagerung des Fachwerkträgers (System 3).....	48
3.3.4	FE-Netz im Knotenbereich bei System 3	49
3.3.5	Geometrische Ersatzimperfektion bei System 3	49
3.3.6	Druckgurtragfähigkeit bei globalem Knicken.....	51
4	ERGEBNISVERGLEICH- FE-BERECHNUNG UND NACHWEIS NACH EUROCODE	53
4.1	ÜBERBLICK.....	53
4.2	EINGABE ALS BASIS DER QUERSCHNITTSWERTERMITTLUNG FERTIG.....	55
4.2.1	Eingabe beim I-Profil	55
4.2.2	Überblick der Eingangswerte der untersuchten Querschnitte des I-Profiles	57
4.2.3	Eingabe beim Hohlprofil	58
4.2.4	Überblick der Eingangswerte der untersuchten Querschnitte des Hohlprofiles	60
4.2.5	Berechnungsfaktor für das maximale Biegemoment am Stab.....	61
4.3	QUERSCHNITTSKLASSIFIZIERUNG FERTIG.....	61
4.3.1	Klassifizierung für das I-Profil	61
4.3.2	Klassifizierung für das Hohlprofil	62
4.4	ERMITTLUNG DER EFFEKTIVEN QUERSCHNITTSWERTE NACH EUROCODE	64
4.4.1	I-Profil	64
a)	Vorgehensweise	64
b)	Effektive Querschnittswerte des I-Profiles nach Eurocode ($A_{c,eff}$ mit N alleine).....	65
c)	Effektive Querschnittswerte des I-Profiles nach Eurocode ($W_{c,y,eff}$ mit M_y alleine).....	67
4.4.2	Hohlprofil.....	70
a)	Vorgehensweise	70
b)	Effektive Querschnittswerte des Hohlprofiles nach Eurocode ($A_{c,eff}$ mit N alleine)	71
c)	Effektive Querschnittswerte des Hohlprofiles nach Eurocode ($W_{c,y,eff}$ mit M_y alleine)	73
4.5	ERMITTLUNG DER EFFEKTIVEN QUERSCHNITTSWERTE AUS DER LBA-ANALYSE DES GESAMTSYSTEMS	76

a)	Vorgehensweise.....	76
b)	I-Profil	77
c)	Hohlprofil	80
4.6	ERMITTLUNG DER MAXIMALEN TRAGFÄHIGKEITEN BEZIEHUNGSWEISE TRAGLASTEN	83
4.6.1	<i>GMNIA-Analyse</i>	83
4.6.2	<i>Vorgehen nach Eurocode</i>	83
a)	Konzept I: Biegesteifes Fachwerk → N & M_y am maßgebenden Querschnitt	83
b)	Konzept II: Gelenkfachwerk → nur N am maßgebenden Querschnitt	84
4.6.3	<i>Vorgehen nach Eurocode mit verbesserten effektiven Querschnitten aus der Eigenwertberechnung</i>	85
4.7	ZUSAMMENFASSUNG DER EFFEKTIVEN QUERSCHNITTSWERTE FÜR DIE UNTERSUCHTEN FÄLLE.....	86
4.8	DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE MITTELS LINIENDIAGRAMM	87
4.9	DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE MITTELS BALKENDIAGRAMME.....	89
5	TRAGFÄHIGKEITSVERGLEICH FÜR SYSTEM 1 - FACHWERKTRÄGER MIT I-PROFILIEN.....	90
5.1	VARIATION DER STEGDICKE BEI GLEICHBLEIBENDER FLANSCHDICKE.....	91
5.1.1	<i>Ergebnis mittels Gelenkfachwerk (Konzept II; N alleine)</i>	91
5.1.2	<i>Ergebnis mittels biegesteifem Fachwerk (Konzept I; N & M_y)</i>	92
5.2	VARIATION DER FLANSCHDICKE BEI GLEICHBLEIBENDER STEGDICKE.....	93
5.2.1	<i>Ergebnis mittels Gelenkfachwerk (Konzept II; N alleine)</i>	93
5.2.2	<i>Ergebnis mittels biegesteifem Fachwerk (Konzept I; N & M_y)</i>	94
5.3	VARIATION DER STEG- UND FLANSCHDICKE	95
5.3.1	<i>Ergebnis mittels Gelenkfachwerk (Konzept II; N alleine)</i>	95
5.3.2	<i>Ergebnis mittels biegesteifem Fachwerk (Konzept I; N & M_y)</i>	96
6	TRAGFÄHIGKEITSVERGLEICH FÜR SYSTEM 2 - FACHWERKTRÄGER MIT I-PROFIL UND HÖHEREM QUERSCHNITT	98
6.1	VARIATION DER STEGDICKE BEI GLEICHBLEIBENDER FLANSCHDICKE.....	99
6.1.1	<i>Ergebnis mittels Gelenkfachwerk (Konzept II; N alleine)</i>	99
6.1.2	<i>Ergebnis mittels biegesteifem Fachwerk (Konzept I; N & M_y)</i>	100
6.2	VARIATION DER FLANSCHDICKE BEI GLEICHBLEIBENDER STEGDICKE.....	101
6.2.1	<i>Ergebnis mittels Gelenkfachwerk (Konzept II; N alleine)</i>	101
6.2.2	<i>Ergebnis mittels biegesteifem Fachwerk (Konzept I; N & M_y)</i>	102
6.3	VARIATION DER STEG UND FLANSCHDICKE	103
6.3.1	<i>Ergebnis mittels Gelenkfachwerk (Konzept II; N alleine)</i>	103
6.3.2	<i>Ergebnis mittels biegesteifem Fachwerk (Konzept I; N & M_y)</i>	104
7	TRAGFÄHIGKEITSVERGLEICH FÜR SYSTEM 3 - FACHWERKTRÄGER MIT HOHLPROFILIEN	106
7.1	ERGEBNIS MITTELS GELENKFACHWERK (KONZEPT II; N ALLEINE)	107
7.2	ERGEBNIS MITTELS BIEGESTEIFEM FACHWERK (KONZEPT I; N & M_y)	108
8	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG.....	109

8.1	ZUSAMMENFASSUNG	109
8.2	SCHLUSSFOLGERUNG	110
9	ANHANG	111
9.1	STEGDICKENVARIATION FÜR DAS I-PROFIL MIT H=450 [MM]	111
9.1.1	$t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm]	111
9.1.2	$t_s=11,4$ [mm] und $t_f=26$ [mm]	116
9.1.3	$t_s=8,5$ [mm] und $t_f=26$ [mm]	120
9.1.4	$t_s=6,9$ [mm] und $t_f=26$ [mm]	124
9.2	FLANSCHDICKENVARIATION FÜR DAS I-PROFIL MIT H=450 [MM]	128
9.2.1	$t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm]	128
9.2.2	$t_s=14$ [mm] und $t_f=20$ [mm]	132
9.2.3	$t_s=14$ [mm] und $t_f=14$ [mm]	136
9.2.4	$t_s=14$ [mm] und $t_f=10$ [mm]	140
9.3	STEG-/FLANSCHDICKENVARIATION FÜR DAS I-PROFIL MIT H=450 [MM]	144
9.3.1	$t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm]	144
9.3.2	$t_s=11,4$ [mm] und $t_f=20$ [mm]	148
9.3.3	$t_s=8,5$ [mm] und $t_f=14$ [mm]	152
9.3.4	$t_s=6,9$ [mm] und $t_f=10$ [mm]	156
9.4	STEGDICKENVARIATION FÜR DAS I-PROFIL MIT H=625 [MM]	160
9.4.1	$t_s=19,8$ [mm] und $t_f=26$ [mm]	160
9.4.2	$t_s=16,1$ [mm] und $t_f=26$ [mm]	164
9.4.3	$t_s=12$ [mm] und $t_f=26$ [mm]	168
9.4.4	$t_s=9,7$ [mm] und $t_f=26$ [mm]	172
9.5	FLANSCHDICKENVARIATION FÜR DAS I-PROFIL MIT H=625 [MM]	176
9.5.1	$t_s=19,8$ [mm] und $t_f=26$ [mm]	176
9.5.2	$t_s=19,8$ [mm] und $t_f=20$ [mm]	180
9.5.3	$t_s=19,8$ [mm] und $t_f=14$ [mm]	184
9.5.4	$t_s=19,8$ [mm] und $t_f=10$ [mm]	188
9.6	STEG-/FLANSCHDICKENVARIATION FÜR DAS I-PROFIL MIT H=625 [MM]	192
9.6.1	$t_s=19,8$ [mm] und $t_f=26$ [mm]	192
9.6.2	$t_s=16,1$ [mm] und $t_f=20$ [mm]	196
9.6.3	$t_s=12$ [mm] und $t_f=14$ [mm]	200
9.6.4	$t_s=9,7$ [mm] und $t_f=10$ [mm]	204
9.7	WANDDICKENVARIATION FÜR DAS HOHLPROFIL MIT H=500 [MM]	208
9.7.1	$t=16$ [mm]	208
9.7.2	$t=14,2$ [mm]	213
9.7.3	$t=12,5$ [mm]	217
9.7.4	$t=10$ [mm]	221
9.8	SCHLANKHEIT UND ABMINDERUNGSFAKTOR DES I-PROFILES	225

9.8.1	$t_s=14$ [mm], $t_f=26$ [mm] und $h=450$ [mm]	225
9.8.2	$t_s=14$ [mm], $t_f=26$ [mm] und $h=450$ [mm]	226
9.9	SCHLANKHEIT UND ABMINDERUNGSFAKTOR DES HOHLPROFILES	227
9.9.1	$t=16$ [mm] und $h=500$ [mm]	227
9.9.2	$t=10$ [mm] $h=500$ [mm]	228

1

1 Einleitung

1.1 Einführung und Motivation

Ziel dieser Arbeit war es, einen Aufschluss über die Genauigkeit und die Verwendbarkeit der einzelnen Berechnungsmethoden bei der Bemessung und dem Nachweis der Tragfähigkeit von Fachwerken mit *dünnwandigen Druckgurten (Klasse 3 oder 4)*, welche äußerst knick- und beulgefährdet sind, zu bekommen. Die nötigen Nachweise bei der Berechnung eines derartigen Fachwerksdruckgurtes sind der Knicknachweis und der Querschnittsnachweis mit einschließendem Beulnachweis der Flansche und des Steges. Dieses Beulen wird hierbei durch eine reduzierte Querschnittsfläche berücksichtigt. Im nachfolgenden Bild ist das Versagen durch Beulen der einzelnen Querschnittskomponenten eines Druckgurtes dargestellt.

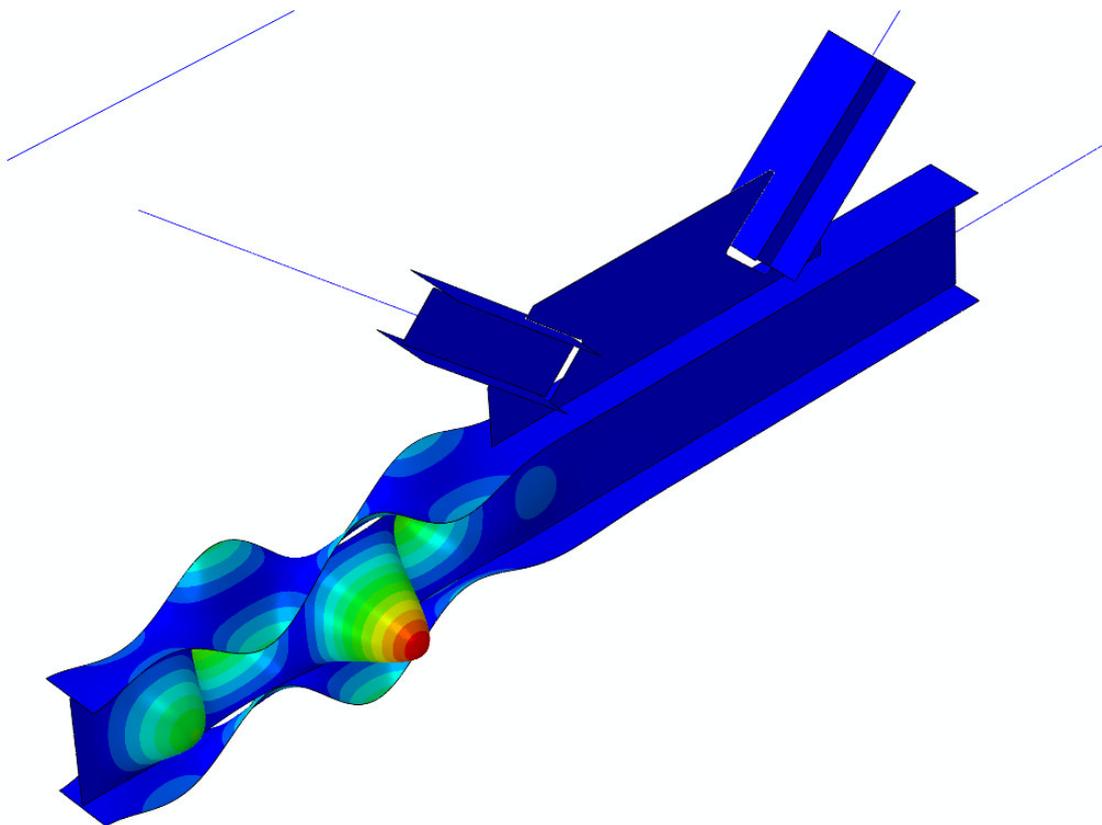


Abb. 1-1 Versagensbild beim Beulen

Da die zurzeit aktuellen Eurocodeauflagen ÖNORM EN 1993-1-1, ÖNORM EN 1993-1-5 und ÖNORM EN 1993-1-8 diese Problemstellung nur am Rande behandeln, sollte diese Diplomarbeit als Diskussionsgrundlage für eine Vereinheitlichung des Berechnungsablaufes bei Fachwerkträgern dienen.

Grundsätzlich werden zurzeit zwei Berechnungsansätze für die Berechnung und Bemessung von Fachwerkträgern (ULS-Zustand) im Hochbau unterschieden. Der eine Ansatz (Konzept I in Abb. 1-2) ist eine starre Betrachtung der Fachwerksknoten, wodurch auch bei Lastangriff alleine in den Knotenpunkten zusätzliche Biegemomente auftreten. Der nachfolgende Knicknachweis beinhaltet dann nicht nur Normalkräfte sondern auch Biegemomente. Der andere Ansatz (Konzept II in Abb. 1-2) beschränkt sich auf eine gelenkige Betrachtung der Fachwerksknoten (Gelenkfachwerk), wodurch nun nur Normalkräfte vorliegen. Dies führt auf einen Biegeknicknachweis mit alleiniger Drucknormalkraft.

Die Berücksichtigung des zusätzlichen Ausbeulens einzelner Komponenten eines Druckstabes ist stark abhängig von den Querschnittsabmessungen und liegt bei Querschnittsklasse 4 vor. Für derartige Querschnitte ist Konzept II nicht vorgesehen.

Auch mit Hinblick auf den Querschnittsnachweis würde eine durchgehende Möglichkeit der Anwendung der Gelenkfachwerktheorie den Berechnungsaufwand erheblich verringern (Beanspruchung durch N alleine). Der Grund dafür ist, dass bei der Berücksichtigung des Beulens Querschnittsausfälle in die Berechnung einfließen, welche wiederum bei einer Momentenbelastung zu einer Asymmetrie des Querschnittes führen. Daraus resultiert die Notwendigkeit der Berücksichtigung dieser Asymmetrie auch in der Widerstandsmomentenberechnung, was einen Mehraufwand bei der Berechnung verursacht und zu einem Querschnittsnachweis zufolge N&M führt.

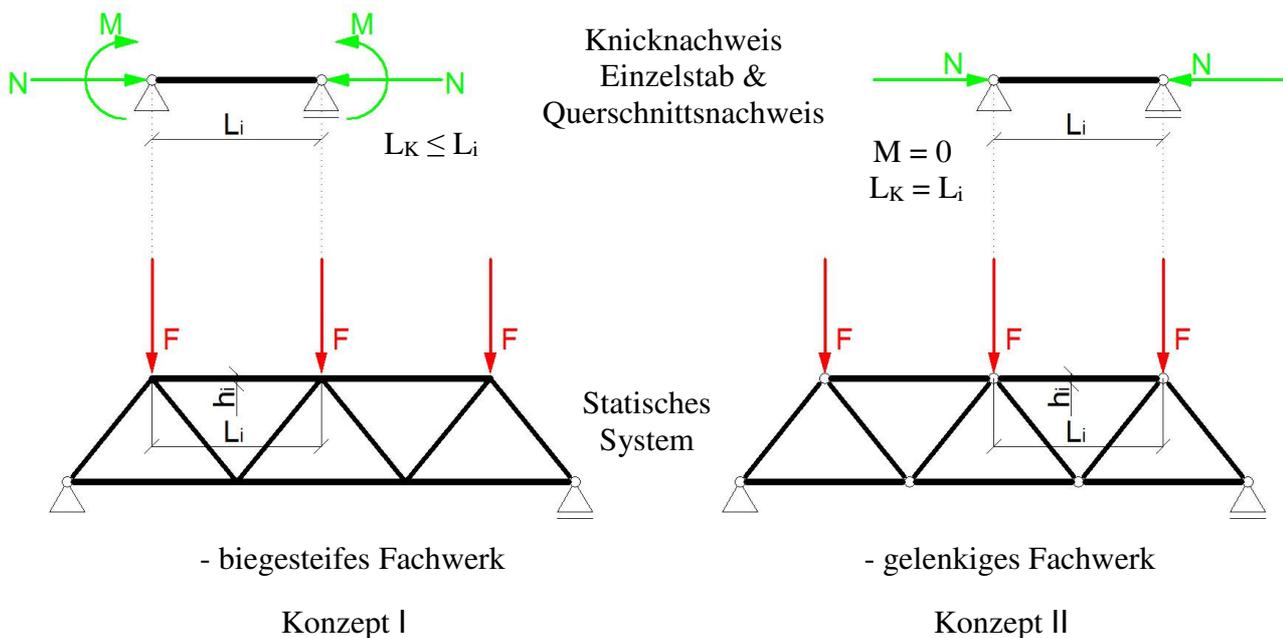


Abb. 1-2 Grundlegende Bemessungsansätze (ULS- Zustand) bei Fachwerkträgern im Hochbau



Abb. 1-3 Realisierte Fachwerkträger der Firma Haslinger (Quelle: Haslinger Stahlbau GmbH)

Im Zuge dieser Arbeit erfolgte auch eine realitätsnahe FE-Modellierung, die die Knotensteifigkeit sowie die Interaktion von Biegeknicken und Beulen erfassen kann. Diese Ergebnisse dienen als Referenzlösung für den Vergleich der beiden Nachweiskonzepte nach Abb. 1-2.

Hauptziel war es herauszuarbeiten, ob eine Betrachtung als Gelenkfachwerk auch im Falle sehr schlanker Druckstäbe, die beulgefährdet sind, möglich ist. Aktuell sind nach Eurocode dafür kompakte Querschnitte (Klasse 1 und 2), die die Ausnutzung der plastischen Querschnittstragfähigkeit zulassen, gefordert. Auch die Schlankheit der Einzelstäbe (L_i/h_i) darf nicht zu gering sein (Abb. 3-16, Seite 36).

1.2 Inhalt und Gliederung der Arbeit

Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über die einzelnen Kapitel, beziehungsweise ein Einblick in die bearbeiteten Themen in dieser Arbeit gegeben.

- **Tragfähigkeit von Fachwerkträgern im Hochbau**
Das Kapitel „Tragfähigkeit von Fachwerkträgern im Hochbau“ weist zwei Unterkapitel auf. Im ersten Unterkapitel werden die bereits vorhandenen Eurocode Nachweise behandelt und im zweiten Punkt wird auf die numerische FE-Modellbildung näher eingegangen, um die realitätsnahe Traglast zu ermitteln.
 - Eurocode-Nachweise
Bei den „Eurocode-Nachweisen“ wurden alle notwendigen Berechnungsschritte zusammenfassend erklärt, mit denen es möglich ist, einen Fachwerksgurt zu bemessen und seine Tragfähigkeit nachzuweisen. Dies beginnt mit der Systemberechnung und reicht dann von der Einteilung in die einzelnen Querschnittsklassen, über einen Querschnittsnachweis (mit und ohne Moment- je nach Konzept), bis hin zum Biegeknicknachweis. Bei den Nachweisen ist die Beulgefährdung zu berücksichtigen.
 - FE- Modelle zur Traglastberechnung
Im Teilabschnitt „FE-Berechnung“ ist das Hintergrundwissen, welches beim numerischen Berechnen dieser Problemstellung wichtig ist, zusammengefasst.

- **Untersuchte Fachwerksysteme**
In diesem Kapitel wird auf die drei untersuchten Systeme näher eingegangen. System 1 und System 2 sind Fachwerkssysteme mit der gleichen Fachwerksgeometrie, jedoch mit unterschiedlichen I-Profil-Querschnitten bei den Fachwerksstäben. System 3 hat wiederum die gleichen Fachwerksabmessungen, jedoch wurde anstatt auf I-Profil-, auf Hohlprofilquerschnitte zurückgegriffen. Es werden die Arbeitsabläufe, welche zum gewünschten Ergebnis führen, näher beschrieben. Die Anlageverhältnisse (System, Querschnitt, Belastung und Lagerung), sowie die erfassten Imperfektionen werden dargestellt.

- **Ergebnisvergleich- FE-Berechnung und Nachweis nach Eurocode**
Im Abschnitt „Ergebnisvergleich- FE-Berechnung und Nachweis nach Eurocode“ wird der Berechnungsablauf von der Eingabe in das Berechnungssheet, bis zum Erhalt der Ergebnisse ausführlich erklärt. Die in den generierten Diagrammen enthaltenen Ergebnisse sind jene aus der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen, einer Eurocode-Berechnung mit Werten aus der linearen Beulanalyse und der reinen Eurocode-Berechnung (Konzept I oder Konzept II, siehe Abb. 1-2 Grundlegende Bemessungsansätze (ULS- Zustand) bei Fachwerkträgern im Hochbau). Die Teilabschnitte dieses Kapitels stimmen mit der Unterteilung der einzelnen Rechenschritte im Berechnungsblatt überein. Dabei wird auch auf die Unterschiede zwischen den Systemen mit

unterschiedlichen Profilquerschnitten Rücksicht genommen. Zusätzlich wird noch Hintergrundwissen zur leichteren Nachvollziehbarkeit des Ablaufes dargelegt und teilweise auch veranschaulicht

- Tragfähigkeit der Systeme

In den Kapiteln „Tragfähigkeitsvergleich für System 1 - Fachwerkträger mit I-Profilen“, „Tragfähigkeitsvergleich für System 2 - Fachwerkträger mit I-Profil und höherem Querschnitt“ und „Tragfähigkeitsvergleich für System 3 - Fachwerkträger mit Hohlprofilen“ werden die aus dem Berechnungssheet erhaltenen Diagramme dargestellt und beschrieben. Die Unterkapitel bei System 1 und System 2 sind hierbei die Stegdickenvariation und die Flanschdickenvariation, sowie die kombinierten Steg- und Flanschdickenvariation. Für System 3 ist nur eine Dickenvariation angeführt, da Hohlprofile konstante Wandstärken über den Querschnitt haben und nicht zwischen Steg und Flansch unterschieden werden kann.

- Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Abschnitte „Zusammenfassung“ und „Schlussfolgerung“ setzen sich mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Ergebnisse und einer sich daraus ergebenden Schlussfolgerung auseinander. Diese Schlussfolgerung und Zusammenfassung sollte als Einstieg in die Diskussion über weitere Untersuchungen von Fachwerkträgern hinsichtlich der Bemessung dienen.

- Anhang

Der abschließende Abschnitt beinhaltet alle getätigten Berechnungen zur besseren Nachvollziehbarkeit.

1.3 Literatur/Normen

- [1] ÖNORM EN 1993: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, 2012
- [2] ÖNORM EN 1993: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile, 2012
- [3] ÖNORM EN 1993: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen, 2012
- [4] Kindmann R., Kraus M., Niebuhr H. J.: Stahlbau Kompakt. Bochum: Verlag Stahleisen GmbH, 2006
- [5] Krapfenbauer T.: Bautabellen. 17. Auflage. Wien: Verlag Jugend & Volk GmbH, 2009
- [6] Fries T. P.: Fem I - Einführung in die FEM. TU Graz: Institut für Baustatik, WS 2013/14

1.4 Software

- [7] Abaqus 6.13-1, Dessault Systèmes, 2013
- [8] RuckZuck 6.0; Mursoft Wörgötter, Kump OEG, Studentenversion 2013

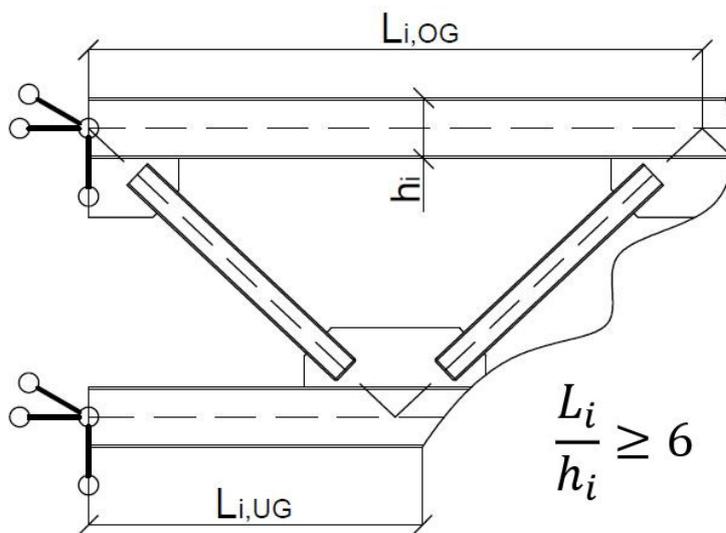
2

2 Tragfähigkeit von Fachwerkträgern im Hochbau

2.1 Eurocode Nachweise

2.1.1 Systemberechnung

Für die Systemberechnung von Fachwerkträgern im Hochbau sind direkte Hinweise in der „Stahlbau Grundnorm“ EN 1993-1-1 nicht enthalten. Lediglich in der Norm für die Bemessung von Anschlüssen EN 1993-1-8 findet sich ein indirekter Hinweis, dass die Berechnung als Gelenkfachwerk nur für Querschnittsklasse 1 und 2 gestattet ist.



Die Momente in den Knoten können, wenn das Verhältnis Systemlänge L_i zu Trägerhöhe h_i größer ist als 6, vernachlässigt werden. Dies bedeutet, dass bei einer Verhältniszahl größer als 6, mit einem gelenkigen Fachwerk gerechnet werden kann. Durch diese Einschränkung ist das Berechnen mittels Gelenkfachwerk bei Querschnitten der Klasse 1 und 2 möglich.

Abb. 2-1 Verhältnis Systemlänge zu Trägerhöhe

2.1.2 Querschnittsnachweise

a) Alleinige Drucknormalkraft N

Bei, mit einer Drucknormalkraft N beaufschlagten, Querschnitten muss ein Querschnittsnachweis geführt werden. Die Querschnittsklassen 1,2 und 3 können mit dem Bruttoquerschnitt (A) nachgewiesen werden. Für Querschnittsklasse 4 sind reduzierte Querschnitte (A_{eff}) zu verwenden.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$$

Die für die Bemessung herangezogene Drucknormalkraft N_{Ed} muss, wie in der obenstehenden Formel gezeigt, kleiner sein als der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit, sonst tritt eine Überbeanspruchung des nachzuweisenden Querschnittes auf.

$$N_{c,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{bzw.} \quad N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} * f_y}{\gamma_{M0}}$$

b) Alleinige Biegebeanspruchung M_y

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit darf im maßgebenden Querschnitt nicht durch den Bemessungswert der Beanspruchung überschritten werden. Die sich daraus ergebende Gleichung ist:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{c,y,Rd}} \leq 1$$

Ein mit einem Biegemoment beaufschlagter Querschnitt kann in den Querschnittsklassen 1 und 2 wie nachfolgend erkennbar mit dem plastischen Widerstandsmoment nachgewiesen werden.

$$M_{c,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} * f_y}{\gamma_{M0}}$$

Querschnitte der Querschnittsklasse 3 können die plastische Momententragfähigkeit nicht entwickeln und daher ist der elastische Querschnittswiderstand zu verwenden.

$$M_{c,y,Rd} = M_{el,y,Rd} = \frac{W_{el,y} * f_y}{\gamma_{M0}}$$

Bei Querschnitten in Klasse 4, muss auf Grund von örtlichen Beulen und der daraus resultierenden Querschnittsausfälle (Teilabschnitt 2.1.5), ein effektives Widerstandsmoment verwendet werden.

$$M_{c,y,Rd} = M_{eff,y,Rd} = \frac{W_{eff,y} * f_y}{\gamma_{M0}}$$

c) Druck und Biegung (N&M_y)

Als konservative Näherung (bei Querschnittsklasse 1 und 2) darf man bei einem gleichzeitigen Auftreten von Druck und Biegung eine lineare Addition der Einzelnachweise vornehmen. Es gelten bei der Verwendung des Widerstandsmomentes und der Querschnittsfläche mit Hinblick auf die Ermittlung der Beanspruchbarkeit die gleichen Voraussetzungen wie bei reinem Druck oder reiner Biegung.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{c,y,Rd}} \leq 1$$

2.1.3 Bauteilnachweise - Biegeknicken

a) Biegeknicken aus der Fachwerksebene

Im Zuge dieser wurde das Versagen aus der Fachwerkebene ausgeschlossen und wurde deshalb nicht näher angeführt

b) Biegeknicken in der Fachwerksebene

- Beanspruchung N&M_y beim biegesteifen Fachwerk

Bei einem mit einer Drucknormalkraft N und einem Biegemoment M_y beaufschlagtem Druckgurt muss nachfolgende Bedingung erfüllt sein:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

N_{Ed} und M_{y,Ed} diese zwei Werte repräsentieren den Bemessungswert der Einwirkung der Drucknormalkraft N_{Ed} und des einwirkenden Momentes M_y um die y-y Achse.

ΔM_{y,Ed} ΔM_{y,Ed} steht für das zusätzliche Biegemoment, welches sich bei Querschnitten der Querschnittsklasse 4, durch die Verschiebung der Querschnittsachse und der daraus entstehenden Exzentrizität, ergibt.

χ_y Abminderungsbeiwert für Biegeknicken um die y-y Achse

χ_{Lt} Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken

Anm.: Der Abminderungsbeiwert χ_{Lt} ist, auf Grund der Lagerungsbedingungen der untersuchten Systeme, 1.

k_{yy} Interaktionsfaktor

Die nachfolgende Tabelle beinhaltet alle Querschnittswerte, die für die Berechnung der charakteristischen Beanspruchbarkeit N_{Rk}= A_i*f_y und M_{y,Rk}= W_i*f_y notwendig sind.

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}
W _z	W _{pl,z}	W _{pl,z}	W _{el,z}	W _{eff,z}
ΔM _{y, Ed}	0	0	0	e _{N,y} N _{Ed}
ΔM _{z, Ed}	0	0	0	e _{N,z} N _{Ed}

Abb. 2-2 Querschnittswerte für Biegeknicken für die einzelnen Querschnittsklassen (Quelle: ÖNORM EN-1993-1-1)

- **Beanspruchung N beim Gelenkfachwerk**

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit darf wie die nachfolgende Gleichung zeigt nicht durch den Bemessungswert der Beanspruchung überschritten werden.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

Bei der Berechnung des Bemessungswertes der Beanspruchbarkeit, bei mit einer Drucknormalkraft N belasteten Druckstäben, wird, wie in der nachfolgenden Gleichung ersichtlich, zwischen den Querschnittsklassen 1,2,3 und der Querschnittsklasse 4 unterschieden.

Querschnittsklassen 1,2 und 3

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}}$$

Querschnittsklasse 4

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A_{eff} * f_y}{\gamma_{M1}}$$

Anm.: Im Zuge dieser Masterarbeit weisen die untersuchten Druckgurte sehr geringe Schlankheiten auf, wodurch Biegeknicken in der Fachwerksebene nicht maßgebend wird.

2.1.4 Querschnittsklassifizierung

Die Klassifizierung eines Querschnittes ist notwendig, um zu überprüfen, ob ein Querschnitt beulgefährdet ist. In Klasse 1 und 2 eingestufte Querschnitte gelten als beulsicher. Klasse 3-Querschnitte erreichen die Streckgrenze in der ungünstigsten Querschnittsfaser und bei Klasse 4-Querschnitten wird die Querschnittstragfähigkeit durch örtliches Beulen begrenzt.

Einseitig gestützte Flansche						
		Gewalzte Querschnitte		Geschweißte Querschnitte		
Klasse	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile				
		freier Rand im Druckbereich		freier Rand im Zugbereich		
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)						
1	$dt \leq 9\varepsilon$	$dt \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$		$dt \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
2	$dt \leq 10\varepsilon$	$dt \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$		$dt \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)		$dt \leq 21\varepsilon \sqrt{k_\sigma}$				
		Für k_σ siehe EN 1993-1-5				
$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Abb. 2-3 Querschnittsklassifizierung einseitig gestützter Querschnitte (Quelle: ÖNORM EN 1993 1-1)

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

Abb. 2-4 Querschnittsklassifizierung beidseitig gestützter Querschnitte (Quelle: ÖNORM EN 1993 1-1)

Abb. 2-3 und Abb. 2-4 zeigen die Größen, welche die Querschnittsklassifizierung definieren. Daraus ist festzustellen, dass die Kenntnis des qualitativen Spannungsverlaufes und der Lagerungsart des zu klassifizierenden Querschnittsteiles für eine Festlegung der Klassifizierungsgrenzen zwingend erforderlich ist. Es wird zwischen beidseitiger Lagerung (Abb. 2-4), z.B. bei I-Profil-Stegen und einseitiger Lagerung (Abb. 2-3), z.B. bei I-Profil-Flanschen, unterschieden. Die Abgrenzung erfolgt dann in Form der Schlankheit des Querschnittsteiles (in diesem Fall mit c/t bezeichnet) und einer materialabhängigen Klassifizierungsgrenze. Bei unsymmetrischer Spannungsverteilung fließt zusätzlich entweder der Faktor ψ oder der Faktor α ein.

2.1.5 Erfassen des Beulens bei Klasse 4- Querschnitten

a) Abminderungsfaktoren ρ für reduzierte Beultragfähigkeit

Ist ein Querschnittteil ein Klasse 4- Querschnitt, so ist nur eine reduzierte Druckspannung ($\rho \cdot f_{yd}$) aufnehmbar. Die Bestimmung der Abminderungsfaktoren ρ ist Grundvoraussetzung für die Ermittlung der effektiven Querschnittswerte, welche in weiterer Folge für den Nachweis bei Querschnitten in Querschnittsklasse 4 als Eingangsparameter herangezogen werden.

Vorab ist es aber notwendig, wie bei der Querschnittsklassifikation, den Lagerungstyp zu bestimmen und eine bezogene Schlankheit zu errechnen, welche die Berechnungsart des Abminderungsfaktors vorgeben, beziehungsweise mitbestimmen. Beim Lagerungstyp wird, wie schon erwähnt, zwischen einseitiger (z.B. halber Flansch eines I-Profiles; Abb. 2-3) und beidseitiger Lagerung (z.B. Steg eines I-Profiles; Abb. 2-4) unterschieden. Die bezogene Plattenschlankheit berechnet sich, wie nachfolgend gezeigt, zu:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\sqrt{f_{yk}}}{\sqrt{\sigma_{cr}}} = \frac{\frac{c}{t}}{28,4 * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}}$$

k_σ wird als Beulwert bezeichnet und ist abhängig von der Spannungsverteilung und der Lagerungsart. Die Beulwerte sind für die unterschiedlichen Spannungsverteilungen und mit den zu unterscheidenden Lagerungsarten in Abb. 2-9 und Abb. 2-10 dargestellt. Die sich, durch die in dieser Diplomarbeit untersuchten Anwendungen, ergebenden Spannungs- und Lagerungstypen sind blau hervorgehoben.

ε berücksichtigt die Festigkeit des betrachteten Querschnittes, mit Bezug auf eine Streckgrenze von $f_y=235$ [N/mm²]. In der nachfolgenden Definition steht f_{yk} für die charakteristische Streckgrenze des verwendeten Profiles in [N/mm²].

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yk}}}$$

Nach Errechnen der bezogenen Schlankheit ist es möglich den geforderten Abminderungsfaktor ρ zu berechnen:

- beidseitig gestützte Querschnittsteile

$$\rho = 1,0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 * \psi}$$

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

- einseitig gestützte Querschnittsteile

$$\rho = 1,0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

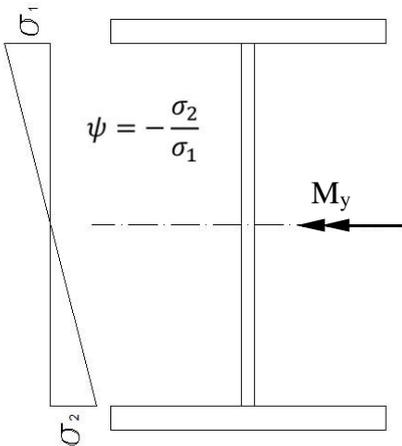


Abb. 2-5 Berechnung von ψ im Falle von Biegebeanspruchung bei einem doppelt sym. Querschnitt

-Beispiel:

Bei den beidseitig gestützten Querschnittsteilen erhält man für die bezogene Grenzsclankheit (Beanspruchung M_y) bei einem symmetrischen Spannungsverlauf $\bar{\lambda}_p = 0,673$, da ψ (der Quotient aus σ_2 und σ_1) den Wert -1 ergibt. Dies gilt für Stege von I-Profilen bei Biegebeanspruchung M_y . Diese Ausführung ist mit der nebenstehenden Abbildung bildlich beschrieben.

b) Effektive Querschnittswerte

Die Abminderung der Beultragfähigkeit einzelner Querschnittsteile kann gleichwertig durch den Ansatz wirksamer Querschnittsteile erfolgen. Wirksame Querschnittbreiten liegen nur für jene Querschnittsteile vor, für die gilt: $\rho < 1$. Bei Vorhandensein von Bauteilen mit großer Schlankheit müssen abgeminderte Querschnittswerte ermittelt werden, um örtliches Beulen zu berücksichtigen. Die Berechnung der effektiven Querschnittswerte erfolgte in dieser Diplomarbeit, wie im Eurocode vorgesehen, ausschließlich durch getrennte Betrachtung des Spannungszustandes resultierend aus der Drucknormalkraft und jenem aus dem maßgebenden Moment. Abb. 2-6 zeigt beispielhaft den wirksamen Querschnitt für ein C-Profil zufolge Normalkraft.

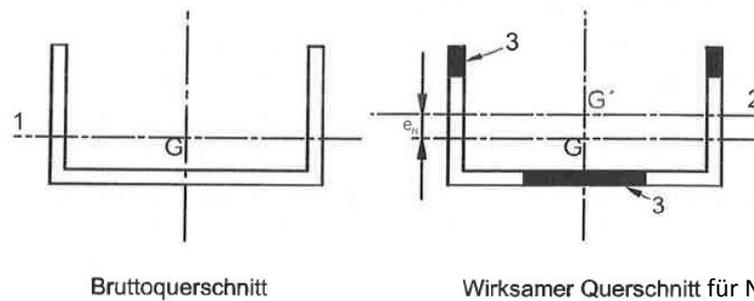


Abb. 2-6 Ausfallender Querschnittsteil bei einem Flansch (Quelle: EN 1993-1-5)

Die beiden oberen freien Enden wirken im Falle einer Normalkraftbelastung nicht mehr mit und es kommt zu einer Verschiebung der Schwerlinie, um den Wert e_N , nach unten. Die **Druckflansche** eines doppelsymmetrischen I-Profiles weisen das gleiche Verhalten auf, das heißt, die Enden dieser wirken nicht mehr mit. Bei Normalkraftbeanspruchung tritt keine Verschiebung der Schwerlinie ein, da die Reduktion symmetrisch erfolgt und dadurch keine Exzentrizitäten entstehen. Nachfolgende Abbildung zeigt dieses symmetrische Verhalten bei Normalkraftbeanspruchung und doppelsymmetrischem I-Profil-Querschnitt.

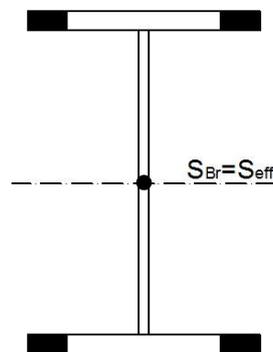


Abb. 2-7 Ausfallende Querschnittsteile der Druckflansche eines doppelsymmetrischen I-Profiles bei Normalkraftbeanspruchung

Die nachfolgende Abbildung zeigt den ausgefallenen Querschnitt bei einem **Steg** eines unter Biegemoment M_y beanspruchten I-Profiles. Auf Grund dieses nun unsymmetrischen Querschnittes

ergibt sich eine Verschiebung der Schwerlinie, was wiederum bei der Berechnung der Widerstandsmomente, wie in den Teilabschnitt 4.4 und 4.5 näher erklärt, berücksichtigt werden muss.

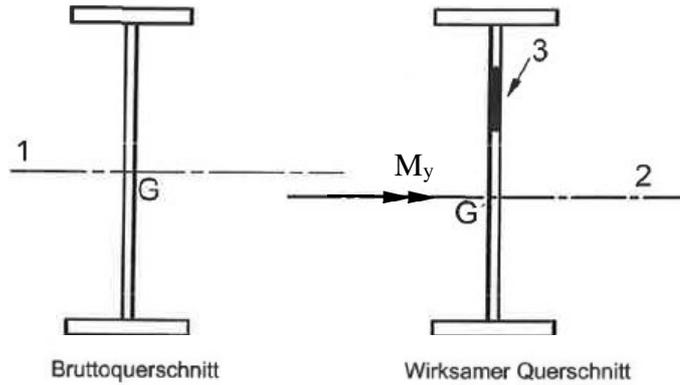


Abb. 2-8 Ausfallender Querschnittsteil bei einem Steg
(Quelle: EN 1993-1-5)

Mit den nachfolgenden zwei Abbildungen wird die Ermittlung der effektiven Breiten für einzelne Querschnittsteile bei verschiedenen Spannungs- und Lagerungsbedingungen mit den dazugehörigen Beulwerten gezeigt. In Abb. 2-9 wird hierbei die Berechnung für beidseits gestützte Querschnittsteile und in Abb. 2-10 die Berechnung für einseitig gestützte Querschnittsteile dargestellt.

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

Abb. 2-9 Spannungsverteilungen und Beulwerte für beidseits gestützte Querschnittsteile
(Quelle: ÖNORM EN 1993-1-5)

Spannungsverteilung (Druck positiv)		Wirksame Breite b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0$: $b_{\text{eff}} = \rho c$			
		$\psi < 0$: $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Beulwert k_{σ}	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21 \psi + 0,07 \psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0$: $b_{\text{eff}} = \rho c$			
		$\psi < 0$: $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Beulwert k_{σ}	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5 \psi + 17,1 \psi^2$	23,8

Abb. 2-10 Spannungsverteilungen und Beulwerte für einseitig gestützte Querschnittsteile
(Quelle: ÖNORM EN 1993-1-5)

Abschließend sind in Abb. 2-11 die maßgebenden Spannungsverläufe, für die Berechnung der effektiven Querschnittswerte, bei einem I-Profil, zufolge N und M_y , dargestellt. Bei Beaufschlagung des Querschnittes mit einer Drucknormalkraft N sind Querschnittsausfälle (nicht schraffiert) unter Umständen in allen Bereichen zu berücksichtigen, da sich eine konstante Drucknormalspannung über den gesamten Querschnitt ergibt. Bei einem Moment M_y ist auch immer ein Querschnittsteil (in Abb. 2-11 Fläche Nr. 5) ohne Abminderung vorhanden. Dies ergibt sich auf Grund der auftretenden Zugspannungen, wo keine Beulgefährdung vorliegt. Weiters ist beim Moment auch der veränderliche Spannungsverlauf am Steg - mit zu berücksichtigender Verschiebung der Schwerlinie - deutlich ersichtlich.

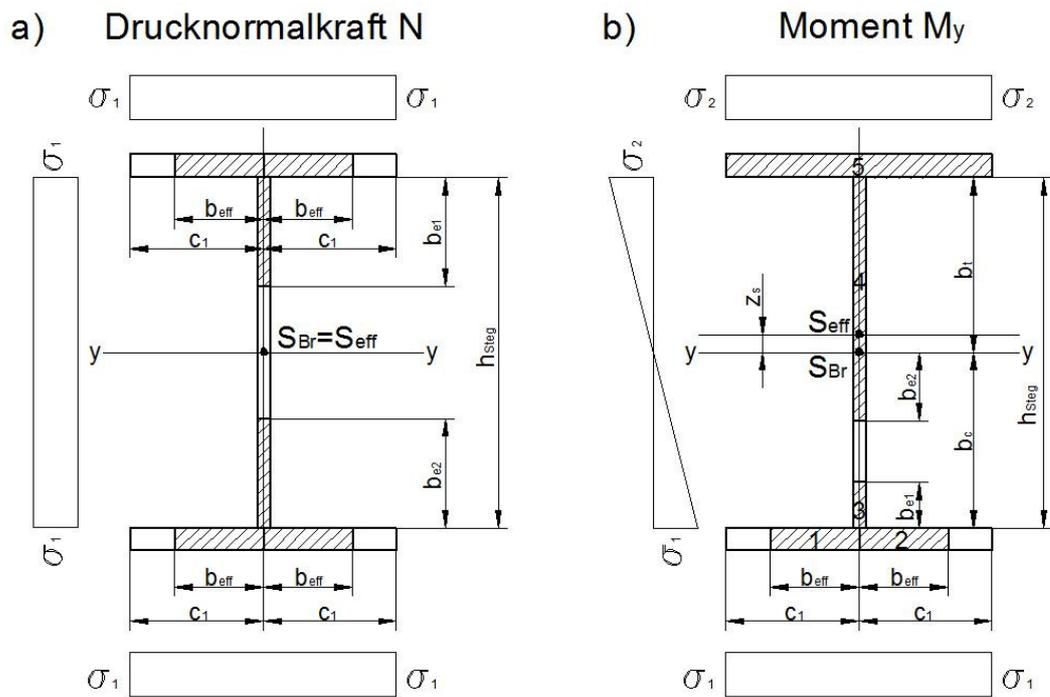


Abb. 2-11 Auftretende Spannungen für die Berechnung der effektiven Breiten am Beispiel eines I-Profiles

2.2 Fe-Modelle zur Traglastermittlung

2.2.1 Modellierung der Fachwerkträger

Die Modellierung erfolgte auf Basis der behandelten Fachwerkträgertypen. Es handelt sich um Fachwerkträger mit I- Profil- Querschnitten, deren Diagonalstäbe nicht direkt mit den Gurtstäben verbunden sind, sondern eingeschlitzte Knotenbleche aufweisen. Es wurde nur jener Druckgurt und in weiterer Folge jene anschließenden Komponenten mit Schalenelementen modelliert, welche direkt versagen, oder möglicherweise am Versagensmechanismus beteiligt sind. All jene Elemente, welche lediglich die Weiterleitung der Kräfte und der globalen Verschiebungen zur Aufgabe hatten, wurden als Stäbe mit den dazugehörigen Profilabmessungen und den sich daraus ergebenden Querschnittswerten modelliert. Diese Art der Modellierung hat eine beträchtliche Zeitersparnis bei den Berechnungen zur Folge, wobei trotzdem eine ausreichende Genauigkeit der Ergebnisse gewährleistet ist.

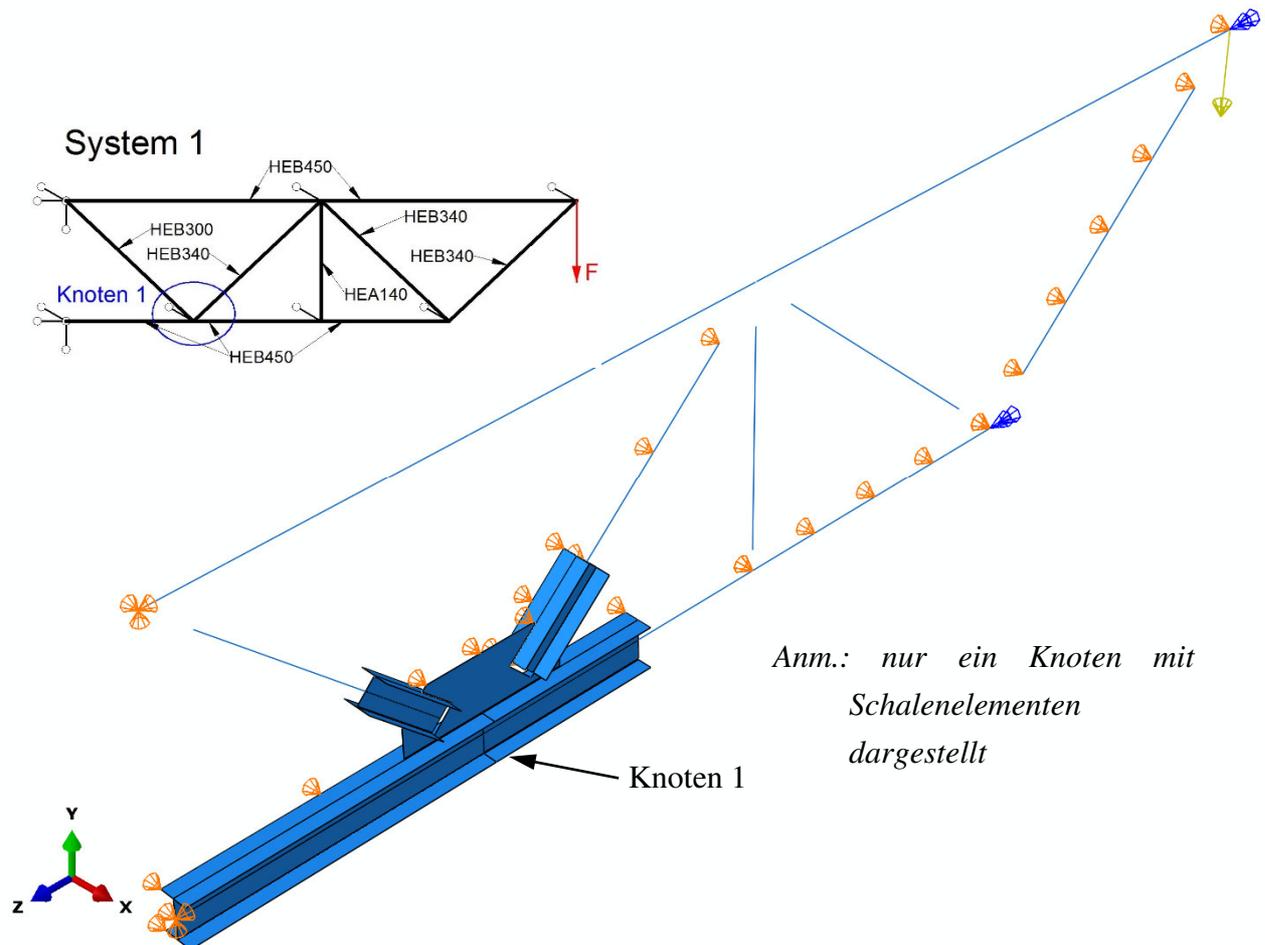


Abb. 2-12 Gesamtansicht des FE-Modells für System 1

2.2.2 Lagerung des Fachwerkträgers

Die Grundvoraussetzung für verwertbare Ergebnisse bei einer numerischen Berechnung ist das richtige Lagern eines Systems. Zu berücksichtigende Effekte bei der Lagerung können globale oder lokale Verschiebungen beziehungsweise Verdrehungen sein, welche entweder zugelassen oder

verhindert werden sollen. Je nachdem welche Versagensmechanismen untersucht werden sollten, das heißt ob lokale oder globale Effekte im Vordergrund stehen, ist es notwendig an verschiedenen Stellen diese Verdrehungen oder auch Verschiebungen ganz zu verhindern oder aber nur zu behindern. Dieses bedingte Zulassen der Verschiebung beziehungsweise Verdrehung kann einem Modell manchmal mehr Realitätsnähe verleihen.

Die für diese Masterarbeit wichtigen Lagerungstypen sind Dreh- und Verschiebungslager, welche in nachfolgender Abbildung (Abb. 2-13) beispielhaft am System 1 dargestellt sind. Die dargestellten Drehlager (blauer Doppelkegel, grün eingekreist) unterbinden ein Verdrehen der Lagerungspunkte um die globale Z-Achse, das bedeutet dass die Behinderung der Verdrehung um die Rotationsachse des Lagerungssymboles erfolgt. Die dargestellten Verschiebungsbehinderungen aus der Trägerebene (globale X-Richtung), welche in Abb. 2-13 in Orange gehalten sind (beispielhaft blau eingekreist), stellen sicher, dass kein Biegeknickversagen aus der Trägerebene erfolgt. Dies muss durch konstruktive Maßnahmen erreicht werden. Wie nachfolgend auch ersichtlich, ist die Orientierung der Rotationsachsen der Lagerungssymbole bei einer dreiwertigen Lagerung gleich jener des Hauptachsensystems (X-, Y-, Z-Richtung).

Die eigentliche Lagerung des Trägers ist durch die roten Kreise hervorgehoben.

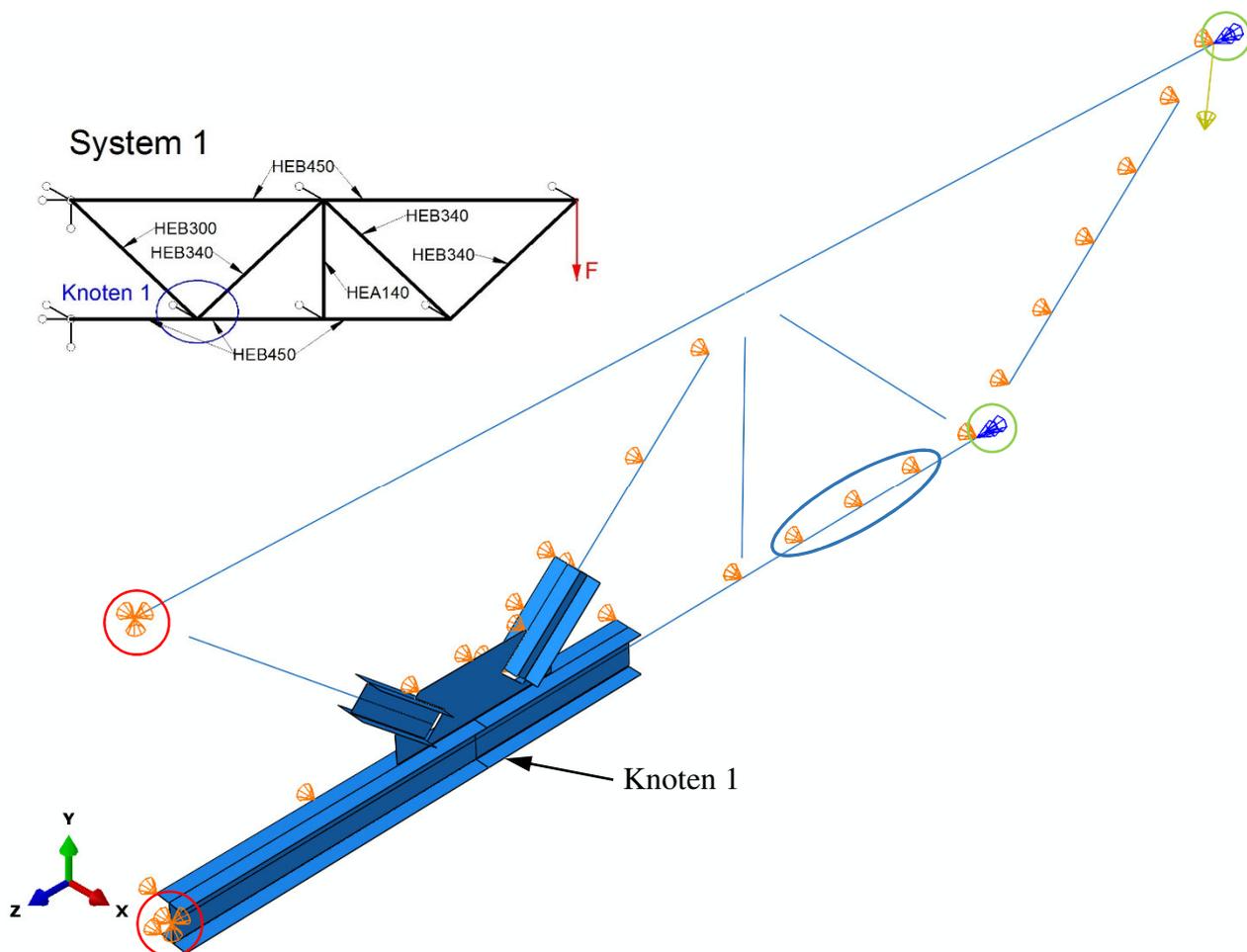


Abb. 2-13 Lagerungsbedingungen für System 1

2.2.3 Verwendetes Elementnetz

Einer der wichtigsten Teilbereiche bei einer FE-Berechnung (Finite Elemente-Berechnung) ist das Festlegen des Elementnetzes der einzelnen Komponenten eines FE-Modelles. Durch dieses Festlegen des Elementnetzes, welches auch „Vernetzen“ genannt wird, beschreibt man einen definierten Bereich im Modell mit Elementen. Diese Elemente können von linearen Dreiecken, über kubische Quadrate bis hin zu Hexaedern mit beliebiger Ordnung jede Form annehmen. Je höher die Ordnung eines Elementes ist, desto genauer kann das zu beschreibende Gebiet abgebildet werden.

Im Abaqus, dem Programm, das zur numerischen Berechnung herangezogen wurde, gibt es bei den mit Schalen-Elementen modellierten Fachwerkskomponenten hinsichtlich der Ordnung, mit quadratisch oder linear, zwei Auswahlmöglichkeiten. Bei den Elementen kann zwischen quadratischen mit 5 oder 6 Freiheitsgraden und dreieckigen unterschieden werden. Die Knotenanzahl bei den quadratischen Elementen ist auf 8 festgelegt und die Anzahl bei den Dreieckselementen ist mit 6 fixiert.

Die, in dieser Masterarbeit für die mit Schalenelementen modellierten Fachwerkskomponenten verwendeten Elemente, waren lineare quadratische Elemente. Bei den, mit Beam-Elementen modellierten, Fachwerkskomponenten wurde auf lineare (geometrische Ordnung) kubische Stabelemente zurückgegriffen.

Die Elementgröße sollte so groß als möglich und gleichzeitig so klein als nötig sein. Der Hintergrund hierin liegt einzig und allein in der Berechnungszeit, da es ab einem gewissen Punkt keinen Sinn mehr macht das Netz zu verfeinern, da sich die Verbesserung der Genauigkeit mit Erhöhung der Elementanzahl immer weniger im Ergebnis niederschlägt.

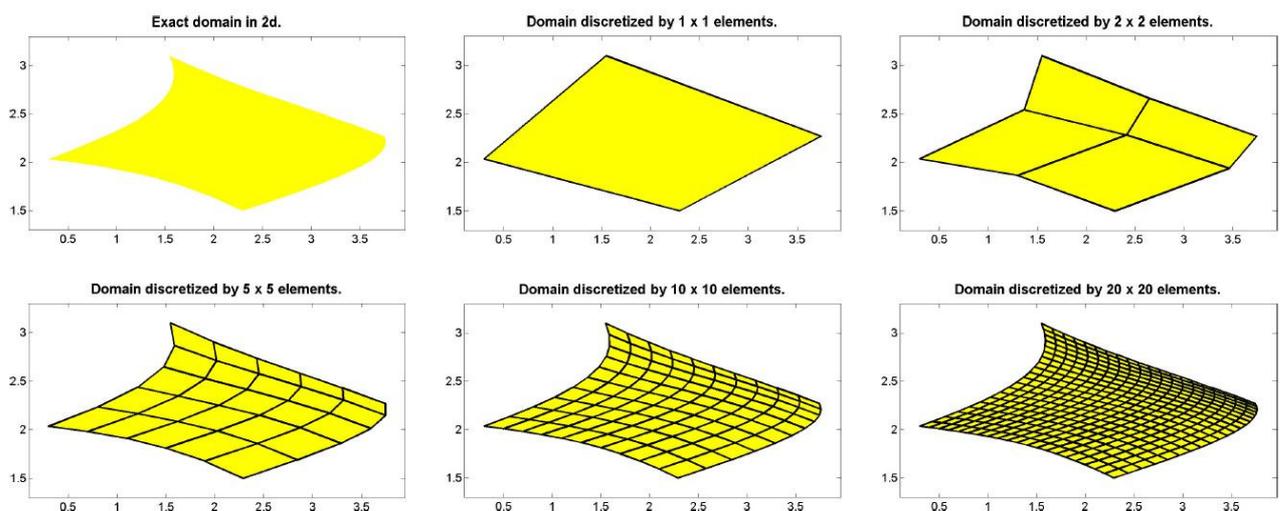


Abb. 2-14 Verfeinerung des Netzes mit linearen Viereckselementen (Quelle: [6])

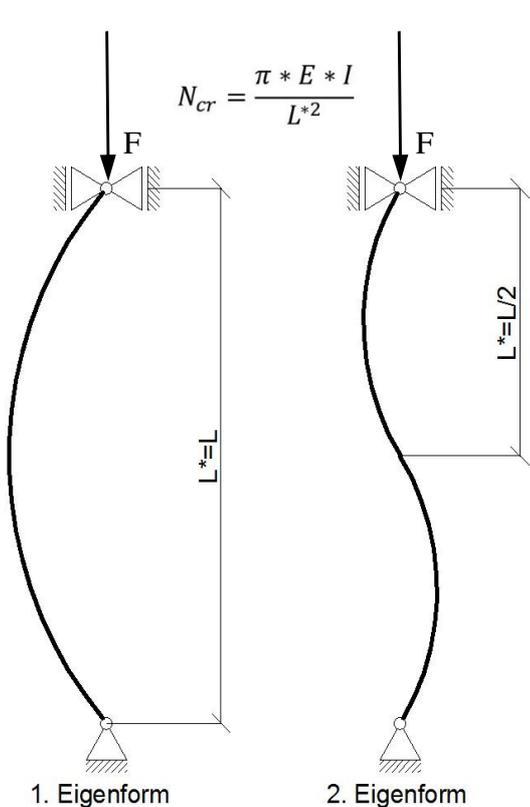
Wie im oberen Teilabschnitt erwähnt, hängt eine ausreichende Beschreibung des Gebietes von der Elementform und der Anzahl der Elemente ab. Abb. 2-14 zeigt dies anhand einer beliebig gewählten 2D-Form, welche durch lineare Viereckselemente abgebildet wird. Es ist ersichtlich, das 20x20

Elemente die Ausgangsform am besten widerspiegelt, jedoch würden für eine numerische Berechnung wahrscheinlich schon 10x10 Elemente ein ausreichend genaues Ergebnis erzielen.

In dieser Arbeit wurden, bei den mit Stabelementen modellierten Komponenten, kubische Elemente mit zwei Knoten und 6 Freiheitsgraden (in Abaqus mit B33 bezeichnet) verwendet und bei den mit Schalenelementen modellierten Komponenten, quadratische Elemente mit 4 Knoten und 5 Freiheitsgraden (in Abaqus mit S4R bezeichnet).

2.2.4 Lineare Beulanalyse (LBA)

Mithilfe der linearen Beulanalyse des verwendeten numerischen Programmes Abaqus, ist es möglich, die Versagensformen im Stabilitätsfall, welche Knick- oder Beuleigenformen genannt werden, eines Systems zu berechnen. Zusätzlich zu diesen Knick- oder Beuleigenformen werden die dazugehörigen Verzweigungslasten bestimmt. Dieses Beulen oder Knicken ist auch als Stabilitätsversagen bekannt und zeichnet sich im Falle einer LBA-Berechnung durch geometrisch lineare und materiell linear elastische Betrachtung aus. Dies bedeutet, dass von einem idealen und somit theoretischen Fall, ohne jegliche Imperfektionen (im nachfolgenden Abschnitt definiert) und linearem Verhalten des Materials beim zu berechnenden System ausgegangen wird. Im Gegensatz dazu steht die geometrische und materielle nichtlineare Analyse mit Imperfektionen, dargestellt in Abschnitt 2.2.6, bei der aber nicht die theoretische Verzweigungslast, sondern die reelle Versagenslast im Vordergrund steht.



Nebenstehend sind beispielhaft für die Berechnung von Eigenwerten mit dazugehörigen Eigenformen Pendelstäbe und die, für die Berechnung der jeweiligen Verzweigungslast notwendige, Knickformel dargestellt. Die abgebildeten Systeme sind beidseitig gelenkig gelagerte Pendelstäbe, welche durch eine Kraft F belastet sind. Es wird von linear elastischem Materialverhalten (in der Knickformel durch den E-Modul repräsentiert), und keiner Imperfektion ausgegangen. Sobald die kritische Verzweigungslast (N_{cr}) erreicht ist, würden sich bei den Pendelstäben die nebenstehenden Knickeigenformen einstellen. Für die erste Eigenform würde zur Ermittlung der Versagenslast die Länge L als Knicklänge in die Berechnung einfließen. Im Falle der zweiten Eigenform wäre die zu verwendende Knicklänge der Abstand zwischen dem Wendepunkt der Knickeigenform und dem Lagerungsgelenk, was die halbe Stablänge, $L^*=L/2$, ergeben würde.

Abb. 2-15 Pendelstäbe mit Knickformen und Knickformel

Eine lineare Beulanalyse des oben abgebildeten Pendelstabes, welche mit einem numerischen Programm durchgeführt werden würde, würde das gleiche Ergebnis wie die, in Abb. 2-15 dargestellte und im danebenstehenden Absatz beschriebene, beispielhafte Berechnung ergeben. Bei einer LBA-Berechnung eines beliebigen Systems mithilfe eines numerischen Programmes würde man die oben angesprochenen Eigenwerte und Eigenformen erhalten, was wiederum die Basis für den Ansatz einer möglichen Imperfektion (Abschnitt 2.2.5) im Falle einer geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse wäre.

2.2.5 Imperfektionen

Bei Stabilitätsgefährdung haben Imperfektionen Einfluss auf die Tragfähigkeit und müssen in entsprechender Form in die Berechnung einfließen. Diese Abweichungen von der Sollform können sich in Schiefstellungen oder Krümmungen niederschlagen und werden als geometrische Imperfektionen bezeichnet. Da diese Imperfektionen einen gravierenden Einfluss auf das Tragverhalten und in weiterer Folge auf die maximale Traglast haben, ist eine Berücksichtigung in entsprechendem Ausmaß sinnvoll und vorgeschrieben. Üblicherweise erfolgt ein Ansatz der geometrischen Imperfektionen affin zum Verlauf der Eigenform. Diese Eigenformen, oder auch Moden genannt, spiegeln die Versagensform des Systems bei einem bestimmten Eigenwert wieder und werden in der FE-Berechnung über eine „linear buckling analysis“ (Abschnitt 2.2.4) gewonnen. Die Höhe der Belastung, bei der das System eine bestimmte Eigenform aufweist wird als Eigenwert bezeichnet. In der nachfolgenden Abbildung ist beispielhaft die 1. Eigenform des System 2 ($t_s=19,8$ [mm] und $t_f=26$ [mm]) ersichtlich, welche vom lokalen Beulen dominiert ist.

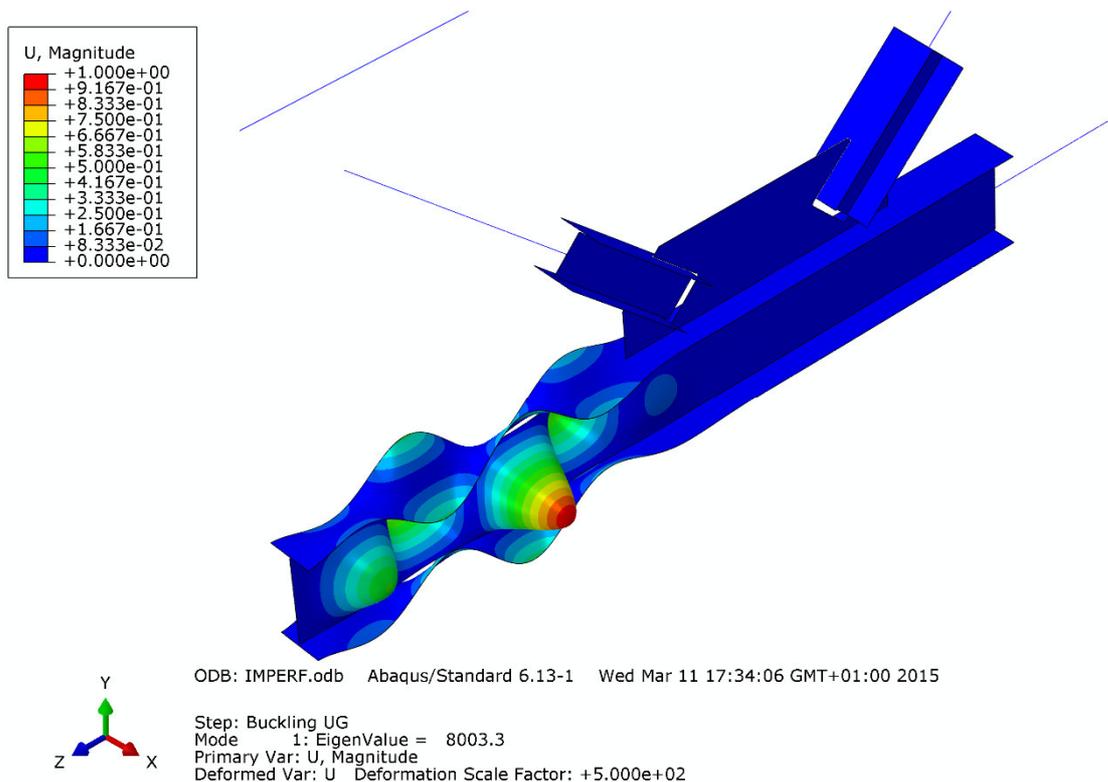


Abb. 2-16 1. Eigenform des Ausgangsquerschnittes ($t_s=19,8$ [mm] und $t_f=26$ [mm]) von System 2

In der Legende zu Abb. 2-16 steht ein Eigenwert (mit EigenValue bezeichnet) von 8003,3, welcher der ersten Eigenform (mit Mode bezeichnet) zugeschrieben wird. Das bedeutet, dass die Verzweigungslast gegenüber der vorgegebenen Referenzlast ($F=1$ [kN]), um den Faktor 8003,3 höher ist.

2.2.6 Geometrische und materielle nichtlineare Analyse mit Imperfektion (GMNIA)

Eine geometrische und materielle nichtlineare Analyse dient zur Ermittlung von Traglasten beliebiger Systeme. Dabei wird je nach Materialgesetz die materielle Nichtlinearität und durch das Miteinbeziehen des Einflusses der Verformungen auf das Ergebnis, die geometrische Nichtlinearität, berücksichtigt. Je nach Bauteil kann zusätzlich eine bestimmte Imperfektion (Abschnitt 2.2.5), welche die geometrische Nichtlinearität verstärkt, miteinbezogen werden.

- Materialverhalten

Da in dieser Arbeit nur das linear elastische ideal plastische Materialgesetz verwendet worden ist, ist für die materielle Nichtlinearität in diesem Teil lediglich dieses Gesetz erklärt.

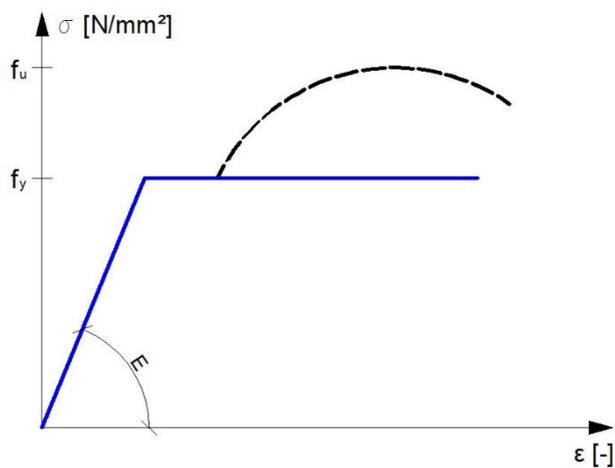


Abb. 2-17 Linear elastisches - ideal plastisches Materialgesetz

Das nebenstehende vereinfachte linear elastische - ideal plastische Materialgesetz (blaue Linie) für Baustahl, zeichnet sich durch seine Bilinearität (steigender Ast und gleichbleibender Ast) aus und ist eine theoretische Annahme. Der schwarz strichlierte Bogen und die blauen Linien bis zu diesem schwarzen Bogen wären das reale Verhalten eines Baustahles.

Der vom Nullpunkt steigende Ast repräsentiert das linear elastische Verhalten des Stahles, oder auch

Hook'sches Gesetz genannt, welches durch seinen Winkel auch den E-Modul definiert. Nach dieser Gerade, beziehungsweise bei Erreichen der Streckgrenze f_y würde sich der Stahl bei Weiterbelastung bis zu einer bestimmten Dehnung auf dem, zwischen der Hook'schen Gerade und der schwarz strichlierten Linie befindlichen, Spannungsplateau dehnen (auch Fließzone genannt) und anschließend verfestigen (schwarze, strichlierte Linie vor dem Peak, zwischen f_y und f_u). Nach dem Peak (nach Erreichen der Zugfestigkeit f_u) würde eine Einschnürung, das heißt eine Verringerung des Querschnittes beginnen, beziehungsweise stattfinden, bis schlussendlich der Bruch eintritt. Dieses Verhalten zeigt sich im einachsigen Zugversuch.

Die Vereinfachung, die sich durch das Weglassen der Verfestigung bei der Anwendung des linear elastischen ideal - plastischen Materialgesetzes ergibt, liefert hinreichend genaue Ergebnisse in den hier untersuchten Stabilitätsfällen.

3 Untersuchte Systeme

3.1 System 1 - Fachwerkträger mit I-Profilen und eingeschlitztem Knotenblech

3.1.1 Anlageverhältnisse

Um einen möglichst großen Praxisbezug gewährleisten zu können, erfolgte die Systemberechnung auf Basis eines bereits bestehenden und gefertigten Fachwerkträgers der Firma Haslinger. Bei diesem bestehenden Fachwerk waren Änderungen bei den Querschnitten der Druckgurte erforderlich, um lokales Beulen abzubilden. Weiters wurde nur ein Teilausschnitt mit geänderten Lagerungsbedingungen (Kragträger) modelliert.

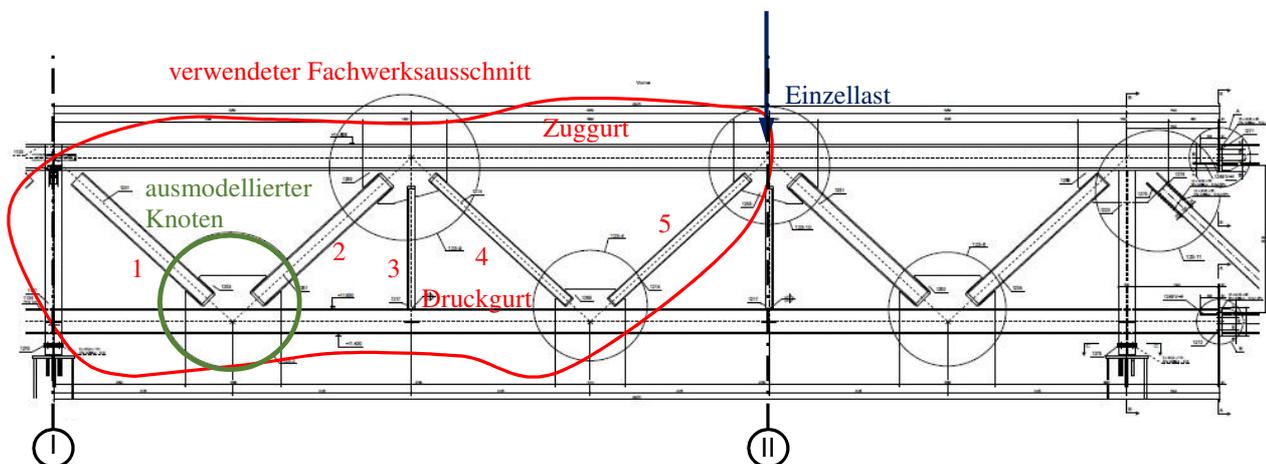


Abb. 3-1 Bestehendes Fachwerk Haslinger

Daher ist der in Abb. 3-1 gekennzeichnete Abschnitt am Ober- und Untergurt jeweils mit einer dreiwertigen Lagerung (Achse I) und nur am „Auskragungsende“ (Achse II) mit einer Einzellast versehen worden. Die Ober- und Untergurte sind in diesem Fachwerk mit einem HEB 450 Profil konzipiert worden, wobei im numerischen Modell gleichwertige Schweißprofile untersucht werden sollten und daher auf den Ausrundungsradius verzichtet worden ist. Der in Abb. 3-1 mit 1 gekennzeichnete Diagonalstab ist ein HEB 300. Die Stäbe 2, 4 und 5 haben eine Dimension von HEB 340 und Stab 3 ist ein HEA 140.

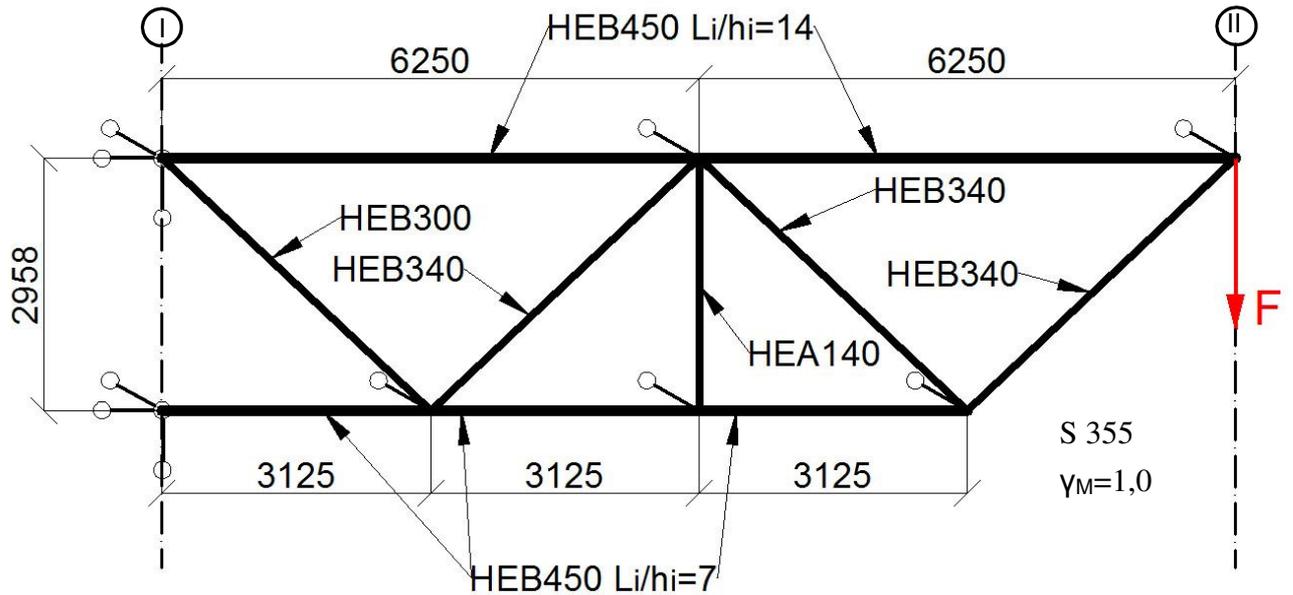


Abb. 3-2 Anlageverhältnisse von System 1

Nachfolgend ist die Geometrie des mit Schalenelementen modellierten Knotens (System 1) dargestellt.

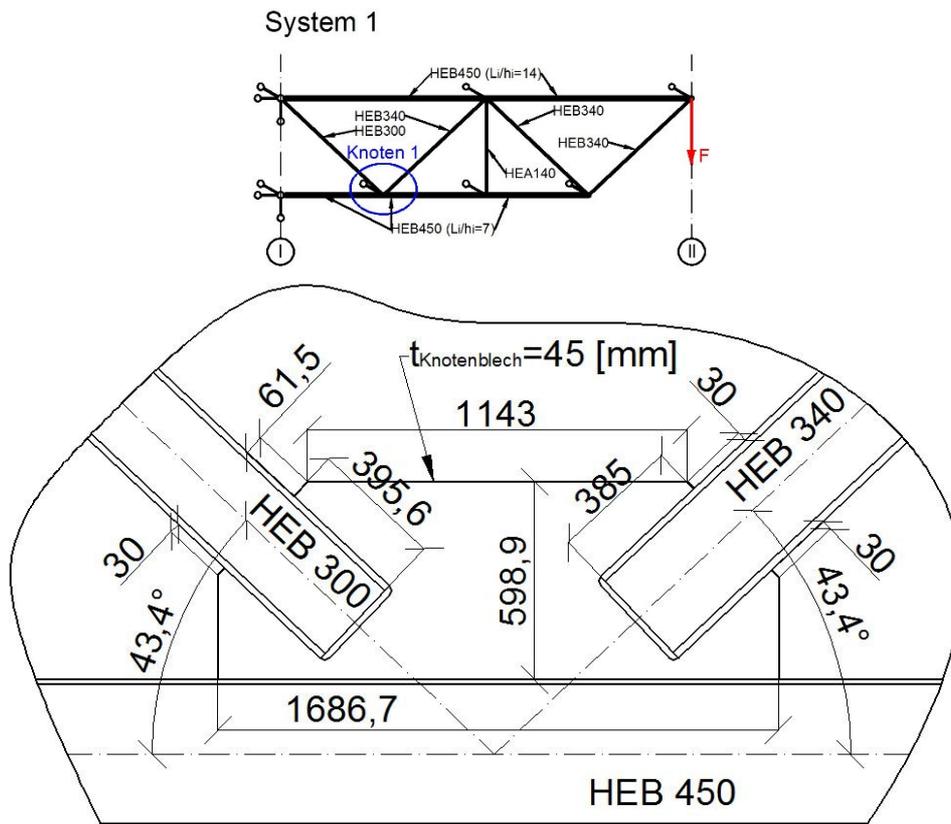


Abb. 3-3 Geometrie von Knoten 1 - System 1

a) Flanschdickenvariation

b_{Fl}	t_f	h_{Steg}	t_s
300,0	26,0	398,0	14,0
	20,0		14,0
	14,0		14,0
	10,0		14,0

Abb. 3-4 Querschnittsgrößen der Flanschdickenvariation - System 1

Die nebenstehende Tabelle zeigt die unterschiedlichen Querschnittsgrößen bei der Flanschdickenvariation von System 1. Die blau hinterlegten Dicken sind jene des Ausgangsquerschnittes. Alle anderen angeführten Dicken sind die einzelnen Stufen bei der Verringerung der Flanschdicke. Der Ausgangsquerschnitt entspricht den Abmessungen eines HEB 450.

b) Stegdickenvariation

b_{Fl}	t_f	h_{Steg}	t_s
300,0	26,0	398,0	14,0
	26,0		11,4
	26,0		8,5
	26,0		6,9

Abb. 3-5 Querschnittsgrößen bei der Stegdickenvariation

Die nebenstehende Tabelle zeigt die unterschiedlichen Querschnittsgrößen bei der Stegdickenvariation von System 1. Die blau hinterlegten Dicken sind wiederum jene des Ausgangsquerschnittes. Alle anderen angeführten Dicken sind die einzelnen Stufen bei der Verringerung der Stegdicke. Der Ausgangsquerschnitt entspricht den Abmessungen eines HEB 450.

c) Kombinierte Steg- Flanschdickenvariation

b_{Fl}	t_f	h_{Steg}	t_s
300,0	26,0	398,0	14,0
	20,0		11,4
	14,0		8,5
	10,0		6,9

Abb. 3-6 Querschnittsgrößen bei der kombinierten Steg- Flanschdickenvariation

Die nebenstehende Tabelle zeigt die unterschiedlichen Querschnittsgrößen bei der kombinierten Steg- Flanschdickenvariation von System 1. Die blau hinterlegten Dicken sind wiederum jene des Ausgangsquerschnittes. Alle anderen angeführten Dicken sind die einzelnen Stufen bei der gleichzeitigen Verringerung der beiden Dicken. Der Ausgangsquerschnitt entspricht den Abmessungen eines HEB 450.

Anm.: Bei der Systemberechnung wurden die geänderten Querschnittswerte berücksichtigt (für Obergurt und Untergurt immer mit dem Bruttoquerschnitt gerechnet).

3.1.2 FE-Modellierung von System 1

Alle Fachwerkskomponenten, welche innerhalb des grünen Splines von Abb. 3-7 liegen, sind mit Shell-/Schalenelementen modelliert worden. Alle Fachwerkskomponenten, welche außerhalb dieses grünen Splines liegen, sind Beam-/Stabelemente.

Die Verbindung der Beam/Stab-Elemente in den einzelnen Knotenpunkten erfolgte wie in Abb. 3-7 ersichtlich (schwarz hinterlegt) mittels „multi point constraints“ (MPC). Dieser Verbindungstyp erzeugt eine starre Verbindung der Endpunkte der einzelnen Beam-Elemente (in Abaqus als „slave nodes“ bezeichnet) ausgehend von einem definierten Punkt (in Abaqus als „master nodes“ bezeichnet), was den Zustand eines Fachwerkes in Natura in diesem Fall am besten widerspiegelt. Die Kopplung zwischen den Shell-Elementen und den daran anschließenden Beam-Elementen (in Abb. 3-7 mit rot hervorgehoben) erfolgte über „tie constraints“, da diese Art der Verbindung keine Relativbewegungen zwischen den Elementen zulässt und sich daher sehr gut für diesen Anwendungsbereich eignet. Für alle Shell-Elemente untereinander ist ebenfalls die notwendige Beziehung mittels „tie constraints“ hergestellt worden, da sich dies als am sinnvollsten herausstellte.

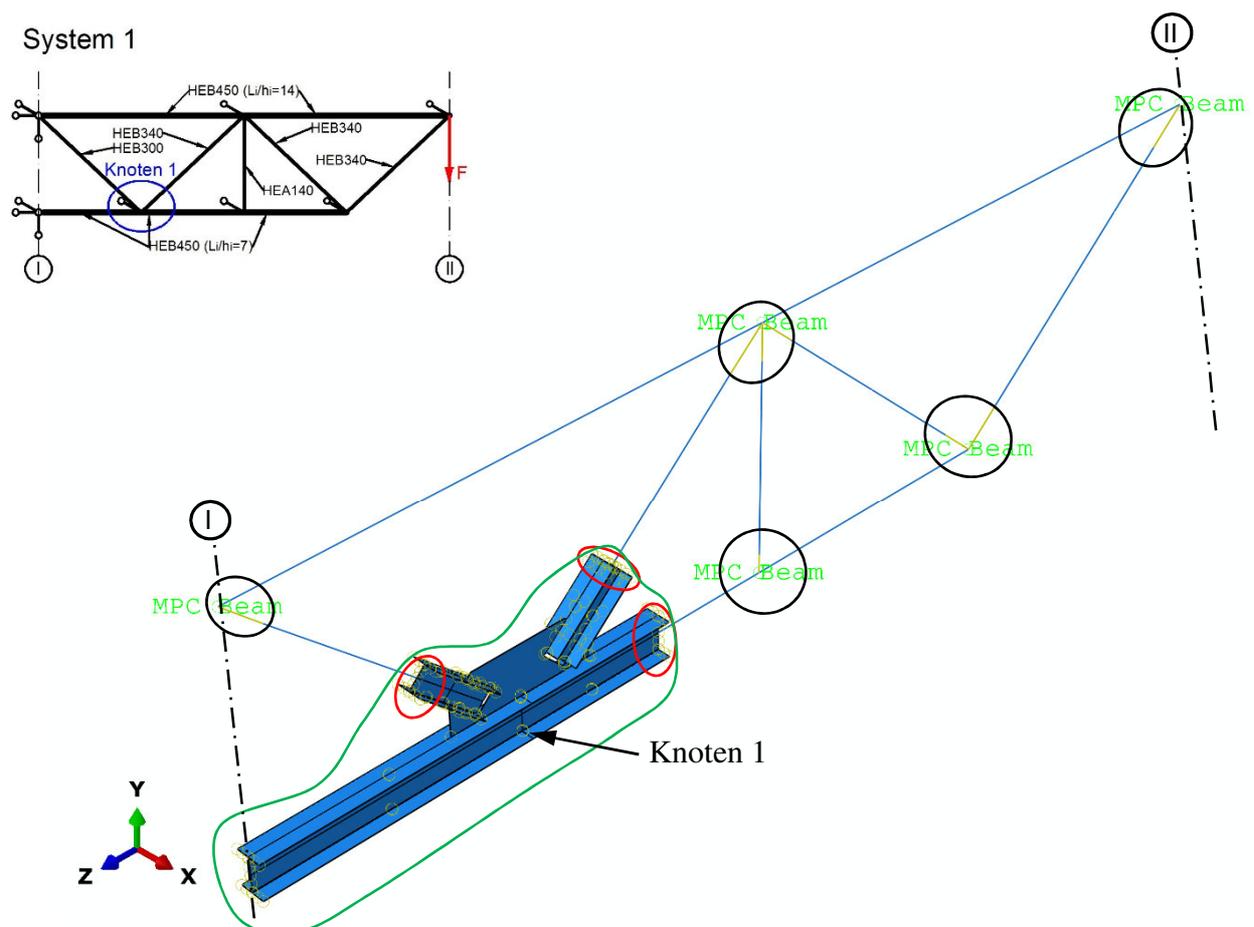


Abb. 3-7 Knotenmodellierung von System 1

Anm.: Wie in Abb. 3-7 ersichtlich, wurde nur ein Knoten (Knoten 1) mit Schalenelementen ausmodelliert. Alle anderen Knoten wurden nicht im Detail dargestellt, da dort die Beanspruchung viel geringer ist und daher kein Einfluss auf den maßgebenden Druckstab entsteht.

3.1.3 Lagerung des Fachwerkträgers (System 1)

Um die gewünschten Ergebnisse (Beulen des Fachwerkdruckgurtes und in weiterer Folge Ermittlung der Versagenslast) bestmöglich zu erreichen sind für die echten Lager des Zug- und Druckgurtes jeweils dreiwertige Lager gewählt worden (Abb. 3-8 rote Kreise; Achse I). Effekte aus der Ebene, das heißt Verschiebungen in X-Richtung wurden, wie in Abb. 3-8 dargestellt, mit Hilfe von künstlichen Lagerungen an und zwischen den einzelnen Knoten unterbunden. Damit die zu untersuchenden lokalen Beuleffekte vorherrschend sind, mussten zusätzlich die Flansche des Druckgurtes und der ersten Druckdiagonale am Auflager, sowie das Knotenblech in X-Richtung gehalten werden. Beispielhaft sind in nachfolgender Abbildung einige Lagerungen der ersten Druckdiagonale am Auflager mit einer schwarzen Ellipse hervorgehoben. Zusätzlich wurden noch die Knotenpunkte der letzten Druckdiagonale (Achse II) gegen Verdrehung gehalten (hellgrüner Kreis). Durch all diese Maßnahmen wurde gewährleistet, dass kein Versagen aus der Fachwerksebene auftritt.

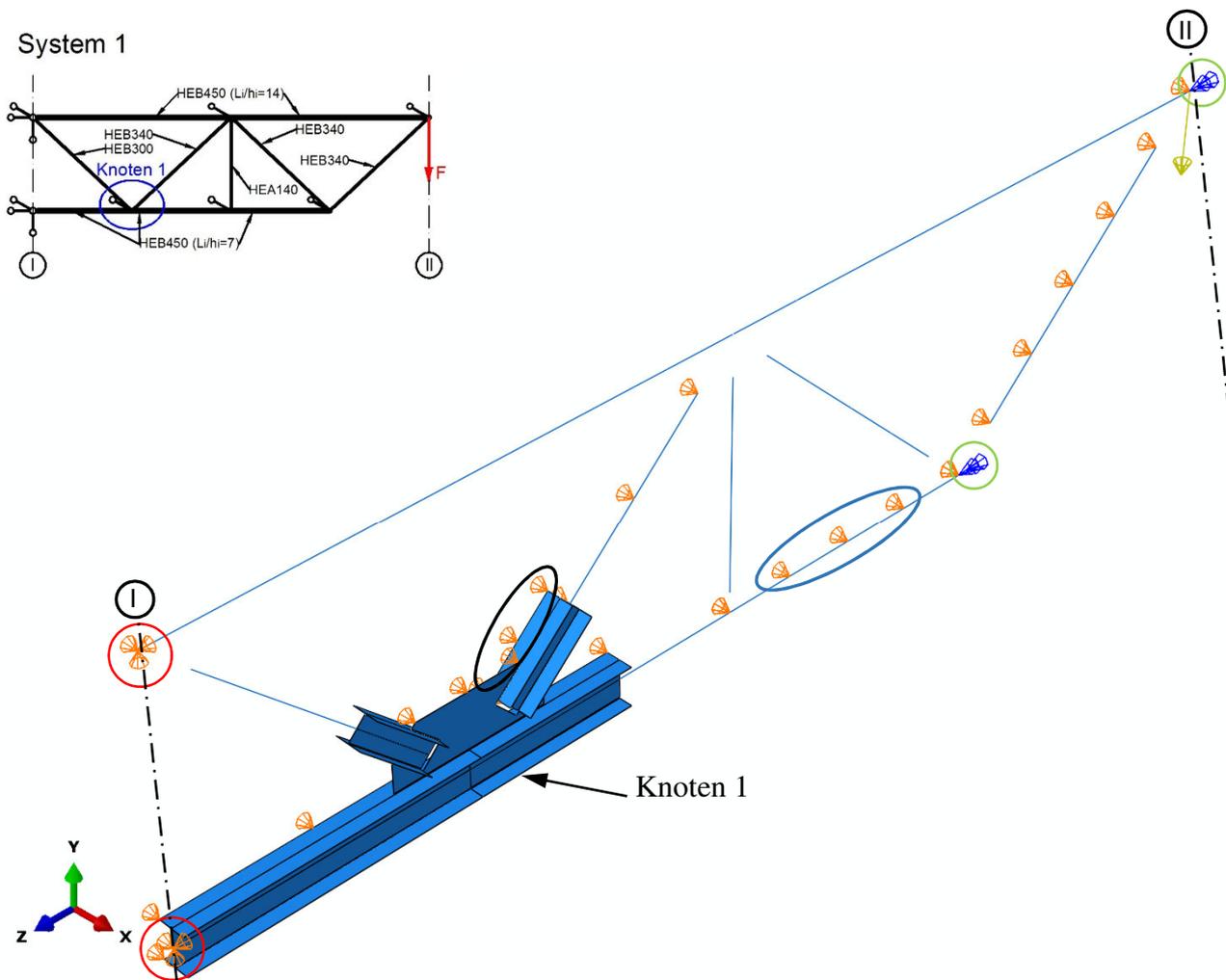


Abb. 3-8 Lagerungsbedingungen von System 1

3.1.4 FE-Netz im Knotenbereich bei System 1

Bei allen Knotenkomponenten, welche mit Shell-Elementen modelliert wurden, inklusive dem zu untersuchenden Druckgurt, wurde eine Maschenweite von 10 [mm] für sinnvoll und auch als ausreichend erachtet und daher mit dieser Größe gewählt. Um ungünstige Einflüsse aller Art auf die Shell-Komponenten zu vermeiden, wurde auch für die direkt daran anschließenden Beam-Elemente eine Elementgröße von 10 [mm] gewählt. Beim Knotenblech ist auf eine etwas größere Maschenweite von 20 [mm] zurückgegriffen worden, da die Kraftübertragung im Vordergrund stand und ein Versagen jeglicher Art nicht zu erwarten war. Für die restlichen Stabelemente war es ausreichend eine Elementgröße von 150 [mm] zu wählen, da diese nur die Übertragung globaler Effekte zur Aufgabe hatten und daher eine untergeordnete Rolle spielten.

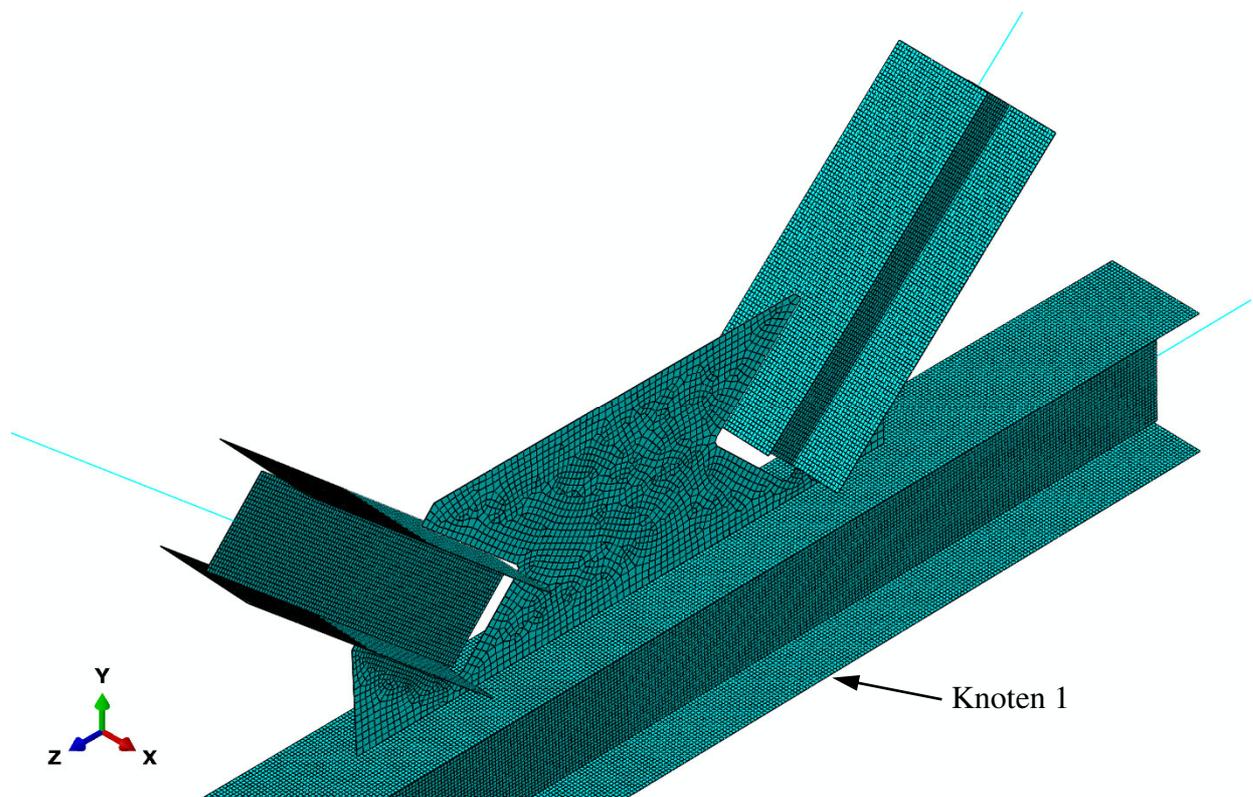


Abb. 3-9 Vernetzter Knoten 1 von System 1

3.1.5 Geometrische Ersatzimperfektionen bei System 1

Anm.: In dieser Arbeit wurden keine globalen Imperfektionen berücksichtigt, da, wie der nachfolgende Teilabschnitt 3.1.6 beispielhaft zeigt, die Schlankheiten der gewählten I-Profile gering waren und dadurch der maßgebende Druckgurt keine Biegeknickgefährdung aufwies.

Die geometrischen Ersatzimperfektion bei dominanten Beuleigenformen wurden bei den FE-Berechnungen zur Variation der Flanschdicken mit $e_{0,max}=b/2/50$ (b = Flanschbreite beziehungsweise Trägerbreite; Abb. 3-11) festgelegt, welche hier der 6. Eigenform des Systems entsprechen. Hierbei ist bewusst nicht auf die 1. Eigenform zurückgegriffen worden, da erst beim 6. Eigenwert die erste Beule circa auf Höhe des Schnittpunktes der Diagonalenachsen und der Druckgurtachse auftritt (rote Ellipse in Abb. 3-10). Um die Vergleichbarkeit der einzelnen Ergebnisse zu wahren, war es auch sinnvoll immer die gleiche Eigenform, vom jedes Mal identen Querschnitt des Druckgurtes zu verwenden. Zu diesem Zweck ist die in Abb. 3-10 dargestellte 6. Eigenform, bei einer Flanschdicke von $t_f= 14$ [mm] und einer Stegdicke von $t_s= 14$ [mm] (beim Druckgurt), gewählt worden.

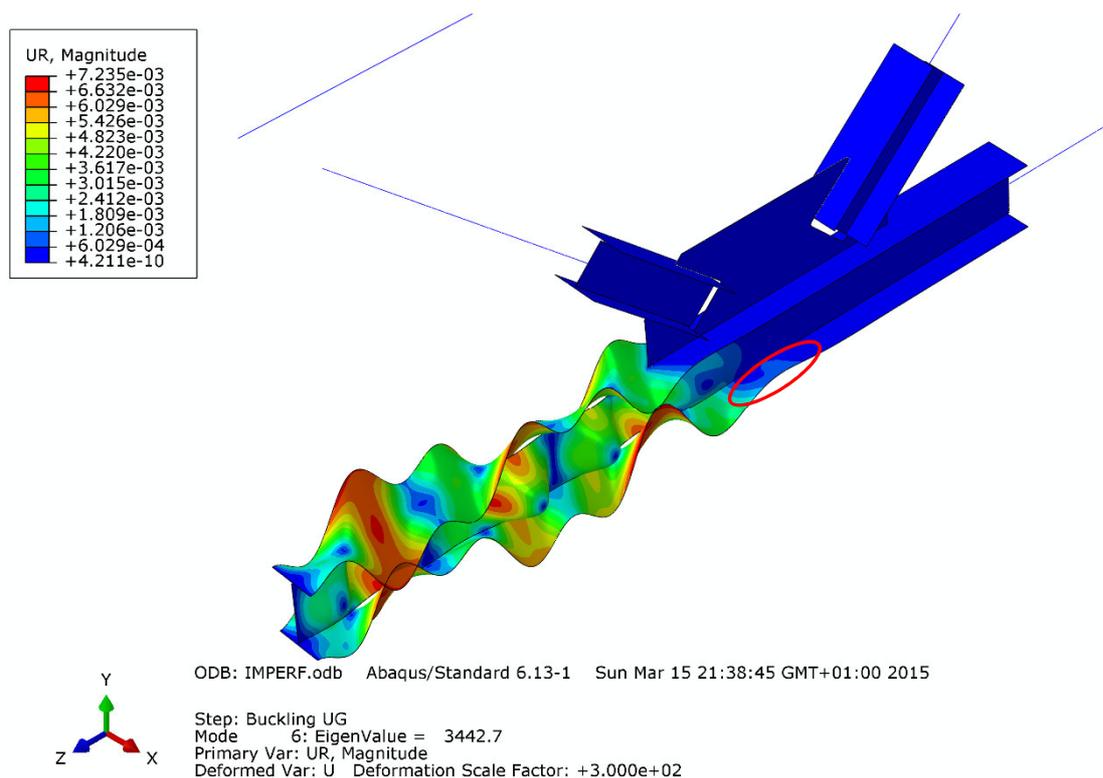


Abb. 3-10 6. Eigenform von System 1 bei $t_s= 14$ [mm] und $t_f= 14$ [mm]

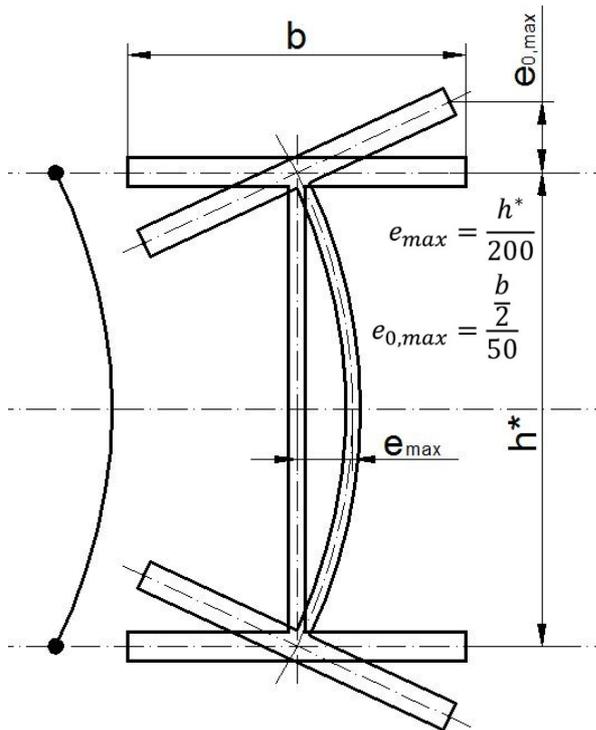


Abb. 3-11 Maße für Imperfektion beim I-Profil für Stegbeulen

Bei den FE-Berechnungen zur Variation der Stegdicke für den Druckgurt des Fachwerkträgers ist eine geometrische Ersatzimperfektion von $e_{max}=h^*/200$ gewählt worden. Wie in der nebenstehenden Abbildung ersichtlich ist h^* der mittlere Abstand zwischen den Gurtflanschen, da beim Beulen mit einer größeren Höhe als der reinen Steghöhe zu rechnen war. Diese größere Höhe ist auf das Zusammenwirken zwischen Flansch und Steg während des Ausbeulens zurückzuführen. Der in Abb. 3-11 abgebildete, fiktive beidseitig gelenkig gelagerte Stab stellt die Beulfigur des Steges dar.

Bei der Variation der Stegdicken für den Druckgurt wurde für die Berücksichtigung der Imperfektion auf die 11. Eigenform des Systems mit $t_s= 14$ [mm] zurückgegriffen. Die erste Eigenform wurde deshalb nicht gewählt, da wie für Abb. 3-10 bereits für den Flansch beschrieben, die 11. Eigenform im kritischen Bereich des Fachwerkträgers zutreffender ist.

Dieses Vorgehen hatte abermals die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der einzelnen stegdickenvariieren Systeme bei der Auswertung als Hintergrund.

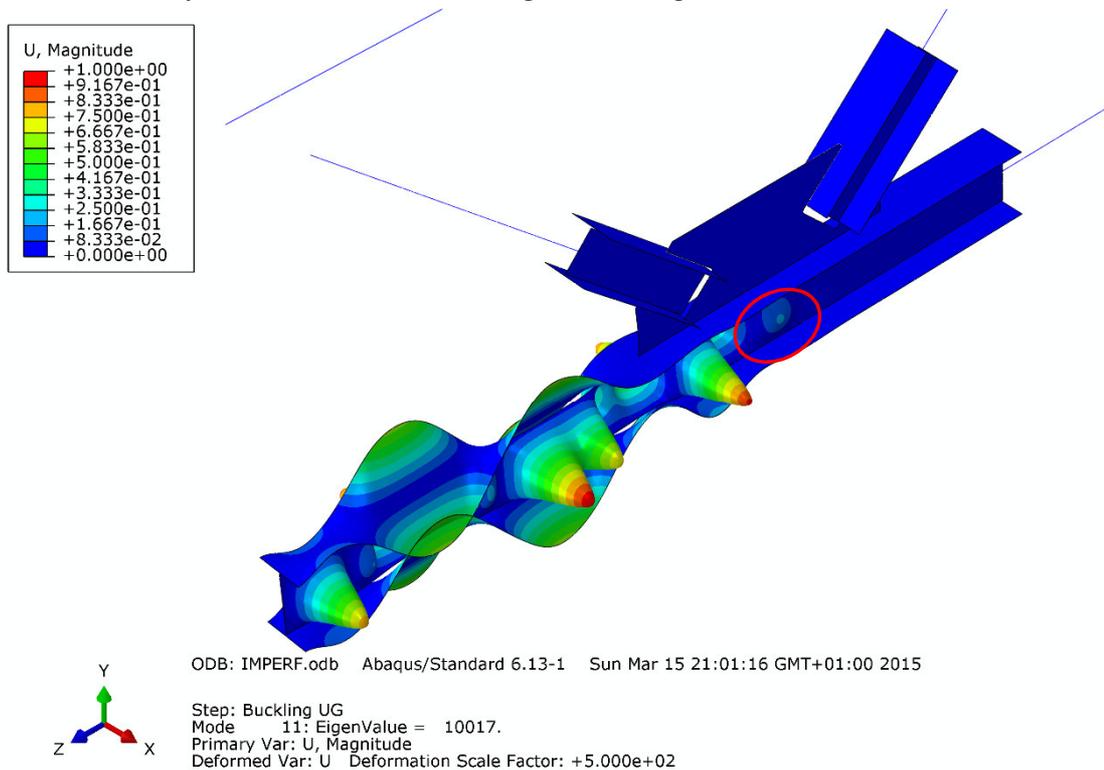
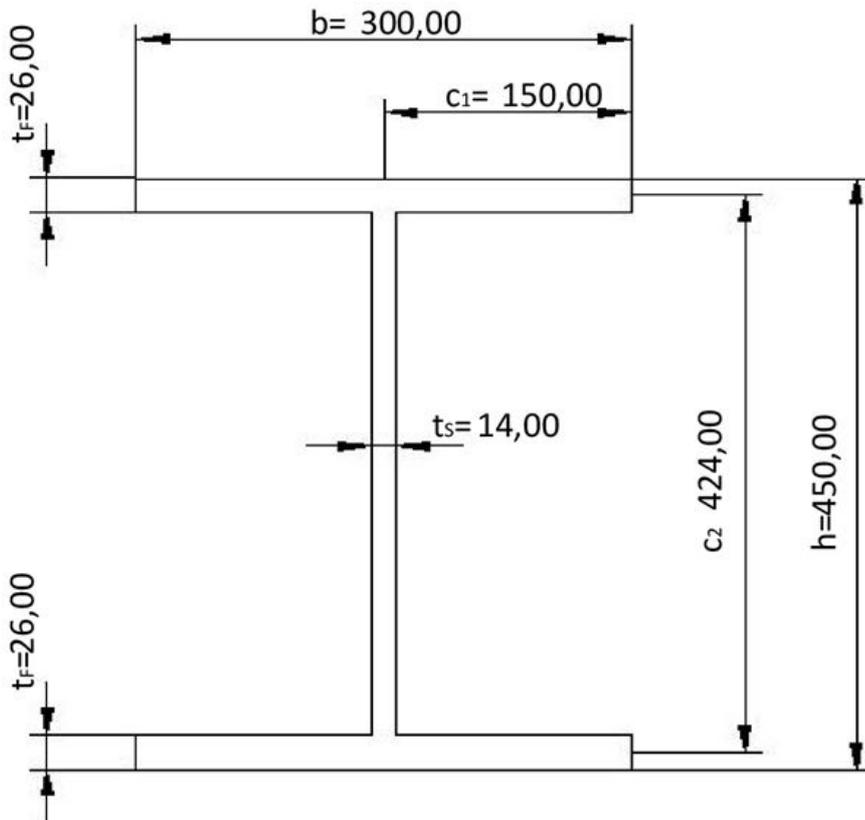


Abb. 3-12 11. Eigenform von System 1 bei $t_s= 14$ [mm] und $t_f= 26$ [mm]

3.1.6 Druckgurt-Tragfähigkeit bei globalem Knicken

Unter globalem Knicken wird hier das Knicken in der Fachwerk-Ebene verstanden. Das Knicken aus der Ebene bleibt hier unberücksichtigt, da die Lagerungsbedingungen dies nicht zulassen. Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft die Skizze, des Ausgangsquerschnittes ($t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm]), des Fachwerkgurtes, mit einer Höhe von $h=450$ [mm]. Weiters sind die eingegebenen Werte wie Querschnittsabmessungen, Materialfestigkeit und Knicklänge, sowie die verwendete Knicklinie und die für die Berechnung notwendigen Querschnittswerte (A und I_y) ersichtlich.



$t_s =$	14,00 [mm]	$f_y =$	355,00 [N/mm ²]
$t_f =$	26,00 [mm]	$L_{cr,y} =$	3125,00 [mm]
$h =$	450,00 [mm]		
$b_{Breite} =$	300,00 [mm]		
		gewählte Knicklinie =	b -> $\alpha = 0,34$
$A =$	211,72 [cm ²]	$I_y =$	77555,75 [cm ⁴]

Abb. 3-13 Skizze, Eingangsparameter, Knicklinie, sowie Querschnittswerte für die Ermittlung der Druckgurt-Tragfähigkeit bei globalem Knicken

Abb. 3-14 zeigt am Beispiel des Ausgangsquerschnittes von System 1 ($t_s = 14$ [mm] und $t_f = 26$ [mm]), die Berechnung des Abminderungsfaktors bei globalem Knicken in der Fachwerksebene. Ein Knickversagen des Fachwerkes aus der Ebene kann durch die Lagerung (Teilabschnitt 3.1.3) der Fachwerksknoten, Stäbe und Schalenelemente-Elemente ausgeschlossen werden. An dem in der obigen Abbildung gezeigten Beispiel ist zu erkennen, dass die errechnete Schlankheit $\bar{\lambda}_y$ sehr gering ist und der sich daraus ergebende Abminderungsfaktor sich äußerst nahe bei 1 befindet. Durch diese Konstellation kann globales Knicken in der Ebene ausgeschlossen werden, wodurch eine Vernachlässigung dieser Versagensart, wie sie in dieser Masterarbeit erfolgte, gerechtfertigt ist. Diese Berechnung ist auch für die kleinste Dickenvariation ($t_s = 6,9$ [mm] und $t_f = 10$ [mm]), mit dem nahezu identen Ergebnis, durchgeführt worden. Die vollständigen Berechnungen mit den dazugehörigen Skizzen sind dem Anhang (Teilabschnitt 9.8) zu entnehmen.

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{77555,75}{211,72}} = 19,14 \quad [\text{cm}]$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

$$\lambda_1 = 93,9 * \varepsilon = 93,9 * 0,81 = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y * \lambda_1} = \frac{3125}{1914,00 * 76,40} = 0,21$$

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

$$\phi = 0,5 * [1 + 0,34 * (0,21 - 0,2) + 0,21^2] = 0,53$$

Abminderungsfaktor -> $\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 + \bar{\lambda}^2}} \leq 1 \rightarrow$

$$\chi = \frac{1}{0,53 + \sqrt{0,53^2 + 0,21^2}} \leq 1 \rightarrow \chi = 0,9951$$

Abb. 3-14 Abminderungsfaktor bei Knickversagen des Druckgurtes bei $t_s = 14$ [mm] und $t_f = 26$ [mm]

3.2 System 2 - Fachwerkträger wie System 1 mit höheren Gurtprofilen

3.2.1 Anlageverhältnisse

Um den Praxisbezug in dieser Arbeit beibehalten zu können, wurde bei der Systemfindung für das System 2 auf das gleiche, bereits gefertigte, Fachwerk der Firma Haslinger zurückgegriffen. Alle Adaptionen und Änderungen welche für das System 1 vorgenommen wurden, wurden auch hier beibehalten, um die Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen der einzelnen Systeme zu wahren.

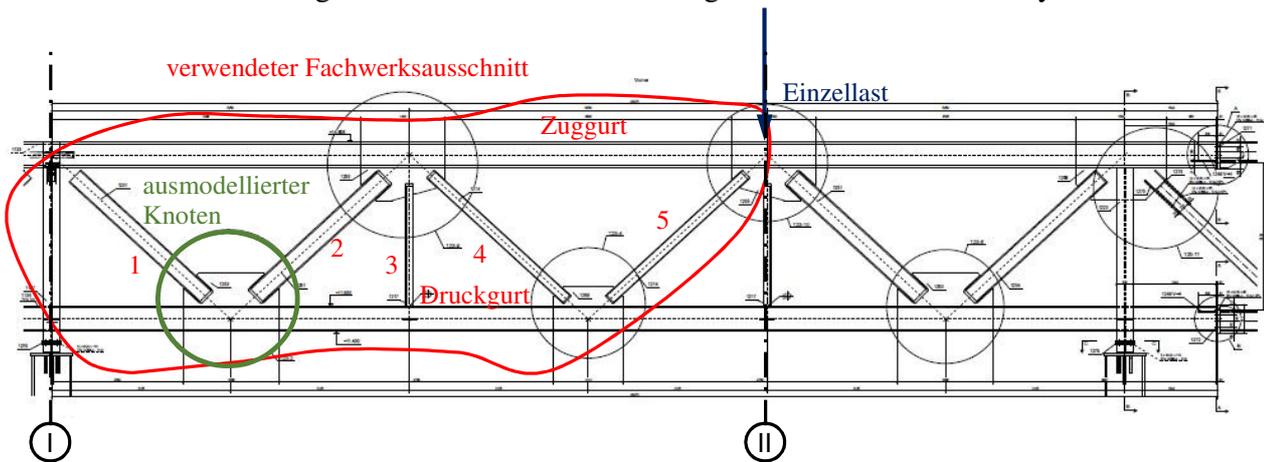


Abb. 3-15 Bestehendes Fachwerk Haslinger

Wie bereits im Teilabschnitt 3.1.1 wurde auch bei dieser Variante auf eine dreiwertige Lagerung (Achse I) beim Zug- beziehungsweise Druckgurt zurückgegriffen und nur am „Auskragungsende“ (Achse II) des adaptierten Systems mit einer Einzellast versehen. Die einzige, aber sehr wesentliche Änderung, betrifft die Querschnittshöhe der Fachwerksgurte. Bei der Wahl dieser Höhe wurde auf ein Verhältnis zurückgegriffen, welches aus dem Eurocode EN 1993-1-8 stammt. Dieses Verhältnis wird nachstehend näher beschrieben.

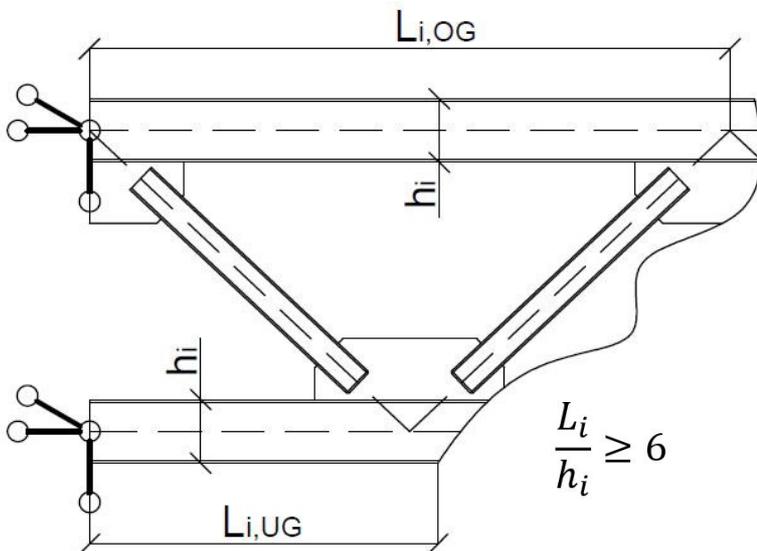


Abb. 3-16 Gurtlänge/Gurthöhe

Es besagt, dass die Grenze von Gurtlänge zu Fachwerksgurthöhe bei 6 liegt. Ist dieses Verhältnis bei einem Fachwerk über diesem Grenzwert von 6, so ist die Annahme eines Gelenkfachwerks (Vernachlässigung von M_y) bei der Berechnung gestattet. Da dies bei System 1 mit einem Wert von 7 deutlich gegeben ist wurde für System 2 eine Verhältniszahl von 5 festgelegt, woraus sich dann eine Fachwerksgurthöhe von 625 [mm] ergibt. Strenggenommen dürfte dieses

Verhältnis, laut Norm, nur für Hohlprofile verwendet werden (siehe ÖNORM EN-1-8, Ausgabe: 2012-03-01, Seite 57, Kapitel 5.1.5, Unterpunkt (1)-(3)), jedoch ist es in dieser Arbeit auch beim I-Profil herangezogen worden.

Bei der Breite wurde vom Ausgangsquerschnitt des ersten Systems mit 300 [mm] nicht abgewichen. Die Ausgangsflanschdicke wurde ebenfalls mit 26 [mm] beibehalten. Um die Vergleichbarkeit zu wahren, war durch den höheren Steg, welcher sich zwangsläufig aus der größeren Querschnittshöhe (h=625 [mm]) ergibt, eine Anpassung der Stegdicke notwendig.

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,1}}} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,2}}} = \lambda_2$$

$$\sigma_{cr,1} = 190000 * \left(\frac{t_1}{c_1}\right)^2 * k_\sigma = 190000 * \left(\frac{t_2}{c_2}\right)^2 * k_\sigma = \sigma_{cr,2}$$

$$\frac{t_1}{c_1} = \frac{t_2}{c_2}$$

Abb. 3-18 Berechnung der modifizierten Stegdicke

Die zuvor erwähnte Anpassung der Stegdicke erfolgte, wie nebenstehend ersichtlich, durch Gleichsetzen der Stegslankheiten. Nach der mathematischen Vereinfachung bleiben als Einflussfaktoren nur mehr die jeweiligen c/t-Verhältnisse übrig. Schlussendlich ergibt sich durch Einsetzen der

Ausgangswerte für das erste System (c₁= 424 [mm] und t₁= 14 [mm]) und der sich neu ergebende Steghöhe (c₂= 599 [mm]) eine Stegdicke von t₂= 19,8 [mm].

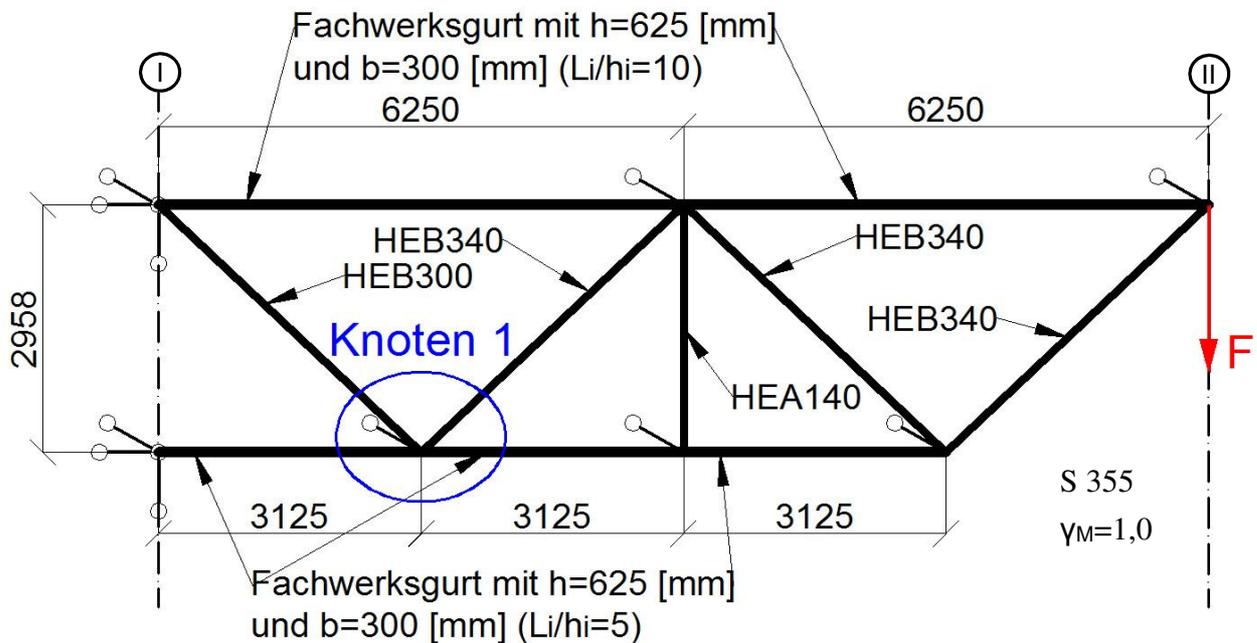


Abb. 3-17 Anlageverhältnisse von System 2

Abb. 3-17 zeigt das Ausgangssystem mit den dazugehörigen Profilen. Bei einem Vergleich mit Abb. 3-2 ist ersichtlich, dass sich lediglich die Fachwerkurte ändern.

Nachfolgend ist die Geometrie des mit Schalenelementen modellierten Knotens (System 2) dargestellt.

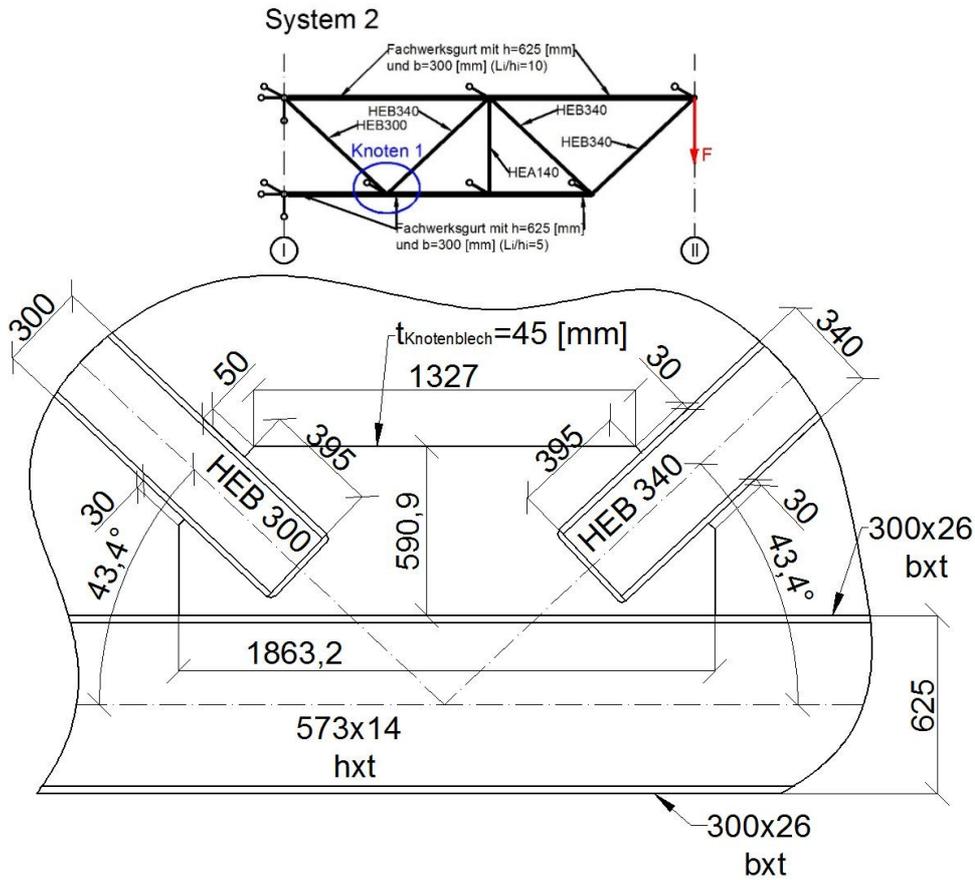


Abb. 3-19 Geometrie von Knoten 1 - System 2

a) Flanschdickenvariation

b_{Fl}	t_f	h_{Steg}	t_s
300,0	26,0	573,0	19,8
	20,0		19,8
	14,0		19,8
	10,0		19,8

Abb. 3-20 Querschnittsgrößen der Flanschdickenvariation - System 2

Die nebenstehende Tabelle zeigt die unterschiedlichen Querschnittsgrößen bei der Flanschdickenvariation von System 2. Die blau hinterlegten Dicken sind jene des Ausgangsquerschnittes. Alle anderen angeführten Dicken sind die einzelnen Stufen bei der Verringerung der Flanschdicke.

b) Stegdickenvariation

b_{Fl}	t_f	h_{Steg}	t_s
300,0	26,0	573,0	19,8
	26,0		16,1
	26,0		12,5
	26,0		9,7

Abb. 3-21 Querschnittsgrößen der Stegdickenvariation - System 2

Die nebenstehende Tabelle zeigt die unterschiedlichen Querschnittsgrößen bei der Stegdickenvariation von System 2. Die blau hinterlegten Dicken sind jene des Ausgangsquerschnittes. Alle anderen angeführten Dicken sind die einzelnen Stufen bei der Verringerung der Stegdicke.

c) Kombinierte Steg- Flanshdickenvariation

b_{Fl}	t_f	h_{Steg}	t_s
300,0	26,0	573,0	19,8
	20,0		16,1
	14,0		12,5
	10,0		9,7

Abb. 3-22 Querschnittsgrößen bei der kombinierten Steg- Flanshdickenvariation

Die nebenstehende Tabelle zeigt die unterschiedlichen Querschnittsgrößen bei der kombinierten Steg-Flanshdickenvariation von System 2. Die blau hinterlegten Dicken sind jene des Ausgangsquerschnittes. Alle anderen angeführten Dicken sind die einzelnen Stufen bei der gleichzeitigen Verringerung der beiden Dicken.

Anm.: Bei der Systemberechnung wurden die geänderten Querschnitte berücksichtigt (für Obergurt und Untergurt immer mit dem Bruttoquerschnitt gerechnet).

3.2.2 FE-Modellierung von System 2

Alle Fachwerkskomponenten, welche innerhalb des grünen Splines von Abb. 3-23 liegen, sind mit Shell-/Schalenelementen modelliert worden. Alle Fachwerkskomponenten, welche außerhalb dieses grünen Splines liegen, sind Beam-/Stabelemente.

Hinsichtlich der Modellierung gab es gegenüber dem System 1 in diesem Teilabschnitt keine Veränderungen. Die schwarz eingekreisten Stabenden wurden mit Verbindungselementen vom Typ „multi point constraints“ (MPC) verbunden. Durch diese Vorgehensweise war eine starre Verbindung gewährleistet und der Zustand in natura wird bestmöglich wiedergespiegelt. Ähnlich verhielt es sich mit den rot eingekreisten Verbindungen. Hierbei wurde eine Verbindung über „tie constraints“ hergestellt, das heißt, dass jeder Punkt des mit Shell-Elementen modellierten Fachwerksgurtes mit dem Endpunkt des Stabelementes verbunden wird. Zwischen den verbundenen Punkten wird keine Relativbewegung zugelassen und daher war dieser Verbindungstyp für diesen Anwendungsfall sehr gut geeignet. Alle Shell-Elemente untereinander wurden ebenfalls mit dem Verbindungstyp „tie constraints“ verbunden, da es sich auch hier als am sinnvollsten herausstellte.

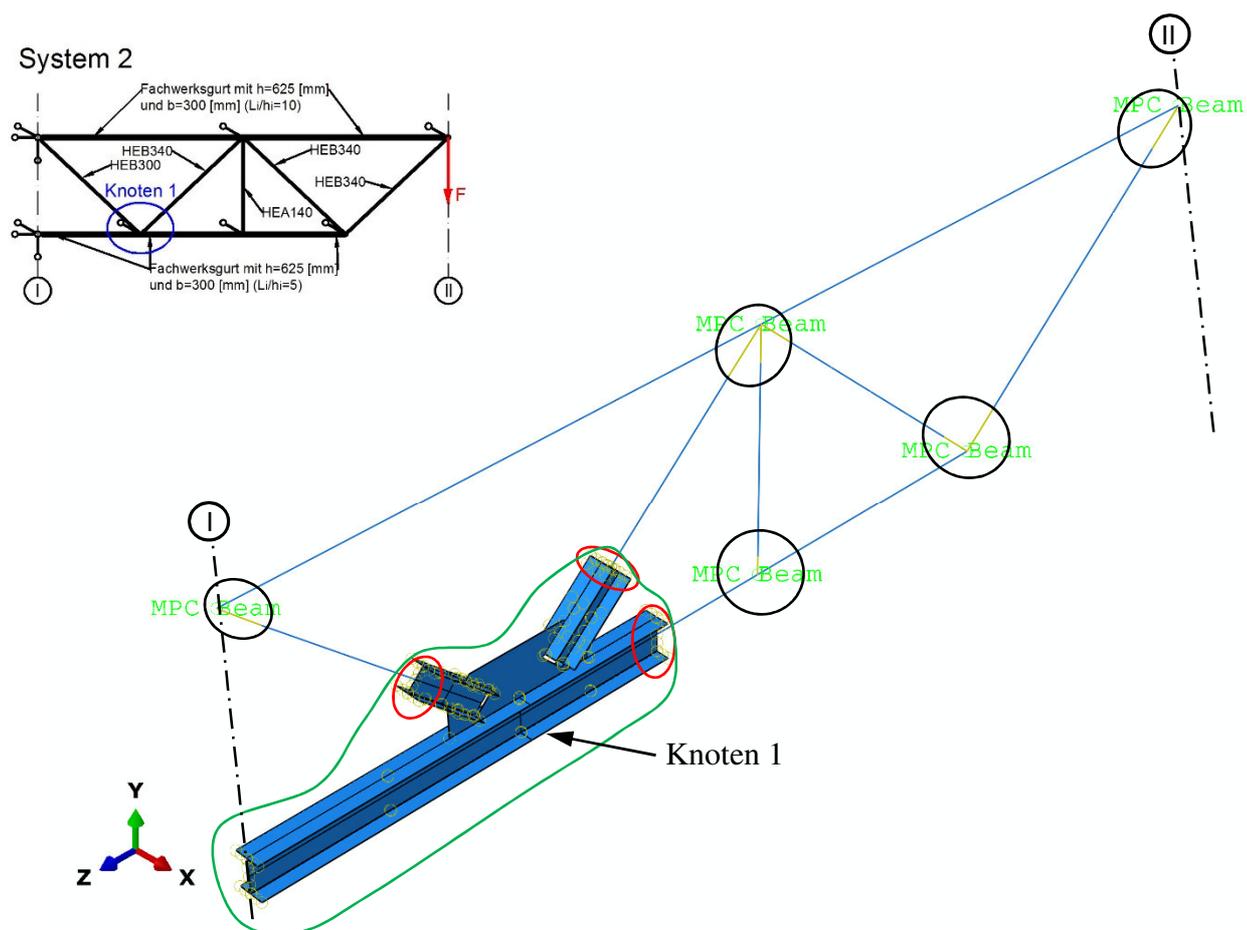


Abb. 3-23 Knotenmodellierung von System 2

Anm.: Wie in Abb. 3-23 ersichtlich, wurde nur ein Knoten (Knoten 1) mit Schalenelementen ausmodelliert. Alle anderen Knoten wurden nicht im Detail dargestellt, da dort die Beanspruchung viel geringer ist und daher kein Einfluss auf den maßgebenden Druckstab entsteht.

3.2.3 Lagerung des Fachwerkträgers (System 2)

Auch hinsichtlich der Lagerung wurde bei diesem System nichts gegenüber System 1 geändert. Die beiden Fachwerksgurte wurden mit Hilfe einer dreiwertigen Lagerung an den Enden gehalten (rote Kreise; Achse I). Verschiebungen aus der Ebene, beziehungsweise globale Effekte aus der Ebene wurden durch Lagerungen an und zwischen den Knotenpunkten unterbunden. Damit das zu untersuchende Beulen des Steges gewährleistet war, wurden auch bei System 2 die Flansche der mit Shell-Elementen modellierten Profile (erste Druckdiagonale am Auflager, Knotenblech und Druckgurt) in globaler X-Richtung gehalten (beispielhaft mit Hilfe der schwarzen Ellipse hervorgehoben). Zusätzlich wurden noch die Knotenpunkte der letzten Druckdiagonale (Achse II) gegen Verdrehung gehalten (hellgrüner Kreis). Durch all diese Halterungen war das zu untersuchende Versagen des Steges gesichert und globale Effekte aus der Ebene waren ausgeschlossen.

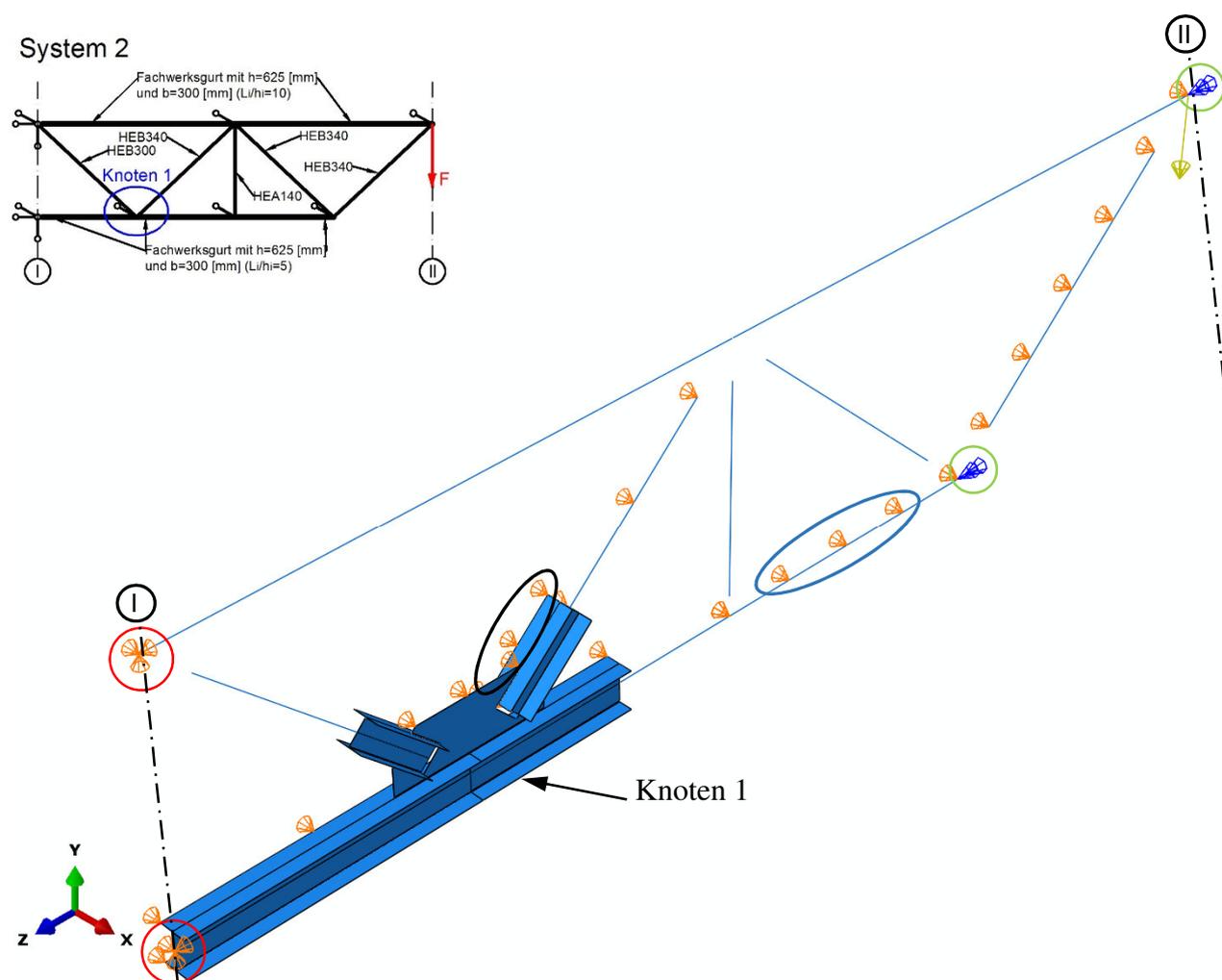


Abb. 3-24 Lagerungsbedingungen von System 2

3.2.4 FE-Netz im Knotenbereich bei System 2

Bei allen Knotenkomponenten wurde, gleich wie im Teilabschnitt 3.1.4, die Netzweite mit 10 [mm] festgelegt, da gegenüber dem ersten System keine zusätzlichen Effekte zu erwarten waren und diese

Maschenweite als groß genug erachtet wurde. Beim Knotenblech wurde die Netzweite wiederum etwas größer gewählt (20 [mm]), da dieses hauptsächlich Kraftübertragung zur Aufgabe hatte. Alle Beam-Elemente, welche direkt an Shell-Komponenten anschließen, haben ebenfalls eine Maschenweite von 10 [mm]. Bei den restlichen Stabelementen wurde eine Elementgröße von 150 [mm] als ausreichend erachtet, da diese nur die Übertragung globaler Effekte zur Aufgabe hatten.

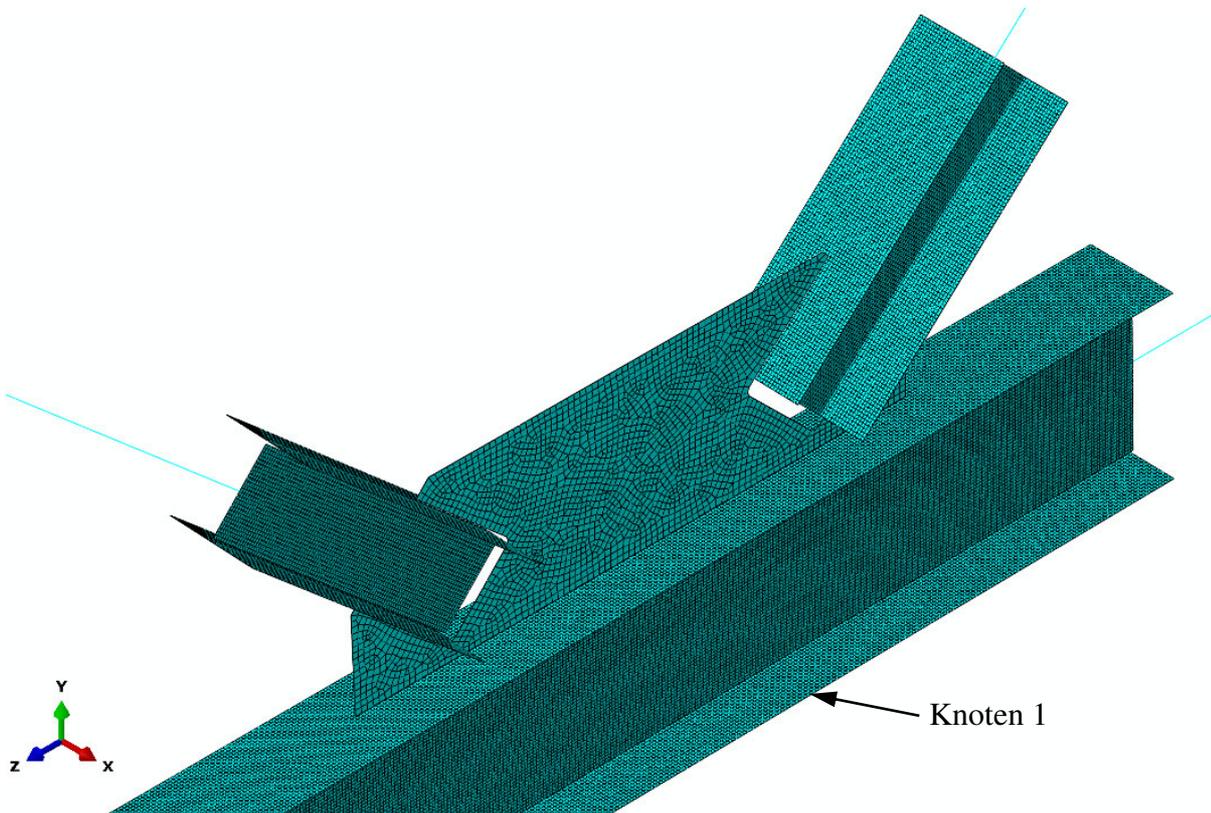


Abb. 3-25 Vernetzter Knoten von System 2

3.2.5 Geometrische Ersatzimperfectionen bei System 2

Anm.: In dieser Arbeit wurden keine globalen Imperfectionen berücksichtigt, da, die Schlankheiten der gewählten I-Profile gering waren und dadurch der maßgebende Druckgurt keine Biegeknickgefährdung aufwies.

Die geometrische Ersatzimperfection bei den dominanten Beuleigenformen ist, wie bereits im Teilabschnitt 3.1.5 beschrieben, mit $e_{0,max}=b/2/50$ (b = Flanschbreite beziehungsweise Trägerbreite; Abb. 3-27) festgelegt worden. Dies ergibt bei einer Breite von 300 [mm] eine Imperfection von 3 [mm], welche im Fall des Flansches der ersten Eigenform entspricht. Die erste Eigenform wurde deshalb als Imperfectionsform gewählt, da der Flansch hier bereits ein erstes Ausweichen auf Höhe des Achsenschnittpunktes zeigt (rote Ellipse in Abb. 3-26) und daher das tatsächliche Verhalten mit dieser Eigenform bereits sehr gut widerspiegelt wird. Aus Gründen der Vergleichbarkeit ist bei allen Flanschdickenvariationen die 1. Eigenform des maßgebenden Flansches ($t_f= 14$ [mm] und $t_s= 19,8$ [mm]) des Druckgurtes gewählt worden.

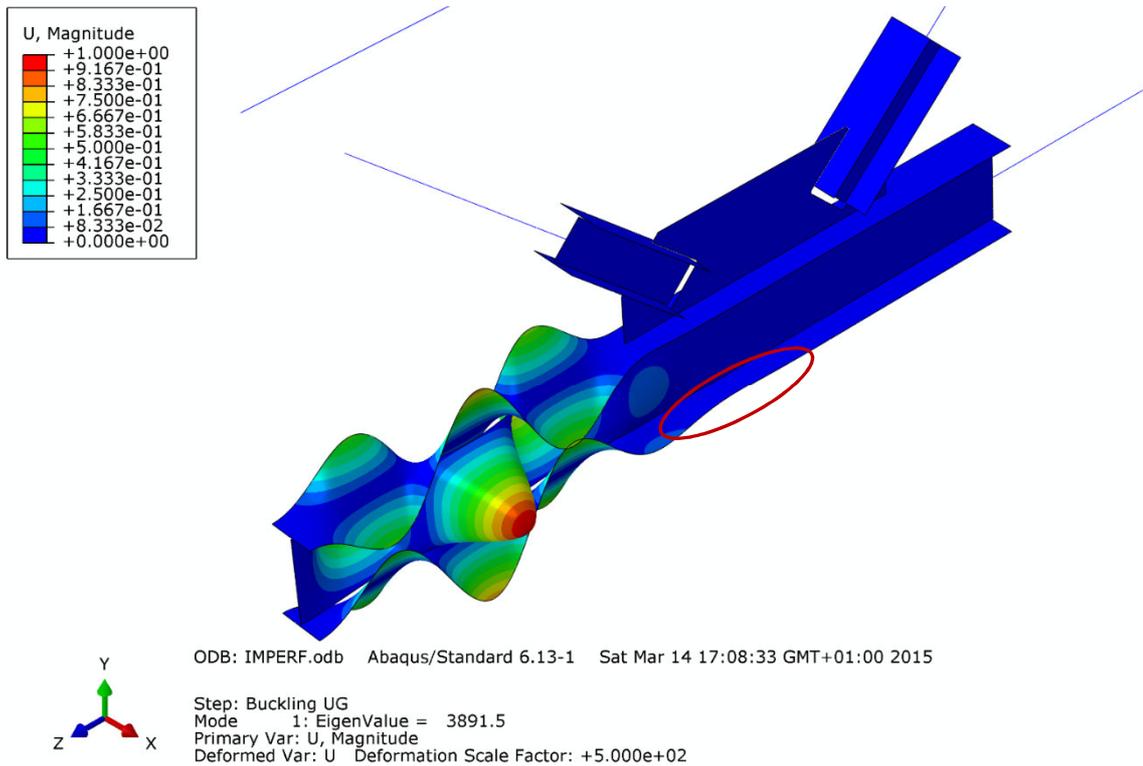
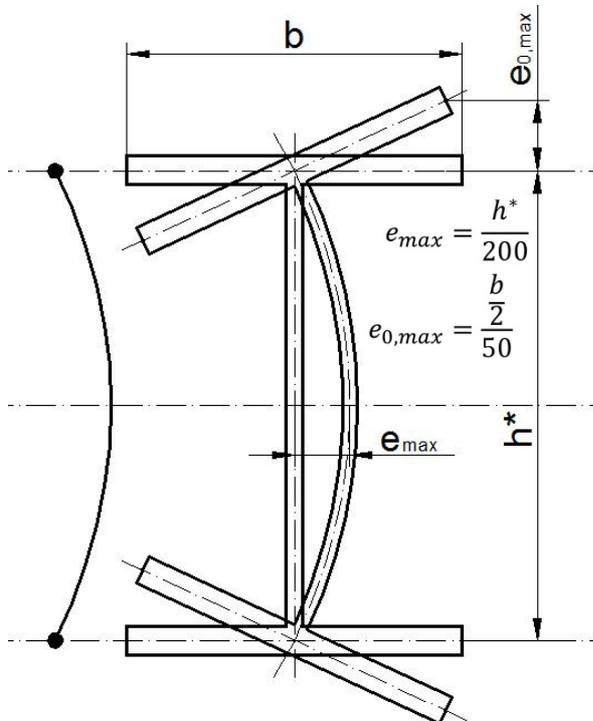


Abb. 3-26 1. Eigenform von System 2 bei $t_f=14$ [mm] und $t_s=19,8$ [mm]



Bei der FE-Berechnung zur Variation der Stegdicke, für den Druckgurt des Fachwerkträgers, ist eine geometrische Ersatzimperfektion von $e_{max}=h^*/200$ festgelegt worden. Die nebenstehende Darstellung zeigt das Mitwirken des Flansches beim Ausbeulen des Steges und der daraus, für die Berechnung der Imperfektion, resultierenden Höhe h^* . Diese Höhe ist hierbei durch die gegenseitige Beeinflussung beider I-Profilkomponenten (Steg und Flansch) als der mittlere Abstand zwischen den zwei Flanschen definiert. Der am linken Abbildungsrand ersichtliche, fiktive und beidseitig gelenkig gelagerte Stab sollte das beim Steg auftretende System besser verdeutlichen.

Abb. 3-27 Maße für Imperfektionen beim I-Profil für Stegbeulen

Bei der Variation der Stegdicken wurde im Falle von System 2 ($t_s= 19,8$ [mm] und $t_f= 26$ [mm]) auf die 8. Eigenform für die Berücksichtigung der Imperfektion zurückgegriffen. Im rot eingekreisten Bereich ist die erste Beule, welche durch diesen Versagensmechanismus hervorgerufen wird, ersichtlich. Diese Beule befindet sich direkt im Schnittpunkt der in diesem Knoten zusammentreffenden Profilachsen, weshalb diese Eigenform ideal für die Mitteilung der Imperfektion an das System bei der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse ist.

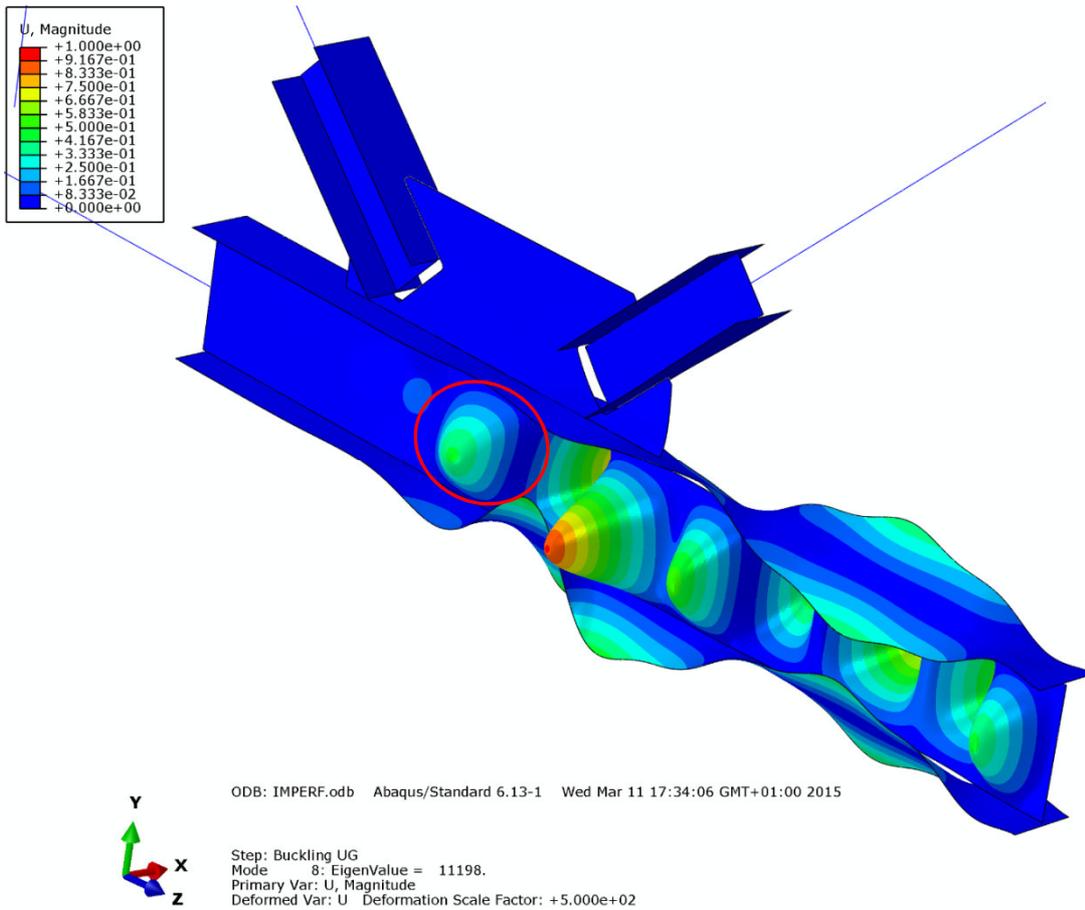


Abb. 3-28 8. Eigenform von System 2 bei $t_s=19,8$ [mm] und $t_f=26$ [mm]

3.3 System 3 - Unveränderter Fachwerkträger mit Hohlprofilquerschnitten

3.3.1 Anlageverhältnisse

Beim letzten zu untersuchendem System (System 3) sollte wiederum die Vergleichbarkeit, nach der Auswertung der Ergebnisse mit den vorhergegangenen zwei Systemen, gewahrt werden. Die Adaptionen sind dieselben, wie in Abschnitt 3.1.1 und 3.2.1. Das Ziel war es abermals, das vorhandene Fachwerk der Firma Haslinger dahingehend anzupassen, dass es zu einer möglichst hohen Normalkraft im Fachwerksdruckgurt kommt, um auch ein Beulversagen eben dieses Fachwerktrages zu gewährleisten.

Wie in Abb. 3-29 ersichtlich ist der Zug- beziehungsweise Druckgurt auch bei dieser Systemvariante wieder mit einer dreiwertigen Lagerung (Achse I in Abb. 3-29) versehen. Das Auskragungsende (Achse II in Abb. 3-29) wird mit einer Einzellast beaufschlagt, um den oben erwähnten Versagensmechanismus herbeizuführen. Der einzige, aber grundlegende Unterschied zu den zwei anderen Systemen liegt in der Profilwahl. Wie aus der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen ist, ist System 3 mit Hohlprofilen konzipiert worden und nicht wie bei den vorhergehenden Systemen mit I-Profilen. Bei den Druckgurten wurde für den Ausgangsquerschnitt auf ein Profil mit den Abmessungen 500x300x16 (H x B x T) zurückgegriffen. Die Diagonalen sind durchwegs mit 350x250x12,5 (H x B x T) großen Profilen konzipiert worden. Lediglich für die einzige vertikale Strebe, wurde ein Profil mit den Abmessungen von 150x200x12,5 (H x B x T) vorgesehen.

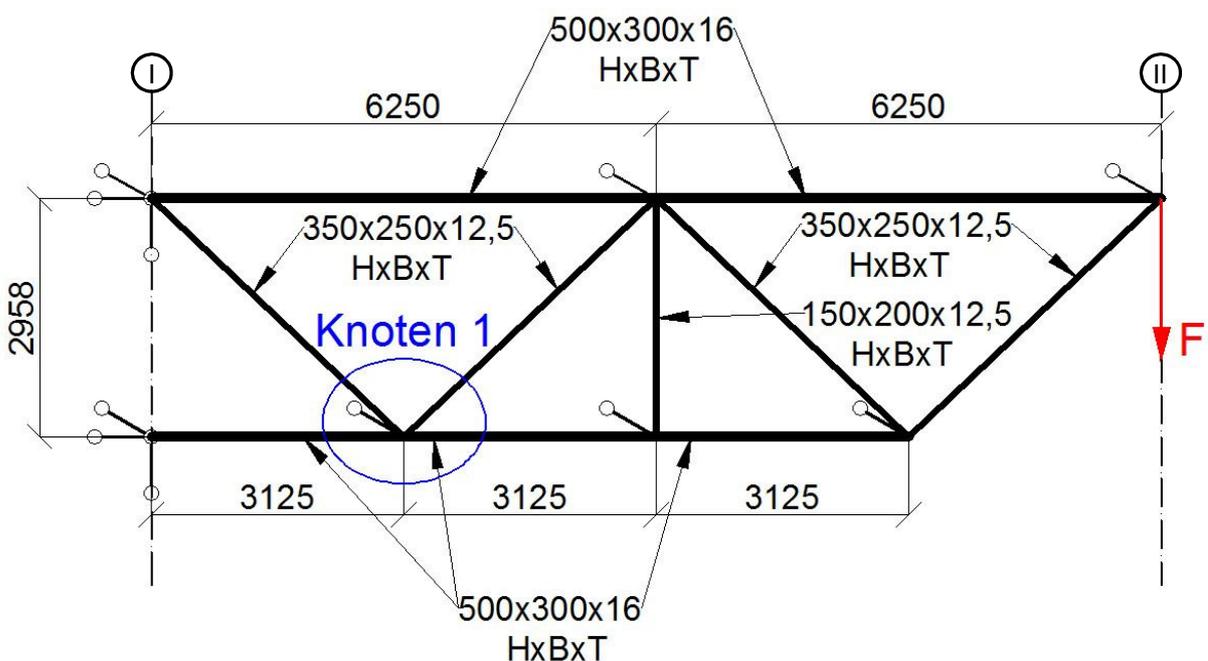


Abb. 3-29 Anlageverhältnisse von System 3

Bei einem Vergleich der vorangegangenen Abbildung mit Abb. 3-2 oder Abb. 3-17 ist erkennbar, dass diese Systemvariante die Untersuchung von Hohlprofilen zur Aufgabe hatte und an der Geometrie des Systems nichts verändert wurde. Nachfolgend ist die Geometrie des mit Schalenelementen modellierten Knotens (System 3) dargestellt.

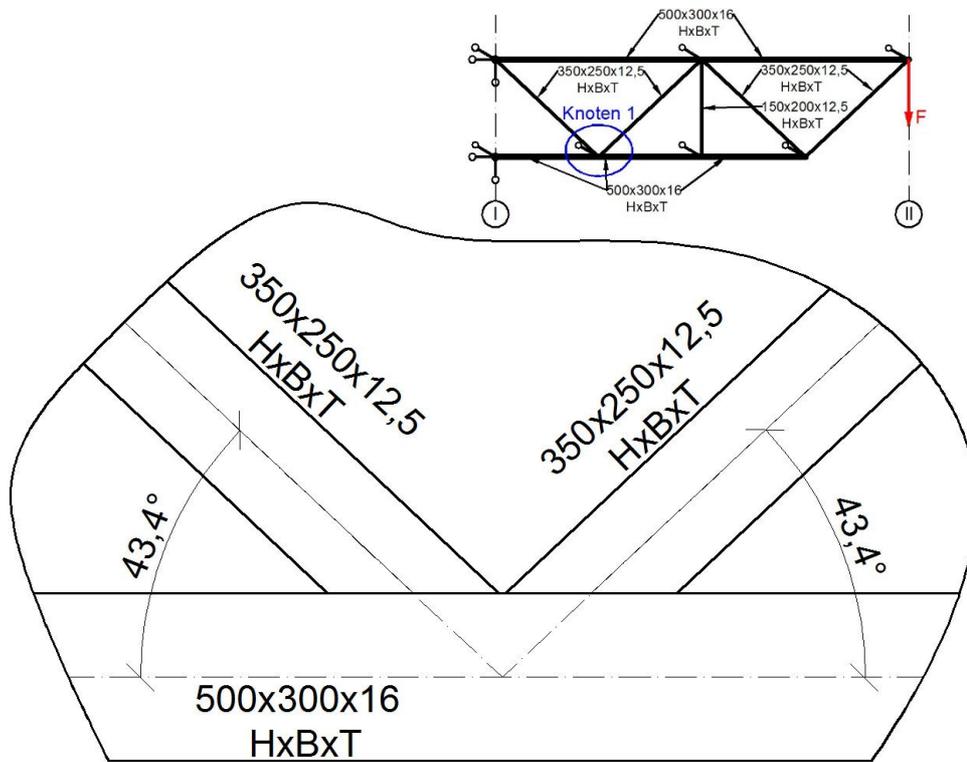


Abb. 3-30 Geometrie von Knoten 1 - System 3

b_{Fl}	t	h_{Steg}	h
300,0	16,0	468,0	500,0
	14,2	471,6	
	12,5	475	
	10,0	480	

Abb. 3-31 Querschnittsgrößen der Dickenvariation - System 3

Die nebenstehende Tabelle zeigt die unterschiedlichen Querschnittsgrößen bei der Wanddickenvariation bei System 3. Der Unterschied zu Teilabschnitt 3.1.1 und 3.2.1 ist, dass sich Steg- und Flanschdicke bei einem Hohlprofil gleichzeitig ändern, und sich dadurch, im Gegensatz zu den oben genannten Teilabschnitten nur eine Tabelle mit Querschnittsgrößen ergibt. Die blau hinterlegten Wanddicken t sind jene des Ausgangsquerschnittes.

Alle angeführten Wanddicken sind die einzelnen Stufen der Dickenvariation. Die Steghöhe h_{Steg} ist hier zusätzlich angeführt und ergibt sich aus $h_{Steg}=h-2*t$.

Anm.: Bei der Systemberechnung wurden die geänderten Querschnittswerte berücksichtigt (für Obergurt und Untergurt immer mit Bruttoquerschnitt gerechnet).

3.3.2 FE-Modellierung von System 3

Alle Fachwerkskomponenten, welche innerhalb des grünen Splines von Abb. 3-32 liegen, sind mit Shell-/Schalenelementen modelliert worden. Alle Fachwerkskomponenten, welche außerhalb dieses grünen Splines liegen, sind Beam-/Stabelemente

Die Modellierung für System 3 erfolgte auf der gleichen Basis wie für System 1 in Abschnitt 3.1.2 und für System 2 in 3.2.2. Die Verbindung der in schwarz eingekreisten Enden der Stabelemente erfolgte wiederum mit dem Verbindungstyp „multi point constrain“. Bei allen rot eingekreisten Elementen erfolgte die Verbindung mit dem Verbindungstyp „tie constraints“, das heißt, dass jeweils die zu verbindenden Endpunkte der Stabelemente, beziehungsweise die zwei Lagerungspunkte der Fachwerksgurte (Achse I), mit allen Punkten von der angrenzenden Stirnfläche der mit Shell-Elementen modellierten Hohlprofile, fest verbunden sind. „Tie constraints“-Verbindungen eignen sich in diesem Fall sehr gut, da sie keine Relativbewegungen zwischen den verbundenen Elementen zulassen und daher ein realitätsnahes System gegeben ist. Die für ein vollständig funktionierendes System noch fehlenden und in Abb. 3-32 gelb eingekreisten Verbindungen, sind jene zwischen dem Fachwerksgurt und den zwei Fachwerksdiagonalen. Dieser Anschluss erfolgt auch mit „tie constraints“, was den geschweißten Knoten realitätsnah abbilden sollte.

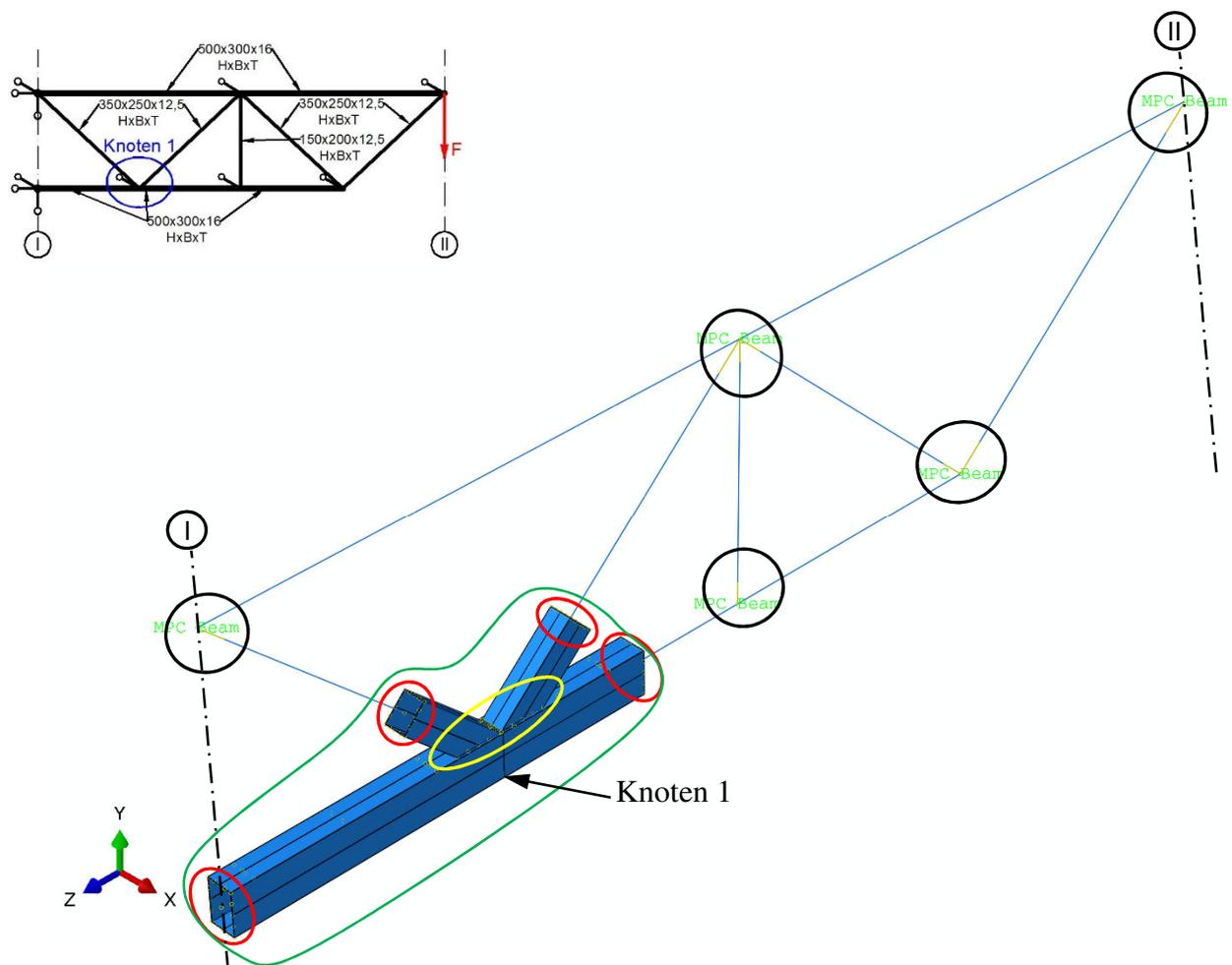


Abb. 3-32 Knotenmodellierung von System 3

Anm.: Wie in Abb. 3-32 ersichtlich, wurde nur ein Knoten (Knoten 1) mit Schalenelementen ausmodelliert. Alle anderen Knoten wurden nicht im Detail dargestellt, da dort die Beanspruchung viel geringer ist und daher kein Einfluss auf den maßgebenden Druckgurtstab entsteht.

3.3.3 Lagerung des Fachwerkträgers (System 3)

Bei der Lagerung gibt es keinen Unterschied zwischen den behandelten Systemen (System 1, System 2 und System 3). Die gelagerten Enden der Fachwerksgurte (rote Kreise; Achse I), beziehungsweise des auskragenden Fachwerkträgers, wurden jeweils mit einer dreiwertigen Lagerung versehen. Alle globalen Effekte aus der Ebene sind durch einwertige Lagerungen an und zwischen den Knoten in globaler X-Richtung unterbunden (beispielhaft mit der blauen Ellipse hervorgehoben). Zusätzlich wurden noch die Knotenpunkte der letzten Druckdiagonale (Achse II) gegen Verdrehung gehalten (hellgrüner Kreis). Um schlussendlich die gewünschten Beuleffekte an Fachwerks-, beziehungsweise Druckgurt erreichen zu können, war noch ein Halten der Profilflansche der ersten Druckdiagonale beziehungsweise des Druckgurtes am Auflager (beispielhaft in Abb. 3-33 mit schwarzer Ellipse hervorgehoben) notwendig.

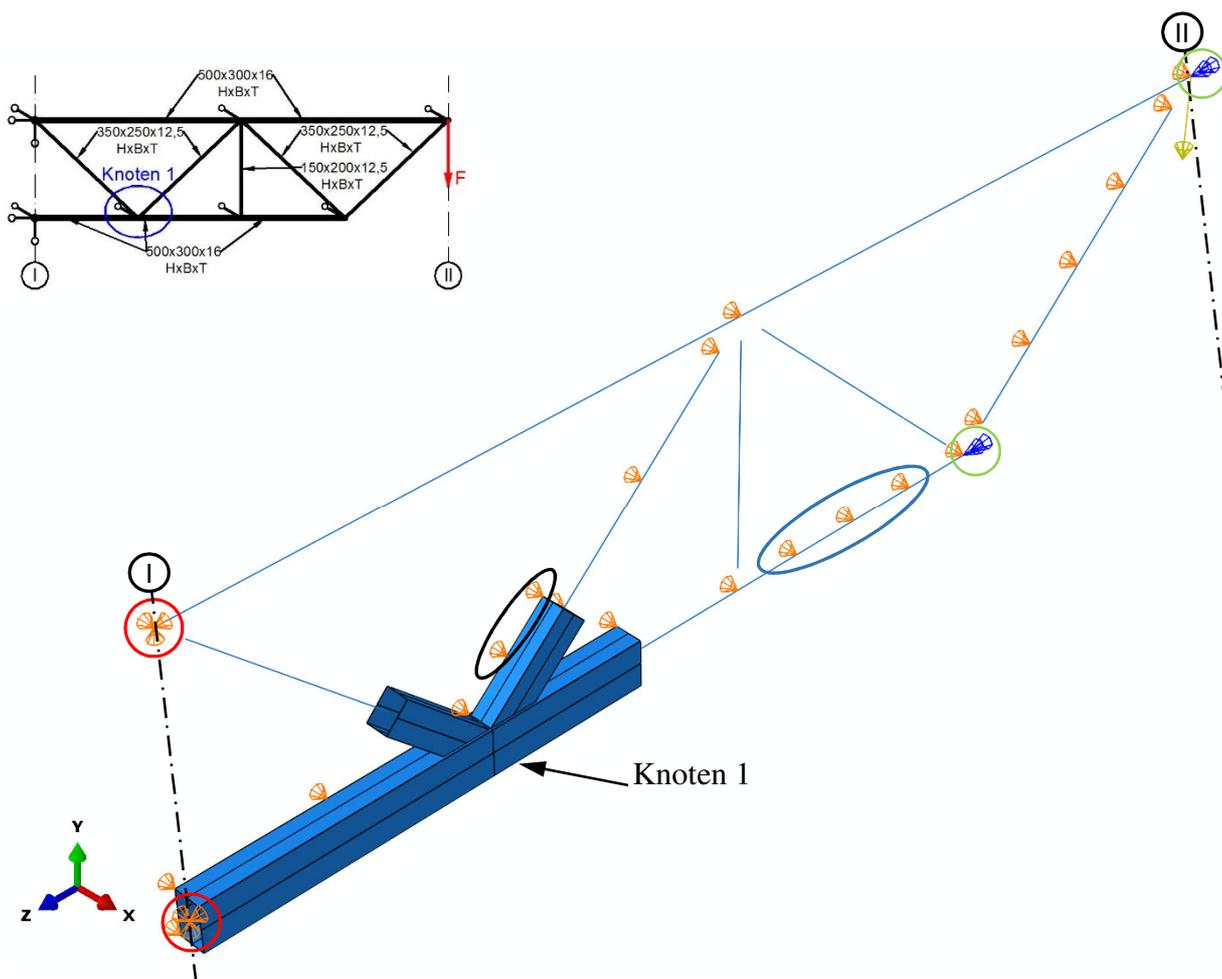


Abb. 3-33 Lagerungsbedingungen von System 3

3.3.4 FE-Netz im Knotenbereich bei System 3

Wie in Abb. 3-34 zu sehen ist, ist in diesem Fall, bei allen drei mit Shell-Elementen modellierten Stäben, die gleiche Netzweite gewählt worden. Eine Weite von 10 [mm] wurde hierbei als ausreichend erachtet und dadurch auch gewählt. Bei allen Stäben, die an den mit Shell-Elementen modellierten Knoten anschließen, wurden, um Einflüsse auf das Ergebnis zu vermeiden, ebenfalls 10 [mm] Elementlänge gewählt. Da die übrigen Stäbe ausschließlich der Weiterleitung der Kräfte und der Verformungen, das heißt für die Übertragung von globalen Effekten, dienen, konnte bei diesen die Elementlänge auf 150 erhöht und damit Rechenzeit gespart werden.

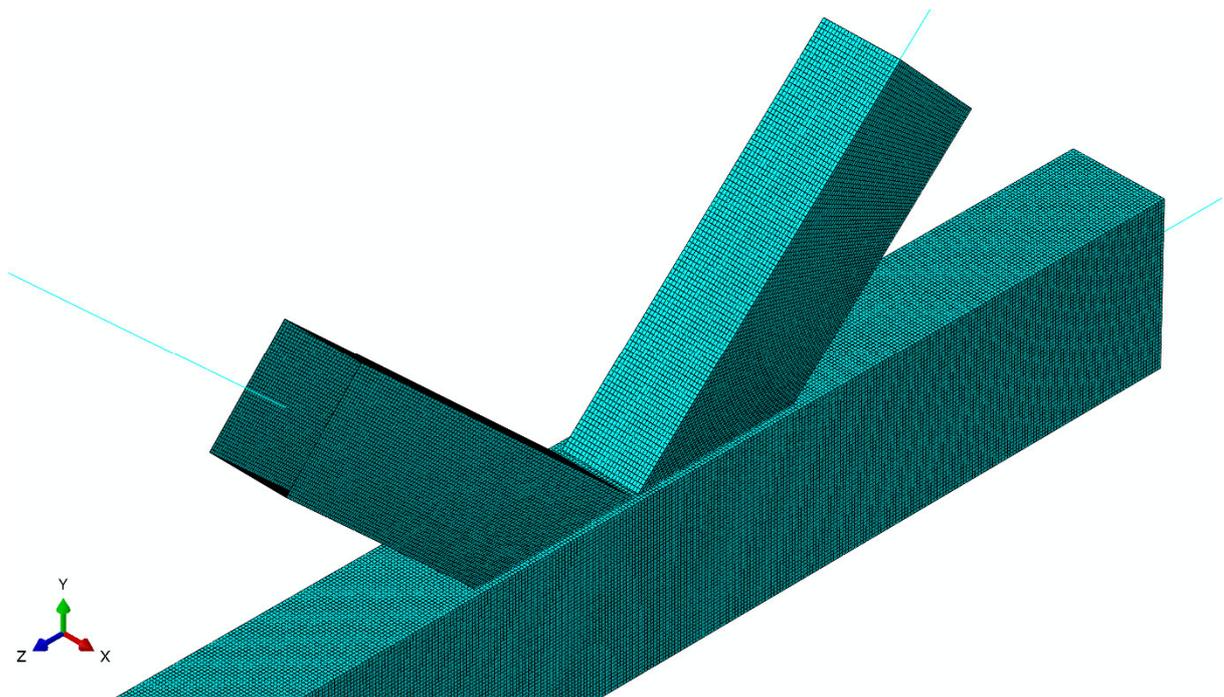


Abb. 3-34 Vernetzter Knoten von System 3

3.3.5 Geometrische Ersatzimperfektion bei System 3

Anm.: In dieser Arbeit wurden keine globalen Imperfektionen berücksichtigt, da, wie der nachfolgende Teilabschnitt 3.3.6 zeigt, die Schlankheiten der gewählten I-Profile gering waren und dadurch der maßgebende Druckgurt keine Biegeknickgefährdung aufwies.

Da beim Hohlprofil der Flansch gegenüber jenem des I-Profiles günstigere Lagerungs- und Geometrieverhältnisse hat und die Wanddicke über den Querschnitt konstant ist, das heißt die Flanschdicke kann nicht separat von der Stegdicke verändert werden, wurde beim Hohlprofil die Variation der Stegdicken als maßgebend erachtet. Die gewählte Imperfektion (siehe Abb. 3-36) wurde dem System mit Hilfe der 4. Eigenform mitgeteilt. Diese Eigenform konnte gewählt werden, da der Einfluss der ersten Beule bis zum Schnittpunkt der Fachwerksdiagonalachsen mit dem Fachwerksuntergurt zurückreicht (rote Ellipse in Abb. 3-35). Um die Vergleichbarkeit wiederum zu

wahren, wurde bei allen Dickenvariationen dieses Hohlprofils die 4. Eigenform des Ausgangsquerschnittes bei Berücksichtigung der Imperfektion verwendet.

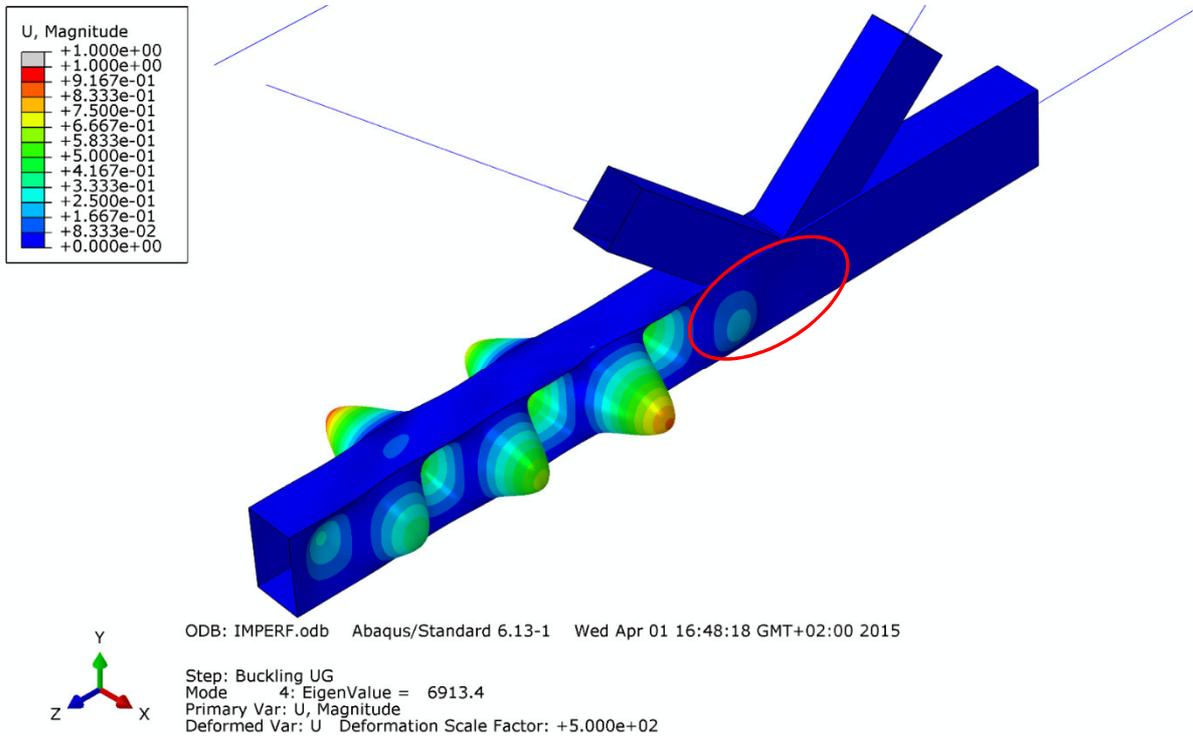


Abb. 3-35 4. Eigenform von System 3 bei $t=16$ [mm]

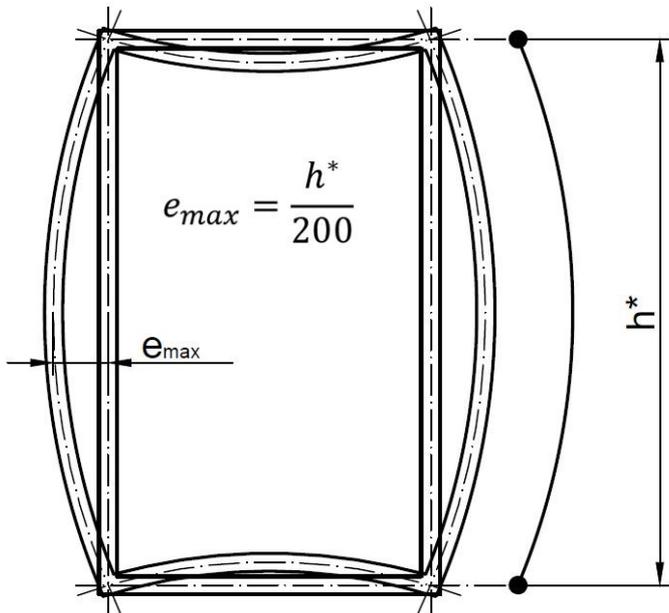
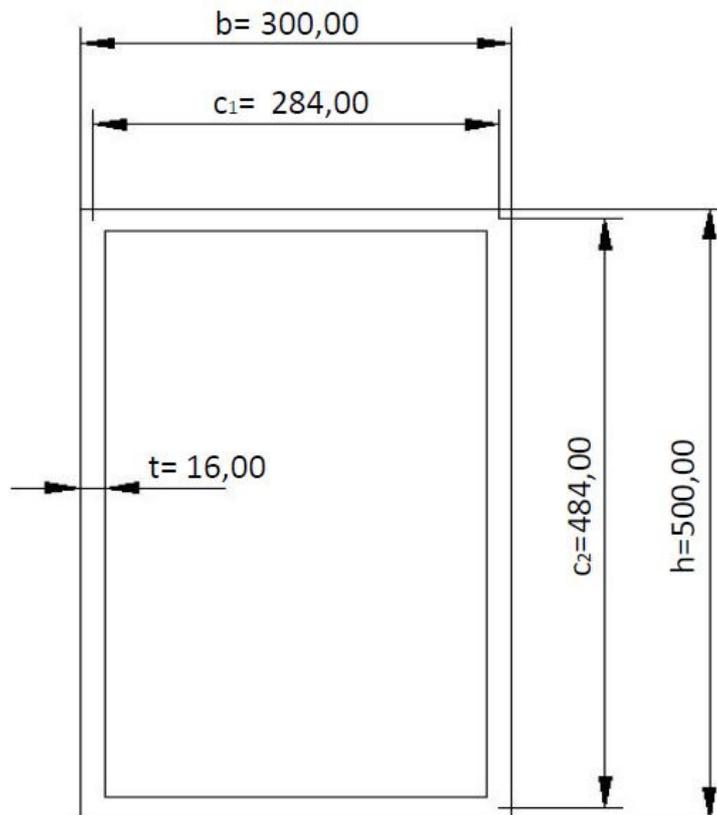


Abb. 3-36 Maße für die geometrische Ersatzimperfektion beim Hohlprofil

Nebstehend ist ein ausgebeultes Hohlprofil dargestellt. Die Größe der Imperfektion wurde mit $e_{max}=h^*/200$ festgelegt. Die Höhe h^* ist dabei der mittlere Abstand der Flansche und repräsentiert das tatsächliche Verhalten am besten, da beim Ausbeulen des Steges eine Wirkung bis in die Flansche, beziehungsweise ein gegenseitiges Beeinflussen Beider, zu erwarten war. Mit dem, zwischen dem Profil und der Bemaßung dargestellten, fiktiven gelenkig gelagerten Stab sollte das Stegbeulen abgebildet werden.

3.3.6 Druckgurtragfähigkeit bei globalem Knicken

Unter globalem Knicken wird hier das Knicken in der Fachwerkebene verstanden. Das Knicken aus der Ebene bleibt hier unberücksichtigt, da die Lagerungsbedingungen dies nicht zulassen. Die nachfolgende Skizze, zeigt den Ausgangsquerschnitt ($t=16$ [mm]) bei der Dickenvariation des Hohlprofiles. Weiters sind die eingegebenen Werte, wie Querschnittsabmessungen, Materialfestigkeit und Knicklänge, sowie die verwendete Knicklinie und die für die Berechnung notwendigen Querschnitte (A und I_y) ersichtlich.



t=	16,00 [mm]	f_y =	355,00 [N/mm ²]
h=	500,00 [mm]	$L_{cr,y}$ =	3125,00 [mm]
b_{Breite} =	300,00 [mm]	gewählte Knicklinie=	c -> $\alpha=0,49$
A=	170,88 [cm ²]	I_y =	83576,12 [cm ⁴]

Abb. 3-37 Skizze, Eingangsparameter, sowie Querschnittswerte für die Ermittlung der Druckgurtragfähigkeit bei globalem Knicken des Hohlprofiles (Ausgangsquerschnitt)

Wie bereits in Teilabschnitt 3.1.6 für das globale Knicken beim I-Profil erklärt, ist auch beim Hohlprofil die Gefährdung dieser Form des Stabilitätsversagens untersucht worden. Wie Abb. 3-38 beispielhaft anhand des Ausgangsquerschnittes ($t=16$ [mm]) zeigt, ist beim Hohlprofil der Abminderungsfaktor 1, da die Schlankheit $\bar{\lambda}_y$ einen sehr geringen Wert annimmt und dadurch das Knicken in der Ebene ausgeschlossen werden kann. Dies rechtfertigt ein Nichtbeachten dieser Versagensform bei den geometrischen Ersatzimperfektionen. Alle Stabilitätseffekte aus der Ebene können auf Grund der Lagerungssituation, das heißt Halten aller Knotenpunkte, sowie mehrmaliges Halten aller Stab- und Shell-Elemente, ebenfalls vernachlässigt werden. Die in diesem Teilabschnitt behandelte Versagensform ist auch für den kleinsten Hohlprofilquerschnitt, mit dem nahezu identen Ergebnis untersucht worden. Beide Berechnungen mit dazugehörigen Skizzen sind dem Anhang (Teilabschnitt 9.9) zu entnehmen.

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{83576,12}{170,88}} = 22,12 \quad [\text{cm}]$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

$$\lambda_1 = 93,9 * \varepsilon = 93,9 * 0,81 = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y * \lambda_1} = \frac{3125}{2212,00 * 76,40} = 0,18$$

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

$$\phi = 0,5 * [1 + 0,49 * (0,18 - 0,2) + 0,18^2] = 0,51$$

Abminderungsfaktor ->
$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 + \bar{\lambda}^2}} \leq 1 \rightarrow$$

$$\chi = \frac{1}{0,51 + \sqrt{0,51^2 + 0,18^2}} \leq 1 \rightarrow \chi = 1,0000$$

Abb. 3-38 Abminderungsfaktor bei Knickversagen des Druckgurtes bei $t=16$ [mm]

4

4 Ergebnisvergleich- FE-Berechnung und Nachweis nach Eurocode

4.1 Überblick

Die drei untersuchten Fachwerkträgersysteme (System 1 aus Teilabschnitt 3.1, System 2 aus Teilabschnitt 3.2 und System 3 aus Teilabschnitt 3.3) weisen dieselbe Geometrie, Lagerung und Belastung auf, einzig die Stabquerschnitte differieren.

Durch die vereinfachte Betrachtung eines Kragträgers, mit alleiniger Einzellast F am Trägerende, ist für die Traglast des Systems immer der Untergurtstab unmittelbar am Lager bemessungsbestimmend. Aus der Tragfähigkeit dieses Stabes $N_{R,UG}$ erhält man unmittelbar die Systemtragfähigkeit ausgedrückt als maximale Einzellast F_{max} . Bedingt durch die vorliegende Geometrie und Lagerung der Fachwerkträger gilt immer: $F_{max} = 4,23 \cdot N_{R,UG}$ (siehe Abb. 4-30).

Ein Biegeknickversagen aus der Trägerebene wird in dieser Arbeit nicht näher untersucht. Damit sind die zusätzlichen fiktiven Haltestäbe in der FE-Berechnung zu erklären. Es zeigt sich, dass für den maßgebenden Untergurtstab nahe am Auflager auch das Biegeknicken in der Ebene vernachlässigt werden kann, da die Schlankheit einen sehr geringen Wert annimmt ($\lambda_y = \sim 0,2$).

Somit kann aus der Querschnittstragfähigkeit des Untergurtstabes direkt am Knoten 1, unmittelbar die Systemtragfähigkeit abgebildet werden.

Folgende Berechnungsergebnisse werden für die einzelnen System und Querschnittsvariationen ermittelt und verglichen:

- Numerische Referenzlösung des realitätsnahen Verhaltens. Das Ergebnis dieser geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen (kurz GMNIA) ist die maximale Traglast des Fachwerks.

Anm.: Die zusätzliche LBA-Analyse (die Ermittlung von Eigenformen mit dazugehörigen Eigenwerten) dient zur Festlegung der geometrischen Ersatzimperfektion (affin zur Eigenform), sowie auch zur Ermittlung zutreffenderer effektiver Querschnitte für Nachweise nach Konzept I und II (Abb. 1-2; Ergebnisvariante "Eigenwerte" - N_EW).

- Tragfähigkeit nach Eurocode am biegesteifen Fachwerk ($N+M_y$)

Anm1.: Da die zutreffenden Biegemomente M_y nicht direkt aus dem FE-Schalenmodell abgeleitet werden konnten, erfolgte eine eigene Stabberechnung mit biegesteifen Stäben, um N und M_y in Abhängigkeit von F ermitteln zu können.

Anm2.: Bei schlanken, beulgefährdeten Querschnitten wurden die effektiven Querschnittswerte nach EN 1993-1-5 ermittelt. Hierbei erfolgte eine isolierte Betrachtung der einzelnen Querschnittsteile für N alleine (Ermittlung von A_{eff}) und M_y alleine (Ermittlung von W_{eff}).

Anm3.: Alternativ erfolgte eine zutreffendere Ermittlung der effektiven Querschnittswerte auf Basis der LBA-Analyse am Gesamtsystem und dadurch entfällt die getrennte Betrachtung von N & M_y .

- Tragfähigkeit nach Eurocode am Gelenkfachwerk (nur N)

Anm1.: Bei beulgefährdeten Querschnitten ist nur A_{eff} zufolge N alleine zu bestimmen.

Anm2.: Alternativ erfolgte der Ansatz von A_{eff} aus der LBA-Analyse am Gesamtsystem.

Nachfolgend werden die Berechnungsabläufe der Berechnungsblätter, welche für die unterschiedlichen Dickenverhältnisse im Anhang beigelegt sind, beispielhaft anhand des Ausgangsquerschnittes für das I-Profil ($h= 450$ [mm], $t_s= 14$ [mm] und $t_f= 26$ [mm]) und jenem des Hohlprofiles ($h= 500$ [mm], $t= 16$ [mm]) erklärt.

Anm.: Die Teilabschnitte 4.2.2 und 4.2.4 enthalten die für die Berechnungen notwendigen und auch verwendeten Werte.

4.2 Eingabe als Basis der Querschnittswertermittlung fertig

4.2.1 Eingabe beim I-Profil

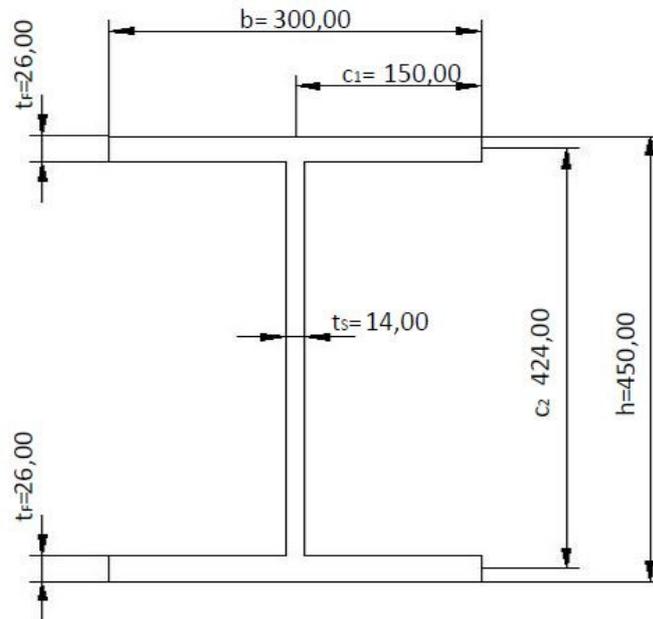


Abb. 4-1 Skizze mit Bemaßung des I-Profiles (Berechnungsblatt)

Vereinfacht wurden sowohl in der FE-Berechnung, als auch bei den Normennachweisen die Ausrundungsradien vernachlässigt.

F _{1,EW,Steg} =	7525,20 [kN]	FGMNIA=	1769,00 [kN]
F _{11,EW,Flansch} =	10017,00 [kN]	t _f =	26,00 [mm]
t _s =	14,00 [mm]	a _{FW,Knoten} =	2958,00 [mm]
b _{Gurt} =	300,00 [mm]	b _{FW,Knoten} =	6250,00 [mm]
h=	450,00 [mm]	M _{Faktor} =	0,07012 [-]
f _y =	355,00 [[N/mm ²]]	ε=	0,81 [-]
		A=	211,72 [cm ²]

Abb. 4-2 Einzugebende Werte des Berechnungsblattes für das I-Profil

Anm.: Alle für die Berechnung notwendigen und im Berechnungsblatt einzugebenden Werte sind in Abb. 4-2 grau hinterlegt.

- Folgende Eingabewerte liegen vor:
 - Querschnittsabmessungen des Druckgurtes
Stegdicke t_s , Flanschdicke t_f , Gurtbreite b_{Gurt} , Gesamthöhe h
 - Materialgüte beziehungsweise Streckgrenze
 f_y
 - Geometriedaten Fachwerk
Knotenpunktabstand am Obergurt $b_{FW,Knoten}$, Systemhöhe $a_{FW,Knoten}$
 - Ergebnis LBA-Analyse

$F_{i,FW,Steg}$, $F_{i,FW,Steg}$ -> diese Werte entsprechen der idealen Systemknicklast F_i .

Daraus ergeben sich die Kritischen Beullasten des Druckgurtes mit $N_{cr,DG} = 4,23 * F_i$ [kN]
(Abb. 4-40)

- Ergebnis der GMNIA-Analyse

F_{GMNIA} stellt die maximale Traglast F dar

- Ergebnis aus der statischen Berechnung (biegesteifes Fachwerk)

M_{Faktor} ist der Berechnungsfaktor für das maximale Biegemoment am Stab

(Abb. 4-40) $M_{y,max} = M_{Faktor} * F$ [kNm]

- A und ϵ

Dies sind Rechenwerte, wobei A die Bruttoquerschnittsfläche und ϵ ein Materialfaktor ist.

Die ersten einzugebenden und für die Berechnung notwendigen Werte sind die Eigenwerte der jeweils als maßgebend bestimmten Eigenformen für den Druckgurt. Dazu wurden jene Eigenwerte aus der linearen Beulanalyse der numerischen Berechnung ausgewählt, bei welchen ein möglichst großes Verschiebungs- zu Kraftverhältnis beim Steg (Eigenform für das Stegbeulen $\rightarrow F_{1.EW,Steg}$), beziehungsweise Verdrehungs- zu Kraftverhältnis im Falle des Flansches (Eigenform für das Flanschbeulen $\rightarrow F_{11.EW,Flansch}$) auftritt, da dies als realistische Annahme für die Berechnung erachtet wurde. Die Ziffern im Index dieser Kräfte (in Abb. 4-2 beispielhaft 1 und 11) beziehen sich entweder auf den in diesem Fall ersten Eigenwert für den Steg oder den elften Eigenwert für den Flansch. Der Wert N_{GMNIA} stammt ebenfalls aus der numerischen Berechnung, wird aber durch eine geometrische und materielle nichtlineare Analyse mit Imperfektionen gewonnen (Abschnitt 2.2.6). Um das Ziel dieses Berechnungsblattes, nämlich, die maximale aufbringbare Last zu berechnen, erreichen zu können, ist ein Umrechnungsfaktor ($M_{y,max} = M_{Faktor} * F$ [kNm]), welcher in Teilabschnitt 4.2.5 näher beschrieben ist, notwendig und als Größe M_{Faktor} einzugeben. Bei der Eingabe der noch fehlenden Werte in die Eingabemaske sind, bis auf die Streckgrenze f_y , alle restlichen einzugebenden Parameter geometrische Größen, welche das verwendete I-Profil definieren.

4.2.2 Überblick der Eingangswerte der untersuchten Querschnitte des I-Profiles

Die zwei nachstehenden Abbildungen zeigen eine Übersicht über die für die Berechnung notwendigen Werte. $i_{EW,Steg}$ und $i_{EW,Flansch}$ stehen für die Nummer i des Eigenwertes, das heißt, dass zum Beispiel 1 für den ersten Eigenwert steht. Die Bedeutung der restlichen Werte ist im vorherigen Teilabschnitt (4.2.1) ausführlich beschrieben und daher wird hier nicht mehr näher darauf eingegangen. Die in der nachstehenden Tabelle aus Abb. 4-2 nicht übernommenen Größen könnten bei einer weiteren Untersuchung dieses Themas mit Hilfe des Berechnungsblattes leicht verändert werden, sind aber für diese Masterarbeit fixe Größen und deshalb in dieser Aufstellung nicht extra angeführt.

Orange ist jene Querschnittsdicke hinterlegt, von welcher die LBA-Analyse als Basis für die Beurteilung des Verschiebungs- zu Kraftverhältnisses beim Steg, beziehungsweise das Verdrehungs- zu Kraftverhältnis beim Flansch herangezogen wurde.

t_f	t_s	$i_{EW,Steg}$	$F_{i,EW,Steg}$	$i_{EW,Flansch}$	$F_{i,EW,Flansch}$	FGMNIA	M_{faktor}	h
Variation der Flanschdicke								
26,0	14,0	6	8260,0	1	7525,2	1758,0	0,07012	450
20,0			5785,6		5332,4	1447,0	0,07023	444
14,0			3442,7		2792,3	1122,0	0,06900	438
10,0			2057,6		1715,3	891,1	0,06661	434
Variation der Stegdicke								
26,0	14,0	1	7525,2	11	10017,0	1769,0	0,07012	450
	11,4		4967,8		6835,3	1679,0	0,07379	
	8,5		2682,6		3703,6	1565,0	0,07830	
	6,9		1725,7		2368,9	1491,0	0,08101	
Variation der Steg- und Flanschdicke								
26,0	14,0	1	7525,2	5	8205,0	1759,0	0,07012	450
20,0	11,4		3864,1		4196,9	1359,0	0,07443	444
14,0	8,5		1503,4		1615,7	734,5	0,08014	438
10,0	6,9		670,35		721,08	638,5	0,08356	434

Abb. 4-3 Eingangswerte von System 1 ($h=450$ [mm])

t_f	t_s	$i_{EW,Steg}$	$F_{i,EW,Steg}$	$i_{EW,Flansch}$	$F_{i,EW,Flansch}$	FGMNIA	M_{faktor}	h
Variation der Flanschdicke								
26,0	19,8	1	8003,3	4	8730,9	2244,0	0,12039	625
20,0			5688,5		6486,9	1931,0	0,11632	619
14,0			3891,5		4593,2	1612,0	0,10938	613
10,0			3053,6		3376,0	1398,0	0,10226	609
Variation der Stegdicke								
26,0	19,8	1	8003,3	3	8609,5	2243,0	0,12039	625
	16,1		5505,3		5910,8	2050,0	0,12926	
	12,0		3001,6		3240,2	1818,0	0,14086	
	9,7		1894,5		2048,5	1675,0	0,14839	
Variation der Steg- und Flanschdicke								
26,0	19,8	1	8003,3	5	9720,2	2243,0	0,12039	625
20,0	16,1		4041,6		4982,8	1733,0	0,12574	619
14,0	12,0		1555,9		1943,1	1134,0	0,13267	613
10,0	9,7		702,0		903,3	737,0	0,13552	609

Abb. 4-4 Eingangswerte von System 2 ($h=625$ [mm])

4.2.3 Eingabe beim Hohlprofil

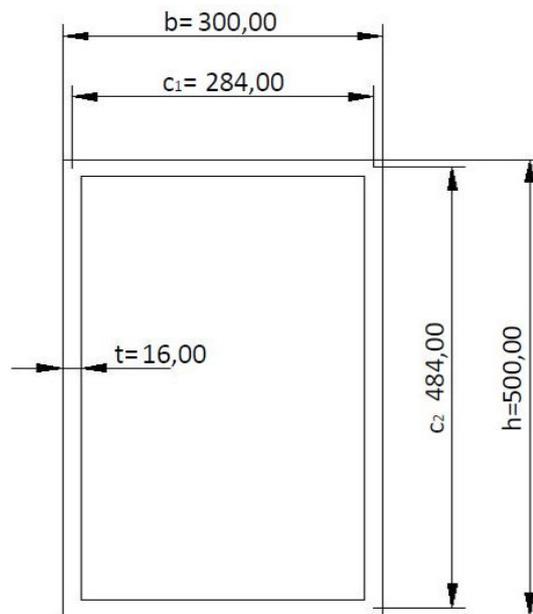


Abb. 4-5 Skizze mit Bemaßung des Hohlprofiles (Berechnungsblatt)

Wie bereits in Abschnitt 4.2.1 wurde auch bei den Hohlprofilen (in Abb. 4-5 ersichtlich) auf die Ausrundungsradien verzichtet.

F _{1,EW,Steg} =	6550,50 [kN]	F _{GMNIA} =	2114,00 [kN]
F _{9,EW,Flansch} =	7602,10 [kN]	a _{FW,Knoten} =	2958,00 [mm]
t=	16,00 [mm]	b _{FW,Knoten} =	6250,00 [mm]
b _{Gurt} =	300,00 [mm]	M _{Faktor} =	0,06739 [-]
h=	500,00 [mm]	ε=	0,81 [-]
f _y =	355,00 [N/mm ²]	A=	245,76 [cm ²]

Abb. 4-6 Eingabemaske des Berechnungsblattes des Hohlprofiles

Anm.: Alle für die Berechnung notwendigen und im Berechnungsblatt einzugebenden Werte sind in Abb. 4-6 grau hinterlegt.

- Folgende Eingabewerte liegen vor:
 - Querschnittsabmessungen des Druckgurtes
Wanddicke t , Gurtbreite b_{Gurt} , Gesamthöhe h
 - Materialgüte beziehungsweise Streckgrenze
 f_y
 - Geometriedaten Fachwerk
Knotenpunktabstand am Obergurt $b_{\text{FW,Knoten}}$, Systemhöhe $a_{\text{FW,Knoten}}$
 - Ergebnis LBA-Analyse
 $F_{i,\text{FW,Steg}}$, $F_{i,\text{FW,Steg}}$ -> diese Werte entsprechen der idealen Systemknicklast F_i
Daraus ergeben sich die Kritischen Beullasten des Druckgurtes mit $N_{\text{cr,DG}} = 4,23 \cdot F_i$ [kN] (Abb. 4-40)
 - Ergebnis der GMNIA-Analyse
 F_{GMNIA} stellt die maximale Traglast F dar
 - Ergebnis aus der statischen Berechnung (biegesteifes Fachwerk)
 M_{Faktor} ist der Berechnungsfaktor für das maximale Biegemoment am Stab
(Abb. 4-40) $M_{y,\text{max}} = M_{\text{Faktor}} \cdot F$ [kNm]
 - A und ϵ
Dies sind Rechenwerte, wobei A die Bruttoquerschnittsfläche und ϵ ein Materialfaktor ist.

Der einzige Unterschied zwischen Abb. 4-6 und der Darstellung für das I-Profil in Abb. 4-2 liegt in der fehlenden Möglichkeit eine Flanschdicke einzugeben. Dies resultiert aus einer gleichbleibenden Wandstärke über den gesamten Querschnitt des Hohlprofiles. Wie auch für Abb. 4-2 erklärt, stammen die ersten einzugebenden Werte aus der numerischen Berechnung. F_{GMNIA} ist das Ergebnis aus der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen (Teilabschnitt 2.2.6) und die zwei restlichen einzugebenden Kräfte sind die Eigenwerte der jeweiligen Eigenformen aus der linearen Beulanalyse. $F_{1,\text{EW,Steg}}$ (Eigenwert der 1. Eigenform für das Stegbeulen) ist der, in diesem Fall, erste Eigenwert und $F_{9,\text{EW,Flansch}}$ (Eigenwert der 9. Eigenform für das Flanschbeulen) der, in diesem Fall, neunte Eigenwert aus der linearen Beulanalyse. Die Ziffer i im Index und der daraus zu

schließende Eigenwert hängt vom Verschiebungs- zu Kraftverhältnis des Steges ($F_{1,EW,Steg}$) und beim Hohlprofil, auf Grund der veränderten Lagerungsart, auch des Flansches ($F_{1,EW,Flansch}$) ab. Der Berechnungsfaktor M_{Faktor} , welcher für die Berechnung der maximal aufbringbaren Last mit Bezug auf das im Druckgurt auftretende Moment ($M_{y,max} = M_{Faktor} \cdot F$ [kNm]) notwendig und im Berechnungsblatt einzugeben ist, ist im nachfolgenden Teilabschnitt 4.2.5 näher beschrieben. Die restlichen einzugebenden Werte sind neben der materialabhängigen Streckgrenze f_y ausschließlich geometrische Größen.

4.2.4 Überblick der Eingangswerte der untersuchten Querschnitte des Hohlprofiles

Die zwei nachstehenden Abbildungen zeigen eine Übersicht über die für die Berechnung notwendigen Werte. $i_{EW,Steg}$ und $i_{EW,Flansch}$ stehen für die Nummer i des Eigenwertes, das heißt, dass zum Beispiel 1 für den ersten Eigenwert steht. Die Bedeutung der restlichen Werte ist im vorherigen Teilabschnitt (4.2.3) ausführlich beschrieben und daher wird hier nicht mehr näher darauf eingegangen. Die in der nachstehenden Tabelle aus Abb. 4-6 nicht übernommenen Größen könnten bei einer weiteren Untersuchung dieses Themas mit Hilfe des Berechnungsblattes leicht verändert werden, sind aber für diese Masterarbeit fixe Größen und deshalb in dieser Aufstellung nicht extra angeführt.

t	$i_{EW,Steg}$	$F_{i,EW,Steg}$	$i_{EW,Flansch}$	$F_{i,EW,Flansch}$	NGMNIA	M_{faktor}
16,0	1	6550,5	9	7602,1	2114,0	0,06739
14,2		4566,8		5311,9	1847,0	0,06984
12,5		3106,2		3621,0	1582,0	0,07116
10,0		1582,9		1851,4	1178,0	0,07425

Abb. 4-7 Eingangswerte von System 3 (Hohlprofile)

Orange ist jene Querschnittsdicke hinterlegt, von welcher die LBA-Analyse als Basis für die Beurteilung des Verschiebungs- zu Kraftverhältnisses beim Steg, beziehungsweise das Verdrehungs- zu Kraftverhältnis beim Flansch herangezogen wurde.

4.2.5 Berechnungsfaktor für das maximale Biegemoment am Stab

Nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft die Berechnung des maximalen Biegemomentes für den maßgebenden Druckgurt am Beispiel des Ausgangsquerschnittes von System 1 (I-Profil; $h=450$ [mm], $t_f=14$ [mm] und $t_s=14$ [mm]). Hierbei muss die aufgebrachte Einzellast, am Auskragungsende (Achse II), mit dem Umrechnungsfaktor M_{Faktor} (mit Hilfe von RuchZuck für das biegesteife System ermittelt) multipliziert werden und man erhält als Ergebnis das maximale Biegemoment M_y des maßgebenden Druckstabes in [kNm].

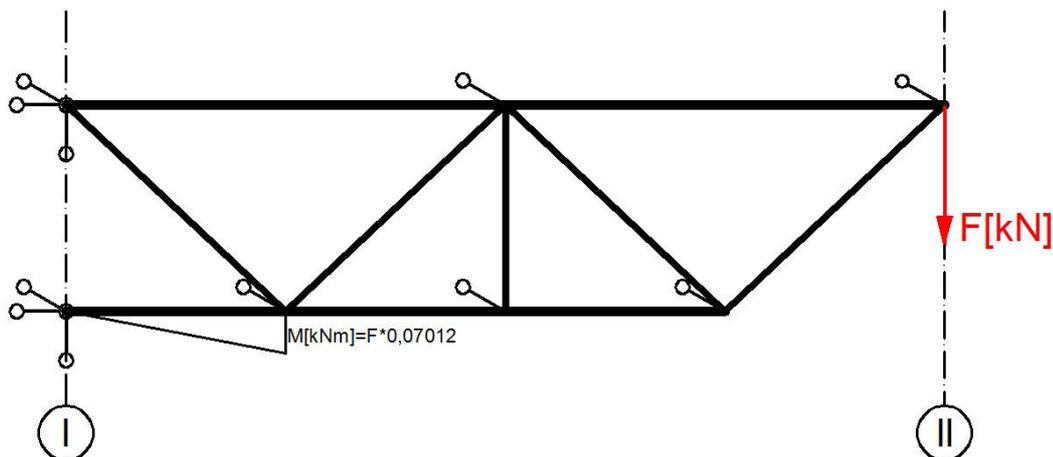


Abb. 4-8 Umrechnungsfaktor für das maximale Biegemoment am Stab (I-Profil, $h=450$ [mm], $t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm])

4.3 Querschnittsklassifizierung fertig

Anm.: Die Querschnittsklassifizierung erfolgt immer unter der Beanspruchung N alleine.

4.3.1 Klassifizierung für das I-Profil

Beispielhaft ergibt sich für den Querschnitt nach Abb. 4-1 ($t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm]):

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch:	$c_1=$	150,00 [mm]		
	$t=$	26,00 [mm]		
	$(c/t)^*=$	$5,77 \leq 9 * \epsilon$	=	7,32 Klasse 1
Steg:	$c_2=$	424,00 [mm]		
	$t=$	14,00 [mm]		
	$(c/t)^*=$	$30,29 \leq 38 * \epsilon$	=	30,92 Klasse 2

Abb. 4-9 Querschnittsklassifizierung des I-Profiles (Berechnungsblatt)

Im Anschluss an die Eingabe der Parameter erfolgt die Zuordnung des Flansches und des Steges zu den jeweiligen Querschnittsklassen. Dies ist ein essentieller Teil für spätere Berechnungsschritte, um bei der Berechnung der Versagenslast plastische, elastische oder effektive Querschnittswerte für die

jeweilige Berechnungsmethode richtig verwenden zu können. Da bei der Berechnung des starren Fachwerkes zusätzlich zur Normalkraft auch ein Moment wirkt, müsste dies bei der Einteilung in die Querschnittsklassen eigentlich berücksichtigt werden, jedoch erfolgt die Klassifizierung in diesem Berechnungsschritt, vereinfacht, ausschließlich über die Drucknormalkraft.

Die Grenzwerte bei der Klassifizierung sind lagerungs- und spannungsverlaufsabhängig und daher beim Flansch und beim Steg durch unterschiedliche Werte definiert. Beim Flansch werden die Grenzen für einseitige Lagerung und beim Steg für zweiseitige Lagerung bei jeweils konstantem Spannungsverlauf laut ÖNORM EN 1993-1-1 verwendet. Die genaue Definition dieser Norm ist in Abschnitt 2.1.4 beschrieben.

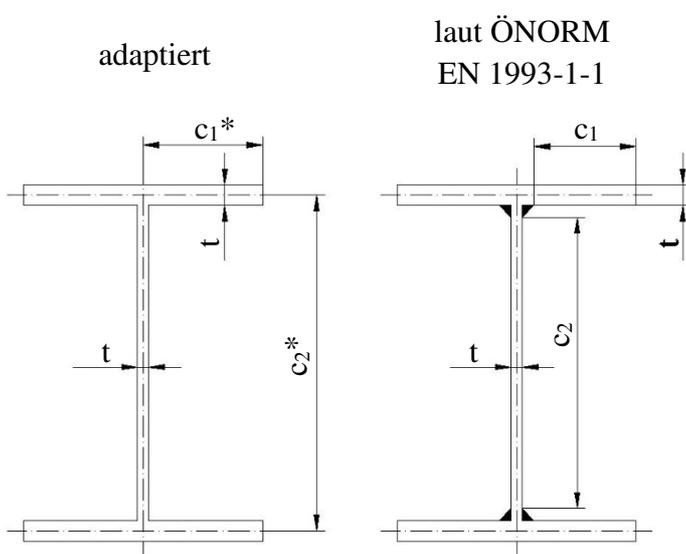


Abb. 4-10 Vergleich der c/t Verhältnisse beim I-Profil

Bei einem Vergleich wie er in Abb. 4-10 abgebildet ist, wurde der c -Wert nicht wie in der Norm angegeben gewählt, sondern etwas der FE-Berechnung angepasst. Der Hintergrund dessen ist, dass im FE-Model keine Schweißnähte abgebildet worden sind und deshalb die Vorgaben der Norm nicht mehr ganz zutreffend waren. Infolgedessen wird die Formel im Berechnungsblatt für die Auswertung nicht wie üblich mit (c/t) sondern mit $(c/t)^*$ bezeichnet.

4.3.2 Klassifizierung für das Hohlprofil

Beispielhaft ergibt sich für den Querschnitt nach Abb. 4-5 ($t=16$ [mm]):

• **Klassifizierung (N alleine):**

Flansch	$c_1 =$	284,00 [mm]		
	$t =$	16,00 [mm]		
	$(c/t)^* = 284/16 =$	17,75	$\geq 33 \cdot \epsilon$	= 26,85 Klasse 1
Steg	$c_2 =$	484,00 [mm]		
	$t =$	16,00 [mm]		
	$(c/t)^* = 484/16 =$	30,25	$\leq 38 \cdot \epsilon$	= 30,92 Klasse 2

Abb. 4-11 Querschnittsklassifizierung des Hohlprofiles (Berechnungsblatt)

Direkt nach der Eingabe der für die Berechnung notwendigen Parameter, erfolgt auch beim Berechnungsblatt des Hohlprofiles, wie bei jenem des I-Profiles, die Einteilung in die Querschnittsklassen. Ohne Einteilung in eben diese Klassen wäre wiederum eine Unterscheidung

zwischen plastischen, elastischen und effektiven Querschnittswerten bei der Berechnung der maximalen Traglast nicht möglich. Um die Einordnung in die Querschnittsklassen etwas zu vereinfachen wird auch beim Hohlprofil wie für das I-Profil, das durch die starre Einspannung entstehende Moment vernachlässigt und daher erfolgt die Klassifizierung ausschließlich mit Hilfe der Drucknormalkraft. Dies ist ein etwas konservativerer Ansatz, als jener bei kombinierter Berücksichtigung von Druck und Biegung. Weiters ist das Moment im Druckgurt generell um ein Vielfaches kleiner als die Normalkraft und es hat daher nicht so einen großen Einfluss auf die Klassifizierung.

Der einzige Unterschied zur Querschnittsklassifizierung des I-Profiles ergibt sich bei den Grenzwerten der einzelnen Querschnittsklassen des Flansches. Wie in Abschnitt 2.1.4 bereits beschrieben, muss eine Unterscheidung bei verschiedenen Lagerungstypen und unterschiedlichen Spannungsverläufen getroffen werden. Dies ist im Gegensatz zur Lagerung des Flansches des I-Profiles, wo eine einseitige Lagerung vorherrscht, beim Flansch des Hohlprofiles eine zweiseitige Lagerung.

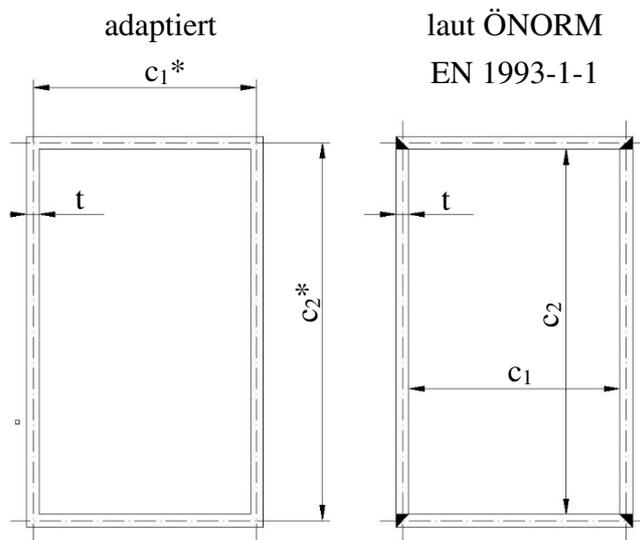


Abb. 4-12 Vergleich der c/t -Verhältnisse beim Hohlquerschnitt

Abb. 4-12 zeigt wie Abb. 4-10 den Unterschied zwischen der in der Norm vorgeschlagenen Ermittlung des c -Wertes und den für diese Diplomarbeit verwendeten und an das FE-Modell angepassten c^* -Wert. Der Hintergrund dessen ist wiederum, dass im FE-Modell keine Schweißnähte abgebildet worden sind und deshalb die Vorgaben der Norm nicht mehr ganz zutreffend waren.

4.4 Ermittlung der effektiven Querschnittswerte nach Eurocode

4.4.1 I-Profil

a) Vorgehensweise

Zu berücksichtigen war, dass sich die effektive Querschnittsfläche A_{eff} ausschließlich mit effektiven Breiten, welche aus reiner Drucknormalkraft, das heißt mit konstanter Spannungsverteilung, wie in Abb. 4-13 a) dargestellt, resultieren, berechnet. Das effektive Widerstandsmoment W_{eff} wird mit den effektiven Breiten des mit Druck belasteten Flansches des Fachwerksuntergurtes, welcher auf einer konstanten Spannungsverteilung basiert und der effektiven Breite des Steges, welche auf einer veränderlichen Spannungsverteilung basiert, berechnet (Abb. 4-13 b)). Der auf Zug belastete Flansch erfährt keine Verringerung der Breite, da hier ein Ausfall von Querschnittsteilen, auf Grund örtlichen Beulens, nicht möglich ist. Bei der Berechnung des Widerstandsmomentes ist eine mögliche Verschiebung der Schwerlinie zu beachten.

Anm.: Wichtig ist hierbei, die Trennung der Belastungen N (Drucknormalkraft) und M_y (Biegemoment) in Einzelbeanspruchungen (Abb. 4-13).

- Infolge $N \rightarrow A_{eff}$
- Infolge $M_y \rightarrow W_{eff}$

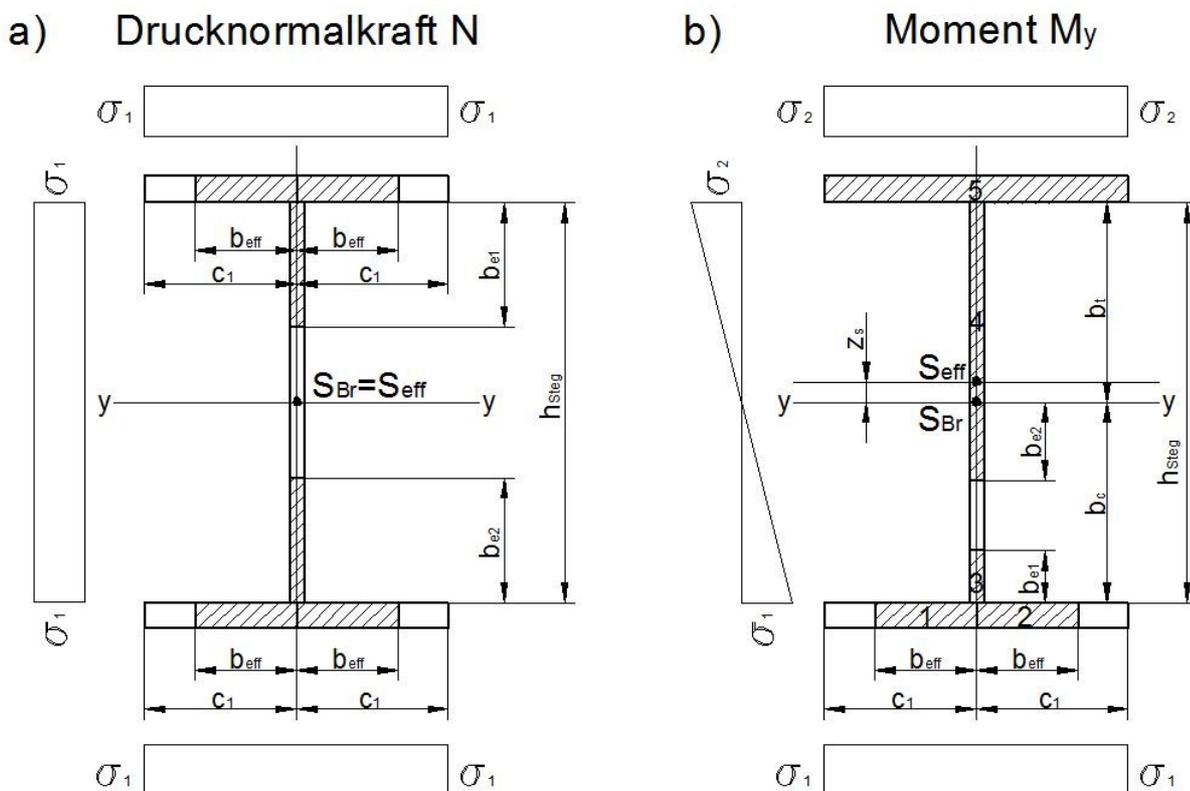


Abb. 4-13 Effektive Breiten bei Drucknormalkraft N und Biegemoment M_y beim I-Profil

b) Effektive Querschnittswerte des I-Profiles nach Eurocode ($A_{c,eff}$ mit N alleine)• **Effektive Breite des Flansches (N alleine)**

$$\begin{aligned}
 \text{Flansch: } \quad \sigma_{cr} &= 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = \\
 \sigma_{cr} &= 190000 * \left(\frac{26}{150}\right)^2 * 0,425 = \quad 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad \text{mit } k_{\sigma} = \quad 0,425 \\
 \bar{\lambda}_p &= \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{242,61}} = \quad 0,38 \\
 \chi_p &= 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748 \\
 \chi_p &= \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = \quad 1,00 \\
 b_{eff} &= c * \chi_p = 150 * 1 = \quad 150,00 \text{ [mm]}
 \end{aligned}$$

Abb. 4-14 Abminderungsfaktor und effektive Breite des Flansches bei gelenkigem Fachwerk beim I-Profil (Berechnungsblatt)

Anm1.: gerechnet wird für die halbe Flanschbreite ($b/2=150$ [mm])

Anm2.: Obige Abbildung zeigt beispielhaft die Berechnung der effektiven Flanschbreite des Ausgangsquerschnittes des I-Profiles mit $h=450$ [mm], $t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm].

Die Vorgehensweise erfolgt wie in EN-1993-1-1 vorgesehen und in Abschnitt 2.1.5 erläutert. Die Höhe des Beulwertes k_{σ} ist abhängig vom Spannungsverlauf und den Lagerungsbedingungen. Im Falle des vorliegenden Flansches ist dies ein dreiseitig gelenkig gelagertes Blech mit einem freien Rand und konstantem Druck, wodurch sich ein Beulwert k_{σ} von 0,425 ergibt. Der Grenzwert für eine Abminderung ist lagerungsbedingt auf 0,748 festgelegt. Die Werte c und t sind ident mit jenen aus der Flanschklassifizierung in Teilabschnitt 4.3.1. Die effektive Breite ergibt sich schlussendlich durch Multiplikation des Abminderungsfaktors mit der Ausgangsbreite (halbe Flanschbreite $b/2$).

• **Effektive Breite des Steges (N alleine)**

Bei Betrachtung als Gelenkfachwerk erhält der Druckgurt nur Normalkräfte, sodass auch für den Steg von einer konstanten Drucknormalspannung auszugehen ist (Abb. 4-13 a).

$$\begin{aligned}
 \text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} &= 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = \\
 \sigma_{cr} &= 190000 * \left(\frac{14}{424}\right)^2 * 4 = 82,86 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad \text{mit } k_{\sigma} = 4,00 \\
 \bar{\lambda}_p &= \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,5}{82,86}} = 0,65 \\
 \chi_p &= 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00 \\
 \chi_p &= \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \\
 b_{eff} &= h_{steg} * \chi_p = 398 * 1 = 398,00 \text{ [mm]}
 \end{aligned}$$

Abb. 4-15 Abminderungsfaktor und effektive Breite des Steges bei gelenkigem Fachwerk beim I-Profil (Berechnungsblatt)

Anm.: Obige Abbildung zeigt beispielhaft die Berechnung der effektiven Stegbreite des Ausgangsquerschnittes des I-Profiles mit $h=450$ [mm], $t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm].

Die Vorgehensweise erfolgt wie in EN-1993-1-1 vorgesehen und in Abschnitt 2.1.5 erläutert. In diesem Fall wird der Beulwert durch eine konstante Spannung und durch eine vierseitig gelenkige Lagerung bestimmt und dies ergibt, wie in Abb. 4-15 ersichtlich, einen Wert von $k_{\sigma}=4$. Wie bei allen Abminderungsfaktoren, bei welchen der Steg allseitig gelenkig gelagert ist, ist die Grenzschlankheit, welche die Berechnungsart und die Höhe des Abminderungsfaktors beeinflusst, auf 0,673 festgelegt. Für die Berechnung des Abminderungsfaktors, ist bei Überschreiten der Grenzschlankheit ($\bar{\lambda}_p \geq 0,673$), der Faktor Psi mit $\psi=+1$ festgelegt. Die Werte c und t sind ident mit jenen aus der Stegklassifizierung in Teilabschnitt 4.3.1. Der abschließende Schritt ist die Multiplikation der Ausgangsbreite mit dem Abminderungsfaktor um die effektive Breite zu erhalten.

• **Berechnung der effektiven Querschnittsfläche $A_{c,eff}$**

Wie nachfolgende Formel zeigt, wird die Querschnittsfläche durch Multiplikation der effektiven Breiten (1xSteg und 4xFlansch, da mit der halben Flanscbreite gerechnet) mit den jeweiligen Dicken (Stegdicke t_s oder Flanschdicke t_f) errechnet.

$$\begin{aligned}
 A_{c,eff} &= b_{eff,Steg} * t_s + 4 * b_{eff,Flansch} * t_f \\
 A_{c,eff} &= 39,8 * 1,4 + 4 * 15 * 2,6 = 211,72 \text{ [cm}^2\text{]}
 \end{aligned}$$

c) Effektive Querschnittswerte des I-Profiles nach Eurocode ($W_{c,y,eff}$ mit M_y alleine)• Effektive Breite des Flansches (M_y alleine)

$$\begin{aligned}
 \text{Flansch: } \sigma_{cr} &= 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_\sigma = \\
 \sigma_{cr} &= 190000 * \left(\frac{26}{150}\right)^2 * 0,425 = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad \text{mit } k_\sigma = 0,425 \\
 \bar{\lambda}_p &= \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{242,61}} = 0,38 \\
 \chi_p &= 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748 \\
 \chi_p &= \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00 \\
 b_{eff} &= c * \chi_p = 150 * 1 = 150,00 \text{ [mm]}
 \end{aligned}$$

Abb. 4-16 Abminderungsfaktor und effektive Breite des Flansches bei starrem Fachwerk beim I-Profil (Berechnungsblatt)

Anm1.: Gerechnet wurde für die halbe Flanschbreite ($b/2=150$ [mm])

Anm2.: Obige Abbildung zeigt beispielhaft die Berechnung der effektiven Flanschbreite des Ausgangsquerschnittes des I-Profiles mit $h=450$ [mm], $t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm].

Auf Grund der gleichen Ausgangslage bezüglich des Querschnittes, der Lagerungsbedingungen und der Spannungsverteilung gilt die idente Vorgehensweise, wie beim Flansch, bei gelenkiger Fachwerksbetrachtung (N alleine).

• Effektive Breite des Steges (M_y alleine)

Im Gegensatz zur Berechnung der effektiven Flanschbreiten ist beim Steg eine Besonderheit aufgetreten, da es, wie in Teilabschnitt 2.1.5 erklärt, Unterschiede in der Breitenermittlung zwischen den konstanten Spannungsverläufen (bei mit alleiniger Drucknormalkraft N beaufschlagten Stegen) und den variablen Spannungsverläufen (bei mit alleinigem Biegemoment M_y beaufschlagten Stegen) gibt. Durch die spezielle Breitenermittlung bei veränderlichem Verlauf war bei der Querschnittswerteermittlung, auf welche nachfolgend noch näher eingegangen wird, auf die entstandene Asymmetrie und in weiterer Folge auf die Verschiebung der Schwerachse (Abb. 4-13 b) zu achten.

Anm.: Die nachfolgenden zwei Abbildungen zeigen beispielhaft die Berechnung der effektiven Stegbreite des Ausgangsquerschnittes des I-Profiles mit $h=450$ [mm], $t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm].

$$\begin{aligned}
 \text{Steg } (\psi = -1): \quad \sigma_{cr} &= 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = \\
 \sigma_{cr} &= 190000 * \left(\frac{14}{424}\right)^2 * 23,90 = 495,08 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad \text{mit } k_{\sigma} = 23,90 \\
 \bar{\lambda}_p &= \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{495,08}} = 0,27 \\
 \chi_p &= 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \\
 \chi_p &= \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00
 \end{aligned}$$

Abb. 4-17 Abminderungsfaktor bei starrem Fachwerk und effektive Breite des Steges beim I-Profil (Berechnungsblatt)

Wie bei allen anderen Abminderungsfaktoren wird auch hier mit Hilfe einer bezogenen Schlankheit ein Abminderungsfaktor für die Berechnung der effektiven Breite (Höhe) des Steges bestimmt. Ein Unterschied, der sich zur Abb. 4-16 ergibt, ist eine etwas verschobene Grenzschlankheit von 0,673 (in Abb. 4-16 mit 0,748 festgelegt) welche auf die veränderten Lagerungsbedingungen zurückzuführen ist. Wird für Abb. 4-16 noch von einer dreiseitigen Lagerung mit freiem Rand ausgegangen, so ändert sich dies bei obiger Abbildung in allseitig gelenkig gelagert. Die Werte c und t sind ident mit jenen aus der Stegklassifizierung aus Teilabschnitt 4.3.1. Der Wert Psi, welcher, wie in Teilabschnitt 2.1.5 beschrieben, den veränderlichen Spannungsverlauf berücksichtigt und bei Überschreiten der Grenzschlankheit ($\bar{\lambda}_p \geq 0,673$) verwendet wird, ist auf Grund des symmetrischen Querschnittes mit $\psi=-1$ festgelegt.

effektive	Breite	$b_{eff,ver.} = b_c * \chi_1 = 199 * 1 =$	199,00 [mm]
veränderlicher	Verlauf:	$b_c = 0,5 * h_{Steg} = 0,5 * 398 =$	199,00 [mm]
		$b_t = 0,5 * h_{Steg} = 0,5 * 398 =$	199,00 [mm]
		$b_{e1} = b_{eff,ver.} * 0,4 =$	79,60 [mm]
		$b_{e2} = b_{eff,ver.} * 0,6 =$	119,40 [mm]

Abb. 4-18 Effektive Breite des Steges bei starrem Fachwerk beim I-Profil (Berechnungsblatt)

Die Ermittlung der Breiten b_t und b_c (in Abb. 4-19 bildlich dargestellt) würde normalerweise eine iterative Herangehensweise erfordern, da sich mit dem Verschieben der Schwerlinie automatisch die Größenordnung von b_t und b_c mitändert. In dieser Arbeit wurde auf diese Iteration verzichtet und die zwei Berechnungsgrößen vereinfacht mit $b_t=0,5*h_{Steg}$ und $b_c=0,5*h_{Steg}$ angenommen.

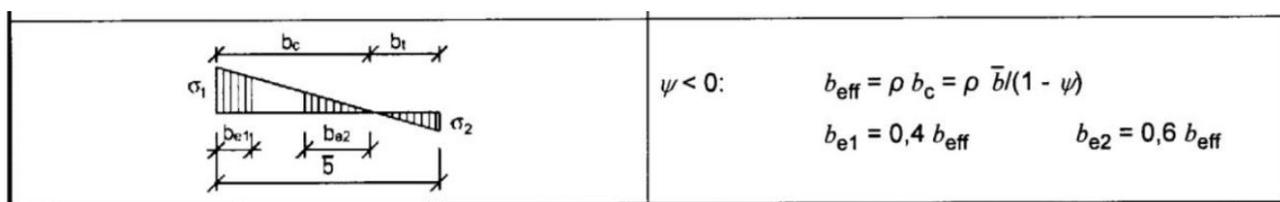


Abb. 4-19 Ermittlung der effektiven Breite des Steges bei veränderlichem Spannungsverlauf (Quelle: EN 1993-1-5)

• **Berechnung des effektiven Widerstandsmomentes $W_{c,eff}$ (M_y alleine)**

Durch das auftretende Biegemoment ergibt sich eine Zug- und eine Druckzone (Abb. 4-13 b), wodurch nach Errechnen der effektiven Breiten ein asymmetrischer Querschnitt und in weiterer Folge eine Verschiebung der Schwerlinie entstehen kann. Dies musste bei der Ermittlung des Widerstandsmomentes berücksichtigt werden.

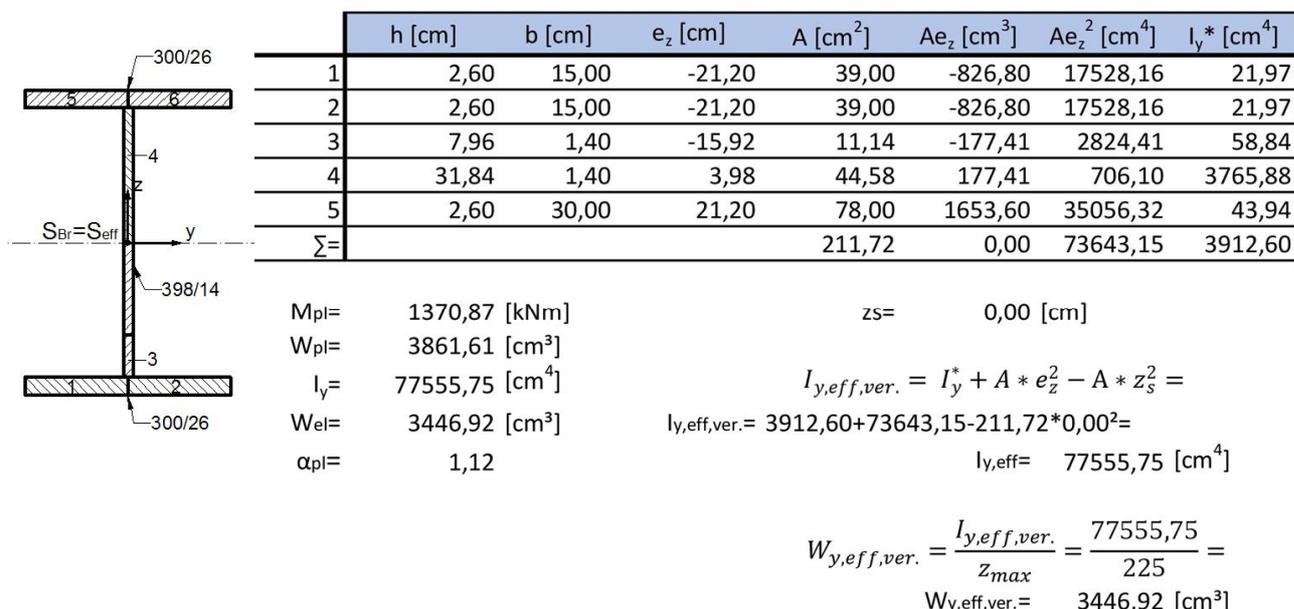


Abb. 4-20 Ermittlung der Querschnittswerte für das I-Profil bei starrem Fachwerk (Berechnungsblatt)

Das effektive Widerstandsmoment W_{eff} wird mit den effektiven Breiten der mit Druck belasteten Flansche des Fachwerksuntergurtes, welche auf einer konstanten Spannungsverteilung basieren und den effektiven Breiten des Steges, welche auf einer veränderlichen Spannungsverteilung basieren, berechnet (Abb. 4-13 b)). Der auf Zug belastete Flansch erfährt keine Verringerung der Breite, da hier ein Ausfall von Querschnittsteilen, auf Grund örtlichen Beulens, nicht möglich ist (Abb. 4-13 b)). Bei der Berechnung des Widerstandsmomentes ist eine mögliche Verschiebung der Schwerachse zu beachten. Diese Verschiebung der Schwerachse ($z_s \neq 0$) würde sich, wie in Abb. 4-20 ersichtlich, bei der Ermittlung des Flächenträgheitsmomentes $I_{y,eff,ver.}$ und bei der Berechnung des Widerstandsmomentes $W_{y,eff,ver.}$ (durch einen größeren Randfaserabstand $z_{max} = h/2 + z_s$), bemerkbar machen. Die plastischen und elastischen Querschnittswerte (M_{pl} , W_{pl} , I_y und W_{el}) sind in Abb. 4-20 lediglich ergänzend angeführt und beziehen sich auf den Bruttoquerschnitt.

4.4.2 Hohlprofil

a) Vorgehensweise

Bei der Ermittlung von $A_{c,eff}$ (infolge N alleine) ist darauf zu achten, dass nur jene effektiven Breiten des Steges und des Flansches verwendet werden, welche sich bei einem konstanten Spannungsverlauf (Abb. 4-21 a)) ergeben. Bei Biegemomentenbeanspruchung M_y ergeben sich wiederum für den Flansch konstante Spannungsverläufe. Bei den Stegen sind bei der Ermittlung des Widerstandsmomentes (alleinige Biegemomentenbeanspruchung M_y) veränderliche Spannungsverläufe vorhanden (Abb. 4-21 b)), was auf Grund der daraus resultierenden Abminderung (Abb. 4-21 b)) einen unsymmetrischen Querschnitt ergibt. Die sich daraus ergebende Ausmittigkeit der Schwerachse muss mitberücksichtigt werden. In nachfolgender Abbildung (Abb. 4-21 b)) ist zu erkennen, dass bei einer Momentenbelastung auf der Zugseite keine Querschnittsabminderung vorzunehmen ist, da in diesem Bereich keine Querschnittsausfälle auf Grund von Beulen möglich sind.

Anm.: Wichtig ist hierbei, die Trennung der Belastungen N (Drucknormalkraft) und M_y (Biegemoment) in Einzelbeanspruchungen.

- Infolge $N \rightarrow A_{eff}$
- Infolge $M_y \rightarrow W_{eff}$

a) Drucknormalkraft N

b) Moment M_y

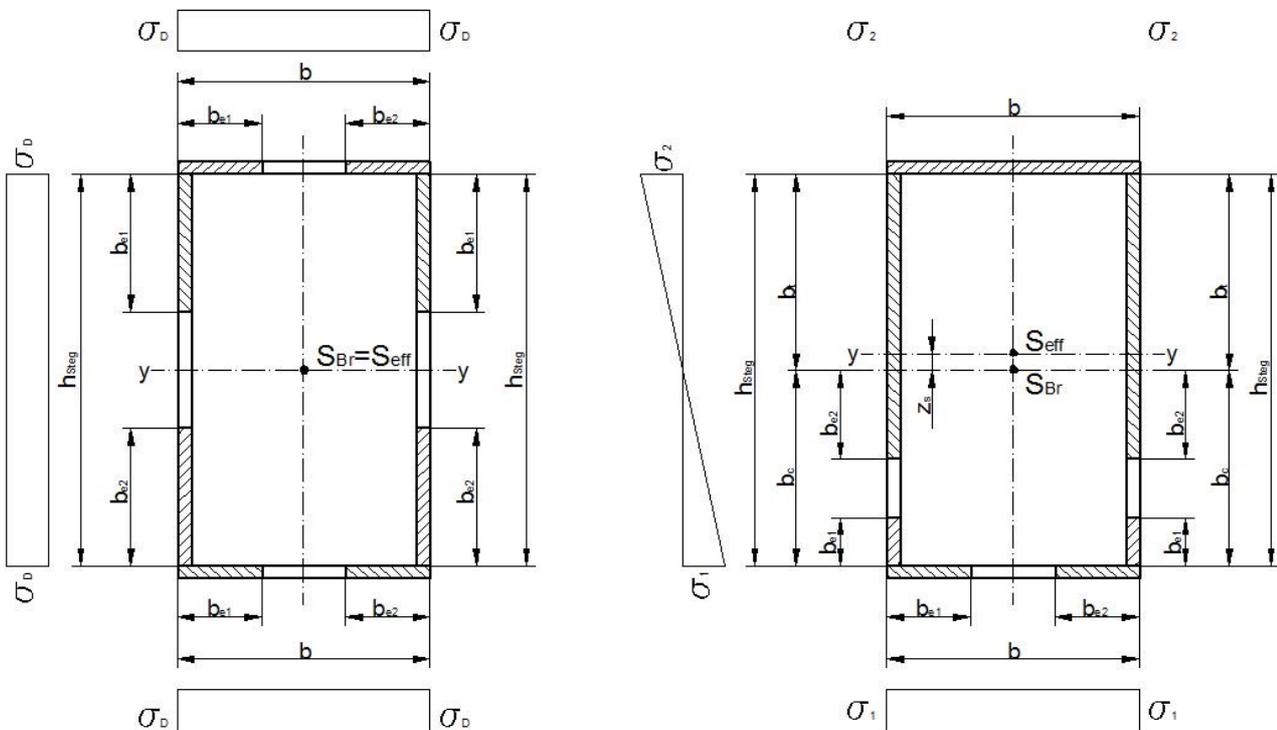


Abb. 4-21 Effektive Breiten bei Drucknormalkraft N und Biegemoment M_y beim Hohlprofil

b) Effektive Querschnittswerte des Hohlprofiles nach Eurocode ($A_{c,eff}$ mit N alleine)

- **Effektive Breite des Flansches (N alleine)**

$$\begin{aligned}
 \text{Flansch } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} &= 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = \\
 \sigma_{cr} &= 190000 * \left(\frac{16}{284}\right)^2 * 4 = \quad 241,22 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad \text{mit } k_{\sigma} = \quad 4,00 \\
 \bar{\lambda}_p &= \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{241,22}} = \quad 0,38 \\
 \chi_p &= 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \\
 \chi_p &= \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi = \quad 1,00 \\
 b_{eff} &= b * \chi_p = 300 * 1 = \quad 300,00 \text{ [mm]}
 \end{aligned}$$

Abb. 4-22 Abminderungsfaktor und effektive Breite des Flansches bei gelenkigem Fachwerk beim Hohlprofil (Berechnungsblatt)

Anm: Obige Abbildung zeigt beispielhaft die Berechnung der effektiven Flanschbreite des Ausgangsquerschnittes des Hohlprofiles mit $h=500$ [mm] und $t=16$ [mm].

Die Vorgehensweise erfolgt wie in Abschnitt 2.1.5 dargestellt. Der Unterschied zur Berechnung beim I-Profil besteht in der Lagerung des Flansches und der sich daraus ergebenden etwas anderen Randbedingungen. Durch die jetzt vierseitige Lagerung des Hohlprofilflansches wird, da eine konstante Spannungsverteilung (Abb. 4-21 b) vorherrscht, laut ÖNORM EN 1993-1-5 ein Beulwert von $k_{\sigma}=4$ angesetzt. Die Werte c und t sind ident mit jenen aus der Stegklassifizierung aus Teilabschnitt 4.3.2. Auf Grund der, in diesem Fall vorherrschenden, vierseitigen Lagerung ändert sich die für die Berechnung mitbestimmende Grenzschlankheit gegenüber dem Flansch des I-Profiles von 0,748 auf 0,673. Der Wert ψ , welcher, wie in Teilabschnitt 2.1.5 beschrieben, den Spannungsverlauf berücksichtigt und bei Überschreiten der Grenzschlankheit ($\bar{\lambda}_p \geq 0,748$) verwendet wird, ist mit $\psi=+1$ festgelegt. Nach einer Multiplikation der Ausgangsbreite mit dem Abminderungsfaktor erhält man die effektive Breite.

• **Effektive Breite des Steges (N alleine)**

Bei Betrachtung als Gelenkfachwerk erfährt der Druckgurt nur Normalkräfte N, sodass auch für den Steg von einer konstanten Drucknormalspannung auszugehen ist.

$$\begin{aligned}
 \text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} &= 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 83,05 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad \text{mit } k_{\sigma} = 4,00 \\
 \sigma_{cr} &= 190000 * \left(\frac{16}{484}\right)^2 * 4 = \\
 \bar{\lambda}_p &= \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{83,05}} = 0,65 \\
 \chi_p &= 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi = 1,00 \\
 \chi_p &= \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \\
 b_{eff} &= h_{Steg} * \chi_p = 468 * 1 = 468,00 \text{ [mm]}
 \end{aligned}$$

Abb. 4-23 Abminderungsfaktor und effektive Breite des Steges bei gelenkigem Fachwerk beim Hohlprofil (Berechnungsblatt)

Anm: Obige Abbildung zeigt beispielhaft die Berechnung der effektiven Flanschbreite des Ausgangsquerschnittes des Hohlprofiles mit $h=500$ [mm] und $t=16$ [mm].

Auf Grund der gleichen Ausgangslage bezüglich des Querschnittes, der Lagerungsbedingungen (allseitig gelenkig gelagert) und der Spannungsverteilung ($\psi=+1$) gilt die idente Vorgehensweise, wie beim Flansch.

• **Berechnung der effektiven Querschnittsfläche $A_{c,eff}$**

Die effektive Querschnittsfläche wird durch Multiplikation der effektiven Breiten (2xSteg und 2xFlansch) mit der Wanddicke errechnet. Nachfolgende Formel zeigt dies anhand des Hohlprofiles mit $t=16$ [mm].

$$\begin{aligned}
 A_{c,eff} &= (2 * b_{eff,Steg} + 2 * b_{eff,Flansch}) * t \\
 A_{c,eff} &= (2 * 46,8 + 2 * 30) * 1,6 = 245,76 \text{ [cm}^2\text{]}
 \end{aligned}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} =$
 $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{16}{484}\right)^2 * 23,90 = 496,25 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad \text{mit } k_{\sigma} = 23,90$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{496,25}} = 0,27$$

$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$ $\rightarrow \chi = 1,00$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

Abb. 4-25 Abminderungsfaktor des Steges bei starrem Fachwerk beim Hohlprofil (Berechnungsblatt)

Anm: Obige Abbildung zeigt beispielhaft die Berechnung der effektiven Flanschbreite des Ausgangsquerschnittes des Hohlprofile mit $h=500 \text{ [mm]}$ und $t=16 \text{ [mm]}$.

Wie schon für die vorhergegangenen Berechnungen angeführt wird, auch in Abb. 4-25 mit Hilfe einer bezogenen Schlankheit ein Abminderungsfaktor für die Berechnung der effektiven Breite (Höhe) des Steges bestimmt. Die Werte c und t sind wiederum ident mit jenen aus der Stegklassifizierung aus Teilabschnitt 4.3.2. Unterschiede, die sich zu Abb. 4-24 ergeben, sind ein, bedingt durch die veränderliche Spannungsverteilung, negatives Psi von $\psi=-1$ und ein, durch die veränderliche Spannungsverteilung höherer Beulwert von $k_{\sigma}=23,9$ (bei $\psi=-1$). Die Grenzschlankheit ist durch die allseitig gelenkige Lagerung wiederum mit $\bar{\lambda}_p = 0,673$ festgelegt.

effektive	Breite	$b_c = 0,5 * h_{\text{Steg}} = 0,5 * 468 =$	234,00 [mm]
veränderlicher	Verlauf:	$b_t = 0,5 * h_{\text{Steg}} = 0,5 * 468 =$	234,00 [mm]
		$b_{\text{eff,ver.}} = b_c * \chi_1 = 234 * 1 =$	234,00 [mm]
		$b_{e1} = b_{\text{eff,ver.}} * 0,4 = 234 * 0,4 =$	93,60 [mm]
		$b_{e2} = b_{\text{eff,ver.}} * 0,6 = 234 * 0,6 =$	140,40 [mm]

Abb. 4-26 Effektive Breite des Steges bei starrem Fachwerk beim Hohlprofil (Berechnungsblatt)

Die Ermittlung der Breiten b_t und b_c (in Abb. 4-26 und Abb. 4-27 bildlich dargestellt) würde normalerweise eine iterative Herangehensweise erfordern, da sich mit dem Verschieben der Schwerachse automatisch die Größenordnung von b_t und b_c mitändert. In dieser Arbeit wurde auf diese Iteration verzichtet und die zwei Berechnungsgrößen vereinfacht mit $b_t=0,5*h_{\text{Steg}}$ und $b_c=0,5*h_{\text{Steg}}$ angenommen. Nach der Multiplikation von der Steghöhe mit dem Abminderungsfaktor erhält man die effektive Breite $b_{\text{eff,ver.}}$ des Steges.

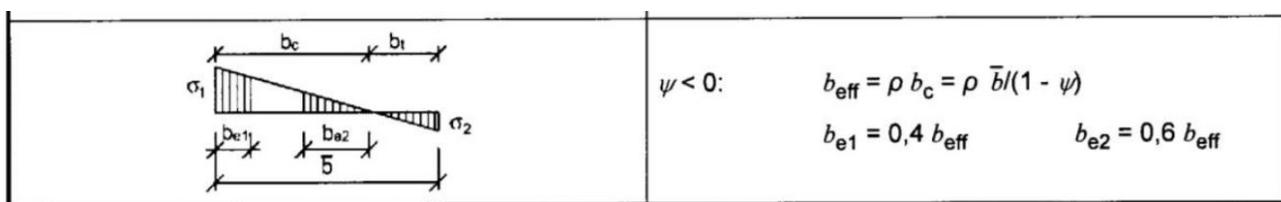


Abb. 4-27 Ermittlung der effektiven Breite des Steges (Quelle: EN 1993-1-5)

• **Berechnung des effektiven Widerstandsmomentes $W_{c,eff}$**

Wie bereits beim I-Profil (in Teilabschnitt 4.4.1 b), ist auch beim Hohlprofil die nach Berücksichtigung des Abminderungsfaktors möglicherweise entstandene Asymmetrie bei der Ermittlung des Widerstandsmomentes zu berücksichtigen.

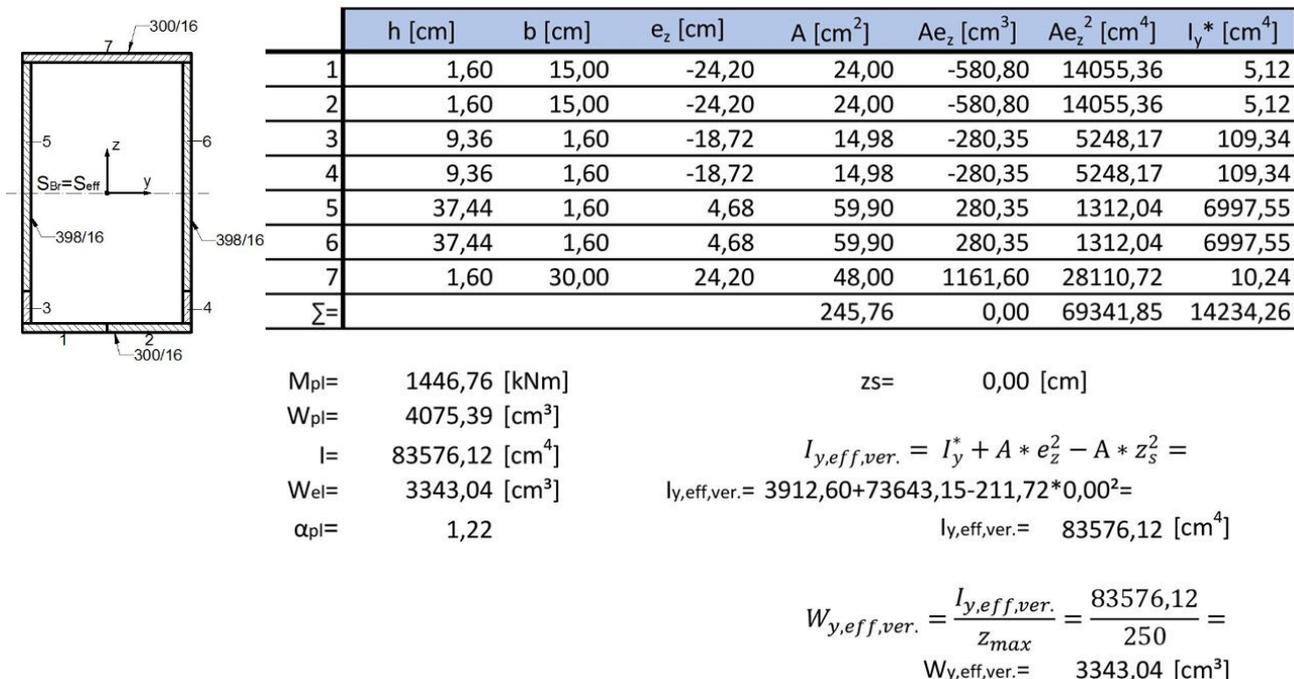


Abb. 4-28 Ermittlung der Querschnittswerte für das Hohlprofil bei starrem Fachwerk (Berechnungsblatt)

Das effektive Widerstandsmoment W_{eff} wird, gleich wie beim I-Profil, mit den effektiven Breiten der mit Druck belasteten Flansche des Fachwerksuntergurtes, welche auf einer konstanten Spannungsverteilung basieren und den effektiven Breiten der beiden Stege, welche auf einer veränderlichen Spannungsverteilung basieren, berechnet (Abb. 4-21 b). Der auf Zug belastete Flansch erfährt keine Verringerung der Breite, da hier ein Ausfall von Querschnittsteilen, auf Grund örtlichen Beulens, nicht möglich ist (Abb. 4-21 b). Bei der Berechnung des Widerstandsmomentes ist eine mögliche Verschiebung der Schwerachse zu beachten. Diese Verschiebung der Schwerachse ($z_s \neq 0$) würde sich, wie in Abb. 4-28 ersichtlich, bei der Ermittlung des Flächenträgheitsmomentes $I_{y,eff,ver.}$ und bei der Berechnung des Widerstandsmomentes $W_{y,eff,ver.}$ (durch einen größeren Randfaserabstand $z_{max} = h/2 + z_s$), bemerkbar machen. Die plastischen und elastischen Querschnittswerte (M_{pl} , W_{pl} , I_y und W_{el}) sind in Abb. 4-28 lediglich ergänzend angeführt und beziehen sich auf den Bruttoquerschnitt.

$$N_{EW} = \frac{2 * b * F_{i,EW}}{a} = 4,2258 * F_{i,EW}$$

Wie die nachfolgende Abbildung zeigt, handelt sich in der oberhalb abgebildeten Formel bei den Faktoren b und a um Normalabstände zwischen dem Lastangriffspunkt der Einzellast F (Achse II) und der Lagerung des Fachwerkdruckstabes (Achse I). Die Formel ergibt sich dann durch aufstellen des Momentengleichgewichtes.

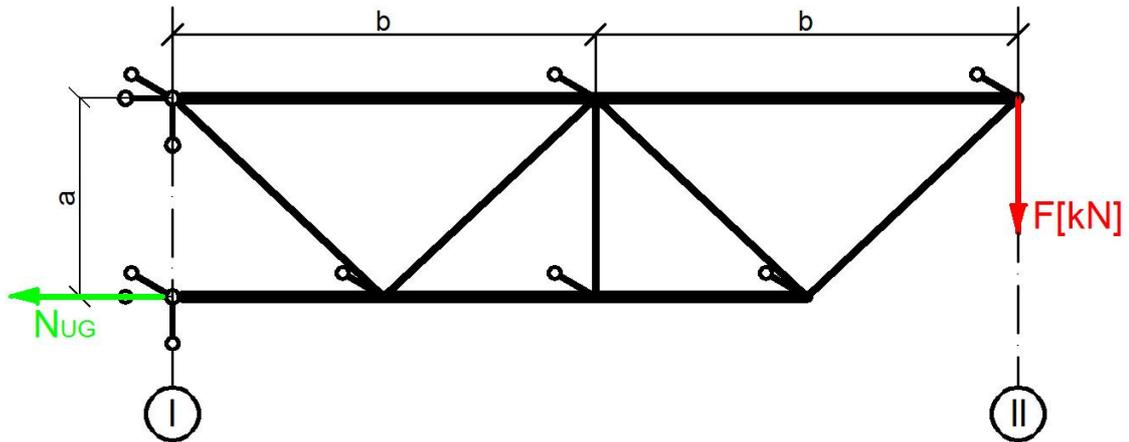


Abb. 4-30 Umrechnung der Eigenwerte - Zusammenhang zwischen der Belastung F und der Drucknormalkraft N_{UG} am maßgebenden Fachwerksstab

b) I-Profil

• Effektive Breite des Flansches

$$\begin{aligned} \text{Flansch: } \sigma_{cr} &= \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = \\ &= \frac{42330,12}{211,72} = 199,93 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \\ \bar{\lambda}_p &= \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{199,93}} = 0,42 \\ \chi_p &= 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748 \\ \chi_p &= \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p} \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \end{aligned}$$

$$\text{effektive Breite bei konst. } b_{eff} = c * \chi_p = 150 * 1 = 150,00 \text{ [mm]}$$

Verlauf:

Abb. 4-31 Abminderungsfaktor und effektive Breite des Flansches mit Hilfe von Eigenwerten beim I-Profil (Berechnungsblatt)

Anm.: Obige Abbildung zeigt beispielhaft die Berechnung der effektiven Flanschbreite des Ausgangsquerschnittes des I-Profiles mit $h=450$ [mm], $t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm]).

Mit Hilfe der in Druckgurtkraft $N_{EW,Flansch,UG}$, für welche im vorhergehenden Teilabschnitt (4.5 a) die Berechnung auf Grundlage des gewählten Eigenwertes des Flansches erklärt ist, kann unter

Einbeziehung der Querschnittsfläche eine kritische elastische Beulspannung errechnet werden. Mit dieser Spannung ist es dann möglich den bezogenen Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ für die Ermittlung des Abminderungsfaktors χ_p zu berechnen. Die Grenzschlankheit, ab welcher eine Querschnittsreduktion erfolgt, ist auf Grund der Lagerungsbedingungen, im Falle des Flansches dreiseitig gestützt mit freiem Rand, auf 0,748 festgelegt. Durch Multiplikation des Abminderungsfaktors mit der Flanschbreite erhält man die effektive Breite des Flansches.

• **Effektive Breite des Steges**

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 150,20 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{150,20}} = 0,49$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei konst. Verlauf:	beff,konst. = h _{Steg} * χ_1 = 398 * 1 =	398,00 [mm]
	be1 = beff,konst. * 0,5 = 398 * 0,5 =	199,00 [mm]
	be2 = beff,konst. * 0,5 = 398 * 0,5 =	199,00 [mm]

Abb. 4-32 Abminderungsfaktor und effektive Breite des Steges mit Hilfe von Eigenwerten beim I-Profil (Berechnungsblatt)

Anm.: Obige Abbildung zeigt beispielhaft die Berechnung der effektiven Stegbreite des Ausgangsquerschnittes des I-Profiles mit $h=450$ [mm], $t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm]).

Mit Hilfe der in Druckgurkraft $N_{EW,Steg,UG}$, für welche im vorhergehenden Teilabschnitt (4.5 a) die Berechnung auf Grundlage des maßgebenden Eigenwertes des Steges erklärt ist, kann unter Einbeziehung der Querschnittsfläche eine kritische elastische Beulspannung errechnet werden. Ein Unterschied, der sich zur Abb. 4-31 ergibt, ist eine etwas verschobene Grenzschlankheit von 0,673, welche auf die veränderten Lagerungsbedingungen zurückzuführen ist. Wird für Abb. 4-31 noch von einer dreiseitigen Lagerung mit freiem Rand ausgegangen, so ändert sich dies bei obiger Abbildung in allseitig gelenkig gelagert. Für die Berechnung des Abminderungsfaktors bei Überschreiten der Grenzschlankheit ($\bar{\lambda}_p \geq 0,673$) ist der Faktor Psi mit $\psi=+1$ festgelegt. Dies ergibt sich aus der konstanten Spannungsverteilung, hervorgerufen durch die Normaldruckkraft $N_{EW,Steg,UG}$. Durch Multiplikation des Abminderungsfaktors mit der Steghöhe erhält man die effektive Breite des Flansches.

Die nachstehende Abbildung zeigt die Aufteilung der effektiven Stegbreite $b_{eff,konst.}$ in b_{e1} und b_{e2} für die anschließend erklärte Berechnung der effektiven Querschnittswerte $A_{c,eff}$ und $W_{y,eff,konst.}$

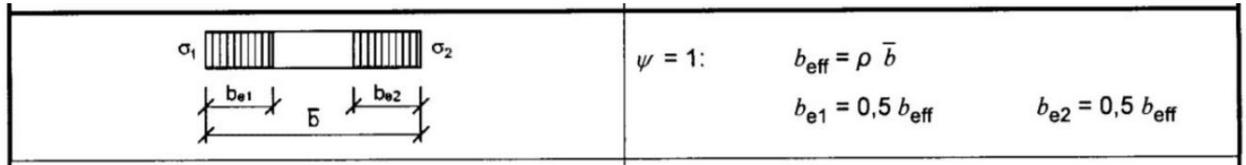


Abb. 4-33 Ermittlung der effektiven Breite des Steges bei konstantem Spannungsverlauf (Quelle: EN 1993-1-5)

• **Berechnung des effektiven Widerstandsmomentes $W_{y,eff,konst.}$ beim I-Profil**

Um den, in Teilabschnitt 4.6 erklärten, letzten Arbeitsschritt, nämlich die Berechnung der maximalen Traglasten, abarbeiten zu können, war die Ermittlung des effektiven Widerstandsmomentes notwendig.

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y [*] [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
2	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
3	19,90	1,40	-9,95	27,86	-277,21	2758,21	919,40
4	19,90	1,40	9,95	27,86	277,21	2758,21	919,40
5	2,60	15,00	21,20	39,00	826,80	17528,16	21,97
6	2,60	15,00	21,20	39,00	826,80	17528,16	21,97
$\Sigma=$				211,72	0,00	75629,06	1926,69

M _{pl} = 1370,87 [kNm]	z _s = 0,00 [cm]
W _{pl} = 3861,61 [cm ³]	
I _y = 77555,75 [cm ⁴]	
W _{el} = 3446,92 [cm ³]	
α _{pl} = 1,12	

$$I_{y,eff,konst.} = I_y^* + A * e_z^2 - A * z_s^2 =$$

$$I_{y,eff,konst.} = 1926,69 + 75629,06 - 211,72 * 0,00^2 =$$

$$I_{y,eff,konst.} = 77555,75 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$W_{y,eff,konst.} = \frac{I_{y,eff,konst.}}{z_{max}} = \frac{77555,75}{225} =$$

$$W_{y,eff,konst.} = 3446,92 \text{ [cm}^3\text{]}$$

Abb. 4-34 Ermittlung der Querschnittswerte für das I-Profil, bei mit Hilfe von Eigenwerten berechneten Querschnittsbreiten (Berechnungsblatt)

Das effektive Widerstandsmoment W_{eff} wird mit den effektiven Breiten der mit Druck belasteten Flansche des Fachwerksuntergurtes, welche auf einer konstanten Spannungsverteilung basieren und der effektiven Breite des Steges, welche ebenfalls auf einer konstanten Spannungsverteilung basiert, berechnet (Abb. 4-29, I-Profil). Auf Grund der Symmetrie des Querschnittes und der Tatsache, dass alle Querschnittskomponenten eine konstante Spannungsverteilung aufweisen (Abb. 4-29), kann eine Verschiebung der Schwerachse, wie sie in den Teilabschnitten 4.4 möglich ist, nicht auftreten ($z_s=0$). Der für die Berechnung von $W_{y,eff,konst.}$ verwendete maximale Randfaserabstand z_{max} ist somit die halbe Profilhöhe, ausgehend vom Flächenschwerpunkt.

Die in Abb. 4-38 ersichtlichen plastischen und elastischen Querschnittswerte (M_{pl} , W_{pl} , I_y und W_{el}) werden mit Hilfe des Brutto-Querschnittes errechnet und sind in Abb. 4-34 lediglich ergänzend angeführt.

• **Berechnung der effektiven Querschnittsfläche $A_{c,eff}$ beim I-Profil**

Wie nachfolgende Formel zeigt, wird die Querschnittsfläche durch Multiplikation der effektiven Breiten (1xSteg und 4xFlansch, da mit der halben Flanscbreite gerechnet) mit den jeweiligen Dicken (Stegdicke t_s oder Flanschdicke t_f) errechnet.

$$A_{c,eff} = b_{eff,Steg} * t_s + 4 * b_{eff,Flansch} * t_f$$

$$A_{c,eff} = 39,8 * 1,4 + 4 * 15 * 2,6 = 211,72 [cm^2]$$

c) Hohlprofil

- Effektive Breite des Flansches

Flansch ($\psi = +1$):

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = \frac{32125,17}{245,76} = 130,72 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{130,72}} = 0,52$$

$\chi_p = 1$ für $\bar{\lambda}_p \leq 0,673$ → $\chi_p = 1,00$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei konst. Verlauf: $b_{eff,konst.} = b * \chi_p = 300 * 1 = 300,00 \text{ [mm]}$

$b_{e1} = b_{eff,konst.} * 0,5 = 300 * 0,5 = 150,00 \text{ [mm]}$

$b_{e2} = b_{eff,konst.} * 0,5 = 300 * 0,5 = 150,00 \text{ [mm]}$

Abb. 4-35 Abminderungsfaktor und effektive Breite des Flansches mit Hilfe von Eigenwerten beim Hohlprofil (Berechnungsblatt)

Anm.: Obige Abbildung zeigt beispielhaft die Berechnung der effektiven Flanscbreite des Ausgangsquerschnittes des Hohlprofiles mit $h=500 \text{ [mm]}$ und $t=16 \text{ [mm]}$.

Mit Hilfe der in Druckgurkraft $N_{EW,Flansch,UG}$, für welche im Teilabschnitt (4.5 a) die Berechnung auf Grundlage des maßgebenden Eigenwertes des Steges erklärt ist, kann unter Einbeziehung der Querschnittsfläche eine kritische elastische Beulspannung σ_{cr} errechnet werden. Ein Unterschied, der sich zum Flansch des I-Profiles ergibt, ist eine etwas verschobene Grenzschlankheit von 0,673, welche auf die veränderten Lagerungsbedingungen zurückzuführen ist. Die Grenzschlankheit $\bar{\lambda}_p$ ist auf Grund der allseitig gelenkigen Lagerung mit 0,673 festgelegt. Für die Berechnung des Abminderungsfaktors bei Überschreiten der Grenzschlankheit ($\bar{\lambda}_p \geq 0,673$) ist der Faktor Psi mit $\psi = +1$ festgelegt. Dies ergibt sich aus der konstanten Spannungsverteilung, hervorgerufen durch die Normaldruckkraft $N_{EW,Flansch,UG}$. Durch Multiplikation des Abminderungsfaktors mit der Steghöhe erhält man die effektive Breite des Flansches.

Die nachstehende Abbildung zeigt die Aufteilung der effektiven Flanschbreite $b_{\text{eff,konst.}}$ in b_{e1} und b_{e2} für die Berechnung der effektiven Querschnittswerte $A_{c,\text{eff}}$ und $W_{y,\text{eff,konst.}}$.

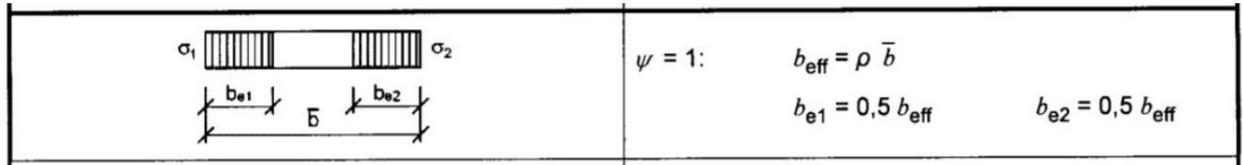


Abb. 4-36 Ermittlung der effektiven Breite des Flansches bei konstantem Spannungsverlauf (Quelle: EN 1993-1-5)

• **Effektive Breite des Steges**

Steg ($\psi = +1$):

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A_{OS}} = \frac{27681,29}{245,76} = 112,64 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{112,64}} = 0,56$$

$\chi_p = 1$ für $\bar{\lambda}_p \leq 0,673$ → $\chi_p = 1,00$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei konst. Verlauf:

$$b_{\text{eff,konst.}} = h_{\text{Steg}} * \chi_p = 468 * 1 = 468,00 \text{ [mm]}$$

$$b_{e1} = b_{\text{eff,konst.}} * 0,5 = 468 * 0,5 = 234,00 \text{ [mm]}$$

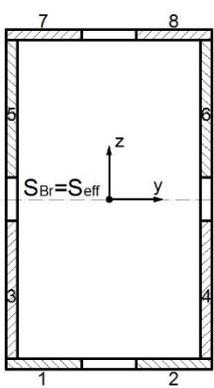
$$b_{e2} = b_{\text{eff,konst.}} * 0,5 = 468 * 0,5 = 234,00 \text{ [mm]}$$

Abb. 4-37 Abminderungsfaktor und effektive Breite des Steges mit Hilfe von Eigenwerten beim Hohlprofil (Berechnungsblatt)

Auf Grund der gleichen Ausgangslage bezüglich des Querschnittes, der Lagerungsbedingungen (allseitig gelenkig gelagert) und der Spannungsverteilung ($\psi = +1$) gilt die idente Vorgehensweise, wie beim Flansch.

• **Berechnung des effektiven Widerstandsmomentes $W_{y,eff,konst.}$ beim Hohlprofil**

Um den Teilabschnitt 4.6 abarbeiten zu können, ist die Ermittlung von $W_{y,eff,konst.}$ von grundlegender Bedeutung.



	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	1,60	15,00	-24,20	24,00	-580,80	14055,36	5,12
2	1,60	15,00	-24,20	24,00	-580,80	14055,36	5,12
3	23,40	1,60	-11,70	37,44	-438,05	5125,16	1708,39
4	23,40	1,60	-11,70	37,44	-438,05	5125,16	1708,39
5	23,40	1,60	11,70	37,44	438,05	5125,16	1708,39
6	23,40	1,60	11,70	37,44	438,05	5125,16	1708,39
7	1,60	15,00	24,20	24,00	580,80	14055,36	5,12
8	1,60	15,00	24,20	24,00	580,80	14055,36	5,12
Σ=				245,76	0,00	76722,09	6854,03

M _{pl} =	1446,76 [kNm]	z _s =	0,00 [cm]
W _{pl} =	4075,39 [cm ³]		
I _y =	83576,12 [cm ⁴]		
W _{el} =	3343,04 [cm ³]		
α _{pl} =	1,22		

$$I_{y,eff,konst.} = I_y^* + A * e_z^2 - A * z_s^2 =$$

$$I_{y,eff,konst.} = 6854,03 + 76722,09 - 211,72 * 0,00^2 =$$

$$I_{y,eff,konst.} = 83576,12 [cm^4]$$

$$W_{y,eff,konst.} = \frac{I_{y,eff,konst.}}{z_{max}} = \frac{83576,12}{250} =$$

$$W_{y,eff,konst.} = 3343,04 [cm^3]$$

Abb. 4-38 Ermittlung der Querschnittswerte für das Hohlprofil (Berechnungsblatt)

Das effektive Widerstandsmoment W_{eff} wird mit den effektiven Breiten der mit Druck belasteten Flansche des Fachwerksuntergurtes, welche auf einer konstanten Spannungsverteilung basieren und den effektiven Breiten der Stege, welche ebenfalls auf einer konstanten Spannungsverteilung basieren, berechnet (Abb. 4-29, Hohlprofil). Auf Grund der Symmetrie des Querschnittes und der Tatsache, dass alle Querschnittskomponenten eine konstante Spannungsverteilung aufweisen (Abb. 4-29, Hohlprofil), kann eine Verschiebung der Schwerachse, wie sie in den Teilabschnitten 4.4 möglich ist, nicht auftreten. Dadurch ist der für die Berechnung von $W_{y,eff,konst.}$ verwendete Wert z_{max} (maximaler Randfaserabstand) mit der halben Profilhöhe $h/2$, ausgehend vom Flächenschwerpunkt, festgelegt.

Die in Abb. 4-38 ersichtlichen plastischen und elastischen Querschnittswerte (M_{pl} , W_{pl} , I_y und W_{el}) werden mit Hilfe des Brutto-Querschnittes errechnet und sind nur ergänzend angeführt.

• **Berechnung der effektiven Querschnittsfläche $A_{c,eff}$ beim Hohlprofil**

Die effektive Querschnittsfläche wird durch Multiplikation der effektiven Breiten (2xSteg und 2xFlansch) mit der Wanddicke errechnet. Nachfolgende Formel zeigt dies anhand des Hohlprofiles mit $t=16$ [mm].

$$A_{c,eff} = (2 * b_{eff,Steg} + 2 * b_{eff,Flansch}) * t$$

$$A_{c,eff} = (2 * 46,8 + 2 * 30) * 1,6 = 245,76 [cm^2]$$

4.6 Ermittlung der maximalen Tragfähigkeiten beziehungsweise Traglasten

4.6.1 GMNIA-Analyse

Anm.: Nachfolgende Erklärung gilt für die in Abb. 4-2 und Abb. 4-6 dargestellten, sowie in den Teilabschnitten 4.2.2 und 4.2.4 für die verschiedenen Querschnitte angeführten Werte aus der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen (F_{GMNIA}).

F_{GMNIA} ist ein direktes Ergebnis aus der geometrischen und materiellen nichtlinearen Lösung mit Imperfektionen (GMNIA). Es wird auch als Laststeigerungsfaktor bezeichnet und ist die maximale Belastung F , die auf das jeweilige Fachwerk wirken darf, damit kein Versagen eintritt. Dieser Wert ist ein Vergleichswert zu den mit Hilfe des Eurocodes berechneten Ergebnissen (nachfolgende Teilabschnitte 4.6.2 und 4.6.3) und fließt direkt in die Diagramme ein.

4.6.2 Vorgehen nach Eurocode

a) Konzept I: Biegesteifes Fachwerk → N & M_y am maßgebenden Querschnitt

Abschließend wird in diesem Teil der Berechnung noch die maximale Traglast bei starrer Fachwerksbetrachtung, abgeleitet aus dem Querschnittsnachweis des Druckgurtes nahe der Lagerachse, ermittelt. Aus der nachfolgend abgebildeten und in Teilabschnitt 2.1.2 c) beschriebenen linearen Interaktion zwischen der Drucknormalkraft N und dem Biegemoment M_y , wird ebenen diese Traglast F (Abb. 4-40) errechnet.

$$F \text{ starres Fachw: } \frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,07012 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1630,22 \text{ [kN]}$$

Abb. 4-39 Berechnung der Traglast bei starrer Fachwerksbetrachtung (N & M_y ; Berechnungsblatt)

Wie bei einem Vergleich von Abb. 4-39 mit Abb. 4-41 ersichtlich ist, kommt bei Konzept I zusätzlich zum Term mit der Untergurtnormaldruckkraft noch ein Term für das Moment hinzu. Dieser Unterschied zur Gelenkfachwerksbetrachtung ergibt sich aus dem annähernd starren Verhalten der Knoten und der daraus resultierenden Fähigkeit der Momentenübertragung. Der Wert 4,2258 spiegelt das Verhältnis $(2*b)/a$ wieder und ist ident mit jenem des Gelenkfachwerkes (Abb. 4-42), bedingt durch die gelenkige Lagerung der Gurte. Im anschließenden Term sind die 0,07012 für die richtige Berechnung des Momentes von essentieller Bedeutung. Beide Werte wurden mit Hilfe des Statikprogrammes RuckZuck ermittelt, da sie nicht direkt aus der FE-Berechnung ausgelesen werden können. Sie sind in Abb. 4-40 bildlich dargestellt. Diese Faktoren können aber auch mit Hilfe einer Handberechnung eines einfach statisch unbestimmten Systems bestimmt werden.

Die verwendeten Querschnittswerte $A_{c,eff}$ (N alleine) und W_{verw} („verw“ steht für das je nach Querschnittsklasse verwendete Widerstandsmoment) ergeben sich aus den Berechnungen in den Teilabschnitten 4.4 und 4.5. Das verwendete Widerstandsmoment W_{verw} kann je Querschnittsklasse W_{pl} (plastisches Widerstandsmoment; Klasse 1 und 2), W_{el} (elastisches Widerstandsmoment; Klasse 3) oder W_{eff} (effektives Widerstandsmoment; Klasse 4) sein.

Der letzte Einflussfaktor ist die Streckgrenze f_y , welche die Materialfestigkeit in die Berechnungen einfließen lässt.

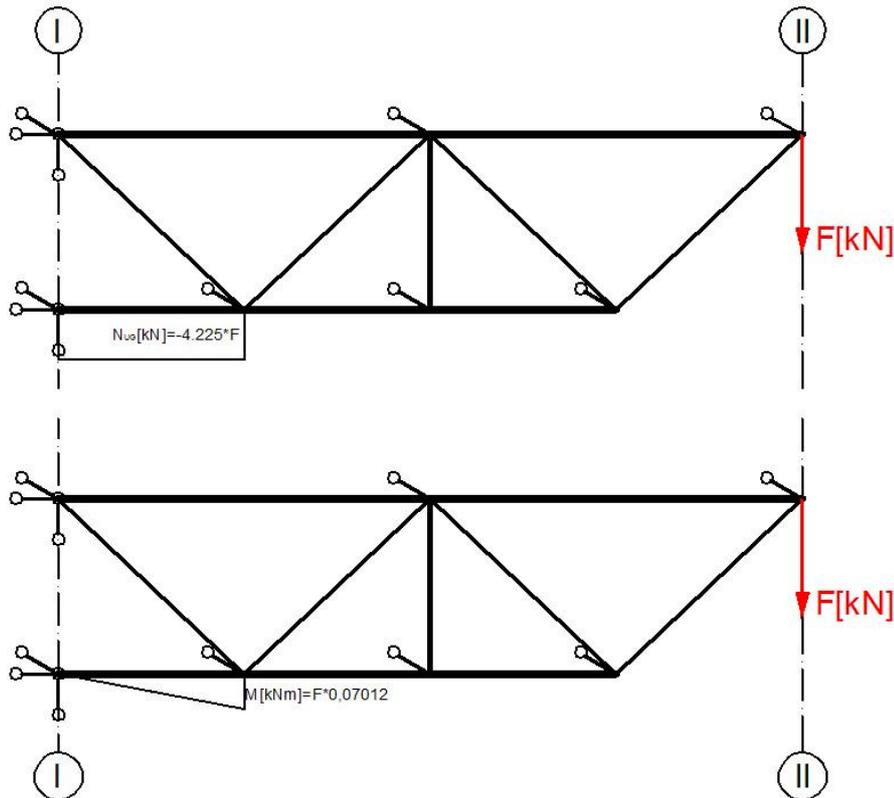


Abb. 4-40 Beziehungen der Drucknormalkraft N und dem Moment M_y beim starren Fachwerk

b) Konzept II: Gelenkfachwerk → nur N am maßgebenden Querschnitt

Wie in der nachfolgenden Abbildung zu sehen ist, wird für die Berechnung der maximalen Traglast F lediglich die effektive Querschnittsfläche $A_{c,eff}$ (N alleine) benötigt.

$$F \text{ gelenkiges Fachw.: } \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{F * 4,2258}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1778,60 \text{ [kN]}$$

Abb. 4-41 Berechnung der Traglast bei gelenkiger Fachwerksbetrachtung (N alleine; Berechnungsblatt)

Wie auch schon für Abb. 4-39 beschrieben, hängt die Höhe der maximalen Traglast bezogen auf das Fachwerksende ausschließlich vom Verhältnis $2 \cdot b/a = 4,2258$, der Streckgrenze und von der Querschnittsfläche ab. Das geometrische Verhältnis mit 4,2258 ist in der nachstehenden Darstellung noch einmal zu sehen. In diesem Berechnungsschritt ist wieder deutlich erkennbar, dass durch die Gelenkfachwerksbetrachtung kein Moment vorhanden ist und ein deutlicher Mehraufwand in der Berechnung entfällt.

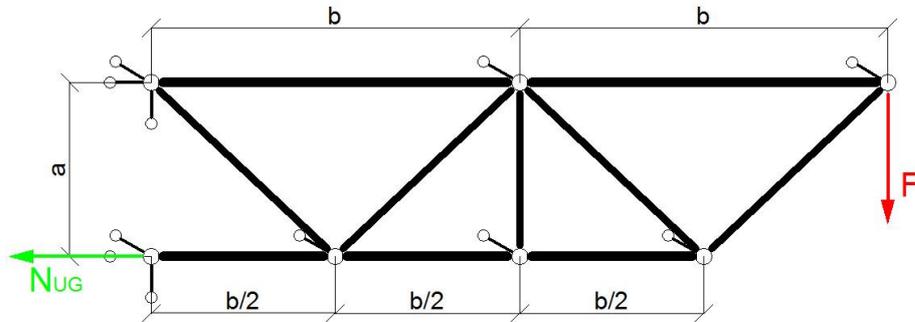


Abb. 4-42 Geometrische Beziehung beim Gelenkfachwerk

4.6.3 Vorgehen nach Eurocode mit verbesserten effektiven Querschnitten aus der Eigenwertberechnung

Mit den verbesserten effektiven Querschnitten $A_{c,eff}$ (N alleine) und W_{verw} („verw“ steht für verwendet und W errechnet sich alleine mit M_y) mit Hilfe der LBA-Analyse, erfolgt die gleiche Vorgehensweise nach Eurocode.

4.7 Zusammenfassung der effektiven Querschnittswerte für die untersuchten Fälle

In den nachfolgenden 3 Tabellen sind die Brutto-Querschnittswerte und die effektiven Querschnittswerte der zwei Nachweisvarianten nach Eurocode von allen variierten Querschnitten (I-Profil und Hohlprofil) dargestellt.

h [mm]	t _f [mm]	t _s [mm]	QS-Kl.	Brutto-QS		eff. QS nach EC		eff. QS nach EC u. EW	
				A [cm ²]	W _{el} [cm ³]	A _{eff} [cm ²]	W _{eff} [cm ³]	A _{eff} [cm ²]	W _{eff} [cm ³]
Variation der Flanschdicke									
450,0	26,0	14,0	2	211,72	3446,92	211,72	3446,92	211,72	3446,92
444,0	20,0		2	176,56	2777,73	176,56	2777,73	211,72	2777,73
438,0	14,0		3	141,40	2091,66	141,40	2091,66	141,40	2091,66
434,0	10,0		4	117,96	1624,42	106,88	1434,99	116,46	1612,28
Variation der Stegdicke									
450,0	26,0	14,0	2	211,72	3446,92	211,72	3446,92	211,72	3446,92
		11,4	4	201,37	3386,21	197,00	3386,21	201,37	3386,21
		8,5	4	189,83	3318,50	180,98	3318,50	187,36	3318,42
		6,9	4	183,46	3281,14	173,25	3281,14	170,62	3126,59
Variation der Steg- und Flanschdicke									
450,0	26,0	14,0	2	211,72	3446,92	211,72	3446,92	211,72	3446,92
444,0	20,0	11,4	4	166,06	2713,88	161,61	2713,38	166,06	2713,38
438,0	14,0	8,5	4	118,85	1947,42	109,73	1947,42	112,52	1891,77
434,0	10,0	6,9	4	88,57	1430,94	66,87	1228,52	69,59	1182,27

Abb. 4-43 Zusammenfassung der effektiven Querschnittswerte für die untersuchten Fälle beim I-Profil mit der Ausgangshöhe von h= 450 [mm]

h [mm]	t _f [mm]	t _s [mm]	QS-Kl.	Brutto-QS		eff. QS nach EC		eff. QS nach EC u. EW	
				A [cm ²]	W _{el} [cm ³]	A _{eff} [cm ²]	W _{eff} [cm ³]	A _{eff} [cm ²]	W _{eff} [cm ³]
Variation der Flanschdicke									
625,0	26,0	19,8	2	269,45	5473,99	269,45	5473,99	269,45	5473,99
619,0	20,0		2	234,64	4513,98	234,64	4513,98	234,98	4513,98
613,0	14,0		3	199,83	3536,55	199,83	3536,55	199,83	3536,55
609,0	10,0		4	176,62	2873,90	165,55	2622,96	174,50	2874,89
Variation der Stegdicke									
625,0	26,0	19,8	2	269,45	5473,99	269,45	5473,99	269,45	5473,99
		16,1	4	248,25	5288,36	239,34	5288,36	248,25	5288,36
		12,0	4	244,76	5082,67	206,74	5082,67	216,68	5025,65
		9,7	4	211,58	4967,28	190,78	4967,28	178,02	4321,98
Variation der Steg- und Flanschdicke									
625,0	26,0	19,8	2	269,45	5473,99	269,45	5473,99	269,45	5473,99
619,0	20,0	16,1	4	213,22	4320,60	204,21	4320,60	213,22	4320,60
613,0	14,0	12,0	4	154,20	3111,91	135,80	3111,98	137,58	2968,09
609,0	10,0	9,7	4	117,13	2310,09	84,68	2039,31	86,42	1914,47

Abb. 4-44 Zusammenfassung der effektiven Querschnittswerte für die untersuchten Fälle beim I-Profil mit der Ausgangshöhe von h= 625 [mm]

h [mm]	t [mm]	QS-Kl.	Brutto-QS		eff. QS nach EC		eff. QS nach EC u. EW	
			A [cm ²]	W _{el} [cm ³]	A _{eff} [cm ²]	W _{eff} [cm ³]	A _{eff} [cm ²]	W _{eff} [cm ³]
Variation der Wanddicke								
500,0	16,0	2	245,76	3343,04	245,76	3343,04	245,76	3343,04
	14,2	4	219,13	3004,24	212,44	3004,24	219,13	3004,24
	12,5	4	193,75	2675,91	179,11	2675,91	189,19	2675,86
	10,0	4	156,00	2178,08	131,82	2178,08	132,66	1998,57

Abb. 4-45 Zusammenfassung der effektiven Querschnittswerte für die untersuchten Fälle beim Hohlprofil

4.8 Darstellung der Ergebnisse mittels Liniendiagramm

Auf die Unterscheidung in gelenkige und biegesteife Betrachtung des Fachwerks wird in diesem Teilabschnitt nicht Rücksicht genommen, da es zwar bei den Werten, nicht aber beim Aufbau der Diagramme Unterschiede gibt und sich nur die Linien verschieben würden.

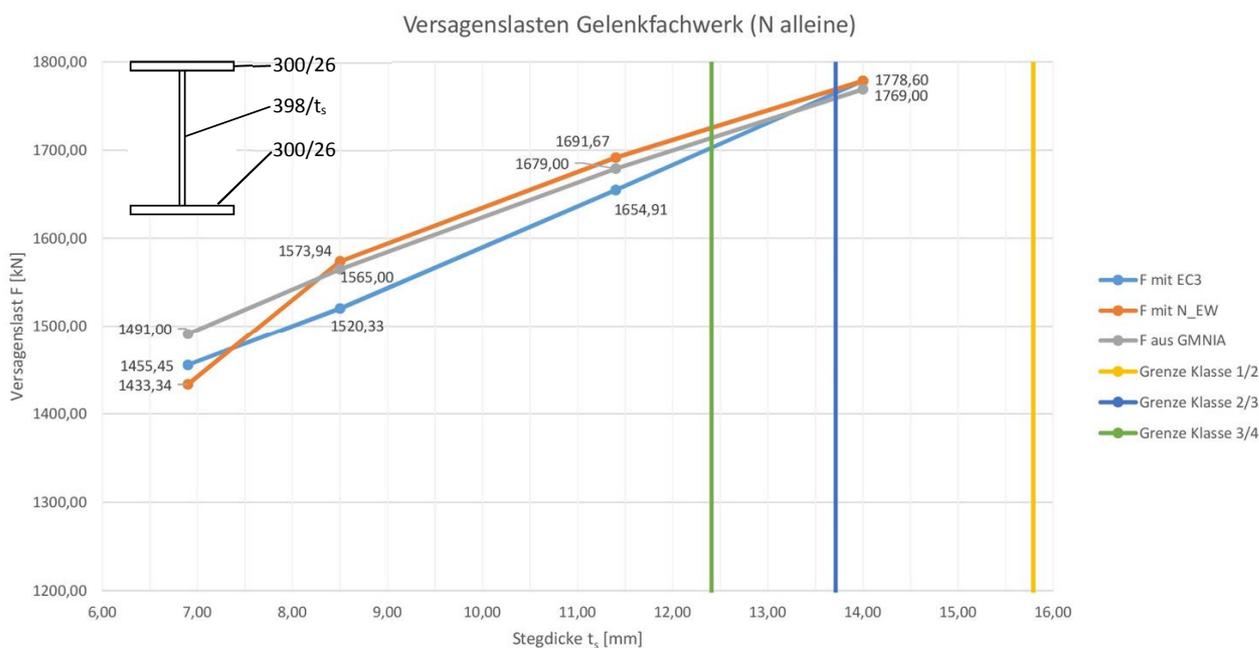


Abb. 4-46 Versagenslasten bei gelenkiger Fachwerkbetrachtung und Variation der Stegdicke (Liniendiagramm)

Die zuvor bei den einzelnen Systemen (System 1, System 2 und System 3) mit verschiedenen Druckgurtquerschnitten durch unterschiedliche Berechnungsvarianten erhaltenen Ergebnisse wurden abschließend in einem Liniendiagramm zusammengefasst. Abb. 4-46 zeigt dies beispielhaft an den Resultaten für die Berechnung mittels Gelenkfachwerk (N alleine) des 450 Millimeter hohen Druckgurtes bei Veränderung der Querschnittswerte durch Variation der Stegdicken. Wie in obiger Darstellung ersichtlich, werden die Punkte schlussendlich durch die verschiedenfarbigen Linien verbunden. Die Lage der Punkte wird durch die Versagenslast auf der Ordinate und durch, in diesem

Fall, die Stegdicke auf der Abszisse definiert. Die Werte der Abszisse können sich gegenüber der oben gezeigten Abbildung insofern verändern, als dass der Flansch anstatt des Steges die Bezugsgröße für die Versagenslast bildet.

- Die in grau gehaltene Linie repräsentiert die Ergebnisse aus der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen.
- Orange sind die Ergebnisse aus der Eurocode-Berechnung mit Hilfe von Eigenwerten.
- Die blaue Linie zeigt die Resultate aus der reinen Eurocode-Berechnung.

Die zwei letztgenannten Methoden werden im Kapitel 4 näher beschrieben.

Die vertikalen Striche repräsentieren die Grenzen der einzelnen Querschnittsklassen

- Wie aus der Legende aus Abb. 4-46 abzulesen ist, bildet die gelbe Linie die Abgrenzung zwischen Querschnittsklasse 1 und 2. Das bedeutet, dass sich der Druckgurt, wenn er einen dickeren Steg als $t_s \approx 15,8$ [mm] hat, in Querschnittsklasse 1 befindet.
- Der Bereich zwischen der gelben und der vertikalen blauen Linie repräsentiert Querschnittsklasse 2.
- Zwischen der vertikalen blauen und der vertikalen grünen Linie befindet sich Querschnittsklasse 3 und bei jeder Stegdicke welche kleiner als $t_s \approx 12,4$ [mm] ist, spricht man von einem Druckgurt der sich in Querschnittsklasse 4 befindet.

4.9 Darstellung der Ergebnisse mittels Balkendiagramme

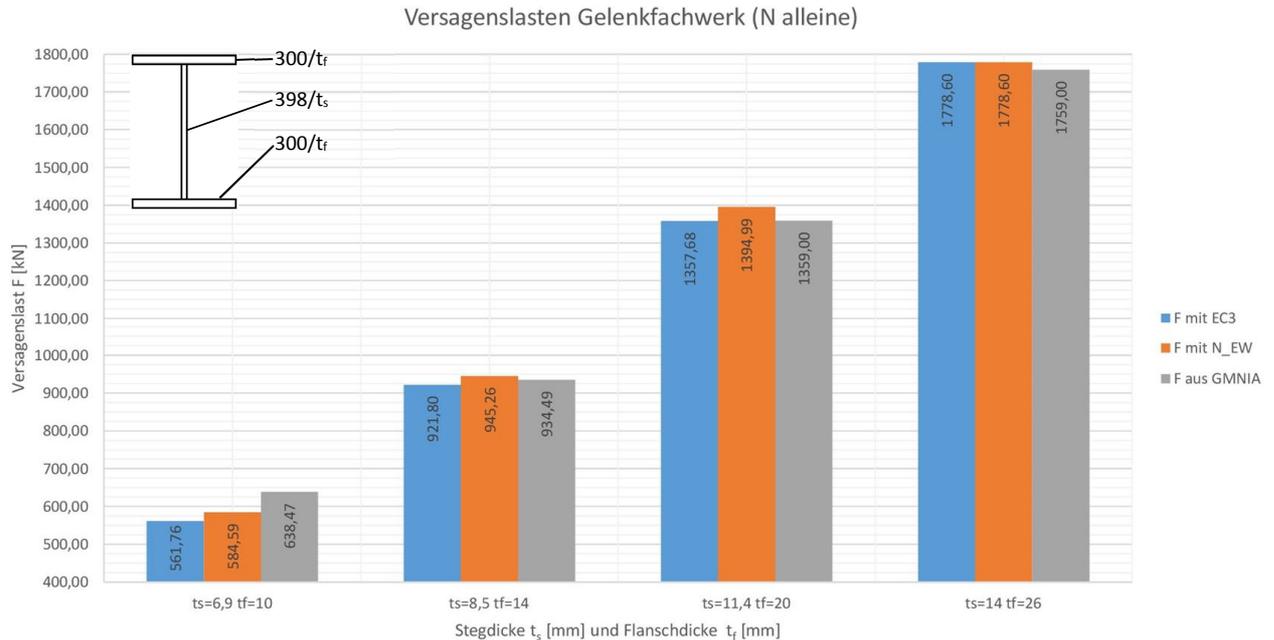


Abb. 4-47 Versagenslasten bei gelenkiger Fachwerksbetrachtung und Variation der Stegdicke (Balkendiagramm)

Auf der Ordinate wird, wie im Liniendiagramm (vorangegangener Abschnitt), die Höhe der Versagenslast in [kN] angegeben. Die Abszisse ist in vier Bereiche geteilt, wobei jeder Bereich eine Steg-/Flanshdickenkombination berücksichtigt. Wie der Legende zu entnehmen ist, sind alle mit Eurocode 3 berechneten Ergebnisse blau dargestellt. Orange hinterlegt sind jene Resultate der kombinierten Lösung aus Numerik und Eurocode und grau sind alle Versagenslasten aus der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen.

Abb. 4-47 zeigt dies beispielhaft an den Resultaten für die Berechnung mittels Gelenkfachwerk (N alleine) des 450 Millimeter hohen Druckgurtes bei Veränderung der Querschnittswerte durch Variation der Stegdicken mit gleichzeitiger Veränderung der Flanshdicke.

5

5 Tragfähigkeitsvergleich für System 1 - Fachwerkträger mit I-Profilen

Die Berechnungsschritte der Tragfähigkeitsermittlung des Systems sind bereits in Kapitel 4 beschrieben worden. In diesem Kapitel erfolgt die Interpretation der Ergebnisse von System 1 und das damit einhergehende und zu erwartende Verhalten des Systems.

In allen, in diesem Kapitel verwendeten, Diagrammen repräsentiert die blaue Linie die Ergebnisse, bei welchen die effektiven Querschnittswerte nach dem Eurocode ermittelt wurden (in den Legenden als EC3 bezeichnet). Die orange Linie zeigt die Ergebnisse, bei welchen die effektiven Querschnittswerte mit Hilfe von Eigenwerten aus der LBA-Analyse und dem Eurocode ermittelt wurde (in den Legenden als N_EW benannt). Die graue Linie stellt die numerischen Vergleichswerte aus der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen dar (in den Legenden mit GMNIA bezeichnet).

Nachstehend wird bei jeder Dickenvariation in ein Ergebnis mittels Gelenkfachwerk (Konzept II; N alleine) und ein Ergebnis mittels biegesteifem Fachwerk (Konzept I; N & M_y) unterschieden. Auf die Unterschiede zwischen den zwei verwendeten Berechnungskonzepten wird im Teilabschnitt „1.1 Einführung und Motivation“ näher eingegangen

5.1 Variation der Stegdicke bei gleichbleibender Flanschdicke

Die in der Berechnung verwendeten und durch die unterschiedlichen Punkte repräsentierten Stegdicken sind 14, 11,4, 8,5 und 6,9 [mm].

5.1.1 Ergebnis mittels Gelenkfachwerk (Konzept II; N alleine)

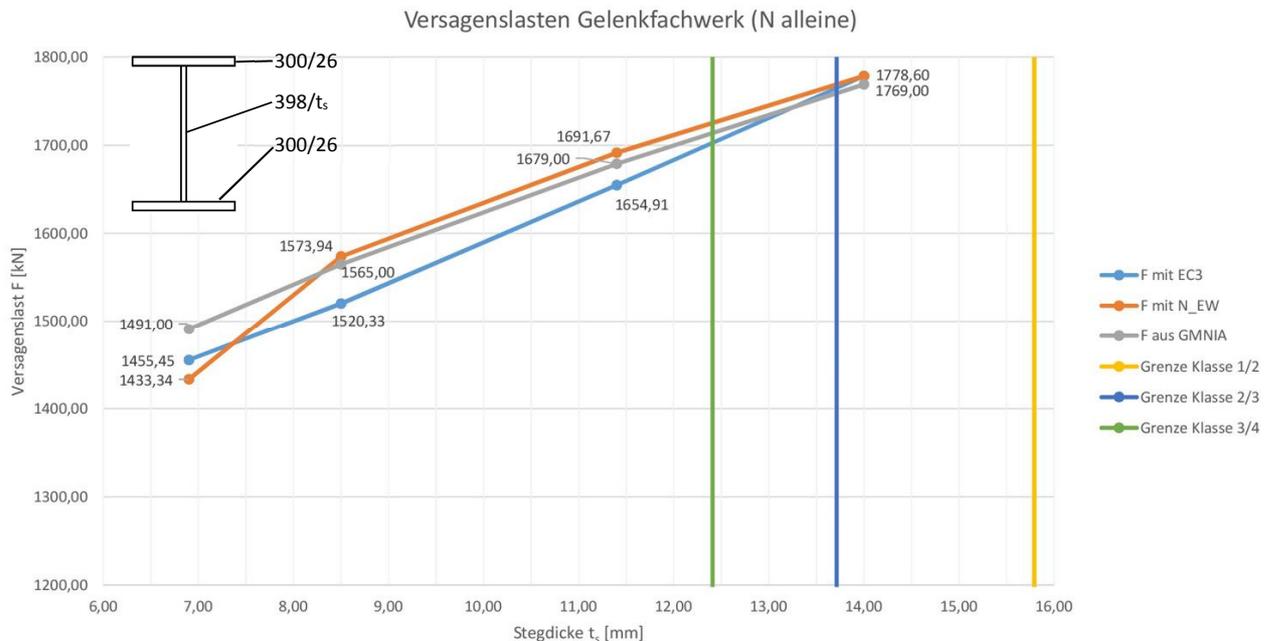


Abb. 5-1 Versagenslasten mittels Gelenkfachwerktheorie und Variation der Stegdicke - System 1

Obige Darstellung zeigt die Ergebnisse nach Gelenkfachwerktheorie (blaue und orange Linie) im Vergleich zum Ergebnis der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen (graue Linie). Dabei ist eine Überschätzung der Eurocode-Berechnungen gegenüber dem numerischen Ergebnis zu erkennen. Der Ausgangsquerschnitt ($t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm]) befindet sich in der Querschnittsklasse 2, das heißt zwischen der gelben und vertikalen blauen Linie. Der Bereich mit Querschnittsklasse 3 ist ein sehr geringer und wurde bei dieser Dickenvariation übersprungen. Daher befinden sich alle restlichen Querschnitte mit verringerter Stegdicke links von der grünen Linie in Querschnittsklasse 4. Es ist zu erkennen, dass sich bis zu einer Stegdicke von 8,5 [mm] die Überschätzung bei der Eurocode-Berechnung konstant in eine Unterschätzung ändert und die mit Eigenwerten berechnete maximale Versagenslast bleibt um circa den gleichen Wert über der numerisch berechneten Last. Die immer größer werdende Differenz zwischen den Eurocodeberechnungen ist hauptsächlich mit dem immer kleiner werdenden Abminderungsfaktor für den Steg bei der reinen Eurocode-Berechnung zu begründen. Der Abfall von der mit Eigenwerten berechneten Last bei der kleinsten Querschnittsfläche ($t_s=6,9$ [mm]), ist auf eine deutliche Erhöhung der Schlankheiten beim Steg und das Überschreiten der Grenzschlankheit beim Flansch zurückzuführen. Dies hat eine Verringerung der Abminderungsfaktoren zur Folge und dadurch reduziert sich automatisch die für den Nachweis verwendbare Querschnittsfläche.

5.1.2 Ergebnis mittels biegesteifem Fachwerk (Konzept I; N & M_y)

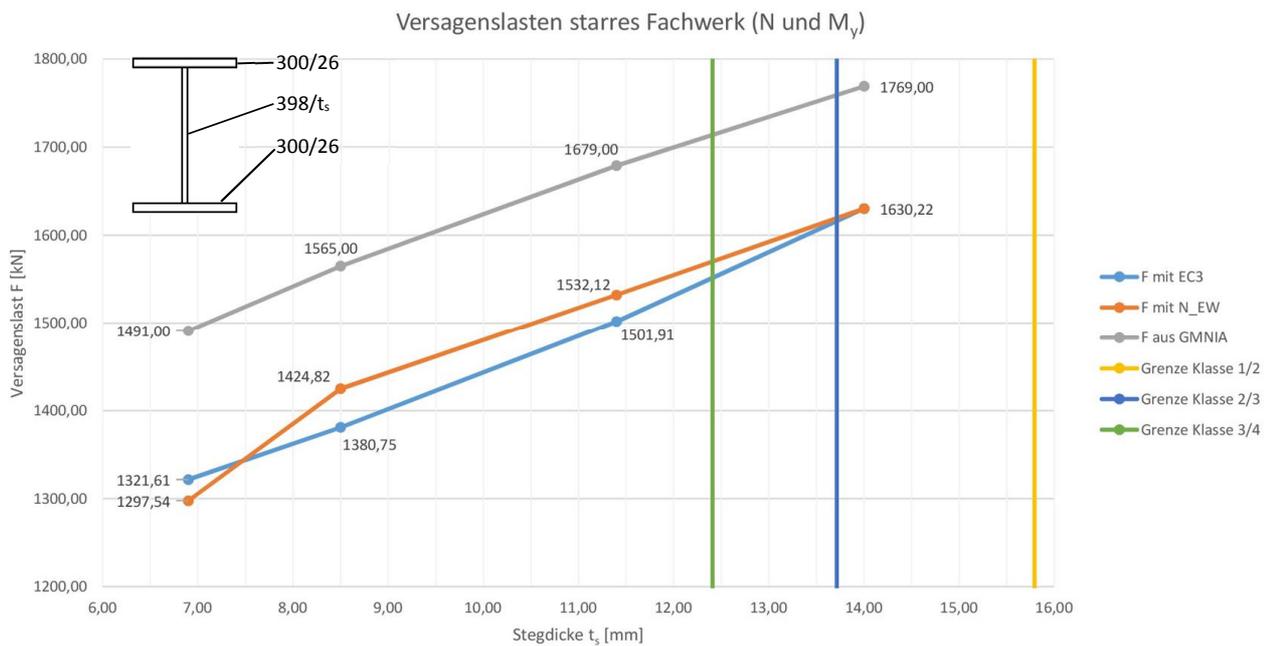


Abb. 5-2 Versagenslasten bei biegesteifer Betrachtung und Variation der Stegdicke - System 1

Gegenüber der vorangegangenen Darstellung ist im oben gezeigten Bild eine deutliche Unterschätzung der Versagenslast bei den Eurocode-Berechnungen zu beobachten, was sich bei allen Dickenvariationen nicht mehr ändert. Dies deshalb, weil hier im Gegensatz zu Teilabschnitt 5.1.1 das Biegemoment Querschnittsnachweis mitberücksichtigt wurde. Bei der reinen Eurocode-Berechnung ist beim kleinsten Querschnitt eine Annäherung gegenüber der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen zu beobachten. Die Versagenslastermittlung mittels Eigenwerten und reiner Eurocode-Berechnung ergibt bei $t_s=8,5$ [mm] erstmals unterschiedliche Werte. Diese geringe Differenz ist durch ein erstmaliges Überschreiten der Grenzschlankheit und der dadurch beginnenden, schwachen Abminderung des Steges bei Berechnung mit Hilfe der Eigenwerte zu erklären. Die Querschnittsfläche des Steges bei einer reinen Eurocode-Berechnung erfährt ebenfalls eine Abminderung auf Grund des Überschreitens der Grenzschlankheit, jedoch wirkt sich dies im Ergebnis nicht so gravierend aus. Bei der letzten Dickenvariation ($t_s=6,9$ [mm]) des Steges beginnt auch beim Flansch eine Abminderung (auch wenn sie noch schwach ist) und der Abminderungsfaktor beim Steg verkleinert sich durch seine gestiegene Schlankheit weiter, was den Abfall bei der kombinierten Berechnung mit Eigenwerten und Eurocode (orange) erklärt.

5.2 Variation der Flanschdicke bei gleichbleibender Stegdicke

Die in der Berechnung verwendeten und durch die unterschiedlichen Punkte repräsentierten Flanschdicken sind 26, 20, 14 und 10 [mm]. Die Unterschiede bei den Ergebnissen aus der numerischen Berechnung gegenüber Abschnitt 5.1 erklären sich durch Änderungen bei der berücksichtigten Imperfektion.

5.2.1 Ergebnis mittels Gelenkfachwerk (Konzept II; N alleine)

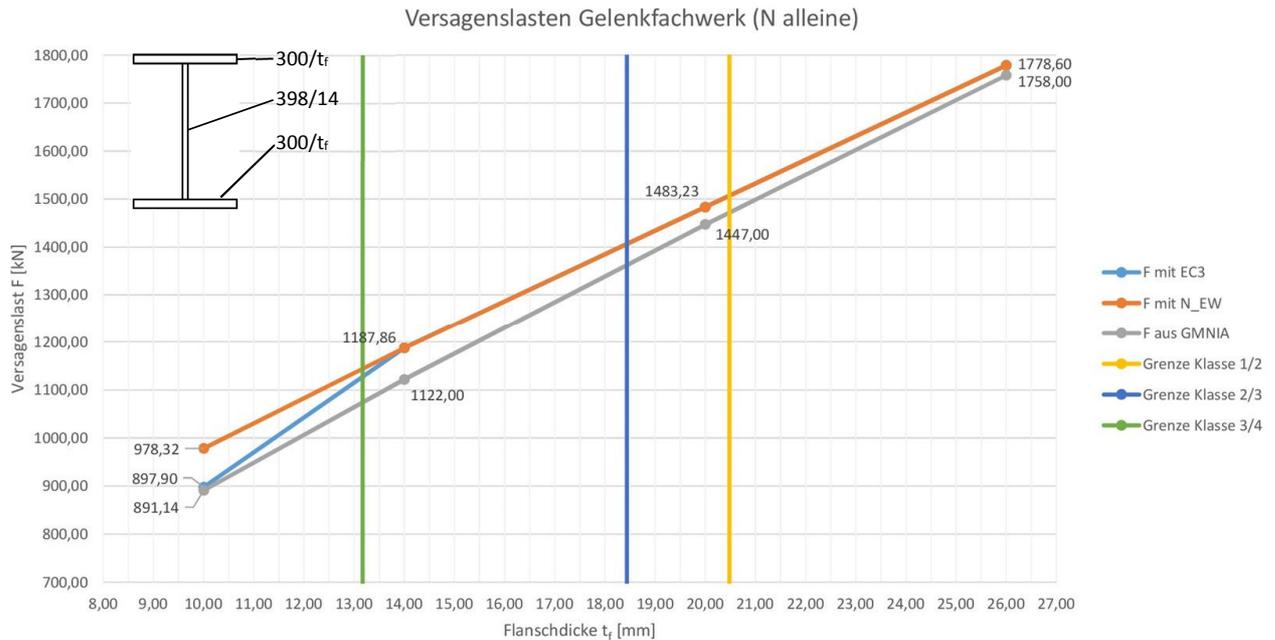


Abb. 5-3 Versagenslasten mittels Gelenkfachwerktheorie und Variation der Flanschdicke - System 1

Die Versagenslast wird bei dieser Art der Querschnittsänderung und Berechnungsmethode mittels Gelenkfachwerk gegenüber der numerischen Lösung durchgehend etwas überschätzt. Die maximal aufnehmbare Last bei der Berechnung mit den Eigenwerten (orange Linie, N_EW) vergrößert sich gegenüber der geometrischen und materiellen nichtlinearen Lösung mit Imperfektionen etwas. Die Werte aus der Ermittlung nach Eurocode decken sich bis zu einer Flanschdicke von $t_f=14$ [mm] mit den Berechnung mit Eigenwerten, fallen dann aber bis zur Flanschdicke von $t_f=10$ [mm] deutlich ab. Dieser Abfall ist mit dem Überschreiten der Grenزشlankheit beim Flansch und der damit einhergehenden rechnerischen Reduktion der verwendbaren Querschnittsfläche, verursacht durch geringere Abminderungsfaktoren, bei Querschnitten in Klasse 4 verbunden. Zwar werden beide Grenزشlankheiten (Flansch und Steg) für die letzte Dickenvariation ($t_f=10$ [mm]) bei der Berechnung mit Eigenwerten auch überschritten, jedoch sind die sich berechnenden Abminderungsfaktoren nahe bei eins, wodurch in Abb. 5-3 bei der reinen Eurocode-Berechnung kein Knick erkennbar ist.

5.2.2 Ergebnis mittels biegesteifem Fachwerk (Konzept I; N & M_y)

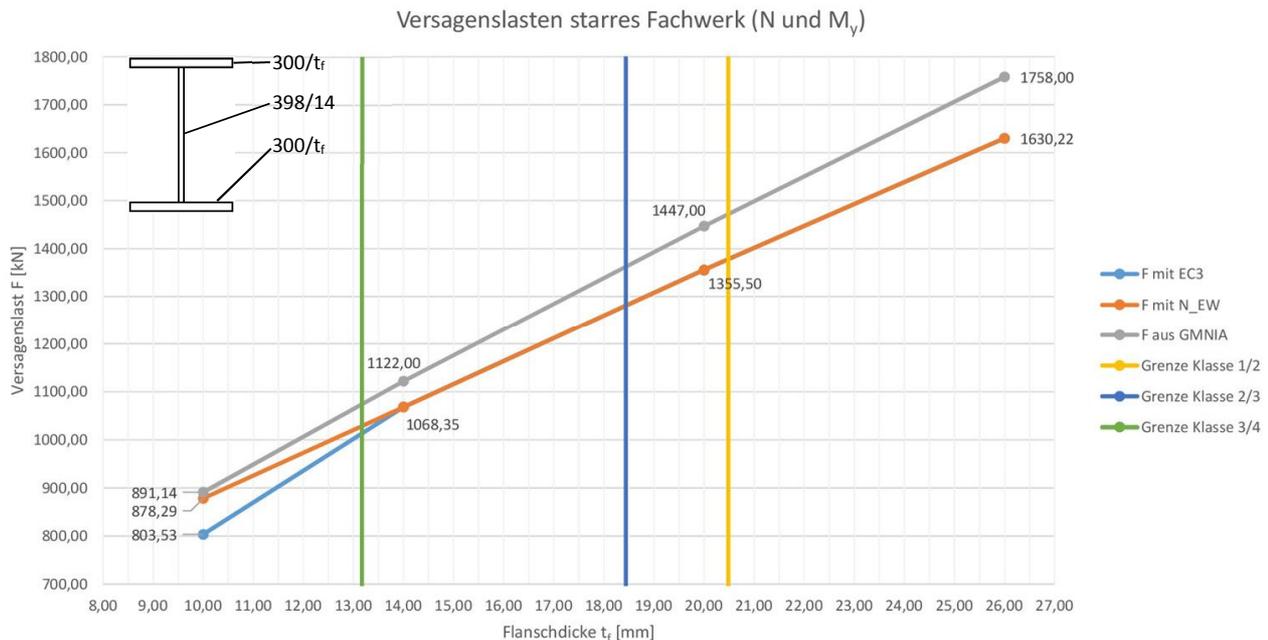


Abb. 5-4 Versagenslasten bei biegesteifer Betrachtung und Variation der Flanschdicke - System 1

Durch die Berücksichtigung des Momentes bei biegesteifer Betrachtung verschieben sich die Ergebnisse der Eurocodeberechnungen, wie bereits bei der Stegdickenvariation gezeigt, unter jene aus der numerischen Berechnung und unterschätzen diese bei allen Dickenvariationen. Bis zu einer Flanschdicke von $t_f=14$ [mm] decken sich die Resultate aus der Ermittlung mit Hilfe der Eigenwerte mit jenen des Eurocodes. Es ist eine leichte Annäherung bei verringerter Flanschdicke gegenüber der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen zu erkennen. Der Abfall der aufnehmbaren Last bei der Eurocodeberechnung nach einer Flanschdicke von $t_f=14$ [mm] erklärt sich, wie bei den vorhergehenden Diagrammen, durch ein Überschreiten der Grenzschlankheit des Flansches und einem dadurch kleineren Abminderungsfaktor, welcher sich bei der Berechnung der Querschnittswerte negativ auf die Versagenslast auswirkt. Wie schon in Abschnitt 5.2.1 ersichtlich, wird auch hier, bei der letzten Dickenvariation ($t_f=10$ [mm]) bei der Berechnung mit Hilfe der Eigenwerte, der Steg und der Flansch abgemindert, jedoch ist diese Abminderung auch hier äußerst gering und dadurch mit keinem Knick in der Linie ersichtlich.

5.3 Variation der Steg- und Flanschdicke

Die in der Berechnung verwendeten und durch die unterschiedlichen Punkte repräsentierten Flanschdicken sind 26, 20, 14 und 10 [mm] mit den jeweils dazugehörigen Stegdicken von 14, 11,4, 8,5 und 6,9 [mm]. Die Unterschiede in den Ergebnissen der numerischen Berechnung gegenüber den Abschnitten 5.1 und 5.2 erklären sich durch die Unterschiede in der Berücksichtigung der Imperfektion.

5.3.1 Ergebnis mittels Gelenkfachwerk (Konzept II; N alleine)

Als zusätzliche Hintergrundinformation ist nachfolgend für die jeweiligen Dickenvariationen die maßgebende Querschnittsklasse angegeben.

- $t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm] Querschnittsklasse 2 (Steg maßgebend)
- $t_s=11,4$ [mm] und $t_f=20$ [mm] Querschnittsklasse 4 (Steg maßgebend)
- $t_s=8,5$ [mm] und $t_f=14$ [mm] Querschnittsklasse 4 (Steg maßgebend)
- $t_s=6,9$ [mm] und $t_f=10$ [mm] Querschnittsklasse 4 (Steg und Flansch)

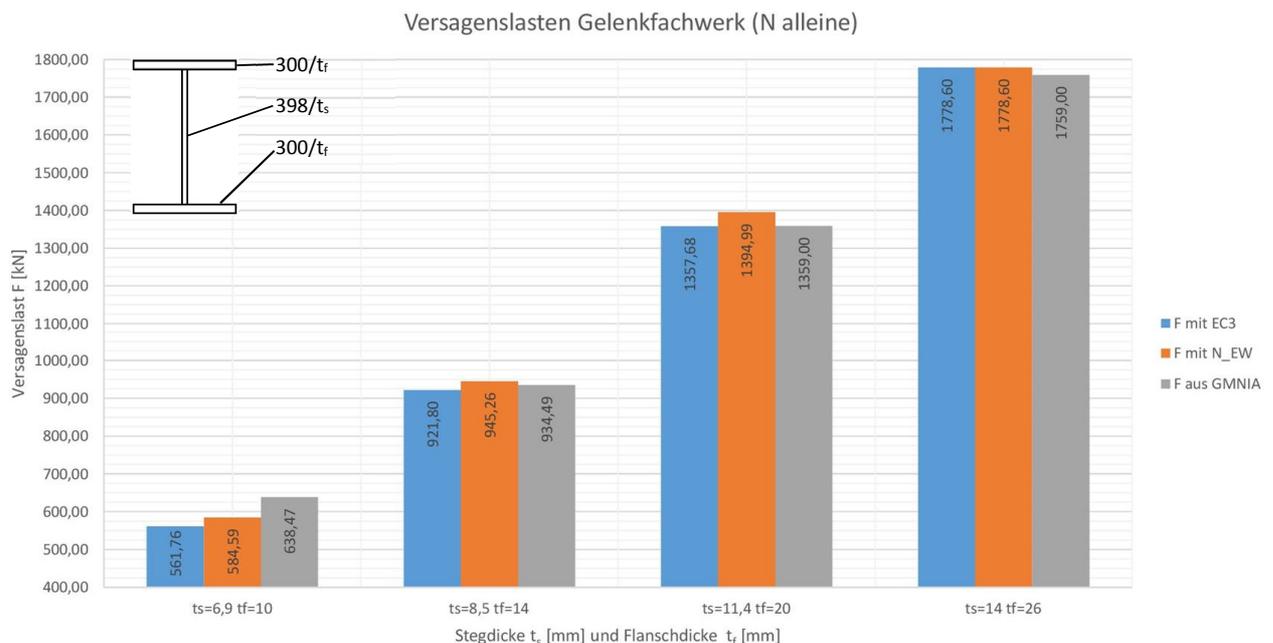


Abb. 5-5 Versagenslasten mittels Gelenkfachwerktheorie und Variation der Stegdicke und Flanschdicke - System 1

Das in Abb. 5-5 dargestellte Balkendiagramm zeigt bei nicht beulgefährdeten Querschnitten eine Überschätzung bei der Berechnung mit Hilfe des Eurocodes gegenüber der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen. Dies ändert sich bei einer Eurocode-Berechnung bereits bei der zweiten Dickenvariation ($t_s=11,4$ [mm] $t_f=20$ [mm]) in eine sehr geringe Unterschätzung, was auf ein erstmaliges Überschreiten der Grenzschlankheit beim Steg zurückzuführen ist. Bei der Berechnung mit den Eigenwerten ist dies nicht der Fall, wodurch auch die Differenz in den Ergebnissen zustande kommt. Beim nächstkleineren Querschnitt ($t_s=8,5$ [mm]

und $t_f=14$ [mm]) wird bei der reinen Eurocode-Berechnung lediglich die Steghöhe weiter abgemindert, jedoch erfahren bei der kombinierten Eurocode-Eigenwert-Berechnung Steg und Flansch eine Abminderung, wodurch es zwischen beiden Ergebnissen, welche mit Hilfe des Eurocodes Berechnet wurden, wiederum eine Annäherung gibt. Beim kleinsten Querschnitt sind die Schlankheiten bei Steg und Flansch so hoch, dass beide Querschnittskomponenten bei beiden Berechnungsvarianten eine deutliche Abminderung erfahren.

5.3.2 Ergebnis mittels biegesteifem Fachwerk (Konzept I; N & M_y)

Als zusätzliche Hintergrundinformation ist auch hier nachfolgend für die jeweiligen Dickenvariationen die maßgebende Querschnittsklasse angegeben.

- $t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm] Querschnittsklasse 2 (Steg maßgebend)
- $t_s=11,4$ [mm] und $t_f=20$ [mm] Querschnittsklasse 4 (Steg maßgebend)
- $t_s=8,5$ [mm] und $t_f=14$ [mm] Querschnittsklasse 4 (Steg maßgebend)
- $t_s=6,9$ [mm] und $t_f=10$ [mm] Querschnittsklasse 4 (Steg und Flansch)

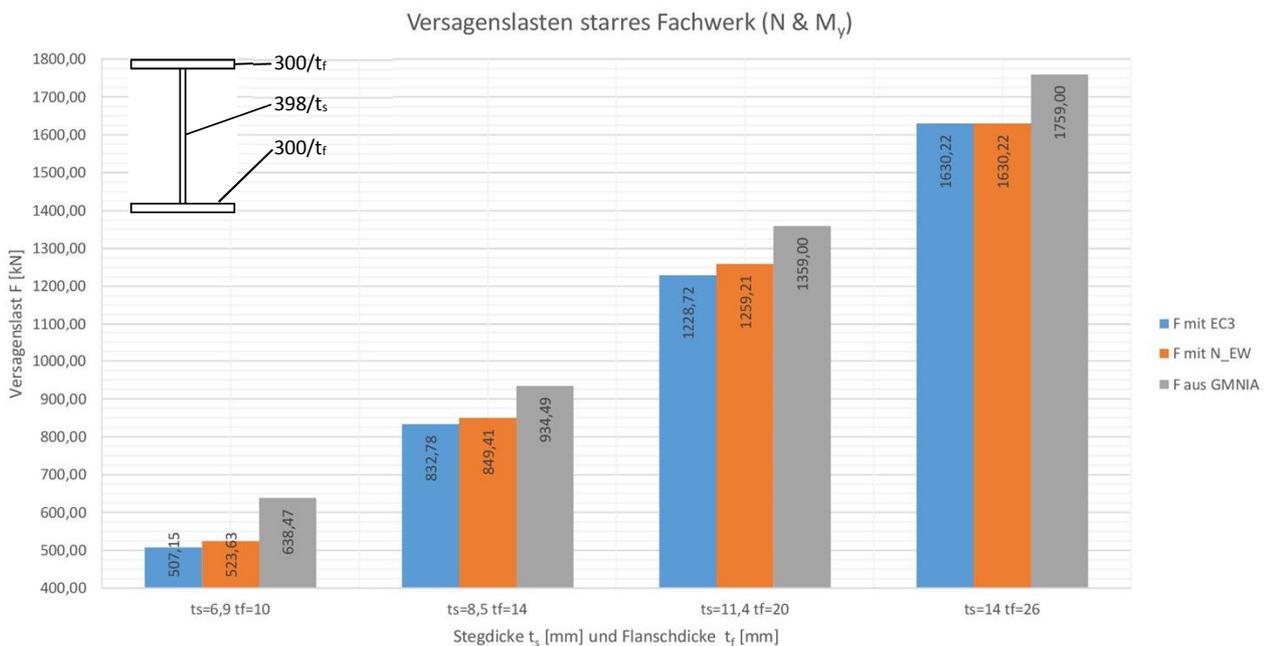


Abb. 5-6 Versagenslasten bei biegesteifer Betrachtung und Variation der Stegdicke und Flanshdicke - System 1

Etwas anders als bei der gelenkigen Betrachtung verhält es sich bei der biegesteifen Betrachtung. Hier ist auf Grund der Berücksichtigung des Momentes eine deutliche Unterschätzung der Versagenslast beim Ausgangsquerschnitt festzustellen. Der erste Unterschied zwischen den Ergebnisse nach Eurocode ist bereits bei $t_s=11,4$ [mm] und $t_f=20$ [mm] zu beobachten, was auf den Abminderungsfaktor des Steges bei konstantem Spannungsverlauf zurückzuführen ist. Gleiches ist beim nächst kleineren Querschnitt ($t_s=8,5$ [mm] und $t_f=14$ [mm]) zu beobachten, jedoch wird hier bei der Lösung mit Eigenwerten neben dem Steg und auch der Flansch abgemindert, wodurch es wieder zu einer leichten Annäherung der beiden Eurocode-Ergebnisse kommt. Beim kleinsten Querschnitt

($t_s=6,9$ [mm] und $t_f=10$ [mm]) werden bis auf den Steg mit veränderlichem Spannungsverlauf alle Querschnittskomponenten deutlich abgemindert, wodurch der Ergebnisunterschied zwischen den Eurocodeberechnungen und der geometrisch und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen noch einmal deutlich ansteigt.

6

6 Tragfähigkeitsvergleich für System 2 - Fachwerkträger mit I-Profil und höherem Querschnitt

Die Berechnungsschritte der Tragfähigkeitsermittlung des Systems sind bereits in Kapitel 4 beschrieben worden. In diesem Kapitel erfolgt die Interpretation der Ergebnisse von System 2 und das damit einhergehende und zu erwartende Verhalten des Systems.

In allen, in diesem Kapitel verwendeten, Diagrammen repräsentiert die blaue Linie die Ergebnisse, bei welchen die effektiven Querschnittswerte nach dem Eurocode ermittelt wurden (in den Legenden als EC3 bezeichnet). Die orange Linie zeigt die Ergebnisse, bei welchen die effektiven Querschnittswerte mit Hilfe von Eigenwerten aus der LBA-Analyse und dem Eurocode ermittelt wurde (in den Legenden als N_EW benannt). Die graue Linie stellt die numerischen Vergleichswerte aus der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen dar (in den Legenden mit GMNIA bezeichnet).

Nachstehend wird bei jeder Dickenvariation in ein Ergebnis mittels Gelenkfachwerk (Konzept II; N alleine) und ein Ergebnis mittels biegesteifem Fachwerk (Konzept I; N & M_y) unterschieden. Auf die Unterschiede zwischen den zwei verwendeten Berechnungskonzepten wird im Teilabschnitt „1.1 Einführung und Motivation“ näher eingegangen

6.1 Variation der Stegdicke bei gleichbleibender Flanschdicke

Die in der Berechnung verwendeten und durch die unterschiedlichen Punkte repräsentierten Stegdicken sind 19,8, 16,1, 12 und 9,7 [mm].

6.1.1 Ergebnis mittels Gelenkfachwerk (Konzept II; N alleine)

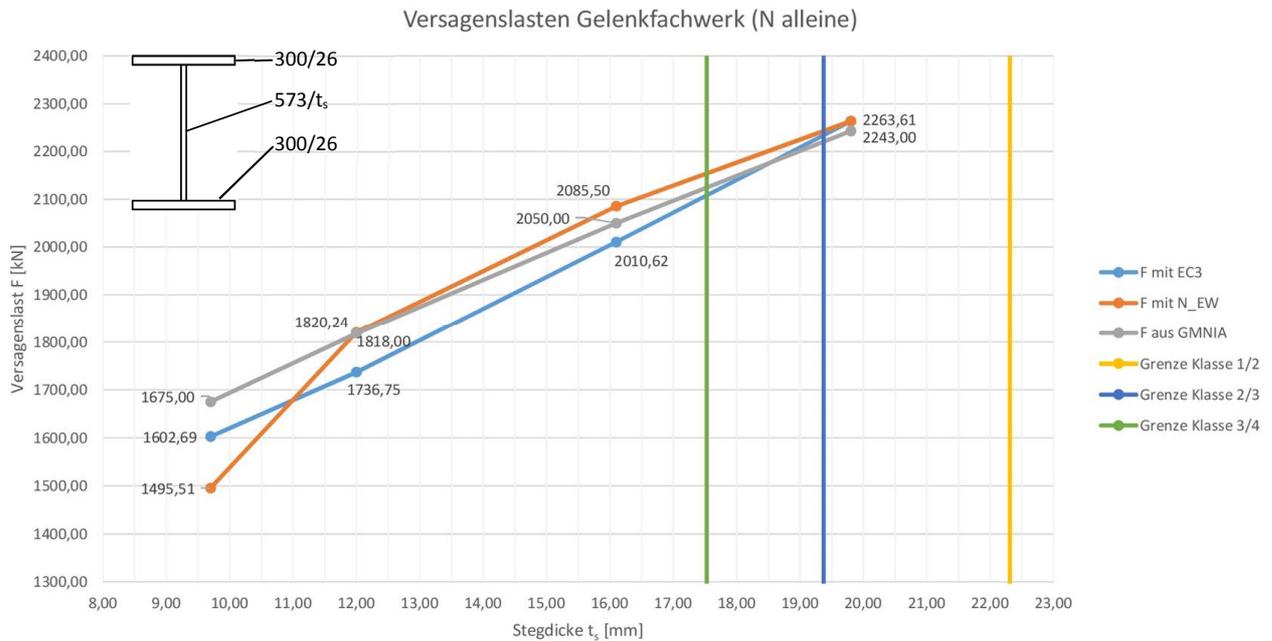


Abb. 6-1 Versagenslasten mittels Gelenkfachwerktheorie und Variation der Stegdicke - System 2

Abb. 6-1 zeigt bei der Variation der Stegdicke eine anfänglich geringfügige Überschätzung der Tragfähigkeiten gegenüber der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen bei der Berechnung nach Eurocode und jener mit Hilfe der Eigenwerte. Der Ausgangsquerschnitt befindet sich in der Querschnittsklasse 2, das heißt zwischen der gelben und vertikalen blauen Linie. Der Bereich mit Querschnittsklasse 3 ist ein sehr geringer und wurde bei dieser Dickenvariation übersprungen. Daher befinden sich alle restlichen Querschnitte links von der grünen Linie in Querschnittsklasse 4. Es ist zu erkennen, dass sich bei einer Stegdicke von $t_s=16,1$ [mm] bereits eine Differenz zwischen den mit Eurocode berechneten Traglasten ergibt. Diese Differenz ist mit einer Grenزشlankheitsüberschreitung und der daraus resultierenden Abminderung des Steges bei der reinen Eurocode-Berechnung zu erklären, wodurch sich hier die Überschätzung bei $t_s=19,8$ [mm] in eine Unterschätzung ändert. Bei einer Stegdicke von $t_s=12$ [mm] wird auch der Steg bei der Berechnung mit Eigenwerten abgemindert, wodurch die Annäherung an die geometrische und materielle nichtlineare Analyse mit Imperfektionen zu erklären ist. Bei der reinen Eurocode-Berechnung wird der Steg weiter abgemindert und dadurch auch der Abstand, zu den mit Hilfe der Eigenwerte berechneten Ergebnissen, halbwegs konstant gehalten. Beim letzten Querschnitt ($t_s=12$ [mm]) sind die Schlankheiten des Flansches und des Steges sehr groß, was einen Abfall der Traglast zur Folge hat. Bei der reinen Eurocode-Berechnung wird wiederum nur der Steg abgemindert,

wodurch diese Versagenslast weiter einigermaßen konstant unter jener der numerischen Analyse bleibt.

6.1.2 Ergebnis mittels biegesteifem Fachwerk (Konzept I; N & M_y)

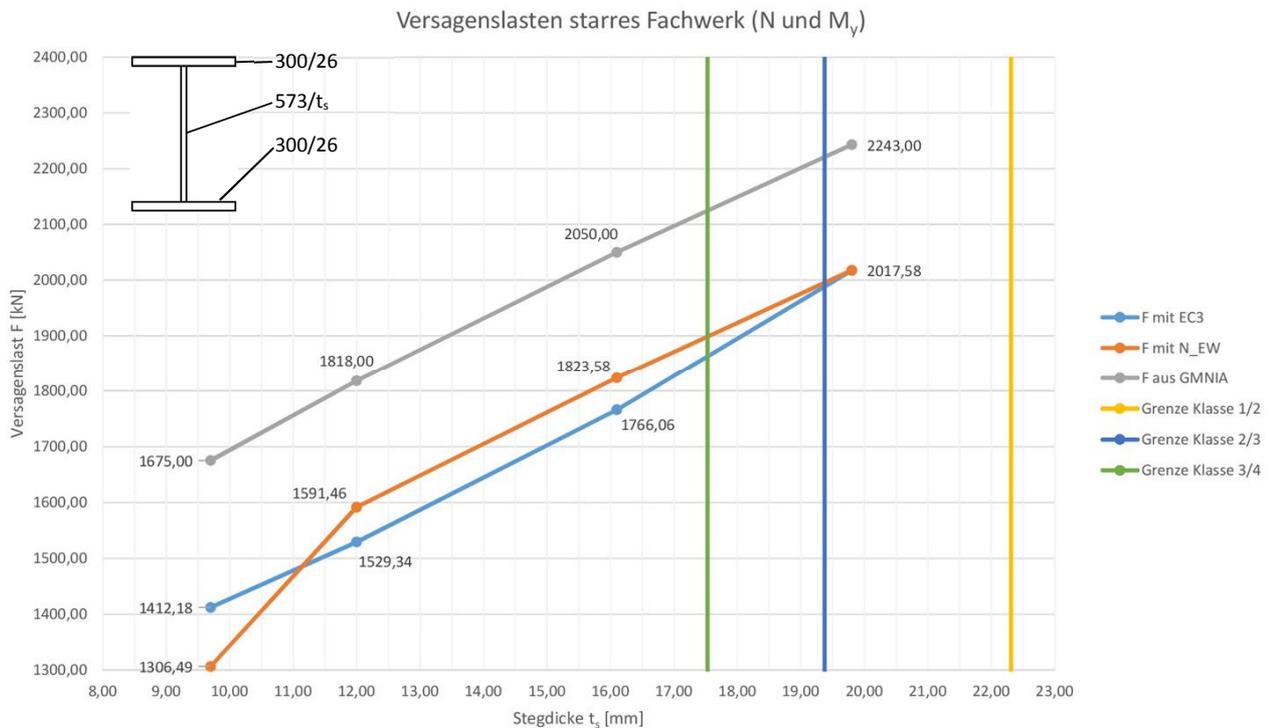


Abb. 6-2 Versagenslasten bei biegesteifer Betrachtung und Variation der Stegdicke - System 2

Gegenüber der vorangegangenen Darstellung ist im oben gezeigten Bild eine deutliche Unterschätzung im Vergleich zur numerisch berechneten Versagenslast zu beobachten und dies ändert sich bei Änderung der Stegdicke nicht. Diese Änderung gegenüber Teilabschnitt 6.1.1 wird in diesem Teilabschnitt durch die zusätzliche Berücksichtigung des Biegemomentes verursacht. Bei einer Eurocode Berechnung ist ab $t_s=12$ [mm] eine Annäherung gegenüber der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen bis zum letzten untersuchten Punkt ($t_s=9,7$ [mm]) hin zu beobachten. Die Versagenslastermittlung mittels Eigenwerten ergibt bis zu $t_s=12$ [mm] eine circa gleichbleibend (im Vergleich mit dem numerischen Ergebnis) geringere aufnehmbare Kraft, jedoch ist gegenüber der reinen Eurocode-Berechnung eine Differenz ab $t_s=16,1$ [mm] bei den Versagenslasten zu erkennen, was wiederum auf den Einfluss des Abminderungsfaktors des Steges zurückzuführen ist. Der Abfall der letzten, mit Einfluss der Eigenwerte berechneten, Versagenslast ($t_s=9,7$ [mm]) ist mit den sehr großen Schlankheiten von Steg und Flansch und der, in weiterer Folge, geringen Querschnittfläche zu begründen. Bei der reinen Eurocode-Berechnung wird wiederum nur der Steg der zur Normalkraft gehörenden Querschnittsfläche abgemindert.

6.2 Variation der Flanschdicke bei gleichbleibender Stegdicke

Die in der Berechnung verwendeten und durch die unterschiedlichen Punkte repräsentierten Flanschdicken sind 26, 20, 14 und 10 [mm].

6.2.1 Ergebnis mittels Gelenkfachwerk (Konzept II; N alleine)

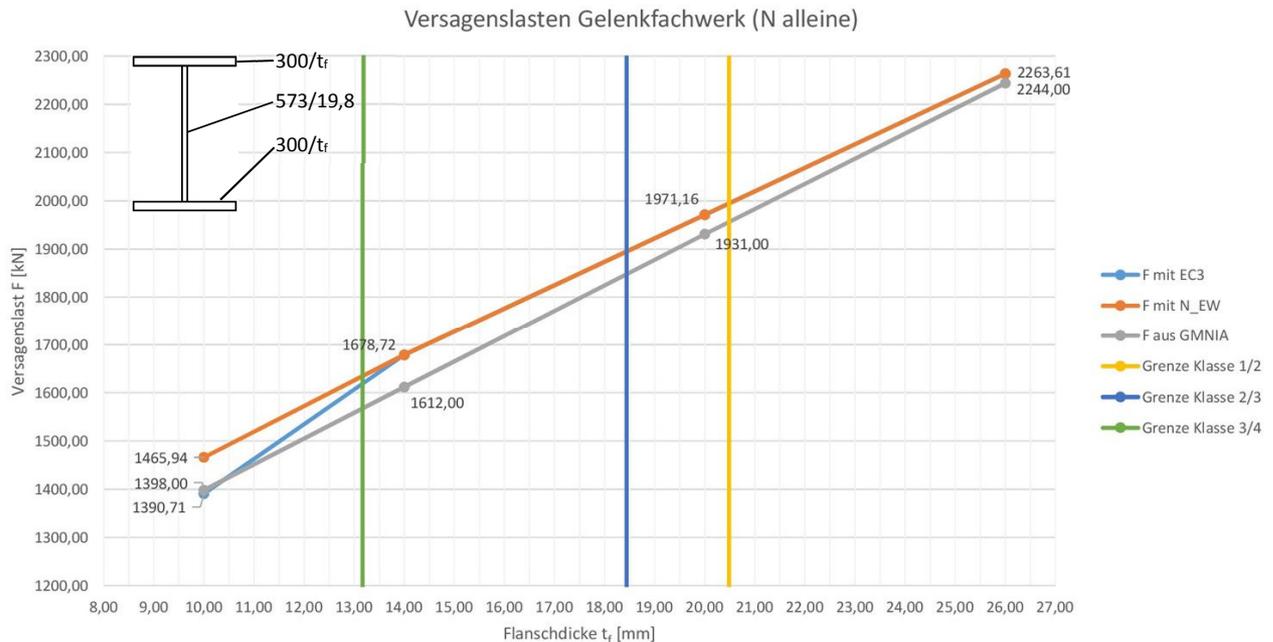


Abb. 6-3 Versagenslasten mittels Gelenkfachwerktheorie und Variation der Flanschdicke - System 2

Die Versagenslast wird bei dieser Art der Querschnittsänderungen und Berechnungsmethode gegenüber der numerischen Lösung durchgehend etwas überschätzt. Einzige Ausnahme bildet der letzte Fall mit $t_s=10$ [mm] bei der Eurocode-Berechnung. Die Abweichung bei der maximal aufnehmbaren Last bei der Berechnung mit den Eigenwerten vergrößert sich gegenüber den numerischen Ergebnissen geringfügig bei abnehmender Stegdicke. Die Werte aus der Ermittlung nach Eurocode decken sich bei Flanschdicke von $t_f \geq 14$ [mm] mit den zuvor erwähnten, da durch die geringen Schlankheiten der Abminderungsfaktor bei allen Querschnittskomponenten 1 ist, fallen dann aber beim letzten untersuchten Querschnitt deutlich ab. Dieser Abfall ist mit dem Überschreiten der Grenزشlankheit des Flansches und der damit einhergehenden rechnerischen Reduktion der verwendbaren Querschnittsfläche bei Querschnitten in Klasse 4 verbunden. Bei der, mit Hilfe der Eigenwerte berechneten Versagenslasten, ergeben sich durch die kleinen Schlankheiten keine nennenswerten Abminderungen.

6.2.2 Ergebnis mittels biegesteifem Fachwerk (Konzept I; N & M_y)

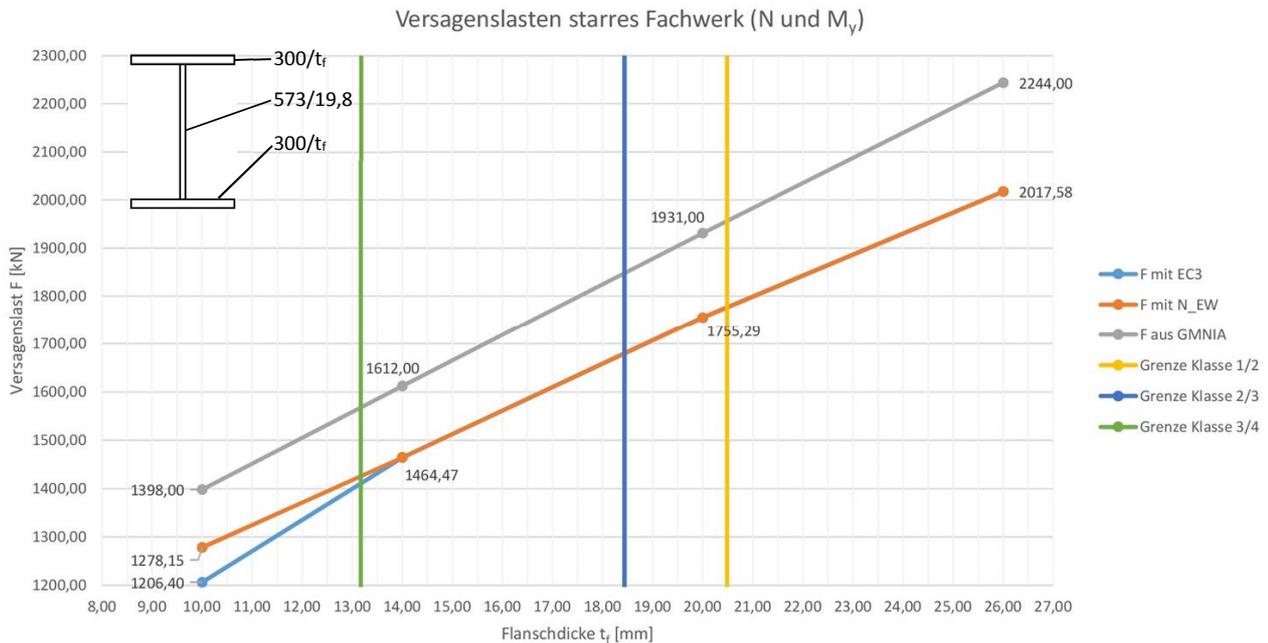


Abb. 6-4 Versagenslasten bei biegesteifer Betrachtung und Variation der Flanschdicke - System 2

Scheinbar gleich wie im vorhergehenden Teilabschnitt ist auch das Verhalten, bei Berücksichtigung des Momentes, beziehungsweise biegesteifer Betrachtung, jedoch verschieben sich die Ergebnisse, wie bereits bei der Stegdickenvariation gezeigt, deutlich unter jene aus der numerischen Berechnung. Bis zu einer Flanschdicke von $t_f \geq 14$ [mm] decken sich die Resultate der reinen Eurocode-Berechnung, durch die nicht vorhandene Abminderung (Abminderungsfaktor von 1), wiederum mit jenen, welche mit Hilfe der Eigenwerte mit dem Eurocode ermittelt wurden. Je geringer die Flanschdicke wird, desto mehr nähern sich die Ergebnisse an die geometrische und materielle nichtlineare Analyse mit Imperfektionen an. Der Abfall der aufnehmbaren Last bei $t_f = 10$ [mm] nach Eurocode erklärt sich wie bei den vorhergehenden Diagrammen durch ein Überschreiten der Grenzschlankheit beim Flansch und der damit einhergehenden Reduktion der Querschnittswerte auf Grund eines kleineren Abminderungsfaktors.

6.3 Variation der Steg und Flanschdicke

Die in der Berechnung verwendeten und durch die unterschiedlichen Punkte repräsentierten Flanschdicken sind 26, 20, 14 und 10 [mm] mit den jeweils dazugehörigen Stegdicken von 19,8, 16,1, 12 und 9,7 [mm].

6.3.1 Ergebnis mittels Gelenkfachwerk (Konzept II; N alleine)

Als zusätzliche Hintergrundinformation ist nachfolgend für die jeweiligen Dickenvariationen die maßgebende Querschnittsklasse angegeben.

- $t_s=19,8$ [mm] und $t_f=26$ [mm] Querschnittsklasse 2 (Steg maßgebend)
- $t_s=16,1$ [mm] und $t_f=20$ [mm] Querschnittsklasse 4 (Steg maßgebend)
- $t_s=12$ [mm] und $t_f=14$ [mm] Querschnittsklasse 4 (Steg maßgebend)
- $t_s=9,7$ [mm] und $t_f=10$ [mm] Querschnittsklasse 4 (Steg und Flansch)

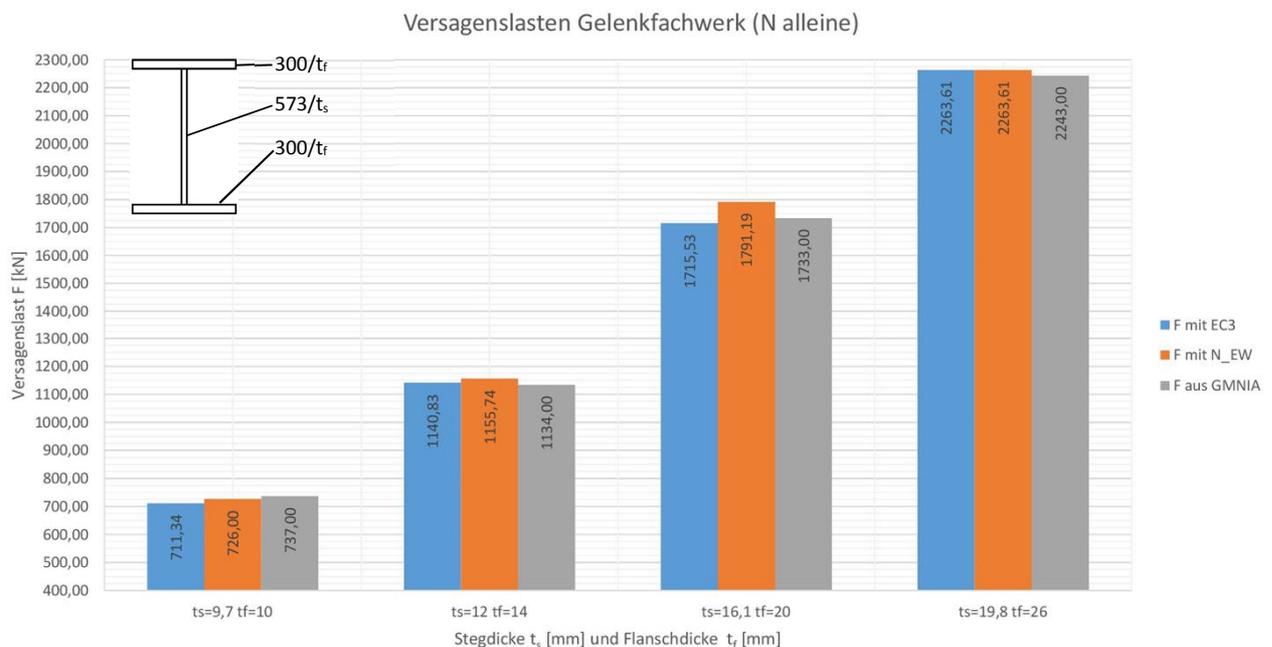


Abb. 6-5 Versagenslasten mittels Gelenkfachwerktheorie und Variation der Stegdicke und Flanschdicke - System 2

Das in Abb. 6-5 dargestellte Balkendiagramm zeigt eine anfängliche (beim Ausgangsquerschnitt $t_s=19,8$ [mm] und $t_f=26$ [mm]) geringe Überschätzung der Berechnungen mittels Eurocode und jener mit Hilfe der Eigenwerte gegenüber der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse. Nach der ersten Reduktion der Querschnittsabmessungen auf $t_s=16,1$ [mm] und $t_f=20$ [mm] vergrößert sich diese Überschätzung bei der Berechnung mit Eigenwerten (keine Abminderung), wohingegen das Ergebnis der reinen Eurocode-Berechnung (geringe Abminderung des Steges) geringfügig unter der numerischen Lösung liegt. Beim größeren der restlichen zwei Querschnitte liegen die Ergebnisse etwas über der numerischen Methode, wobei bei der Berechnung mit Einfluss der Eigenwerte beide Querschnittskomponenten (Steg und Flansch) abgemindert werden und bei der reinen Eurocode-

Berechnung nur der Steg eine weitere Abminderung erfährt. Beim kleinsten Querschnitt ist ein genau gegenteiliges Verhalten zu beobachten. Trotz großer Schlankheiten und Abminderung aller Querschnittskomponenten ist im Gegensatz zu den vorhergegangenen Untersuchungsergebnissen (Variation der Steg- und Flanschdicke) nur ein geringer Abfall der aufnehmbaren Traglasten bei der kleinsten Dickenvariation der Eurocode-Ergebnisse zu beobachten.

6.3.2 Ergebnis mittels biegesteifem Fachwerk (Konzept I; N & M_y)

Als zusätzliche Hintergrundinformation ist nachfolgend für die jeweiligen Dickenvariationen die maßgebende Querschnittsklasse angegeben.

- $t_s=19,8$ [mm] und $t_f=26$ [mm] Querschnittsklasse 2 (Steg maßgebend)
- $t_s=16,1$ [mm] und $t_f=20$ [mm] Querschnittsklasse 4 (Steg maßgebend)
- $t_s=12$ [mm] und $t_f=14$ [mm] Querschnittsklasse 4 (Steg maßgebend)
- $t_s=9,7$ [mm] und $t_f=10$ [mm] Querschnittsklasse 4 (Steg und Flansch)

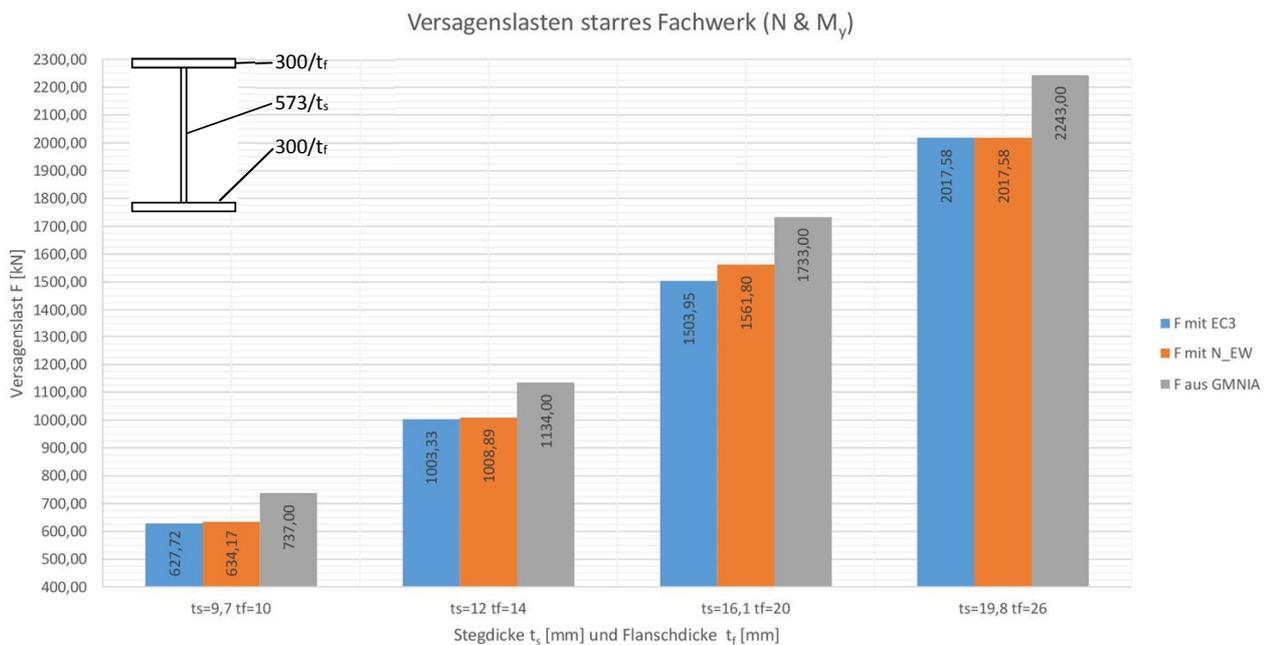


Abb. 6-6 Versagenslasten bei biegesteifer Betrachtung und Variation der Stegdicke und der Flanschdicke

Beim Ausgangsquerschnitt ($t_s=19,8$ [mm] und $t_f=26$ [mm]) liegen die Ergebnisse der Eurocode-Berechnungen deutlich unter jenem aus der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen, was, wie in anderen Teilabschnitten bei biegesteifer Betrachtung auch schon gezeigt, immer bei der Berücksichtigung des Biegemomentes der Fall ist. Nach der ersten Reduktion der Dicken sind noch alle Schlankheiten klein, wodurch es keine Abminderungen und in weiterer Folge Abweichungen in den Ergebnissen der zwei Eurocodeberechnungen gibt, was wiederum weiter eine Unterschätzung des numerischen Ergebnisses zu Folge hat. Beim zweitkleinsten Querschnitt sind die

Abminderungsfaktoren bei reiner Eurocode-Berechnung, bis auf den mit konstantem Spannungsverlauf berechneten Abminderungsfaktor des Steges, weiter 1, was eine deutliche Annäherung an das numerische Ergebnis bedeutet. Bei der Ermittlung der Versagenslast mit Hilfe der Eigenwerte werden Flansch und Steg abgemindert und die Unterschätzung gegenüber der geometrischen und materiellen nichtlinearen Lösung mit Imperfektionen bleibt prozentual gleich hoch, wie bei den vorangegangenen Querschnitten. Beim kleinsten Querschnitt werden alle Querschnittskomponenten abgemindert (bis auf den Steg mit veränderlichem Spannungsverlauf der reinen Eurocode-Berechnung), wodurch die Berechnung mit Einfluss der Eigenwerte das numerische Ergebnis weiter unterschätzt und die Versagenslast der reinen Eurocode-Berechnung sogar über der Last der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen liegt.

7

7 Tragfähigkeitsvergleich für System 3 - Fachwerkträger mit Hohlprofilen

Die Berechnungsschritte der Tragfähigkeitsermittlung des Systems sind bereits in Kapitel 4 beschrieben worden. In diesem Kapitel erfolgt die Interpretation der Ergebnisse von System 3 und das damit einhergehende und zu erwartende Verhalten des Systems.

In allen, in diesem Kapitel verwendeten, Diagrammen repräsentiert die blaue Linie die Ergebnisse, bei welchen die effektiven Querschnittswerte nach dem Eurocode ermittelt wurden (in den Legenden als EC3 bezeichnet). Die orange Linie zeigt die Ergebnisse, bei welchen die effektiven Querschnittswerte mit Hilfe von Eigenwerten aus der LBA-Analyse und dem Eurocode ermittelt wurde (in den Legenden als N_EW benannt). Die graue Linie stellt die numerischen Vergleichswerte aus der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen dar (in den Legenden mit GMNIA bezeichnet).

Nachstehend wird bei jeder Dickenvariation in ein Ergebnis mittels Gelenkfachwerk (Konzept II; N alleine) und ein Ergebnis mittels biegesteifem Fachwerk (Konzept I; N & M_y) unterschieden. Auf die Unterschiede zwischen den zwei verwendeten Berechnungskonzepten wird im Teilabschnitt „1.1 Einführung und Motivation“ näher eingegangen

Die in der Berechnung verwendeten und durch die unterschiedlichen Punkte repräsentierten Wandstärken sind 16, 14,2, 12,5 und 10 [mm].

7.1 Ergebnis mittels Gelenkfachwerk (Konzept II; N alleine)

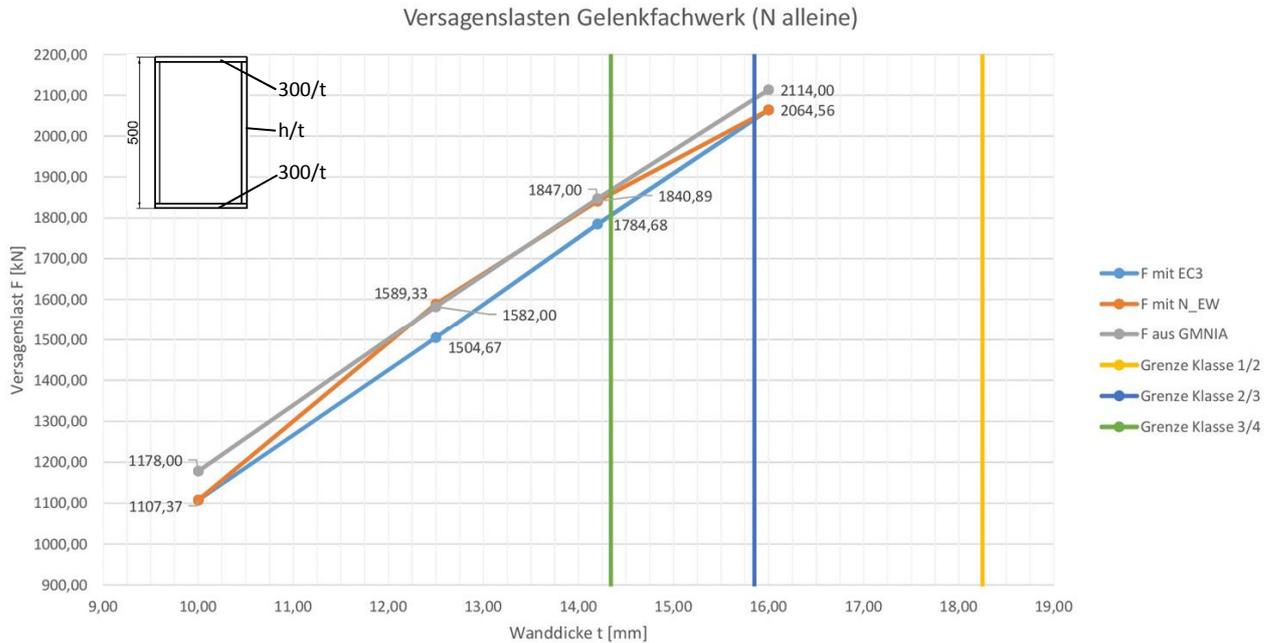


Abb. 7-1 Versagenslast mittels Gelenkfachwerktheorie - System 3

Anders als bei den I-Profilen, wo beim Anfangsquerschnitt mit der größten Wanddicke stets eine Überschätzung der Traglast erfolgt, befinden sich die durch Eurocode 3 oder mit Hilfe der Eigenwerte und Eurocode 3 berechneten Versagenslasten, bei Betrachtung mittels Gelenkfachwerktheorie, unter jenem der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen. Die Ergebnisse der reinen Eurocode-Berechnung bleiben einigermaßen konstant unter jenen der numerischen Analyse. Die Differenz bei den Ergebnissen nach Eurocode, ist durch eine Abminderung der Steghöhe bei der reinen Eurocode-Berechnung zu erklären. Das weitere Auseinanderdriften (zwischen $t=14,2$ [mm] und $t=12,5$ [mm]) ist das Resultat einer größeren zusätzlichen Abminderung des Steges bei der Eurocodeberechnung, als bei jener Berechnung mit Hilfe der Eigenwerte. Die Annäherung der Eurocode-Ergebnisse für die kleinste Wanddicke ist auf eine Abminderung des Flansches bei der kombinierten Berechnung (Eurocode und Eigenwerte) zurückzuführen, welche bei der reinen Eurocode-Berechnung nicht auftritt.

7.2 Ergebnis mittels biegesteifem Fachwerk (Konzept I; N & M_y)

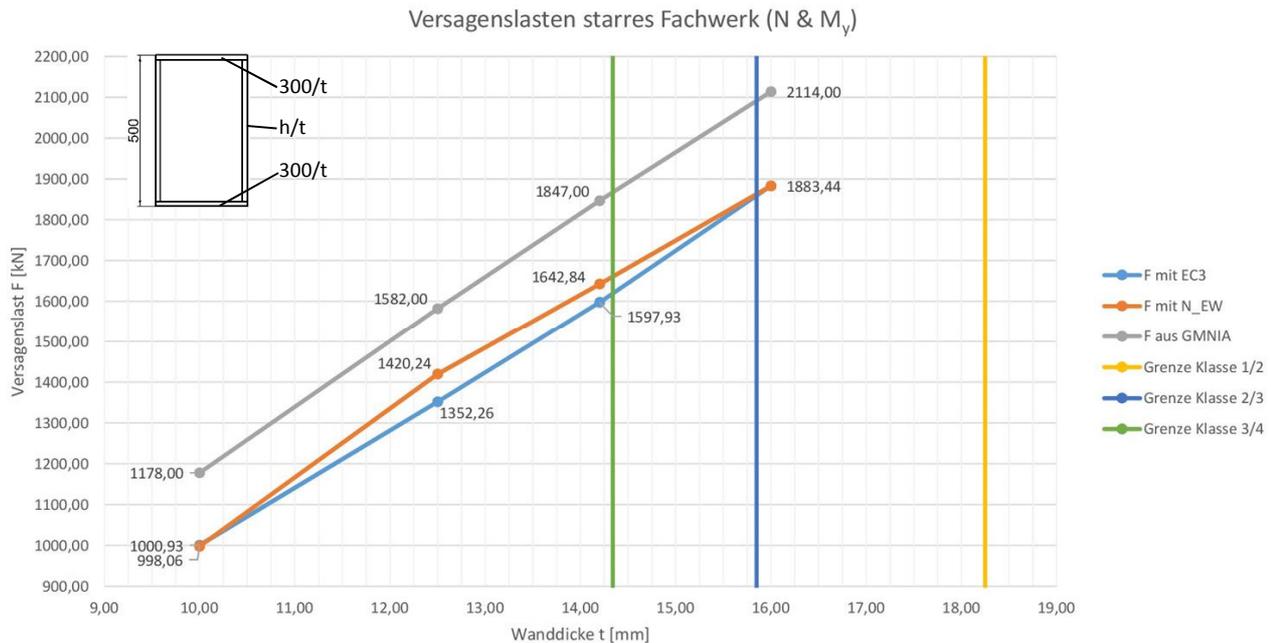


Abb. 7-2 Versagenslast bei biegesteifer Betrachtung - System 3

Gegenüber Abb. 7-1 ist die deutlich größere Abweichung der Eurocode-Berechnungen von den numerischen Ergebnissen mit der Berücksichtigung des Momentes durch die starre Fachwerksbetrachtung zu erklären. Die Berechnungen der ersten zwei Wanddicken ($t=16$ [mm] und $t=14,2$ [mm]) nach Eurocode, sowie bei den Berechnungen mit den Eigenwerten haben auf Grund von Schlankheiten, welche unter den Grenzschlankheiten liegen, Abminderungsfaktoren von eins und unterscheiden sich daher beim Ergebnis auch nicht voneinander. Bei einer Wanddicke des Hohlprofiles von $t=12,5$ [mm] wird lediglich der Steg der kombinierten Berechnung etwas abgemindert, womit die geringe Differenz zu erklären ist. Bei der letzten Wanddicke ($t=10$ [mm]) nähert sich die reine Eurocode-Berechnung der geometrischen und materiellen nichtlinearen Analyse mit Imperfektionen weiter an und vergrößert die Differenz zur Berechnung mit Hilfe der Eigenwerte. Dies ist ausschließlich auf Abminderungen des Flansches und des Steges bei der Berechnung mit Eigenwerten zurückzuführen.

8

8 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

8.1 Zusammenfassung

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde die Möglichkeit der Berechnung eines Fachwerkträgers mit Hilfe der Gelenkfachwerktheorie untersucht. Diese deutliche Vereinfachung durch Vernachlässigen der Momentenbeanspruchung, hat eine erhebliche Verringerung des Berechnungsaufwandes zur Folge. Derzeit fehlen Ergebnisse für dünnwandige, beulgefährdete Querschnitte und daher sollte diese Diplomarbeit als Diskussionsgrundlage für den zukünftigen Ablauf der Berechnungen bei Fachwerken dienen.

Notwendige Nachweise bei der Berechnung von Fachwerksdruckgurten sind, im Zuge der Berechnung des Querschnittsnachweises, der darin integrierte Beulnachweis (Flansche und Steg) und um die Systemstabilität zu gewährleisten, der Knicknachweis. Auf den Nachweis des Knickens konnte in dieser Diplomarbeit gänzlich verzichtet werden, da die Schlankheiten der stabilitätsgefährdeten Stäbe bei einem Knicken in der Ebene sehr gering waren und sich dadurch ein Abminderungsfaktor von ungefähr 1 ergab. Knicken aus der Ebene war auf Grund der Lagerungsbedingungen nicht zugelassen.

Ausschlaggebend für den deutlichen Mehraufwand bei einer biegesteifen Betrachtung eines Fachwerkes, sind die, bei Beulgefährdung zu unterscheidenden, effektiven Querschnitte für Normalkraft und Biegung. Bei Biegung entsteht eine Asymmetrie, die die Berechnung der Querschnittswerte erheblich aufwändiger macht (A_{eff} , W_{eff}). Eine Gelenkfachwerkbetrachtung, bei welcher lediglich Normalkräfte auftreten, bedeutet eine erhebliche Vereinfachung bei der Berechnung.

Es wurden drei Systeme, welche sich hauptsächlich in der Wahl der Profile für die Fachwerksstäbe unterschieden haben, untersucht. Bei zwei dieser Systeme wurden I-Profile und beim Dritten, Hohlprofile für den Querschnitt gewählt. Für jedes System wurden Berechnungen mit unterschiedlichen Dicken der Querschnittsteile angestellt, um eine möglichst große Erkenntnis betreffend der zutreffenden Wahl des Berechnungssystems (Gelenkfachwerk oder starres Fachwerk) zu erhalten. Diese Berechnungen wurden für das jeweilige Berechnungssystem, numerisch mittels eines FE-Modells (um einen Referenzwert zu erhalten), mit einer reinen Eurocode Berechnung und einer kombinierten Berechnung aus Eurocode und zutreffender linearer Beulanalyse (LBA) angestellt.

8.2 Schlussfolgerung

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Berücksichtigung der Momentenbeanspruchung durch eine biegesteife Betrachtung der Fachwerksknoten, bei den in dieser Arbeit untersuchten Fachwerken, eine teils deutliche Unterschätzung der Traglast bewirkt. Dies hätte bei der Bemessung der verwendeten Fachwerke mit anschließendem Nachweis infolge Drucknormalkraft N und Biegemoment M_y eine Überdimensionierung der Fachwerksstäbe und damit eine gewisse Unwirtschaftlichkeit zur Folge. Auf Grundlage der gewonnenen Ergebnisse zeigt sich, dass bei der Bemessung und dem Nachweis eine Gelenkfachwerksbetrachtung mit alleinigen Normalkräften, in den meisten Fällen möglich wäre.

Die Abweichungen, welche sich bei zusätzlicher Berücksichtigung des Momentes ergeben, sind teils beträchtlich. Bei den I-Profilquerschnitten überschätzt eine Gelenkfachwerksbetrachtung die Tragfähigkeit geringfügig. Beim Fachwerk welches mit Hohlprofilen ausgeführt ist, wird die Traglast, bei Anwendung der Gelenkfachwerkstheorie, in allen Querschnittsklassen etwas unterschätzt. Daher erscheint eine Berücksichtigung der in den Fachwerkstäben zusätzlich auftretenden Momentes nicht erforderlich.

Je dünner der Steg ist, desto eher trifft das Gelenkfachwerkssystem, verglichen mit den gerechneten FE-Traglasten, bei I-Querschnitten zu. Hier wird das reale System zum Teil sogar etwas unterschätzt, womit diese Betrachtungsweise eher konservativ ist und daher auf der sicheren Seite liegt. Bei dünner werdenden Flanschen der verwendeten I-Profile bleibt die anfängliche geringe Überschätzung der Traglasten in fast allen Querschnittsklassen bestehen. Bei den sehr dünnen Flanschen (Querschnittsklasse 4) nähern sich die FE-Ergebnisse der gelenkigen Betrachtung an.

Beim Fachwerk mit Hohlprofilen ergibt sich bei geringerer Wandstärke keine Besonderheit und die gelenkige Betrachtungsweise wäre bei allen Querschnittsklassen die eindeutig zutreffendere.

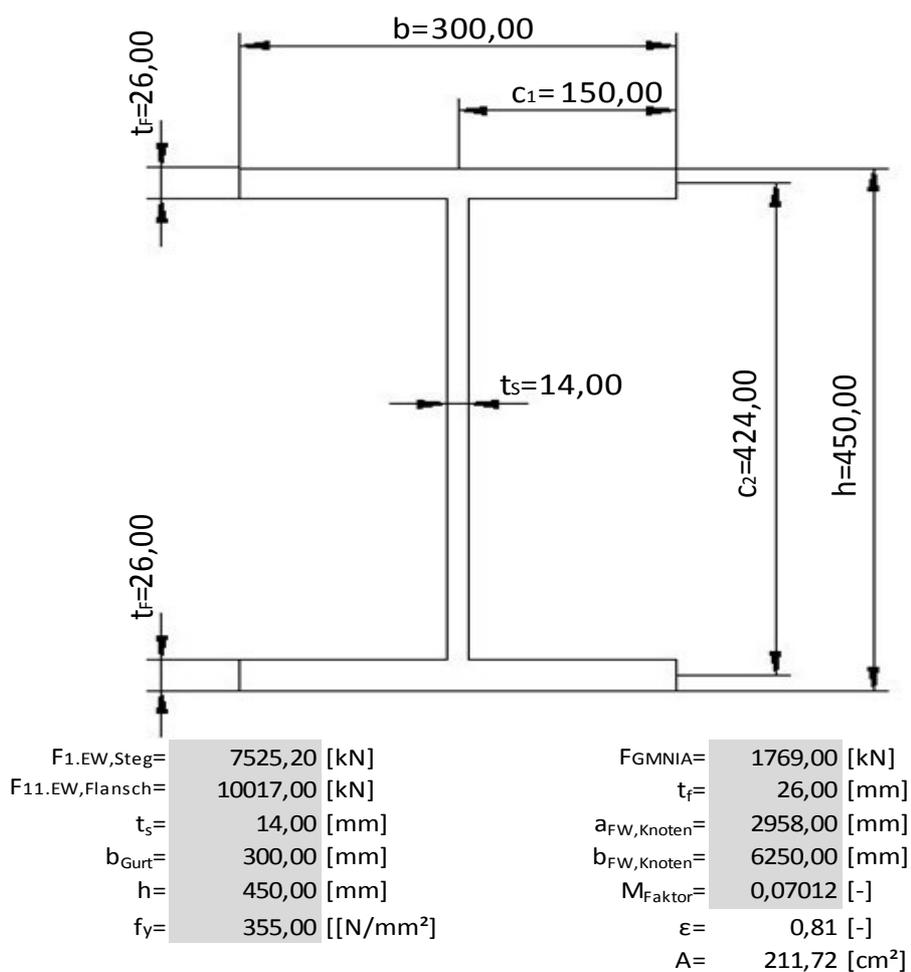
Abschließend ist zu sagen, dass der anfängliche Gedanke einer größeren Genauigkeit bei Berücksichtigung des Momentes für die untersuchten Fachwerke nicht zutrifft und eine Gelenkfachwerksbetrachtung bei allen untersuchten Profilvarianten völlig ausreichend ist.

Zu berücksichtigen ist, dass in dieser Arbeit nur Druckgurte untersucht wurden, die selbst nicht zum globalen Ausknicken neigen.

9

9 Anhang

Das abschließende Kapitel beinhaltet alle Berechnung für die Unterschiedlichen Profile mit den jeweiligen Dickenvariationen. Die Teilabschnitte 9.8 und 9.9 enthalten die Berechnungen für die Abminderungsfaktoren bei globalem Knicken des I-Profiles und des Hohlprofiles.

9.1 Stegdickenvariation für das I-Profil mit $h=450$ [mm]9.1.1 $t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm]

• **Klassifizierung (N alleine):**

Flansch: $c_1 = 150,00$ [mm]
 $t = 26,00$ [mm]
 $(c/t)^* = 150/26 = 5,77 \leq 9 \cdot \epsilon = 7,32$ Klasse 1

Steg: $c_2 = 424,00$ [mm]
 $t = 14,00$ [mm]
 $(c/t)^* = 424/14 = 30,29 \leq 38 \cdot \epsilon = 30,92$ Klasse 2

• **Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):**

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 \cdot \left(\frac{t}{c}\right)^2 \cdot k_\sigma =$
 $\sigma_{cr} = 190000 \cdot \left(\frac{26}{150}\right)^2 \cdot 0,425 = 242,61$ [kN/cm²] mit $k_\sigma = 0,425$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{242,61}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = b \cdot \chi_p = 150 \cdot 1 = 150,00$$
 [mm]

Steg ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = 190000 \cdot \left(\frac{t}{c}\right)^2 \cdot k_\sigma =$
 $\sigma_{cr} = 190000 \cdot \left(\frac{14}{424}\right)^2 \cdot 4 = 82,86$ [kN/cm²] mit $k_\sigma = 4,00$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,5}{82,86}} = 0,65$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = h_{Steg} \cdot \chi_p = 398 \cdot 1 = 398,00$$
 [mm]

$$A_{br} = 211,72$$
 [cm²] \rightarrow $A_{c,eff} = 211,72$ [cm²]

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} \cdot f_y} = \frac{4,2258 \cdot F}{211,72 \cdot 35,50} \leq 1 \quad F = 1778,60$ [kN]

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} =$
 $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{14}{424}\right)^2 * 0,425 = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{242,61}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{\text{eff}} = b * \chi_p = 150 * 1 = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} =$
 $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{14}{424}\right)^2 * 23,90 = 495,08 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{495,08}} = 0,27$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive Breite $b_c = 0,5 * h_{\text{Steg}} = 0,5 * 398 = 199,00 \text{ [mm]}$

veränderlicher Verlauf: $b_t = 0,5 * h_{\text{Steg}} = 0,5 * 398 = 199,00 \text{ [mm]}$

$$b_{\text{eff,ver.}} = b_c * \chi_1 = 199 * 1 = 199,00 \text{ [mm]}$$

$$b_{e1} = b_{\text{eff,ver.}} * 0,4 = 199 * 0,4 = 79,60 \text{ [mm]}$$

$$b_{e2} = b_{\text{eff,ver.}} * 0,6 = 199 * 0,6 = 119,40 \text{ [mm]}$$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 150,20 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{150,20}} = 0,49$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\rightarrow \chi_p = 1,00$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei konst. Verlauf: $b_{\text{eff,konst.}} = h_{\text{Steg}} \cdot \chi_p = 398 \cdot 1 = 398,00 \text{ [mm]}$

$$b_{e1} = b_{\text{eff,konst.}} \cdot 0,5 = 398 \cdot 0,5 = 199,00 \text{ [mm]}$$

$$b_{e2} = b_{\text{eff,konst.}} \cdot 0,5 = 398 \cdot 0,5 = 199,00 \text{ [mm]}$$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y [*] [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
2	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
3	19,90	1,40	-9,95	27,86	-277,21	2758,21	919,40
4	19,90	1,40	9,95	27,86	277,21	2758,21	919,40
5	2,60	15,00	21,20	39,00	826,80	17528,16	21,97
6	2,60	15,00	21,20	39,00	826,80	17528,16	21,97
Σ=				211,72	0,00	75629,06	1926,69

$$M_{pl} = 1370,87 \text{ [kNm]}$$

$$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$$

$$W_{pl} = 3861,61 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$I_y = 77555,75 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$W_{el} = 3446,92 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\alpha_{pl} = 1,12$$

$$I_{y,\text{eff,konst.}} = I_y^* + A \cdot e_z^2 - A \cdot z_s^2 =$$

$$I_{y,\text{eff,konst.}} = 1926,69 + 75629,06 - 211,72 \cdot 0,00^2 =$$

$$I_{y,\text{eff,konst.}} = 77555,75 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$W_{y,\text{eff,konst.}} = \frac{I_{y,\text{eff,konst.}}}{z_{\text{max}}} = \frac{77555,75}{225} =$$

$$W_{y,\text{eff,konst.}} = 3446,92 \text{ [cm}^3\text{]}$$

maßgebende Klasse= Klasse 2

W_{verw}=

$$W_{pl} = 3861,61 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$A_{c,\text{eff}} = 211,72 \text{ [cm}^2\text{]}$$

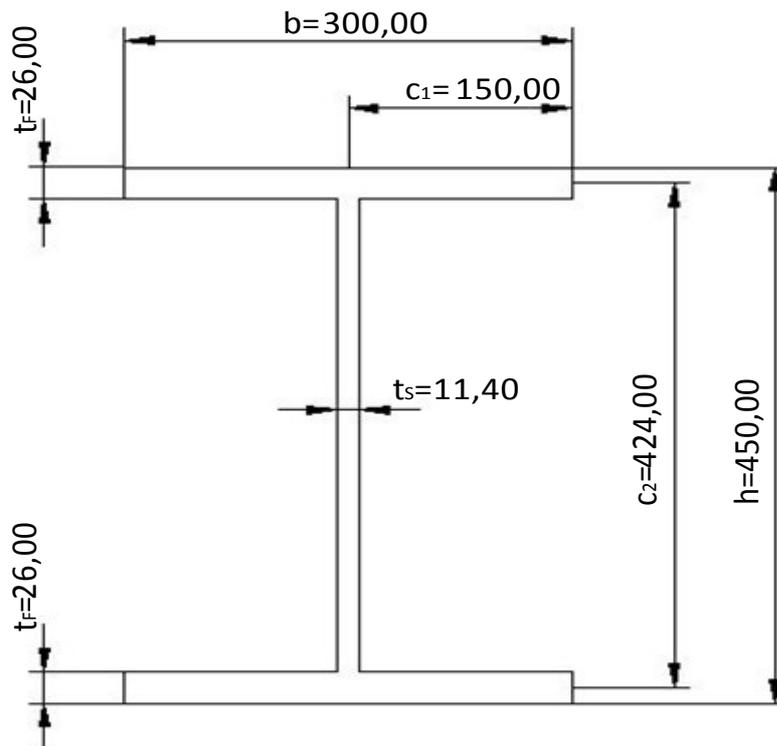
$$\text{F gelenkiges Fachw.: } \frac{N_{UG}}{A_{c,\text{eff}} \cdot f_y} = \frac{4,2258 \cdot F}{A_{c,\text{eff}} \cdot f_y} = \frac{4,2258 \cdot F}{211,72 \cdot 35,50} \leq 1$$

$$F = 1778,60 \text{ [kN]}$$

$$\text{F starres Fachw.: } \frac{N}{A_{c,\text{eff}} \cdot f_y} + \frac{M}{W \cdot f_y} = \frac{4,2258 \cdot F}{A_{c,\text{eff}} \cdot f_y} + \frac{0,07012 \cdot F}{W_{\text{verw}} \cdot f_y} \leq 1$$

$$\frac{4,2258 \cdot F}{211,72 \cdot 35,50} + \frac{0,07012 \cdot F}{3861,61 \cdot 35,5} \leq 1$$

$$F = 1630,22 \text{ [kN]}$$

9.1.2 $t_s=11,4$ [mm] und $t_f=26$ [mm]

F1.EW,Steg=	4967,80 [kN]	FGMNIA=	1679,00 [kN]
F11.EW,Flansch=	6835,30 [kN]	tf=	26,00 [mm]
ts=	11,40 [mm]	aFW,Knoten=	2958,00 [mm]
bGurt=	300,00 [mm]	bFW,Knoten=	6250,00 [mm]
h=	450,00 [mm]	MFAktor=	0,07397 [-]
fy=	355,00 [[N/mm ²]]	ε=	0,81 [-]
		A=	201,37 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch: $c_1 = 150,00$ [mm]
 $t = 26,00$ [mm]
 $(c/t)^* = 5,77 \leq 9 \cdot \epsilon = 7,32$ Klasse 1

Steg: $c_2 = 424,00$ [mm]
 $t = 11,40$ [mm]
 $(c/t)^* = 37,19 \geq 42 \cdot \epsilon = 34,17$ Klasse 4

• **Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):**

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{C}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{\text{eff}} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = +1$):

$$54,94 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,80$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,90$$

$$b_{\text{eff}} = 359,62 \text{ [mm]}$$

$$A_{\text{br}} = 201,37 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{\text{c,eff}} = 197,00 \text{ [cm}^2\text{]}$$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{\text{c,eff}} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{\text{c,eff}} * f_y} \leq 1 \quad F = 1654,91 \text{ [kN]}$

• **Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):**

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{C}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{\text{eff}} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 328,27 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,33$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive	Breite	b _{eff,ver.} =	199,00 [mm]	b _{e1} =	79,60 [mm]
veränderlicher	Verlauf:	b _c =	199,00 [mm]	b _{e2} =	119,40 [mm]
		b _t =	199,00 [mm]		

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
2	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
3	7,96	1,14	-15,92	9,07	-144,46	2299,87	47,91
4	31,84	1,14	3,98	36,30	144,46	574,97	3066,50
5	2,60	30,00	21,20	78,00	1653,60	35056,32	43,94
Σ=				201,37	0,00	72987,48	3202,29

M _{pl} =	1334,32 [kNm]	z _s =	0,00 [cm]
W _{pl} =	3758,65 [cm ³]	I _{y,eff,ver.} =	76189,78 [cm ⁴]
I _y =	76189,78 [cm ⁴]	W _{y,eff,ver.} =	3386,21 [cm ³]
W _{eI} =	3386,21 [cm ³]		
α _{pl} =	1,11		

maßgebende Klasse=	Klasse 4	W _{verw} =	w _{y,eff} =	3386,21 [cm ³]
			A _{c,eff} =	197,00 [cm ²]

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,07397 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1501,91 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

N_{EW,Steg,UG}= 20993,07 [kN] N_{EW,Flansch,UG}= 28884,80 [kN]

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 143,44 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,50$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p} \right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive	Breite	bei	b _{eff,konst.} =	150,00 [mm]
konst. Verlauf:				

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 104,25 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,58$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

$$\rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 398,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 199,00 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 199,00 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_v^* [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
2	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
3	19,90	1,14	-9,95	22,69	-225,73	2245,97	748,66
4	19,90	1,14	9,95	22,69	225,73	2245,97	748,66
5	2,60	15,00	21,20	39,00	826,80	17528,16	21,97
6	2,60	15,00	21,20	39,00	826,80	17528,16	21,97
$\Sigma =$				201,37	0,00	74604,58	1585,19

$M_{pl} = 1334,32 \text{ [kNm]}$
 $W_{pl} = 3758,65 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $I_y = 76189,78 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{el} = 3386,21 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,11$

$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $I_{y,eff,konst.} = 76189,78 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{y,c,eff,konst.} = 3386,21 \text{ [cm}^3\text{]}$

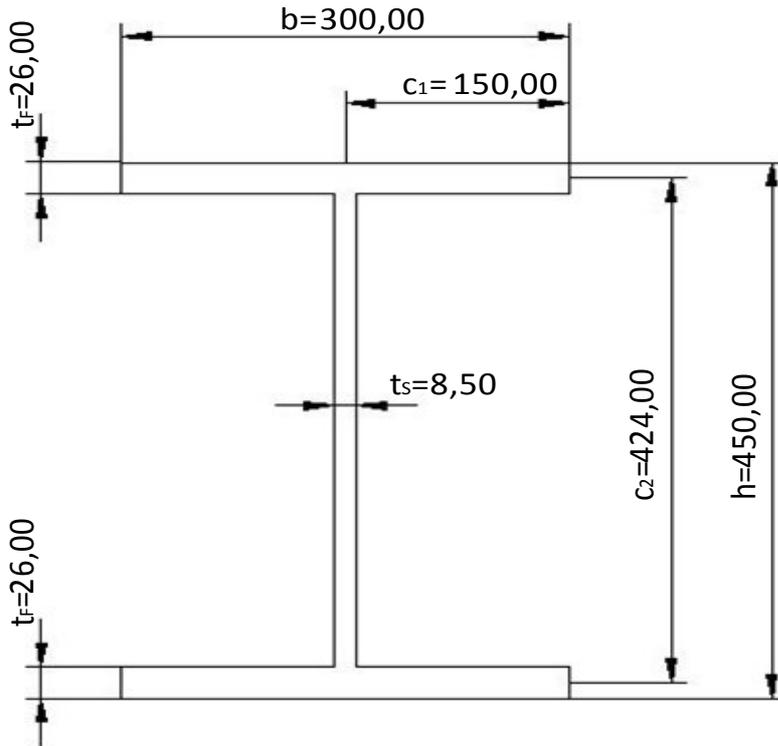
maßgebende Klasse = Klasse 4

$W_{verw} = W_{y,eff} = 3386,21 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 201,37 \text{ [cm}^2\text{]}$

$$\text{F gelenkiges Fachw.:} \quad \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1691,67 \text{ [kN]}$$

$$\text{F starres Fachw.:} \quad \frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,07397 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1532,12 \text{ [kN]}$$

9.1.3 $t_s=8,5$ [mm] und $t_f=26$ [mm]



F1.EW,Steg=	2682,60 [kN]	FGMNIA=	1565,00 [kN]
F11.EW,Flansch=	3703,60 [kN]	tf=	26,00 [mm]
ts=	8,50 [mm]	aFW,Knoten=	2958,00 [mm]
bGurt=	300,00 [mm]	bFW,Knoten=	6250,00 [mm]
h=	450,00 [mm]	Mfaktor=	0,07830 [-]
fy=	355,00 [[N/mm ²]]	ε=	0,81 [-]
		A=	189,83 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch:	c ₁ =	150,00 [mm]	
	t=	26,00 [mm]	
	(c/t)*=	5,77 ≤ 9*ε	= 7,32 Klasse 1
Steg:	c ₂ =	424,00 [mm]	
	t=	8,50 [mm]	
	(c/t)*=	49,88 ≥ 42*ε	= 34,17 Klasse 4

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 30,54 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 1,08$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,74$$

$$b_{eff} = 293,84 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 189,83 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,eff} = 180,98 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.: } \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1520,33 \text{ [kN]}$$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 182,50 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,44$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite $b_{eff,ver.} = 199,00 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 79,60 \text{ [mm]}$
 veränderlicher Verlauf: $b_c = 199,00 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 119,40 \text{ [mm]}$
 $b_t = 199,00 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
2	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
3	7,96	0,85	-15,92	6,77	-107,71	1714,82	35,73
4	31,84	0,85	3,98	27,06	107,71	428,70	2286,42
5	2,60	30,00	21,20	78,00	1653,60	35056,32	43,94
Σ=				189,83	0,00	72256,16	2410,03

$M_{pl} = 1293,55 \text{ [kNm]}$ $z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $W_{pl} = 3643,81 \text{ [cm}^3\text{]}$ $I_{y,eff,ver.} = 74666,19 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $I_y = 74666,19 \text{ [cm}^4\text{]}$ $W_{y,eff,ver.} = 3318,50 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $W_{el} = 3318,50 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,10$

maßgebende Klasse= Klasse 4 $W_{verw} = w_{y,eff} = 3318,50 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 180,98 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,07830 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1380,75 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

$N_{EW,Steg,UG} = 11336,21 \text{ [kN]}$ $N_{EW,Flansch,UG} = 15650,78 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 82,45 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,66$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748$

$\rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 150,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 59,72 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,77$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,93$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 368,91 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 184,46 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 184,46 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
2	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
3	18,45	0,85	-10,68	15,68	-167,41	1787,43	444,54
4	18,45	0,85	10,68	15,68	167,41	1787,43	444,54
5	2,60	15,00	21,20	39,00	826,80	17528,16	21,97
6	2,60	15,00	21,20	39,00	826,80	17528,16	21,97
$\Sigma =$				187,36	0,00	73687,49	976,96

$M_{pl} = 1293,55 \text{ [kNm]}$
 $W_{pl} = 3643,81 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $I_y = 74666,19 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{el} = 3318,50 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,10$

$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $I_{y,eff,konst.} = 74664,45 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{y,eff,konst.} = 3318,42 \text{ [cm}^3\text{]}$

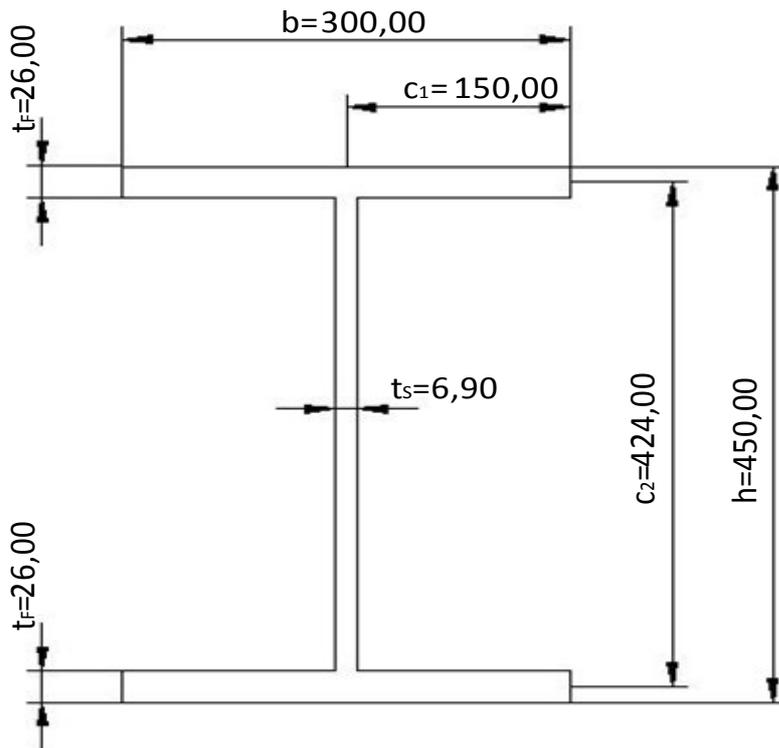
maßgebende Klasse= Klasse 4

$W_{verw} = W_{y,eff} = 3318,42 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 187,36 \text{ [cm}^2\text{]}$

$$\text{F gelenkiges Fachw.:} \quad \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1573,94 \text{ [kN]}$$

$$\text{F starres Fachw.:} \quad \frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,07830 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1424,82 \text{ [kN]}$$

9.1.4 $t_s=6,9$ [mm] und $t_f=26$ [mm]



F1.EW,Steg=	1725,70 [kN]	FGMNIA=	1491,00 [kN]
F11.EW,Flansch=	2368,90 [kN]	tf=	26,00 [mm]
ts=	6,90 [mm]	aFW,Knoten=	2958,00 [mm]
bGurt=	300,00 [mm]	bFW,Knoten=	6250,00 [mm]
h=	450,00 [mm]	MFaktor=	0,08101 [-]
fy=	355,00 [[N/mm ²]]	ε=	0,81 [-]
		A=	183,46 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch:	c ₁ =	150,00 [mm]	
	t=	26,00 [mm]	
	(c/t)*=	5,77 ≤ 9*ε	= 7,32 Klasse 1
Steg:	c ₂ =	424,00 [mm]	
	t=	6,90 [mm]	
	(c/t)*=	61,45 ≥ 42*ε	= 34,17 Klasse 4

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 20,13 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 1,33$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,63$$

$$b_{eff} = 250,04 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 183,46 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,eff} = 173,25 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.: } \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1455,45 \text{ [kN]}$$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 120,26 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,54$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite $b_{eff,ver.} = 199,00 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 79,60 \text{ [mm]}$
 veränderlicher Verlauf: $b_c = 199,00 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 119,40 \text{ [mm]}$
 $b_t = 199,00 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
2	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
3	7,96	0,69	-15,92	5,49	-87,44	1392,03	29,00
4	31,84	0,69	3,98	21,97	87,44	348,01	1856,04
5	2,60	30,00	21,20	78,00	1653,60	35056,32	43,94
Σ=				183,46	0,00	71852,68	1972,92

$M_{pl} = 1271,06 \text{ [kNm]}$ $z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $W_{pl} = 3580,45 \text{ [cm}^3\text{]}$ $I_{y,eff,ver.} = 73825,60 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $I_y = 73825,60 \text{ [cm}^4\text{]}$ $W_{y,eff,ver.} = 3281,14 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $W_{el} = 3281,14 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,09$

maßgebende Klasse= Klasse 4 $W_{verw} = W_{y,eff} = 3281,14 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 173,25 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,08101 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1321,61 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

$N_{EW,Steg,UG} = 7292,51 \text{ [kN]}$ $N_{EW,Flansch,UG} = 10010,56 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 54,56 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,81$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \rightarrow \chi_p = 0,95$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 142,62 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 39,75 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,95$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

$$\rightarrow \chi_p = 0,81$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 323,11$ [mm]
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 161,55$ [mm]
 $b_{e2} = 161,55$ [mm]

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_v^* [cm ⁴]
1	2,60	14,26	-21,20	37,08	-786,13	16665,95	20,89
2	2,60	14,26	-21,20	37,08	-786,13	16665,95	20,89
3	16,16	0,69	-11,82	11,15	-131,79	1558,01	242,45
4	16,16	0,69	11,82	11,15	131,79	1558,01	242,45
5	2,60	14,26	21,20	37,08	786,13	16665,95	20,89
6	2,60	14,26	21,20	37,08	786,13	16665,95	20,89
$\Sigma =$				170,62	0,00	69779,82	568,45

$M_{pl} = 1271,06$ [kNm]
 $W_{pl} = 3580,45$ [cm³]
 $I_y = 73825,60$ [cm⁴]
 $W_{el} = 3281,14$ [cm³]
 $\alpha_{pl} = 1,09$

$z_s = 0,00$ [cm]
 $I_{y,eff,konst.} = 70348,27$ [cm⁴]
 $W_{y,eff,konst.} = 3126,59$ [cm³]

maßgebende Klasse = Klasse 4

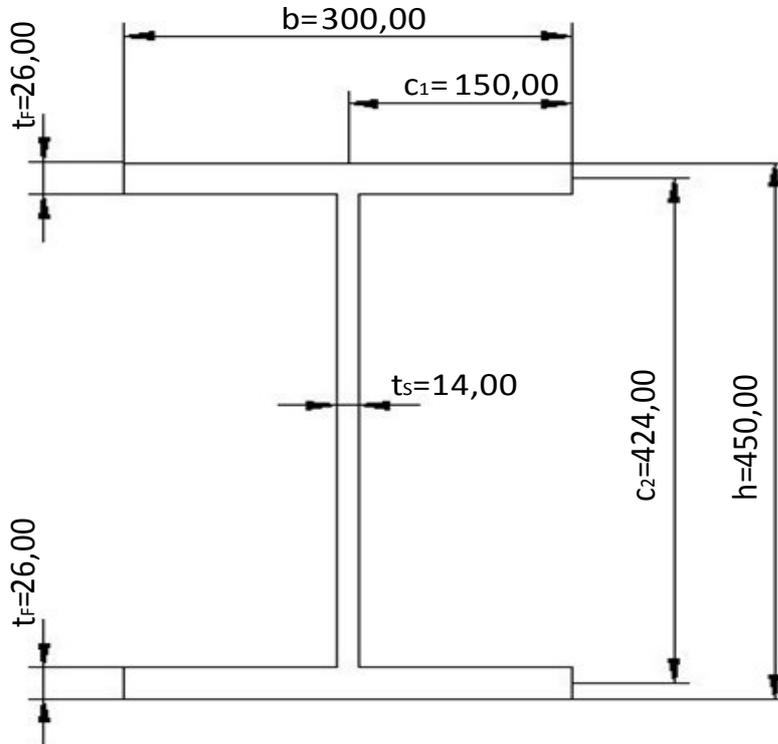
$W_{verw} = W_{y,eff} = 3126,59$ [cm³]
 $A_{c,eff} = 170,62$ [cm²]

$$\text{F gelenkiges Fachw.:} \quad \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1433,34 \text{ [kN]}$$

$$\text{F starres Fachw.:} \quad \frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,08101 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1297,54 \text{ [kN]}$$

9.2 Flanschdickenvariation für das I-Profil mit $h=450$ [mm]

9.2.1 $t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm]



F6.EW,Steg=	8260,00 [kN]	FGMNIA=	1758,00 [kN]
F1.EW,Flansch=	7525,50 [kN]	t _f =	26,00 [mm]
t _s =	14,00 [mm]	a _{FW,Knoten} =	2958,00 [mm]
b _{Gurt} =	300,00 [mm]	b _{FW,Knoten} =	6250,00 [mm]
h=	450,00 [mm]	M _{Faktor} =	0,07012 [-]
f _y =	355,00 [[N/mm ²]]	ε=	0,81 [-]
		A=	211,72 [cm ²]

• **Klassifizierung (N alleine):**

Flansch: c₁= 150,00 [mm]
 t= 26,00 [mm]
 (c/t)*= 5,77 ≤ 9*ε = 7,32 Klasse 1

Steg: c₂= 424,00 [mm]
 t= 14,00 [mm]
 (c/t)*= 30,29 ≤ 38*ε = 30,92 Klasse 2

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 82,86 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,65$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 398,00 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 211,72 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,eff} = 211,72 \text{ [cm}^2\text{]}$$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1778,60 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 495,08 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,27$
 $\chi_p = 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei $b_{eff,ver.} = 199,00 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 79,60 \text{ [mm]}$
 ver\u00e4nderlicher Verlauf: $b_c = 199,00 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 119,40 \text{ [mm]}$
 $b_t = 199,00 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
2	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
3	7,96	1,40	-15,92	11,14	-177,41	2824,41	58,84
4	31,84	1,40	3,98	44,58	177,41	706,10	3765,88
5	2,60	30,00	21,20	78,00	1653,60	35056,32	43,94
Σ=				211,72	0,00	73643,15	3912,60

M_{pl}= 1370,87 [kNm] $z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 W_{pl}= 3861,61 [cm³] $I_{y,eff,ver.} = 77555,75 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $I_y = 77555,75 \text{ [cm}^4\text{]}$ $W_{y,eff,ver.} = 3446,92 \text{ [cm}^3\text{]}$
 W_{eI}= 3446,92 [cm³]
 $\alpha_{pl} = 1,12$

maßgebende Klasse= Klasse 2 $W_{verw} = w_{pl} = 3861,61 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 211,72 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,07012 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1630,22 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

N_{EW,Steg,UG}= 34905,34 [kN] $N_{EW,Flansch,UG} = 31801,47 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 150,21 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,49$

$\chi_p = 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p > 0,748$

$\rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 150,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 164,87 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,46$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 398,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 199,00 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 199,00 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
2	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
3	19,90	1,40	-9,95	27,86	-277,21	2758,21	919,40
4	19,90	1,40	9,95	27,86	277,21	2758,21	919,40
5	2,60	15,00	21,20	39,00	826,80	17528,16	21,97
6	2,60	15,00	21,20	39,00	826,80	17528,16	21,97
$\Sigma =$				211,72	0,00	75629,06	1926,69

$$M_{pl} = 1370,87 \text{ [kNm]}$$

$$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$$

$$W_{pl} = 3861,61 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$I_{y,eff,konst.} = 77555,75 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$I_y = 77555,75 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$W_{y,eff,konst.} = 3446,92 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$W_{el} = 3446,92 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\alpha_{pl} = 1,12$$

maßgebende Klasse= Klasse 2

$W_{verw} =$

$$W_{pl} = 3861,61 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$A_{c,eff} = 211,72 \text{ [cm}^2\text{]}$$

F gelenkiges Fachw.:

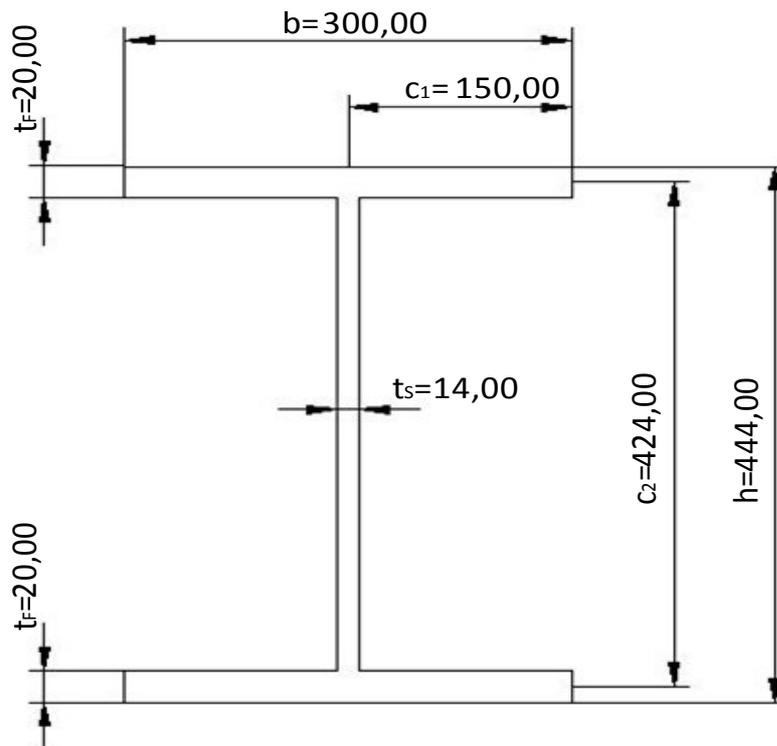
$$\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1$$

$$F = 1778,60 \text{ [kN]}$$

F starres Fachw:

$$\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,07012 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1$$

$$F = 1630,22 \text{ [kN]}$$

9.2.2 $t_s=14$ [mm] und $t_f=20$ [mm]

F _{6.EW,Steg} =	5785,60 [kN]	F _{GMNIA} =	1447,00 [kN]
F _{1.EW,Flansch} =	5332,40 [kN]	t _f =	20,00 [mm]
t _s =	14,00 [mm]	a _{FW,Knoten} =	2958,00 [mm]
b _{Gurt} =	300,00 [mm]	b _{FW,Knoten} =	6250,00 [mm]
h=	444,00 [mm]	M _{Faktor} =	0,07023 [-]
f _y =	355,00 [[N/mm ²]]	ε=	0,81 [-]
		A=	176,56 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch:	c ₁ =	150,00 [mm]	
	t=	20,00 [mm]	
	(c/t)*=	7,50 ≤ 10*ε =	8,14 Klasse 2
Steg:	c ₂ =	424,00 [mm]	
	t=	14,00 [mm]	
	(c/t)*=	30,29 ≤ 38*ε =	30,92 Klasse 2

• **Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):**

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 143,56 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,50$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 82,86 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,65$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 404,00 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 176,56 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,eff} = 176,56 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.:} \quad \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1483,23 \text{ [kN]}$$

• **Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):**

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 143,56 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,50$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 495,08 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,27$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite $b_{eff,ver.} = 202,00 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 80,80 \text{ [mm]}$
 veränderlicher Verlauf: $b_c = 202,00 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 121,20 \text{ [mm]}$
 $b_t = 202,00 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	2,00	15,00	-21,20	30,00	-636,00	13483,20	10,00
2	2,00	15,00	-21,20	30,00	-636,00	13483,20	10,00
3	8,08	1,40	-16,16	11,31	-182,80	2954,08	61,54
4	32,32	1,40	4,04	45,25	182,80	738,52	3938,77
5	2,00	30,00	21,20	60,00	1272,00	26966,40	20,00
Σ=				176,56	0,00	57625,40	4040,32

$M_{pl} = 1105,92 \text{ [kNm]}$ $z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $W_{pl} = 3115,26 \text{ [cm}^3\text{]}$ $I_{y,eff,ver.} = 61665,71 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $I_y = 61665,71 \text{ [cm}^4\text{]}$ $W_{y,eff,ver.} = 2777,73 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $W_{el} = 2777,73 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,12$

maßgebende Klasse= Klasse 2 $W_{verw} = w_{pl} = 3115,26 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 176,56 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,07023 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1355,50 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

$N_{EW,Steg,UG} = 24448,95 \text{ [kN]}$ $N_{EW,Flansch,UG} = 22533,81 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 127,63 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,53$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748$

$\rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 150,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 138,47 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,51$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

$$\rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 404,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 202,00 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 202,00 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_v^* [cm ⁴]
1	2,00	15,00	-21,20	30,00	-636,00	13483,20	10,00
2	2,00	15,00	-21,20	30,00	-636,00	13483,20	10,00
3	20,20	1,40	-10,10	28,28	-285,63	2884,84	961,61
4	20,20	1,40	10,10	28,28	285,63	2884,84	961,61
5	2,00	15,00	21,20	30,00	636,00	13483,20	10,00
6	2,00	15,00	21,20	30,00	636,00	13483,20	10,00
$\Sigma =$				176,56	0,00	59702,49	1963,23

$M_{pl} = 1105,92 \text{ [kNm]}$
 $W_{pl} = 3115,26 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $I_y = 61665,71 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{el} = 2777,73 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,12$

$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $I_{y,eff,konst.} = 61665,71 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{y,eff,konst.} = 2777,73 \text{ [cm}^3\text{]}$

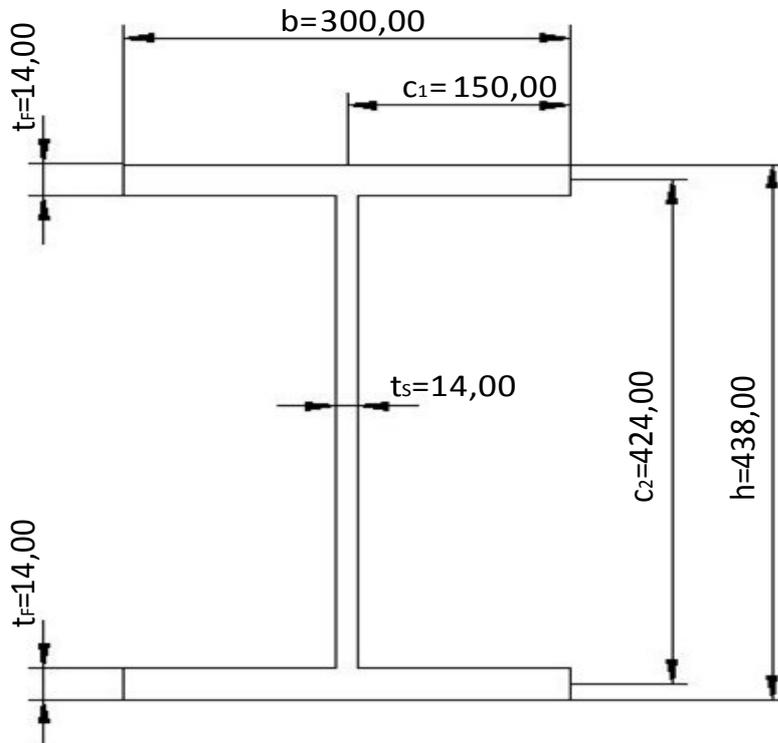
maßgebende Klasse= Klasse 2

$W_{verw} =$
 $W_{pl} = 3115,26 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 176,56 \text{ [cm}^2\text{]}$

$$\text{F gelenkiges Fachw.:} \quad \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1483,23 \text{ [kN]}$$

$$\text{F starres Fachw.:} \quad \frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,07023 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1355,50 \text{ [kN]}$$

9.2.3 $t_s=14$ [mm] und $t_f=14$ [mm]



$F_{6.EW,Steg} =$	3442,70 [kN]	$F_{GMNIA} =$	1122,00 [kN]
$F_{1.EW,Flansch} =$	2792,30 [kN]	$t_f =$	14,00 [mm]
$t_s =$	14,00 [mm]	$a_{FW,Knoten} =$	2958,00 [mm]
$b_{Gurt} =$	300,00 [mm]	$b_{FW,Knoten} =$	6250,00 [mm]
$h =$	438,00 [mm]	$M_{Faktor} =$	0,06990 [-]
$f_y =$	355,00 [[N/mm ²]]	$\epsilon =$	0,81 [-]
		$A =$	141,40 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch:	$c_1 =$	150,00 [mm]	
	$t =$	14,00 [mm]	
	$(c/t)^* =$	$10,71 \leq 14 * \epsilon =$	11,39 Klasse 3
Steg:	$c_2 =$	424,00 [mm]	
	$t =$	14,00 [mm]	
	$(c/t)^* =$	$30,29 \leq 38 * \epsilon =$	30,92 Klasse 2

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 70,34 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,71$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 82,86 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,65$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 410,00 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 141,40 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,eff} = 141,40 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.: } \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1187,86 \text{ [kN]}$$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 70,34 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,71$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 495,08 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,27$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite $b_{eff,ver.} = 205,00 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 82,00 \text{ [mm]}$
 veränderlicher Verlauf: $b_c = 205,00 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 123,00 \text{ [mm]}$
 $b_t = 205,00 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	1,40	15,00	-21,20	21,00	-445,20	9438,24	3,43
2	1,40	15,00	-21,20	21,00	-445,20	9438,24	3,43
3	8,20	1,40	-16,40	11,48	-188,27	3087,66	64,33
4	32,80	1,40	4,10	45,92	188,27	771,92	4116,88
5	1,40	30,00	21,20	42,00	890,40	18876,48	6,86
Σ=				141,40	0,00	41612,54	4194,93

$M_{pl} = 841,05 \text{ [kNm]}$ $z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $W_{pl} = 2369,15 \text{ [cm}^3\text{]}$ $I_{y,eff,ver.} = 45807,46 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $I_y = 45807,46 \text{ [cm}^4\text{]}$ $W_{y,eff,ver.} = 2091,66 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $W_{el} = 2091,66 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,13$

maßgebende Klasse= Klasse 3 $W_{verw} = W_{el} = 2091,66 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 141,40 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,06990 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1068,35 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

$N_{EW,Steg,UG} = 14548,26 \text{ [kN]}$ $N_{EW,Flansch,UG} = 11799,78 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 83,45 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,65$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748$

$\rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 150,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 102,89 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,59$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow$$

$$\chi_p = 1,00$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 410,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 205,00 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 205,00 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_v^* [cm ⁴]
1	1,40	15,00	-21,20	21,00	-445,20	9438,24	3,43
2	1,40	15,00	-21,20	21,00	-445,20	9438,24	3,43
3	20,50	1,40	-10,25	28,70	-294,18	3015,29	1005,10
4	20,50	1,40	10,25	28,70	294,18	3015,29	1005,10
5	1,40	15,00	21,20	21,00	445,20	9438,24	3,43
6	1,40	15,00	21,20	21,00	445,20	9438,24	3,43
$\Sigma =$				141,40	0,00	43783,55	2023,92

$$M_{pl} = 841,05 \text{ [kNm]}$$

$$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$$

$$W_{pl} = 2369,15 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$I_{y,eff,konst.} = 45807,46 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$I_y = 45807,46 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$W_{y,eff,konst.} = 2091,66 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$W_{el} = 2091,66 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\alpha_{pl} = 1,13$$

maßgebende Klasse= Klasse 3

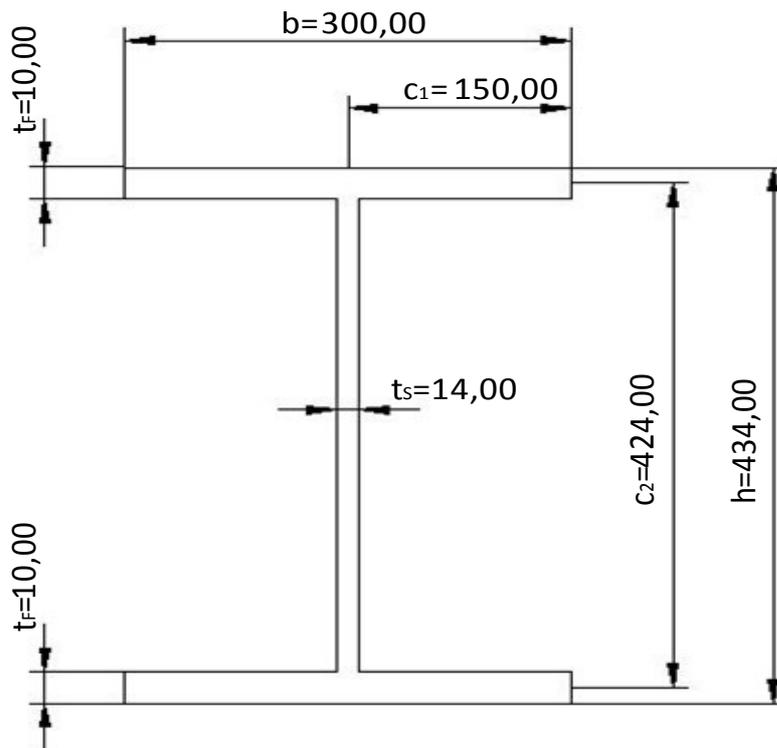
$W_{verw} =$

$w_{el} = 2091,66 \text{ [cm}^3\text{]}$

$A_{c,eff} = 141,40 \text{ [cm}^2\text{]}$

$$\text{F gelenkiges Fachw.:} \quad \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1187,86 \text{ [kN]}$$

$$\text{F starres Fachw.:} \quad \frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,06990 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1068,35 \text{ [kN]}$$

9.2.4 $t_s=14$ [mm] und $t_f=10$ [mm]

$F_{6,EW,Steg}$	2057,60 [kN]
$F_{1,EW,Flansch}$	1715,30 [kN]
t_s	14,00 [mm]
b_{Gurt}	300,00 [mm]
h	434,00 [mm]
f_y	355,00 [[N/mm ²]]

F_{GMNIA}	891,14 [kN]
t_f	10,00 [mm]
$a_{FW,Knoten}$	2958,00 [mm]
$b_{FW,Knoten}$	6250,00 [mm]
M_{Faktor}	0,06661 [-]
ϵ	0,81 [-]
A	117,96 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch:	c_1	150,00 [mm]	
	t	10,00 [mm]	
	$(c/t)^*$	$15,00 \geq 14 \cdot \epsilon$	= 11,39 Klasse 4
Steg:	c_2	424,00 [mm]	
	t	14,00 [mm]	
	$(c/t)^*$	$30,29 \leq 38 \cdot \epsilon$	= 30,92 Klasse 2

• **Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):**

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 35,89 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,99$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,82$$

$$b_{eff} = 122,31 \text{ [mm]}$$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 82,86 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,65$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 414,00 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 117,96 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,eff} = 106,88 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.: } \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 897,90 \text{ [kN]}$$

• **Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):**

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 35,89 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,99$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,82$$

$$b_{eff} = 122,31 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 495,08 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,27$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite $b_{eff,ver.} = 207,00 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 82,80 \text{ [mm]}$
 veränderlicher Verlauf: $b_c = 207,00 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 124,20 \text{ [mm]}$
 $b_t = 207,00 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	1,00	12,23	-21,20	12,23	-259,30	5497,12	1,02
2	1,00	12,23	-21,20	12,23	-259,30	5497,12	1,02
3	8,28	1,40	-16,56	11,59	-191,96	3178,92	66,23
4	33,12	1,40	4,14	46,37	191,96	794,73	4238,55
5	1,00	30,00	21,20	30,00	636,00	13483,20	2,50
$\Sigma =$				112,42	117,40	28451,09	4309,32

$M_{pl} = 664,52 \text{ [kNm]}$ $z_s = 1,04 \text{ [cm]}$
 $W_{pl} = 1871,89 \text{ [cm}^3\text{]}$ $I_{y,eff,ver.} = 32637,80 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $I_y = 35249,83 \text{ [cm}^4\text{]}$ $W_{y,eff,ver.} = 1434,99 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $W_{el} = 1624,42 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,15$

maßgebende Klasse = Klasse 4 $W_{verw} = W_{y,eff.} = 1434,99 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 106,88 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,06661 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 803,53 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

$N_{EW,Steg,UG} = 8695,06 \text{ [kN]}$ $N_{EW,Flansch,UG} = 7248,56 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 61,45 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,76$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748 \rightarrow \chi_p = 0,99$

$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 148,54 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 73,71 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,69$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,98$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 407,44 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 203,72 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 203,72 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_v^* [cm ⁴]
1	1,00	14,85	-21,20	14,85	-314,90	6675,80	1,24
2	1,00	14,85	-21,20	14,85	-314,90	6675,80	1,24
3	20,37	1,40	-10,51	28,52	-299,87	3152,78	986,41
4	20,37	1,40	10,51	28,52	299,87	3152,78	986,41
5	1,00	14,85	21,20	14,85	314,90	6675,80	1,24
6	1,00	14,85	21,20	14,85	314,90	6675,80	1,24
$\Sigma =$				116,46	0,00	33008,79	1977,78

$$M_{pl} = 664,52 \text{ [kNm]}$$

$$W_{pl} = 1871,89 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$I_y = 35249,83 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$W_{el} = 1624,42 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\alpha_{pl} = 1,15$$

$$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$$

$$I_{y,eff,konst.} = 34986,56 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$W_{y,eff,konst.} = 1612,28 \text{ [cm}^3\text{]}$$

maßgebende Klasse= Klasse 4

$$W_{verw} =$$

$$W_{y,eff.} = 1612,28 \text{ [cm}^3\text{]}$$

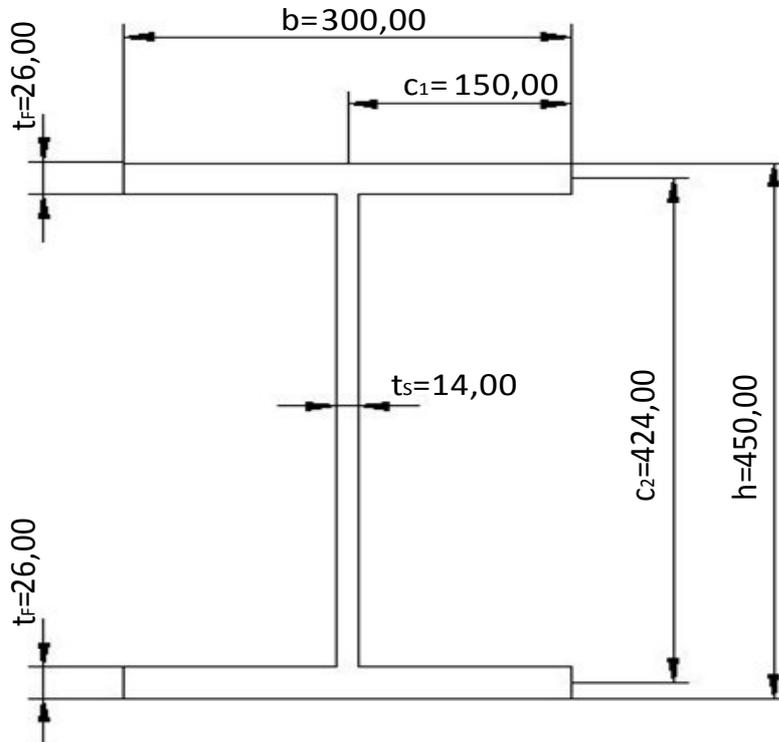
$$A_{c,eff} = 116,46 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.:} \quad \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 978,32 \text{ [kN]}$$

$$\text{F starres Fachw.:} \quad \frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,06661 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 878,29 \text{ [kN]}$$

9.3 Steg-/Flanschdickenvariation für das I-Profil mit $h=450$ [mm]

9.3.1 $t_s=14$ [mm] und $t_f=26$ [mm]



F1.EW,Steg=	7525,20 [kN]	FGMNIA=	1759,00 [kN]
F5.EW,Flansch=	8205,00 [kN]	t_f =	26,00 [mm]
t_s =	14,00 [mm]	$a_{FW,Knoten}$ =	2958,00 [mm]
b_{Gurt} =	300,00 [mm]	$b_{FW,Knoten}$ =	6250,00 [mm]
h =	450,00 [mm]	M_{Faktor} =	0,07012 [-]
f_y =	355,00 [[N/mm ²]]	ϵ =	0,81 [-]
		A =	211,72 [cm ²]

• **Klassifizierung (N alleine):**

Flansch:	c_1 =	150,00 [mm]	
	t =	26,00 [mm]	
	$(c/t)^*$ =	$5,77 \leq 9 \cdot \epsilon$	= 7,32 Klasse 1
Steg:	c_2 =	424,00 [mm]	
	t =	14,00 [mm]	
	$(c/t)^*$ =	$30,29 \leq 38 \cdot \epsilon$	= 30,92 Klasse 2

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 82,86 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,65$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 398,00 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 211,72 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,eff} = 211,72 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.: } \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1778,60 \text{ [kN]}$$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 495,08 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,27$$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive Breite bei veränderlicher Verlauf: $b_{eff,ver.} = 199,00 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 79,60 \text{ [mm]}$
 $b_c = 199,00 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 119,40 \text{ [mm]}$
 $b_t = 199,00 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
2	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
3	7,96	1,40	-15,92	11,14	-177,41	2824,41	58,84
4	31,84	1,40	3,98	44,58	177,41	706,10	3765,88
5	2,60	30,00	21,20	78,00	1653,60	35056,32	43,94
Σ=				211,72	0,00	73643,15	3912,60

$M_{pl} = 1370,87 \text{ [kNm]}$ $z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $W_{pl} = 3861,61 \text{ [cm}^3\text{]}$ $I_{y,eff,ver.} = 77555,75 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $I = 77555,75 \text{ [cm}^4\text{]}$ $W_{y,eff,ver.} = 3446,92 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $W_{el} = 3446,92 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,12$

maßgebende Klasse= Klasse 2 $W_{verw} = W_{pl} = 3861,61 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 211,72 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,07012 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1630,22 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

$N_{EW,Steg,UG} = 31800,20 \text{ [kN]}$ $N_{EW,Flansch,UG} = 34672,92 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 163,77 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,47$$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p} \right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$\rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei konst. Verlauf: $b_{eff,konst.} = 150,00 \text{ [mm]}$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 150,20 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,49$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 398,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 199,00 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 199,00 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
2	2,60	15,00	-21,20	39,00	-826,80	17528,16	21,97
3	19,90	1,40	-9,95	27,86	-277,21	2758,21	919,40
4	19,90	1,40	9,95	27,86	277,21	2758,21	919,40
5	2,60	15,00	21,20	39,00	826,80	17528,16	21,97
6	2,60	15,00	21,20	39,00	826,80	17528,16	21,97
$\Sigma =$				211,72	0,00	75629,06	1926,69

$M_{pl} = 1370,87 \text{ [kNm]}$
 $W_{pl} = 3861,61 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $I = 77555,75 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{el} = 3446,92 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,12$

$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $I_{y,eff,konst.} = 77555,75 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{y,eff,konst.} = 3446,92 \text{ [cm}^3\text{]}$

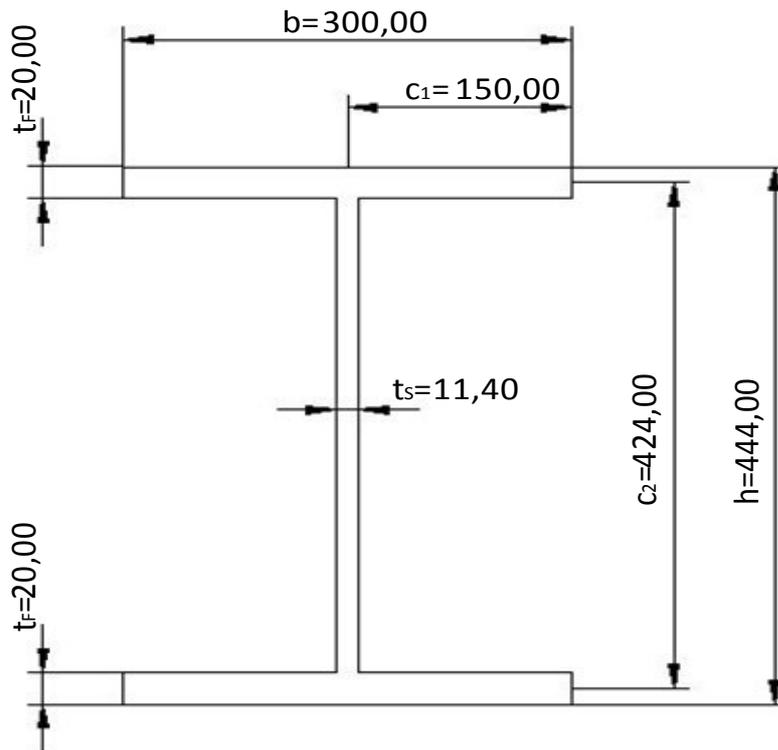
maßgebende Klasse = Klasse 2

$W_{verw} = W_{pl} = 3861,61 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 211,72 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1778,60 \text{ [kN]}$

F starres Fachw.: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,07012 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1630,22 \text{ [kN]}$

9.3.2 $t_s=11,4$ [mm] und $t_f=20$ [mm]



F _{1.EW,Steg} =	3864,10 [kN]	F _{GMNIA} =	1359,00 [kN]
F _{5.EW,Flansch} =	4196,90 [kN]	t _f =	20,00 [mm]
t _s =	11,40 [mm]	a _{FW,Knoten} =	2958,00 [mm]
b _{Gurt} =	300,00 [mm]	b _{FW,Knoten} =	6250,00 [mm]
h=	444,00 [mm]	M _{Faktor} =	0,07443 [-]
f _y =	355,00 [[N/mm ²]]	ε=	0,81 [-]
		A=	166,06 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch: c₁= 150,00 [mm]
 t= 20,00 [mm]
 (c/t)*= 7,50 ≤ 10*ε = 8,14 Klasse 2

Steg: c₂= 424,00 [mm]
 t= 11,40 [mm]
 (c/t)*= 37,19 ≥ 42*ε = 34,17 Klasse 4

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 143,56 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,50$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 54,94 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,80$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,90$$

$$b_{eff} = 365,04 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 166,06 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,eff} = 161,61 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.: } \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1357,68 \text{ [kN]}$$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 143,56 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,50$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 328,27 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,33$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei $b_{eff,ver.} = 202,00 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 80,80 \text{ [mm]}$
 veränderlicher Verlauf: $b_c = 202,00 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 121,20 \text{ [mm]}$
 $b_t = 202,00 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	2,00	15,00	-21,20	30,00	-636,00	13483,20	10,00
2	2,00	15,00	-21,20	30,00	-636,00	13483,20	10,00
3	8,08	1,14	-16,16	9,21	-148,85	2405,46	50,11
4	32,32	1,14	4,04	36,84	148,85	601,37	3207,29
5	2,00	30,00	21,20	60,00	1272,00	26966,40	20,00
Σ=				166,06	0,00	56939,63	3297,40

M_{pl}= 1068,25 [kNm] $z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 W_{pl}= 3009,17 [cm³] $I_{y,eff,ver.} = 60237,03 \text{ [cm}^4\text{]}$
 I= 60237,03 [cm⁴] $W_{y,eff,ver.} = 2713,38 \text{ [cm}^3\text{]}$
 W_{eI}= 2713,38 [cm³]
 α_{pl}= 1,11

maßgebende Klasse= Klasse 4 $W_{verw} = W_{y,c,eff,ver.} = 2713,38 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 161,61 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,07443 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1228,72 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

N_{EW,Steg,UG}= 16329,02 [kN] $N_{EW,Flansch,UG} = 17735,38 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 106,80 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,58$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748$

$\rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 150,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 98,33 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,60$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 404,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 202,00 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 202,00 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	2,00	15,00	-21,20	30,00	-636,00	13483,20	10,00
2	2,00	15,00	-21,20	30,00	-636,00	13483,20	10,00
3	20,20	1,14	-10,10	23,03	-232,58	2349,09	783,03
4	20,20	1,14	10,10	23,03	232,58	2349,09	783,03
5	2,00	15,00	21,20	30,00	636,00	13483,20	10,00
6	2,00	15,00	21,20	30,00	636,00	13483,20	10,00
$\Sigma =$				166,06	0,00	58630,97	1606,06

$M_{pl} = 1068,25 \text{ [kNm]}$
 $W_{pl} = 3009,17 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $I = 60237,03 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{el} = 2713,38 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,11$

$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $I_{y,eff,konst.} = 60237,03 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{y,eff,konst.} = 2713,38 \text{ [cm}^3\text{]}$

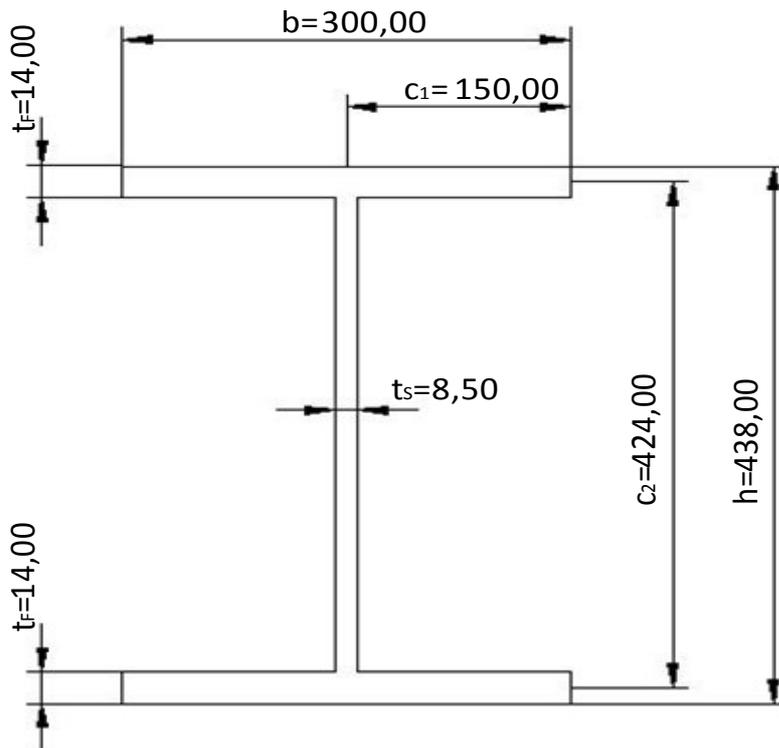
maßgebende Klasse= Klasse 4

$W_{verw} = W_{y,c,eff,ver.} = 2713,38 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 166,06 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1394,99 \text{ [kN]}$

F starres Fachw.: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,07443 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1259,21 \text{ [kN]}$

9.3.3 $t_s=8,5$ [mm] und $t_f=14$ [mm]



F _{1.EW,Steg} =	1503,40 [kN]	F _{GMNIA} =	934,49 [kN]
F _{5.EW,Flansch} =	1615,70 [kN]	t _f =	14,00 [mm]
t _s =	8,50 [mm]	a _{FW,Knoten} =	2958,00 [mm]
b _{Gurt} =	300,00 [mm]	b _{FW,Knoten} =	6250,00 [mm]
h=	438,00 [mm]	M _{Faktor} =	0,08014 [-]
f _y =	355,00 [[N/mm ²]]	ε=	0,81 [-]
		A=	118,85 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch:	c ₁ =	150,00 [mm]	
	t=	14,00 [mm]	
	(c/t)*=	10,71 ≤ 14*ε =	11,39 Klasse 3
Steg:	c ₂ =	424,00 [mm]	
	t=	8,50 [mm]	
	(c/t)*=	49,88 ≥ 42*ε =	34,17 Klasse 4

• **Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):**

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 70,34 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,71$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 30,54 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 1,08$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,74$$

$$b_{eff} = 302,70 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 118,85 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,eff} = 109,73 \text{ [cm}^2\text{]}$$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 921,80 \text{ [kN]}$

• **Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):**

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 70,34 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,71$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 182,50 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,44$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive Breite	b _{eff,ver.} = 205,00 [mm]	b _{e1} = 82,00 [mm]
veränderlicher Verlauf:	b _c = 205,00 [mm]	b _{e2} = 123,00 [mm]
	b _t = 205,00 [mm]	

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	1,40	15,00	-21,20	21,00	-445,20	9438,24	3,43
2	1,40	15,00	-21,20	21,00	-445,20	9438,24	3,43
3	8,20	0,85	-16,40	6,97	-114,31	1874,65	39,06
4	32,80	0,85	4,10	27,88	114,31	468,66	2499,53
5	1,40	30,00	21,20	42,00	890,40	18876,48	6,86
Σ=				118,85	0,00	40096,27	2552,31

M _{pl} = 758,99 [kNm]	z _s = 0,00 [cm]
W _{pl} = 2138,01 [cm ³]	I _{y,eff,ver.} = 42648,58 [cm ⁴]
I = 42648,58 [cm ⁴]	W _{y,eff,ver.} = 1947,42 [cm ³]
W _{eI} = 1947,42 [cm ³]	
α _{pl} = 1,10	

maßgebende Klasse = Klasse 4	W _{verw} = W _{y,c,eff,ver.} = 1947,42 [cm ³]
	A _{c,eff} = 109,73 [cm ²]

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,08014 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 832,78 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

N _{EW,Steg,UG} = 6353,11 [kN]	N _{EW,Flansch,UG} = 6827,67 [kN]
--	---

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 57,45 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,79$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p} \right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,97$$

effektive Breite bei konst. Verlauf:	b _{eff,konst.} = 145,18 [mm]
--------------------------------------	---------------------------------------

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 53,45 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,81$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow$$

$$\chi_p = 0,90$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 367,29 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 183,64 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 183,64 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	1,40	14,52	-21,20	20,33	-430,90	9135,02	3,32
2	1,40	14,52	-21,20	20,33	-430,90	9135,02	3,32
3	18,36	0,85	-11,32	15,61	-176,67	1999,49	438,71
4	18,36	0,85	11,32	15,61	176,67	1999,49	438,71
5	1,40	14,52	21,20	20,33	430,90	9135,02	3,32
6	1,40	14,52	21,20	20,33	430,90	9135,02	3,32
$\Sigma =$				112,52	0,00	40539,05	890,69

$$M_{pl} = 758,99 \text{ [kNm]}$$

$$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$$

$$W_{pl} = 2138,01 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$I_{y,eff,konst.} = 41429,74 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$I = 42648,58 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$W_{y,eff,konst.} = 1891,77 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$W_{el} = 1947,42 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\alpha_{pl} = 1,10$$

maßgebende Klasse = Klasse 4

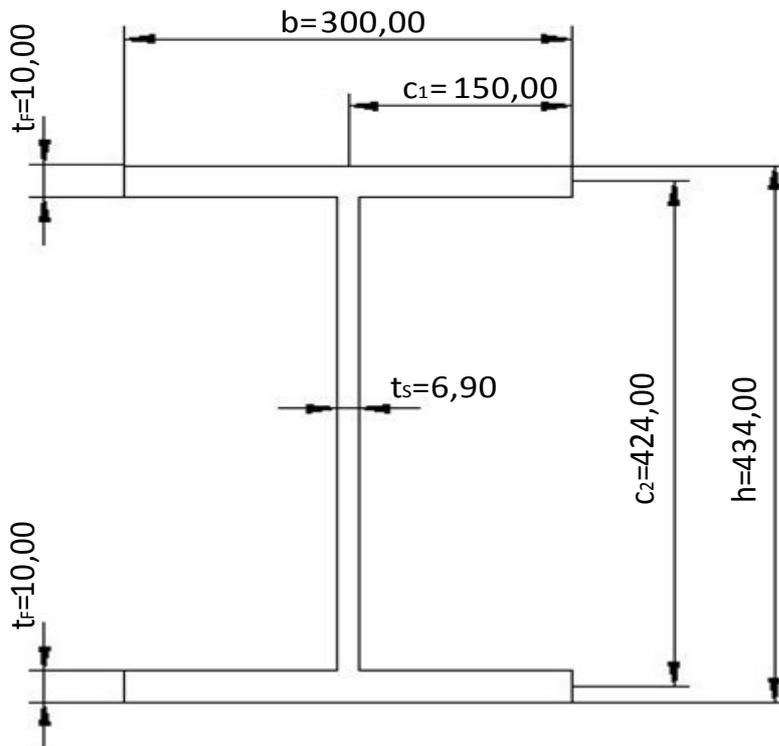
$$W_{verw} = W_{y,c,eff,ver.} = 1891,77 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$A_{c,eff} = 112,52 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.:} \quad \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 945,26 \text{ [kN]}$$

$$\text{F starres Fachw.:} \quad \frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,08014 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 849,41 \text{ [kN]}$$

9.3.4 $t_s=6,9$ [mm] und $t_f=10$ [mm]



F1.EW,Steg=	670,35 [kN]	FGMNIA=	638,47 [kN]
F5.EW,Flansch=	721,08 [kN]	tf=	10,00 [mm]
ts=	6,90 [mm]	aFW,Knoten=	2958,00 [mm]
bGurt=	300,00 [mm]	bFW,Knoten=	6250,00 [mm]
h=	434,00 [mm]	Mfaktor=	0,08356 [-]
fy=	355,00 [[N/mm ²]]	ε=	0,81 [-]
		A=	88,57 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch:	c ₁ =	150,00 [mm]	
	t=	10,00 [mm]	
	(c/t)*=	15,00 ≥ 14*ε =	11,39 Klasse 4
Steg:	c ₂ =	424,00 [mm]	
	t=	6,90 [mm]	
	(c/t)*=	61,45 ≥ 42*ε =	34,17 Klasse 4

• **Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):**

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 35,89 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,99$
 $\chi_p = 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p > 0,748 \rightarrow \chi_p = 0,82$
 $b_{eff} = 122,31 \text{ [mm]}$

Steg ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 20,13 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 1,33$
 $\chi_p = 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 0,63$
 $b_{eff} = 260,09 \text{ [mm]}$

$A_{br} = 88,57 \text{ [cm}^2\text{]} \rightarrow A_{c,eff} = 66,87 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 561,76 \text{ [kN]}$

• **Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):**

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 35,89 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,99$
 $\chi_p = 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p > 0,748 \rightarrow \chi_p = 0,82$
 $b_{eff} = 122,31 \text{ [mm]}$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 120,26 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,54$
 $\chi_p = 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite $b_{eff,ver.} = 207,00 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 82,80 \text{ [mm]}$
 ver\u00e4nderlicher Verlauf: $b_c = 207,00 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 124,20 \text{ [mm]}$
 $b_t = 207,00 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	1,00	12,23	-21,20	12,23	-259,30	5497,12	1,02
2	1,00	12,23	-21,20	12,23	-259,30	5497,12	1,02
3	8,28	0,69	-16,56	5,71	-94,61	1566,75	32,64
4	33,12	0,69	4,14	22,85	94,61	391,69	2089,00
5	1,00	30,00	21,20	30,00	636,00	13483,20	2,50
$\Sigma =$				83,03	117,40	26435,88	2126,18

$M_{pl} = 556,52 \text{ [kNm]}$ $z_s = 1,41 \text{ [cm]}$
 $W_{pl} = 1567,66 \text{ [cm}^3\text{]}$ $I_{y,eff,ver.} = 28396,05 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $I = 31051,48 \text{ [cm}^4\text{]}$ $W_{y,eff,ver.} = 1228,52 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $W_{el} = 1430,94 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,10$

maßgebende Klasse= Klasse 4 $W_{verw} = W_{y,c,eff,ver.} = 1228,52 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 66,87 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,08356 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \text{ F} = 507,15 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

$N_{EW,Steg,UG} = 2832,78 \text{ [kN]}$ $N_{EW,Flansch,UG} = 3047,16 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 34,41 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 1,02$

$\chi_p = 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p > 0,748$

$\rightarrow \chi_p = 0,80$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 120,34 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 31,99 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 1,05$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

$$\rightarrow \chi_p = 0,75$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 310,91 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 155,45 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 155,45 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	1,00	12,03	-21,20	12,03	-255,12	5408,52	1,00
2	1,00	12,03	-21,20	12,03	-255,12	5408,52	1,00
3	15,55	0,69	-12,93	10,73	-138,66	1792,53	216,01
4	15,55	0,69	12,93	10,73	138,66	1792,53	216,01
5	1,00	12,03	21,20	12,03	255,12	5408,52	1,00
6	1,00	12,03	21,20	12,03	255,12	5408,52	1,00
$\Sigma =$				69,59	0,00	25219,13	436,03

$$M_{pl} = 556,52 \text{ [kNm]}$$

$$W_{pl} = 1567,66 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$I = 31051,48 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$W_{el} = 1430,94 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\alpha_{pl} = 1,10$$

$$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$$

$$I_{y,eff,konst.} = 25655,17 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$W_{y,eff,konst.} = 1182,27 \text{ [cm}^3\text{]}$$

maßgebende Klasse = Klasse 4

$$W_{verw} = W_{y,c,eff,ver.} = 1182,27 \text{ [cm}^3\text{]}$$

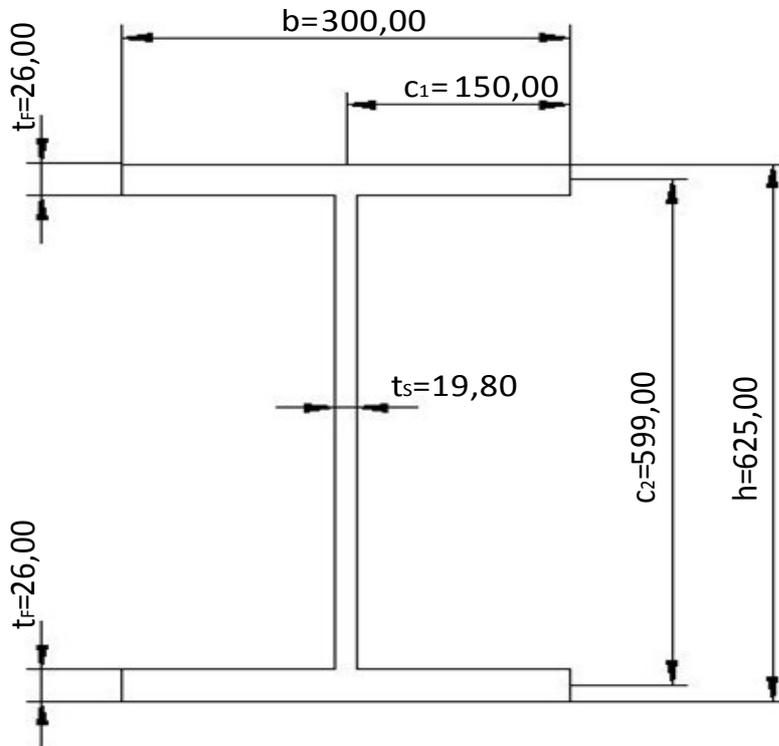
$$A_{c,eff} = 69,59 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.:} \quad \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 584,59 \text{ [kN]}$$

$$\text{F starres Fachw.:} \quad \frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,08356 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 523,63 \text{ [kN]}$$

9.4 Stegdickenvariation für das I-Profil mit h=625 [mm]

9.4.1 $t_s=19,8$ [mm] und $t_f=26$ [mm]



F1.EW,Steg=	8003,30 [kN]	FGMNIA=	2243,00 [kN]
F3.EW,Flansch=	8609,50 [kN]	tf=	26,00 [mm]
ts=	19,80 [mm]	aFW,Knoten=	2958,00 [mm]
bGurt=	300,00 [mm]	bFW,Knoten=	6250,00 [mm]
h=	625,00 [mm]	Mfaktor=	0,12039 [-]
fy=	355,00 [[N/mm ²]	ε=	0,81 [-]
		A=	269,45 [cm ²]

• **Klassifizierung (N alleine):**

Flansch:	c ₁ =	150,00 [mm]	
	t=	26,00 [mm]	
	(c/t)*=	5,77 ≤ 9*ε	= 7,32 Klasse 1
Steg:	c ₂ =	599,00 [mm]	
	t=	19,80 [mm]	
	(c/t)*=	30,25 ≤ 38*ε	= 30,92 Klasse 2

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 83,04 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,65$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 573,00 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 269,45 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,eff} = 269,45 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.: } \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 2263,61 \text{ [kN]}$$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 496,17 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,27$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite $b_{eff,ver.} = 286,50 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 114,60 \text{ [mm]}$
 veränderlicher Verlauf: $b_c = 286,50 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 171,90 \text{ [mm]}$
 $b_t = 286,50 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
2	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
3	11,46	1,98	-22,92	22,69	-520,07	11920,08	248,33
4	45,84	1,98	5,73	90,76	520,07	2980,02	15893,44
5	2,60	30,00	29,95	78,00	2336,10	69966,20	43,94
Σ=				269,45	0,00	154832,49	16229,65

$M_{pl} = 2235,59 \text{ [kNm]}$ $z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $W_{pl} = 6297,43 \text{ [cm}^3\text{]}$ $I_{y,eff,ver.} = 171062,14 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $I_y = 171062,14 \text{ [cm}^4\text{]}$ $W_{y,eff,ver.} = 5473,99 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $W_{el} = 5473,99 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,15$

maßgebende Klasse= Klasse 2 $W_{verw} = W_{pl} = 6297,43 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 269,45 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,12039 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \text{ F} = 2017,58 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

$N_{EW,Steg,UG} = 33820,57 \text{ [kN]}$ $N_{EW,Flansch,UG} = 36382,27 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 135,02 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,51$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748$

$\rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei konst. Verlauf: $b_{eff,konst.} = 150,00 \text{ [mm]}$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 125,52 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,53$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 573,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 286,50 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 286,50 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
2	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
3	28,65	1,98	-14,33	56,73	-812,61	11640,70	3880,23
4	28,65	1,98	14,33	56,73	812,61	11640,70	3880,23
5	2,60	15,00	29,95	39,00	1168,05	34983,10	21,97
6	2,60	15,00	29,95	39,00	1168,05	34983,10	21,97
$\Sigma =$				269,45	0,00	163213,79	7848,35

$M_{pl} = 2235,59 \text{ [kNm]}$
 $W_{pl} = 6297,43 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $I_y = 171062,14 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{el} = 5473,99 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,15$

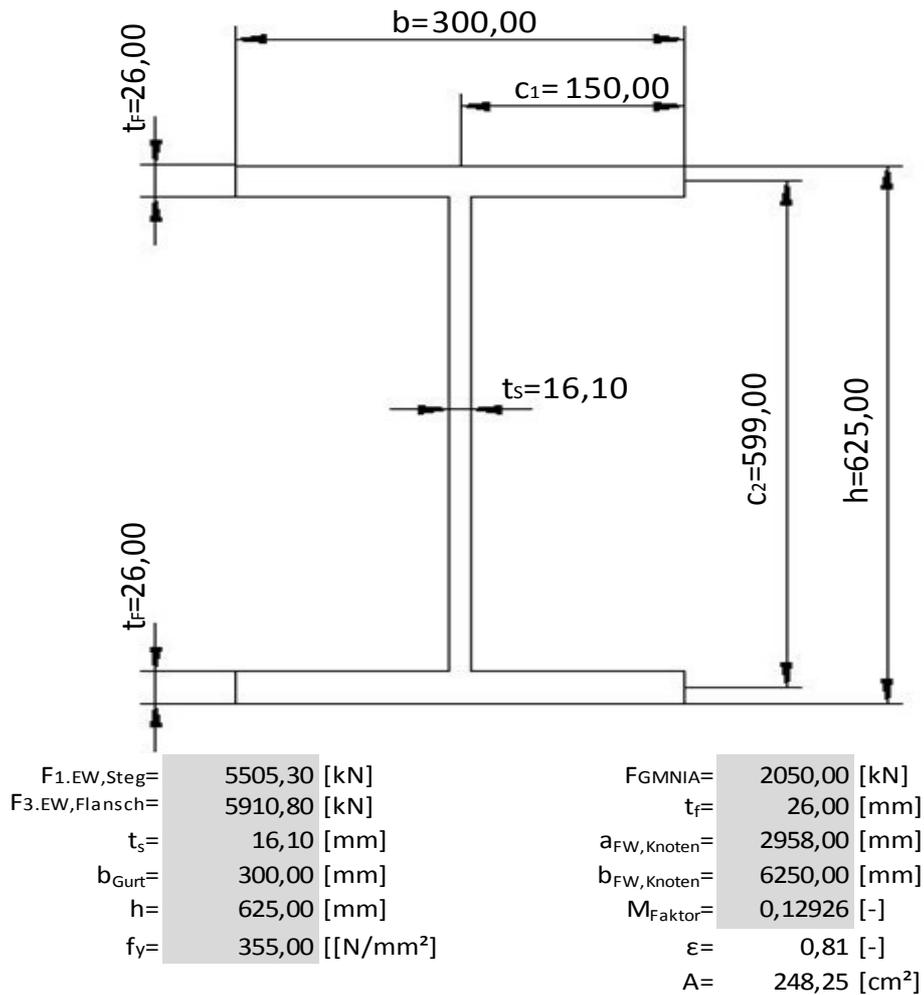
$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $I_{y,eff,konst.} = 171062,14 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{y,eff,konst.} = 5473,99 \text{ [cm}^3\text{]}$

maßgebende Klasse = Klasse 2

$W_{verw} = W_{pl} = 6297,43 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 269,45 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 2263,61 \text{ [kN]}$

F starres Fachw.: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,12039 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 2017,58 \text{ [kN]}$

9.4.2 $t_s=16,1$ [mm] und $t_f=26$ [mm]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch: $c_1 = 150,00$ [mm]
 $t = 26,00$ [mm]
 $(c/t)^* = 5,77 \leq 9 \cdot \epsilon = 7,32$ Klasse 1

Steg: $c_2 = 599,00$ [mm]
 $t = 16,10$ [mm]
 $(c/t)^* = 37,20 \geq 42 \cdot \epsilon = 34,17$ Klasse 4

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{\text{eff}} = 150,00 \text{ [mm]}$$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 54,90 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,80$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,90$$

$$b_{\text{eff}} = 517,63 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 248,25 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,\text{eff}} = 239,34 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.: } \frac{N_{UG}}{A_{c,\text{eff}} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,\text{eff}} * f_y} \leq 1 \quad F = 2010,62 \text{ [kN]}$$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{\text{eff}} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 328,06 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,33$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei $b_{eff,ver.} = 286,50 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 114,60 \text{ [mm]}$
 veränderlicher Verlauf: $b_c = 286,50 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 171,90 \text{ [mm]}$
 $b_t = 286,50 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
2	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
3	11,46	1,61	-22,92	18,45	-422,89	9692,59	201,93
4	45,84	1,61	5,73	73,80	422,89	2423,15	12923,45
5	2,60	30,00	29,95	78,00	2336,10	69966,20	43,94
Σ=				248,25	0,00	152048,12	13213,26

M_{pl}= 2127,77 [kNm] $z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 W_{pl}= 5993,72 [cm³] $I_{y,eff,ver.} = 165261,38 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $I_y = 165261,38 \text{ [cm}^4\text{]}$ $W_{y,eff,ver.} = 5288,36 \text{ [cm}^3\text{]}$
 W_{eI}= 5288,36 [cm³]
 $\alpha_{pl} = 1,13$

maßgebende Klasse= Klasse 4 $W_{verw} = W_{y,c,eff,ver.} = 5288,36 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 239,34 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,12926 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1766,06 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

N_{EW,Steg,UG}= 23264,45 [kN] $N_{EW,Flansch,UG} = 24978,03 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 100,62 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,59$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748$

$\rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 150,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 93,71 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,62$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 573,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 286,50 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 286,50 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
2	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
3	28,65	1,61	-14,33	46,13	-660,76	9465,42	3155,14
4	28,65	1,61	14,33	46,13	660,76	9465,42	3155,14
5	2,60	15,00	29,95	39,00	1168,05	34983,10	21,97
6	2,60	15,00	29,95	39,00	1168,05	34983,10	21,97
$\Sigma =$				248,25	0,00	158863,22	6398,16

$M_{pl} = 2127,77 \text{ [kNm]}$
 $W_{pl} = 5993,72 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $I_y = 165261,38 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{el} = 5288,36 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,13$

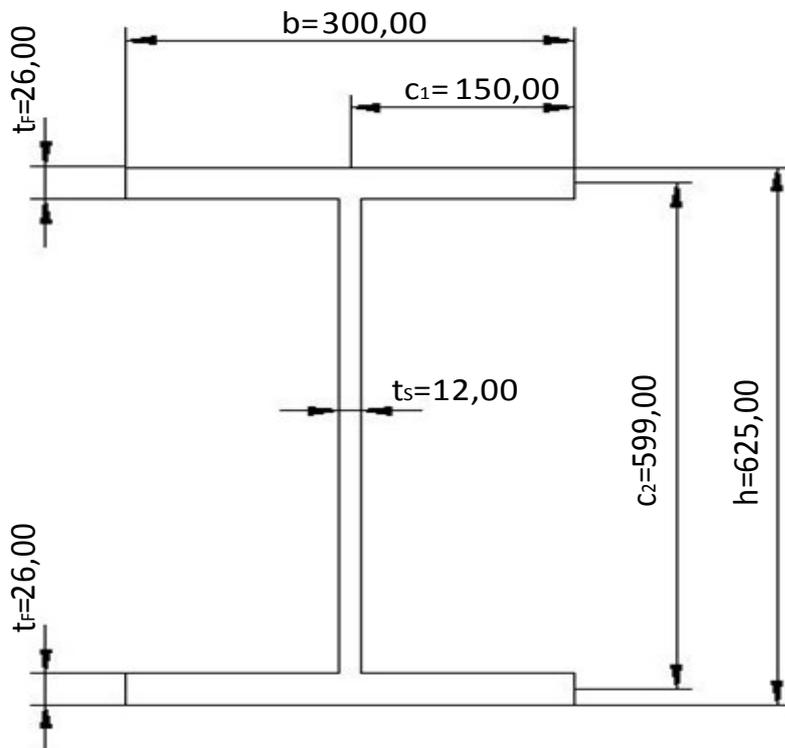
$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $I_{y,eff,konst.} = 165261,38 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{y,eff,konst.} = 5288,36 \text{ [cm}^3\text{]}$

maßgebende Klasse = Klasse 4

$W_{verw} = W_{y,c,eff,ver.} = 5288,36 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 248,25 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 2085,50 \text{ [kN]}$

F starres Fachw.: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,12926 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1823,58 \text{ [kN]}$

9.4.3 $t_s=12$ [mm] und $t_f=26$ [mm]

F1.EW,Steg=	3001,60 [kN]	FGMNIA=	1818,00 [kN]
F3.EW,Flansch=	3240,20 [kN]	tf=	26,00 [mm]
ts=	12,00 [mm]	aFW,Knoten=	2958,00 [mm]
bGurt=	300,00 [mm]	bFW,Knoten=	6250,00 [mm]
h=	625,00 [mm]	MFaktor=	0,14086 [-]
fy=	355,00 [[N/mm ²]]	ε=	0,81 [-]
		A=	224,76 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch: $c_1 = 150,00$ [mm]
 $t = 26,00$ [mm]
 $(c/t)^* = 5,77 \leq 9 \cdot \epsilon = 7,32$ Klasse 1

Steg: $c_2 = 599,00$ [mm]
 $t = 12,00$ [mm]
 $(c/t)^* = 49,92 \geq 42 \cdot \epsilon = 34,17$ Klasse 4

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \rightarrow \chi_p = 1,00$
 $b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$

Steg ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 30,50 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 1,08$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 0,74$
 $b_{eff} = 422,82 \text{ [mm]}$

$A_{br} = 224,76 \text{ [cm}^2\text{]} \rightarrow A_{c,eff} = 206,74 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1736,75 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \rightarrow \chi_p = 1,00$
 $b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 182,25 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,44$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive	Breite	b _{eff,ver.} =	286,50 [mm]	b _{e1} =	114,60 [mm]
veränderlicher	Verlauf:	b _c =	286,50 [mm]	b _{e2} =	171,90 [mm]
		b _t =	286,50 [mm]		

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
2	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
3	11,46	1,20	-22,92	13,75	-315,20	7224,29	150,51
4	45,84	1,20	5,73	55,01	315,20	1806,07	9632,38
5	2,60	30,00	29,95	78,00	2336,10	69966,20	43,94
Σ=				224,76	0,00	148962,75	9870,77

M _{pl} =	2008,30 [kNm]	z _s =	0,00 [cm]
W _{pl} =	5657,19 [cm ³]	I _{y,eff,ver.} =	158833,52 [cm ⁴]
I _y =	158833,52 [cm ⁴]	W _{y,eff,ver.} =	5082,67 [cm ³]
W _{eI} =	5082,67 [cm ³]		
α _{pl} =	1,11		

maßgebende Klasse=	Klasse 4	W _{verw} =	W _{y,c,eff,ver.} =	5082,67 [cm ³]
			A _{c,eff} =	206,74 [cm ²]

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,14086 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1529,34 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

NEW,Steg,UG=	12684,25 [kN]	NEW,Flansch,UG=	13692,53 [kN]
--------------	---------------	-----------------	---------------

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 60,92 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,76$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p} \right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,99$$

effektive	Breite	bei	b _{eff,konst.} =	148,11 [mm]
konst.	Verlauf:			

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 56,43 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,79$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow$$

$$\chi_p = 0,91$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 522,06 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 261,03 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 261,03 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	2,60	14,81	-29,95	38,51	-1153,30	34541,20	21,69
2	2,60	14,81	-29,95	38,51	-1153,30	34541,20	21,69
3	26,10	1,20	-15,60	31,32	-488,60	7621,44	1778,58
4	26,10	1,20	15,60	31,32	488,60	7621,44	1778,58
5	2,60	14,81	29,95	38,51	1153,30	34541,20	21,69
6	2,60	14,81	29,95	38,51	1153,30	34541,20	21,69
$\Sigma =$				216,68	0,00	153407,70	3643,92

$M_{pl} = 2008,30 \text{ [kNm]}$
 $W_{pl} = 5657,19 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $I_y = 158833,52 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{el} = 5082,67 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,11$

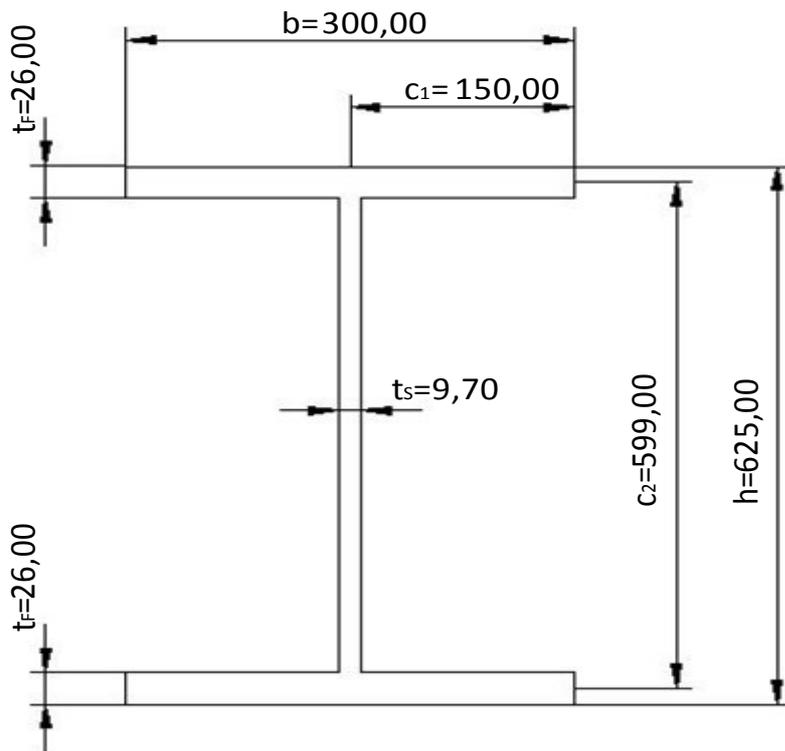
$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $I_{y,eff,konst.} = 157051,62 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{y,eff,konst.} = 5025,65 \text{ [cm}^3\text{]}$

maßgebende Klasse = Klasse 4

$W_{verw} = W_{y,c,eff,ver.} = 5025,65 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 216,68 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1820,24 \text{ [kN]}$

F starres Fachw.: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,14086 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1591,46 \text{ [kN]}$

9.4.4 $t_s=9,7$ [mm] und $t_f=26$ [mm]

F1.EW,Steg=	1894,50 [kN]	FGMNIA=	1675,00 [kN]
F3.EW,Flansch=	2048,50 [kN]	t_f =	26,00 [mm]
t_s =	9,70 [mm]	$a_{FW,Knoten}$ =	2958,00 [mm]
b_{Gurt} =	300,00 [mm]	$b_{FW,Knoten}$ =	6250,00 [mm]
h =	625,00 [mm]	M_{Faktor} =	0,14839 [-]
f_y =	355,00 [[N/mm ²]]	ϵ =	0,81 [-]
		A =	211,58 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch: $c_1 = 150,00$ [mm]
 $t = 26,00$ [mm]
 $(c/t)^* = 5,77 \leq 9 \cdot \epsilon = 7,32$ Klasse 1

Steg: $c_2 = 599,00$ [mm]
 $t = 9,70$ [mm]
 $(c/t)^* = 61,75 \geq 42 \cdot \epsilon = 34,17$ Klasse 4

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 19,93 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 1,33$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,63$$

$$b_{eff} = 358,56 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 211,58 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,eff} = 190,78 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.: } \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1602,69 \text{ [kN]}$$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 119,08 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,55$$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive Breite bei $b_{eff,ver.} = 286,50 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 114,60 \text{ [mm]}$
 veränderlicher Verlauf: $b_c = 286,50 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 171,90 \text{ [mm]}$
 $b_t = 286,50 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
2	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
3	11,46	0,97	-22,92	11,12	-254,78	5839,63	121,66
4	45,84	0,97	5,73	44,46	254,78	1459,91	7786,18
5	2,60	30,00	29,95	78,00	2336,10	69966,20	43,94
Σ=				211,58	0,00	147231,93	7995,72

M_{pl}= 1941,28 [kNm] z_s= 0,00 [cm]
 W_{pl}= 5468,40 [cm³] I_{y,eff,ver.}= 155227,65 [cm⁴]
 I_y= 155227,65 [cm⁴] W_{y,eff,ver.}= 4967,28 [cm³]
 W_{eI}= 4967,28 [cm³]
 α_{pl}= 1,10

maßgebende Klasse= Klasse 4 W_{verw}= W_{y,c,eff,ver.}= 4967,28 [cm³]
A_{c,eff}= 190,78 [cm²]

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,14839 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1412,18 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

N_{EW,Steg,UG}= 8005,83 [kN] N_{EW,Flansch,UG}= 8656,61 [kN]

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 40,91 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,93$$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p} \right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$\rightarrow \quad \chi_p = 0,86$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 128,53 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 37,84 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,97$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,80$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 457,21 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 228,60 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 228,60 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	2,60	12,85	-29,95	33,42	-1000,88	29976,21	18,83
2	2,60	12,85	-29,95	33,42	-1000,88	29976,21	18,83
3	22,86	0,97	-17,22	22,17	-381,84	6575,25	965,69
4	22,86	0,97	17,22	22,17	381,84	6575,25	965,69
5	2,60	12,85	29,95	33,42	1000,88	29976,21	18,83
6	2,60	12,85	29,95	33,42	1000,88	29976,21	18,83
$\Sigma =$				178,02	0,00	133055,33	2006,68

$M_{pl} = 1941,28 \text{ [kNm]}$
 $W_{pl} = 5468,40 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $I_y = 155227,65 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{el} = 4967,28 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,10$

$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $I_{y,eff,konst.} = 135062,01 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{y,eff,konst.} = 4321,98 \text{ [cm}^3\text{]}$

maßgebende Klasse = Klasse 4

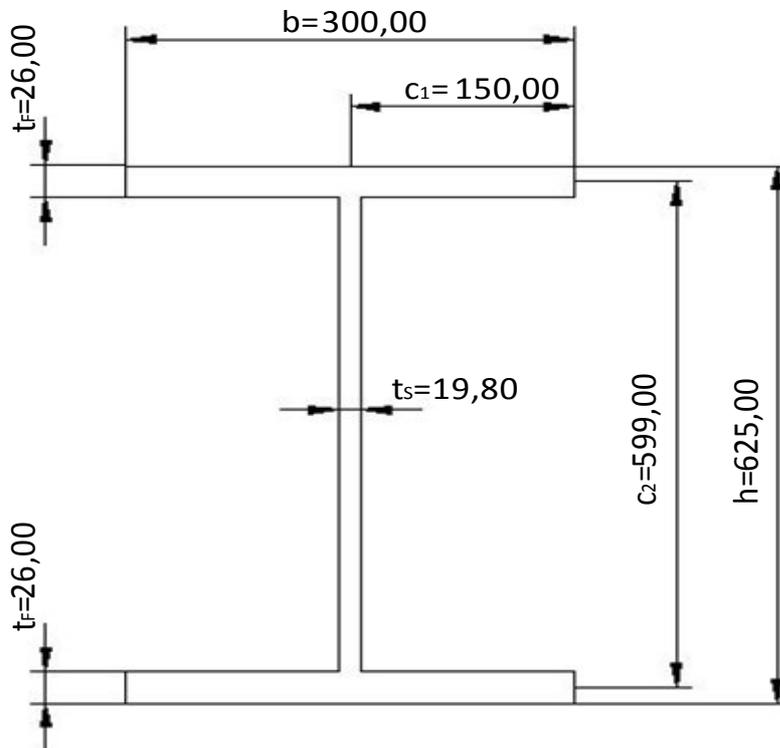
$W_{verw} = W_{y,c,eff,ver.} = 4321,98 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 178,02 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1495,51 \text{ [kN]}$

F starres Fachw.: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,14839 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1306,49 \text{ [kN]}$

9.5 Flanschdickenvariation für das I-Profil mit $h=625$ [mm]

9.5.1 $t_s=19,8$ [mm] und $t_f=26$ [mm]



F1.EW,Steg=	8003,30 [kN]	FGMNIA=	2244,00 [kN]
F4.EW,Flansch=	8730,90 [kN]	t_f =	26,00 [mm]
t_s =	19,80 [mm]	$a_{FW,Knoten}$ =	2958,00 [mm]
b_{Gurt} =	300,00 [mm]	$b_{FW,Knoten}$ =	6250,00 [mm]
h =	625,00 [mm]	M_{Faktor} =	0,12039 [-]
f_y =	355,00 [[N/mm ²]]	ϵ =	0,81 [-]
		A=	269,45 [cm ²]

• **Klassifizierung (N alleine):**

Flansch:	c_1 =	150,00 [mm]	
	t =	26,00 [mm]	
	$(c/t)^*$ =	$5,77 \leq 9 \cdot \epsilon$	= 7,32 Klasse 1
Steg:	c_2 =	599,00 [mm]	
	t =	19,80 [mm]	
	$(c/t)^*$ =	$30,25 \leq 38 \cdot \epsilon$	= 30,92 Klasse 2

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \rightarrow \chi_p = 1,00$
 $b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$

Steg ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 83,04 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,65$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$
 $b_{eff} = 573,00 \text{ [mm]}$

$A_{br} = 269,45 \text{ [cm}^2\text{]} \rightarrow A_{c,eff} = 269,45 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 2263,61 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \rightarrow \chi_p = 1,00$
 $b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 496,17 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,27$$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive Breite bei $b_{eff,ver.} = 286,50 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 114,60 \text{ [mm]}$
 veränderlicher Verlauf: $b_c = 286,50 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 171,90 \text{ [mm]}$
 $b_t = 286,50 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
2	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
3	11,46	1,98	-22,92	22,69	-520,07	11920,08	248,33
4	45,84	1,98	5,73	90,76	520,07	2980,02	15893,44
5	2,60	30,00	29,95	78,00	2336,10	69966,20	43,94
Σ=				269,45	0,00	154832,49	16229,65

M_{pl}= 2235,59 [kNm] $z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 W_{pl}= 6297,43 [cm³] $I_{y,eff,ver.} = 171062,14 \text{ [cm}^4\text{]}$
 I= 171062,14 [cm⁴] $W_{y,eff,ver.} = 5473,99 \text{ [cm}^3\text{]}$
 W_{eI}= 5473,99 [cm³]
 α_{pl}= 1,15

maßgebende Klasse= Klasse 2 $W_{verw} = W_{pl} = 6297,43 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 269,45 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,12039 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 2017,58 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

NEW,Steg,UG= 33820,57 [kN] $NEW,Flansch,UG = 36895,28 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 136,93 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,51$$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p} \right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$\rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 150,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 125,52 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,53$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 573,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 286,50 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 286,50 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
2	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
3	28,65	1,98	-14,33	56,73	-812,61	11640,70	3880,23
4	28,65	1,98	14,33	56,73	812,61	11640,70	3880,23
5	2,60	15,00	29,95	39,00	1168,05	34983,10	21,97
6	2,60	15,00	29,95	39,00	1168,05	34983,10	21,97
$\Sigma =$				269,45	0,00	163213,79	7848,35

$$M_{pl} = 2235,59 \text{ [kNm]}$$

$$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$$

$$W_{pl} = 6297,43 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$I_{y,eff,konst.} = 171062,14 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$I = 171062,14 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$W_{y,eff,konst.} = 5473,99 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$W_{el} = 5473,99 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\alpha_{pl} = 1,15$$

maßgebende Klasse = Klasse 2

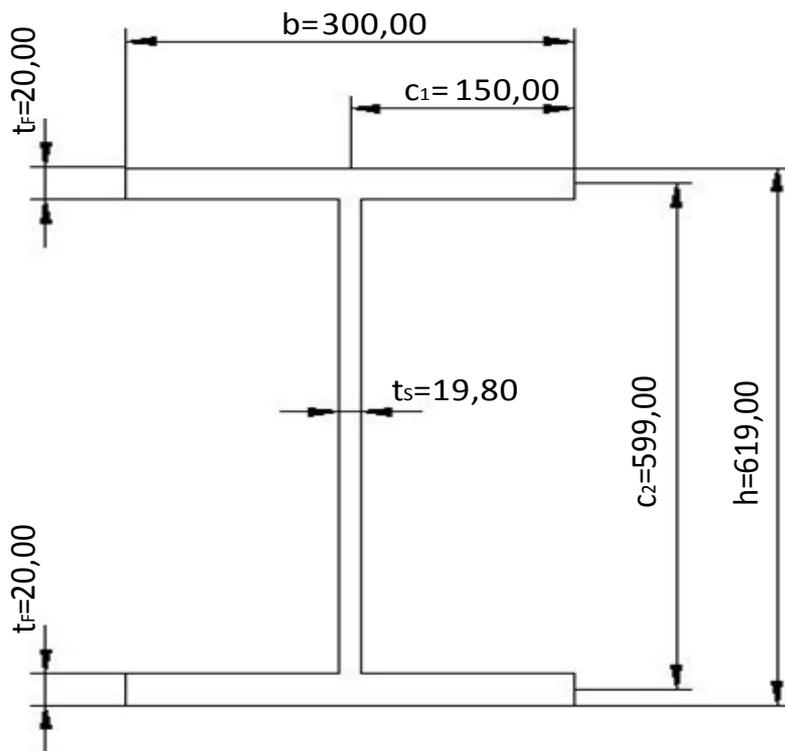
$W_{verw} =$

$$W_{pl} = 6297,43 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$A_{c,eff} = 269,45 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.:} \quad \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 2263,61 \text{ [kN]}$$

$$\text{F starres Fachw.:} \quad \frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,12039 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 2017,58 \text{ [kN]}$$

9.5.2 $t_s=19,8$ [mm] und $t_f=20$ [mm]

F1.EW,Steg=	5688,50 [kN]	FGMNIA=	1931,00 [kN]
F4.EW,Flansch=	6486,90 [kN]	tf=	20,00 [mm]
ts=	19,80 [mm]	aFW,Knoten=	2958,00 [mm]
bGurt=	300,00 [mm]	bFW,Knoten=	6250,00 [mm]
h=	619,00 [mm]	MFaktor=	0,11632 [-]
fy=	355,00 [[N/mm ²]]	ε=	0,81 [-]
		A=	234,64 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch:	c ₁ =	150,00 [mm]	
	t=	20,00 [mm]	
	(c/t)*=	$7,50 \leq 10 \cdot \epsilon$	= 8,14 Klasse 2
Steg:	c ₂ =	599,00 [mm]	
	t=	19,80 [mm]	
	(c/t)*=	$30,25 \leq 38 \cdot \epsilon$	= 30,92 Klasse 2

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 143,56 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,50$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 83,04 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,65$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 579,00 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 234,64 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,eff} = 234,64 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.: } \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1971,16 \text{ [kN]}$$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 143,56 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,50$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 496,17 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,27$
 $\chi_p = 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei $b_{eff,ver.} = 289,50 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 115,80 \text{ [mm]}$
 ver\u00e4nderlicher Verlauf: $b_c = 289,50 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 173,70 \text{ [mm]}$
 $b_t = 289,50 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	2,00	15,00	-29,95	30,00	-898,50	26910,08	10,00
2	2,00	15,00	-29,95	30,00	-898,50	26910,08	10,00
3	11,58	1,98	-23,16	22,93	-531,02	12298,46	256,22
4	46,32	1,98	5,79	91,71	531,02	3074,62	16397,95
5	2,00	30,00	29,95	60,00	1797,00	53820,15	20,00
Σ				234,64	0,00	123013,38	16694,17

$M_{pl} = 1864,97 \text{ [kNm]}$ $z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $W_{pl} = 5253,44 \text{ [cm}^3\text{]}$ $I_{y,eff,ver.} = 139707,55 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $I = 139707,55 \text{ [cm}^4\text{]}$ $W_{y,eff,ver.} = 4513,98 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $W_{el} = 4513,98 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,16$

maßgebende Klasse= Klasse 2 $W_{verw} = w_{pl} = 5253,44 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 234,64 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,11632 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1755,29 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

$N_{EW,Steg,UG} = 24038,62 \text{ [kN]}$ $N_{EW,Flansch,UG} = 27412,53 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 116,83 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,55$

$\chi_p = 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p > 0,748$

$\rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 150,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 102,45 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,59$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow$$

$$\chi_p = 1,00$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 579,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 289,50 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 289,50 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	2,00	15,00	-29,95	30,00	-898,50	26910,08	10,00
2	2,00	15,00	-29,95	30,00	-898,50	26910,08	10,00
3	28,95	1,98	-14,48	57,32	-829,72	12010,22	4003,41
4	28,95	1,98	14,48	57,32	829,72	12010,22	4003,41
5	2,00	15,00	29,95	30,00	898,50	26910,08	10,00
6	2,00	15,00	29,95	30,00	898,50	26910,08	10,00
$\Sigma =$				234,64	0,00	131660,74	8046,81

$M_{pl} = 1864,97 \text{ [kNm]}$
 $W_{pl} = 5253,44 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $I = 139707,55 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{el} = 4513,98 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,16$

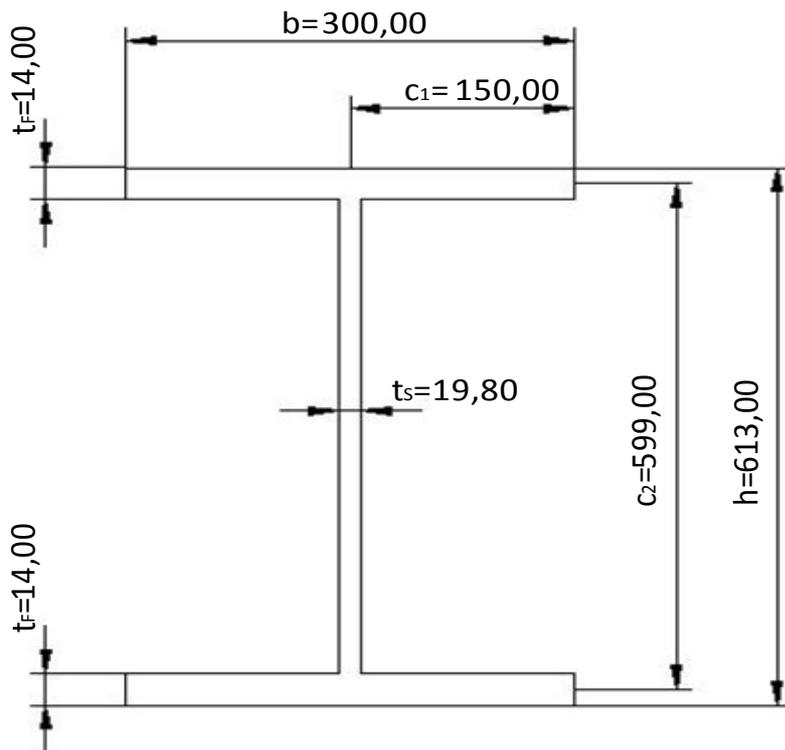
$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $I_{y,eff,konst.} = 139707,55 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{y,eff,konst.} = 4513,98 \text{ [cm}^3\text{]}$

maßgebende Klasse = Klasse 2

$W_{verw} =$
 $W_{pl} = 5253,44 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 234,64 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1971,16 \text{ [kN]}$

F starres Fachw.: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,11632 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1755,29 \text{ [kN]}$

9.5.3 $t_s=19,8$ [mm] und $t_f=14$ [mm]

F1.EW,Steg=	3891,50 [kN]	FGMNIA=	1612,00 [kN]
F4.EW,Flansch=	4593,20 [kN]	tf=	14,00 [mm]
ts=	19,80 [mm]	aFW,Knoten=	2958,00 [mm]
bGurt=	300,00 [mm]	bFW,Knoten=	6250,00 [mm]
h=	613,00 [mm]	Mfaktor=	0,10938 [-]
fy=	355,00 [[N/mm ²]]	ε=	0,81 [-]
		A=	199,83 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch:	c ₁ =	150,00 [mm]	
	t=	14,00 [mm]	
	(c/t)*=	$10,71 \leq 14 \cdot \epsilon$	= 11,39 Klasse 3
Steg:	c ₂ =	599,00 [mm]	
	t=	19,80 [mm]	
	(c/t)*=	$30,25 \leq 38 \cdot \epsilon$	= 30,92 Klasse 2

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

$$\begin{aligned} \text{Flansch:} \quad \sigma_{cr} &= 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 70,34 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad \text{mit } k_{\sigma} = 0,425 \\ \bar{\lambda}_p &= \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,71 \end{aligned}$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{\text{eff}} = 150,00 \text{ [mm]}$$

$$\begin{aligned} \text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} &= 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 83,04 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad \text{mit } k_{\sigma} = 4,00 \\ \bar{\lambda}_p &= \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,65 \end{aligned}$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{\text{eff}} = 585,00 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 199,83 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,\text{eff}} = 199,83 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.:} \quad \frac{N_{UG}}{A_{c,\text{eff}} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,\text{eff}} * f_y} \leq 1 \quad F = 1678,72 \text{ [kN]}$$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

$$\begin{aligned} \text{Flansch:} \quad \sigma_{cr} &= 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 70,34 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad \text{mit } k_{\sigma} = 0,425 \\ \bar{\lambda}_p &= \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,71 \end{aligned}$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{\text{eff}} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 496,17 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,27$
 $\chi_p = 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei $b_{eff,ver.} = 292,50 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 117,00 \text{ [mm]}$
 ver\u00e4nderlicher Verlauf: $b_c = 292,50 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 175,50 \text{ [mm]}$
 $b_t = 292,50 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	1,40	15,00	-29,95	21,00	-628,95	18837,05	3,43
2	1,40	15,00	-29,95	21,00	-628,95	18837,05	3,43
3	11,70	1,98	-23,40	23,17	-542,08	12684,77	264,27
4	46,80	1,98	5,85	92,66	542,08	3171,19	16913,03
5	1,40	30,00	29,95	42,00	1257,90	37674,11	6,86
Σ				199,83	0,00	91204,18	17191,02

M_{pl}= 1494,48 [kNm] $z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 W_{pl}= 4209,81 [cm³] $I_{y,eff,ver.} = 108395,20 \text{ [cm}^4\text{]}$
 I= 108395,20 [cm⁴] $W_{y,eff,ver.} = 3536,55 \text{ [cm}^3\text{]}$
 W_{eI}= 3536,55 [cm³]
 $\alpha_{pl} = 1,19$

maßgebende Klasse= Klasse 3 $W_{verw} = W_{eI} = 3536,55 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 199,83 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,10938 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \text{ F} = 1464,47 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

NEW,Steg,UG= 16444,81 [kN] $NEW,Flansch,UG = 19410,07 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 97,13 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,60$

$\chi_p = 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p > 0,748$

$\rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 150,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 82,29 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,66$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 585,00 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 292,50 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf: $b_{e2} = 292,50 \text{ [mm]}$

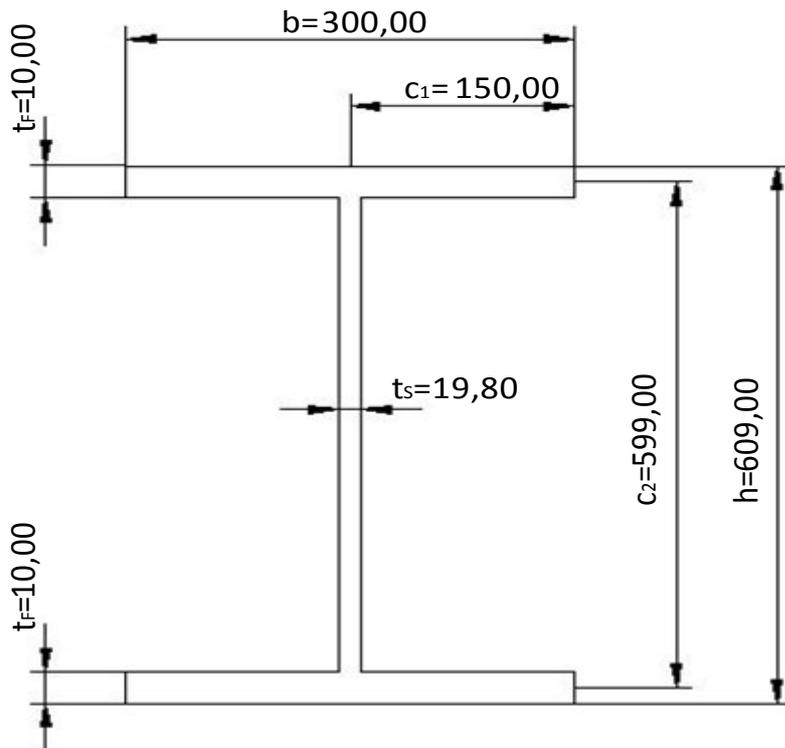
	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	1,40	15,00	-29,95	21,00	-628,95	18837,05	3,43
2	1,40	15,00	-29,95	21,00	-628,95	18837,05	3,43
3	29,25	1,98	-14,63	57,92	-847,01	12387,48	4129,16
4	29,25	1,98	14,63	57,92	847,01	12387,48	4129,16
5	1,40	15,00	29,95	21,00	628,95	18837,05	3,43
6	1,40	15,00	29,95	21,00	628,95	18837,05	3,43
$\Sigma =$				199,83	0,00	100123,16	8272,04

$M_{pl} = 1494,48 \text{ [kNm]}$	$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
$W_{pl} = 4209,81 \text{ [cm}^3\text{]}$	$I_{y,eff,konst.} = 108395,20 \text{ [cm}^4\text{]}$
$I = 108395,20 \text{ [cm}^4\text{]}$	$W_{y,eff,konst.} = 3536,55 \text{ [cm}^3\text{]}$
$W_{el} = 3536,55 \text{ [cm}^3\text{]}$	
$\alpha_{pl} = 1,19$	

maßgebende Klasse= Klasse 3 $W_{verw} = W_{el} = 3536,55 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 199,83 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1$ $F = 1678,72 \text{ [kN]}$

F starres Fachw.: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,10938 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1$ $F = 1464,47 \text{ [kN]}$

9.5.4 $t_s=19,8$ [mm] und $t_f=10$ [mm]

F1.EW,Steg=	3053,60 [kN]	FGMNIA=	1398,00 [kN]
F4.EW,Flansch=	3376,00 [kN]	t_f =	10,00 [mm]
t_s =	19,80 [mm]	$a_{FW,Knoten}$ =	2958,00 [mm]
b_{Gurt} =	300,00 [mm]	$b_{FW,Knoten}$ =	6250,00 [mm]
h =	609,00 [mm]	M_{Faktor} =	0,10226 [-]
f_y =	355,00 [[N/mm ²]]	ϵ =	0,81 [-]
		A =	176,62 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch:	c_1 =	150,00 [mm]	
	t =	10,00 [mm]	
	$(c/t)^*$ =	$15,00 \geq 14 \cdot \epsilon$	= 11,39 Klasse 4
Steg:	c_2 =	599,00 [mm]	
	t =	19,80 [mm]	
	$(c/t)^*$ =	$30,25 \leq 38 \cdot \epsilon$	= 30,92 Klasse 2

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 35,89 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,99$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,82$$

$$b_{eff} = 122,31 \text{ [mm]}$$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 83,04 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,65$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 589,00 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 176,62 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,eff} = 165,55 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.: } \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1390,71 \text{ [kN]}$$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 35,89 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,99$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,82$$

$$b_{eff} = 122,31 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 496,17 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,27$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive	Breite	b _{eff,ver.} =	294,50 [mm]	b _{e1} =	117,80 [mm]
veränderlicher	Verlauf:	b _c =	294,50 [mm]	b _{e2} =	176,70 [mm]
		b _t =	294,50 [mm]		

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	1,00	12,23	-29,95	12,23	-366,32	10971,28	1,02
2	1,00	12,23	-29,95	12,23	-366,32	10971,28	1,02
3	11,78	1,98	-23,56	23,32	-549,52	12946,76	269,72
4	47,12	1,98	5,89	93,30	549,52	3236,69	17262,34
5	1,00	30,00	29,95	30,00	898,50	26910,08	2,50
Σ=				171,08	165,86	65036,08	17536,61

M _{pl} =	1247,56 [kNm]	z _s =	0,97 [cm]
W _{pl} =	3514,26 [cm ³]	I _{y,eff,ver.} =	82411,89 [cm ⁴]
I=	87540,67 [cm ⁴]	W _{y,eff,ver.} =	2622,96 [cm ³]
W _{eI} =	2874,90 [cm ³]		
α _{pl} =	1,22		

maßgebende Klasse=	Klasse 4	W _{verw} =	w _{y,eff} =	2622,96 [cm ³]
			A _{c,eff} =	165,55 [cm ²]

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,10226 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1206,40 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

N_{EW,Steg,UG}= 12903,99 [kN] N_{EW,Flansch,UG}= 14266,40 [kN]

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 80,77 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,66$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p} \right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive	Breite	bei	b _{eff,konst.} =	150,00 [mm]
konst.	Verlauf:			

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 73,06 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,70$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,98$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 578,29 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 289,14 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 289,14 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	1,00	15,00	-29,95	15,00	-449,25	13455,04	1,25
2	1,00	15,00	-29,95	15,00	-449,25	13455,04	1,25
3	28,91	1,98	-14,99	57,25	-858,35	12868,96	3988,69
4	28,91	1,98	14,99	57,25	858,35	12868,96	3988,69
5	1,00	15,00	29,95	15,00	449,25	13455,04	1,25
6	1,00	15,00	29,95	15,00	449,25	13455,04	1,25
$\Sigma =$				174,50	0,00	79558,08	7982,39

$M_{pl} = 1247,56 \text{ [kNm]}$
 $W_{pl} = 3514,26 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $I = 87540,67 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{el} = 2874,90 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,22$

$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $I_{y,eff,konst.} = 87540,46 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{y,eff,konst.} = 2874,89 \text{ [cm}^3\text{]}$

maßgebende Klasse = Klasse 4

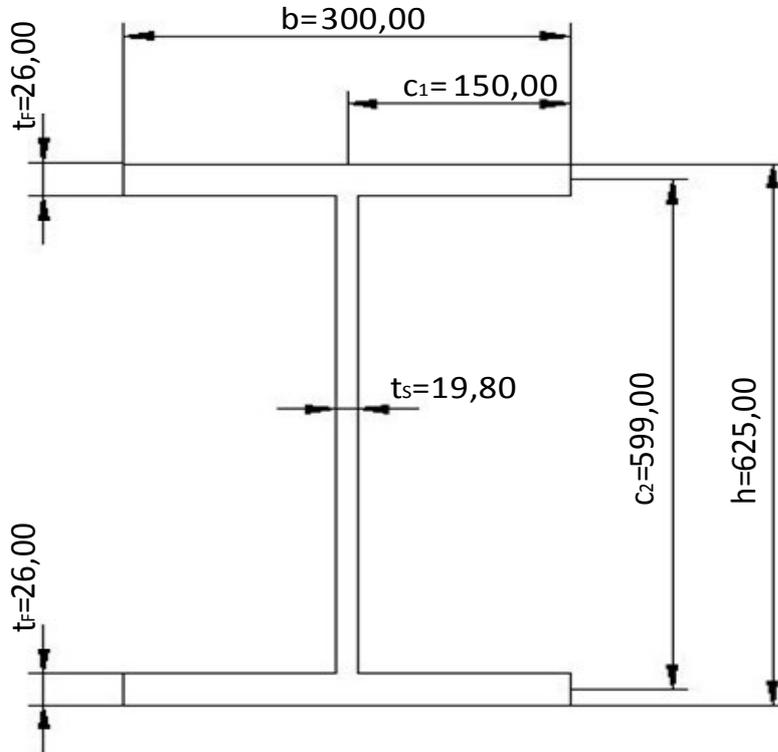
$W_{verw} = W_{y,eff} = 2874,89 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 174,50 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1465,94 \text{ [kN]}$

F starres Fachw.: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,10226 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1278,15 \text{ [kN]}$

9.6 Steg-/Flanshdickenvariation für das I-Profil mit $h=625$ [mm]

9.6.1 $t_s=19,8$ [mm] und $t_f=26$ [mm]



F1.EW,Steg=	8003,30 [kN]	FGMNIA=	2243,00 [kN]
F5.EW,Flansch=	9720,20 [kN]	t_f =	26,00 [mm]
t_s =	19,80 [mm]	$a_{FW,Knoten}$ =	2958,00 [mm]
b_{Gurt} =	300,00 [mm]	$b_{FW,Knoten}$ =	6250,00 [mm]
h =	625,00 [mm]	M_{Faktor} =	0,12039 [-]
f_y =	355,00 [[N/mm ²]]	ϵ =	0,81 [-]
		A=	269,45 [cm ²]

• **Klassifizierung (N alleine):**

Flansch:	c_1 =	150,00 [mm]	
	t =	26,00 [mm]	
	$(c/t)^*$ =	$5,77 \leq 9 \cdot \epsilon$	= 7,32 Klasse 1
Steg:	c_2 =	599,00 [mm]	
	t =	19,80 [mm]	
	$(c/t)^*$ =	$30,25 \leq 38 \cdot \epsilon$	= 30,92 Klasse 2

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \rightarrow \chi_{\phi} = 1,00$
 $b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$

Steg ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 83,04 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,65$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_{\phi} = 1,00$
 $b_{eff} = 573,00 \text{ [mm]}$

$A_{br} = 269,45 \text{ [cm}^2\text{]} \rightarrow A_{c,eff} = 269,45 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 2263,61 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 242,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,38$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \rightarrow \chi_{\phi} = 1,00$
 $b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 496,17 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,27$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite $b_{eff,ver.} = 286,50 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 114,60 \text{ [mm]}$
 veränderlicher Verlauf: $b_c = 286,50 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 171,90 \text{ [mm]}$
 $b_t = 286,50 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
2	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
3	11,46	1,98	-22,92	22,69	-520,07	11920,08	248,33
4	45,84	1,98	5,73	90,76	520,07	2980,02	15893,44
5	2,60	30,00	29,95	78,00	2336,10	69966,20	43,94
Σ=				269,45	0,00	154832,49	16229,65

$M_{pl} = 2235,59 \text{ [kNm]}$ $z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $W_{pl} = 6297,43 \text{ [cm}^3\text{]}$ $I_{y,eff,ver.} = 171062,14 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $I_y = 171062,14 \text{ [cm}^4\text{]}$ $W_{y,eff,ver.} = 5473,99 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $W_{el} = 5473,99 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,15$

maßgebende Klasse= Klasse 2 $W_{verw} = w_{pl} = 6297,43 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 269,45 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,12039 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \text{ F} = 2017,58 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

$N_{EW,Steg,UG} = 33820,57 \text{ [kN]}$ $N_{EW,Flansch,UG} = 41075,90 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 152,44 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,48$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748$

$\rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 150,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 125,52 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,53$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 573,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 286,50 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 286,50 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
2	2,60	15,00	-29,95	39,00	-1168,05	34983,10	21,97
3	28,65	1,98	-14,33	56,73	-812,61	11640,70	3880,23
4	28,65	1,98	14,33	56,73	812,61	11640,70	3880,23
5	2,60	15,00	29,95	39,00	1168,05	34983,10	21,97
6	2,60	15,00	29,95	39,00	1168,05	34983,10	21,97
$\Sigma =$				269,45	0,00	163213,79	7848,35

$$M_{pl} = 2235,59 \text{ [kNm]}$$

$$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$$

$$W_{pl} = 6297,43 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$I_{y,eff,konst.} = 171062,14 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$I_y = 171062,14 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$W_{y,eff,konst.} = 5473,99 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$W_{el} = 5473,99 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\alpha_{pl} = 1,15$$

maßgebende Klasse= Klasse 2

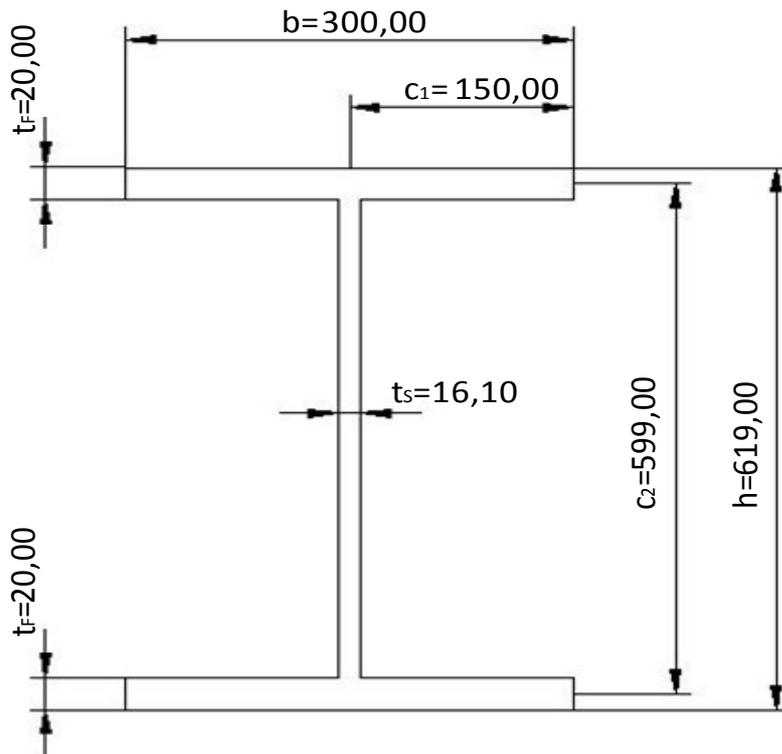
$W_{verw} =$

$$W_{pl} = 6297,43 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$A_{c,eff} = 269,45 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.:} \quad \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 2263,61 \text{ [kN]}$$

$$\text{F starres Fachw.:} \quad \frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,12039 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 2017,58 \text{ [kN]}$$

9.6.2 $t_s=16,1$ [mm] und $t_f=20$ [mm]

F _{1.EW,Steg} =	4010,60 [kN]
F _{5.EW,Flansch} =	4982,80 [kN]
t _s =	16,10 [mm]
b _{Gurt} =	300,00 [mm]
h=	619,00 [mm]
f _y =	355,00 [[N/mm ²]]

F _{GMNIA} =	1733,00 [kN]
t _f =	20,00 [mm]
a _{FW,Knoten} =	2958,00 [mm]
b _{FW,Knoten} =	6250,00 [mm]
M _{Faktor} =	0,12574 [-]
ε=	0,81 [-]
A=	213,22 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch:	c ₁ =	150,00 [mm]	
	t=	20,00 [mm]	
	(c/t)*=	7,50 ≤ 10*ε =	8,14 Klasse 2

Steg:	c ₂ =	599,00 [mm]	
	t=	16,10 [mm]	
	(c/t)*=	37,20 ≥ 42*ε =	34,17 Klasse 4

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 143,56 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,50$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 54,90 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,80$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,90$$

$$b_{eff} = 523,05 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 213,22 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,eff} = 204,21 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.: } \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1715,53 \text{ [kN]}$$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 143,56 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,50$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 328,06 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,33$
 $\chi_p = 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite $b_{eff,ver.} = 289,50 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 115,80 \text{ [mm]}$
 ver\u00e4nderlicher Verlauf: $b_c = 289,50 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 173,70 \text{ [mm]}$
 $b_t = 289,50 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	2,00	15,00	-29,95	30,00	-898,50	26910,08	10,00
2	2,00	15,00	-29,95	30,00	-898,50	26910,08	10,00
3	11,58	1,61	-23,16	18,64	-431,79	10000,27	208,34
4	46,32	1,61	5,79	74,58	431,79	2500,07	13333,69
5	2,00	30,00	29,95	60,00	1797,00	53820,15	20,00
$\Sigma =$				213,22	0,00	120140,63	13582,03

$M_{pl} = 1754,89 \text{ [kNm]}$ $z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $W_{pl} = 4943,35 \text{ [cm}^3\text{]}$ $I_{y,eff,ver.} = 133722,66 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $I_y = 133722,66 \text{ [cm}^4\text{]}$ $W_{y,eff,ver.} = 4320,60 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $W_{el} = 4320,60 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,14$

maßgebende Klasse= Klasse 4 $W_{verw} = W_{y,c,eff,ver.} = 4320,60 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 204,21 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,12574 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \text{ F} = 1503,95 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

$N_{EW,Steg,UG} = 16948,11 \text{ [kN]}$ $N_{EW,Flansch,UG} = 21056,46 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 98,76 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,60$

$\chi_p = 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p > 0,748$

$\rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 150,00 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 79,49 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,67$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

$$\rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive Breite bei konst. Verlauf: $b_{eff,konst.} = 579,00 \text{ [mm]}$

$$b_{e1} = 289,50 \text{ [mm]}$$

$$b_{e2} = 289,50 \text{ [mm]}$$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	2,00	15,00	-29,95	30,00	-898,50	26910,08	10,00
2	2,00	15,00	-29,95	30,00	-898,50	26910,08	10,00
3	28,95	1,61	-14,48	46,61	-674,67	9765,88	3255,29
4	28,95	1,61	14,48	46,61	674,67	9765,88	3255,29
5	2,00	15,00	29,95	30,00	898,50	26910,08	10,00
6	2,00	15,00	29,95	30,00	898,50	26910,08	10,00
Σ				213,22	0,00	127172,07	6550,59

$$M_{pl} = 1754,89 \text{ [kNm]}$$

$$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$$

$$W_{pl} = 4943,35 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$I_{y,eff,konst.} = 133722,66 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$I_y = 133722,66 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$W_{y,eff,konst.} = 4320,60 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$W_{el} = 4320,60 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\alpha_{pl} = 1,14$$

maßgebende Klasse= Klasse 4

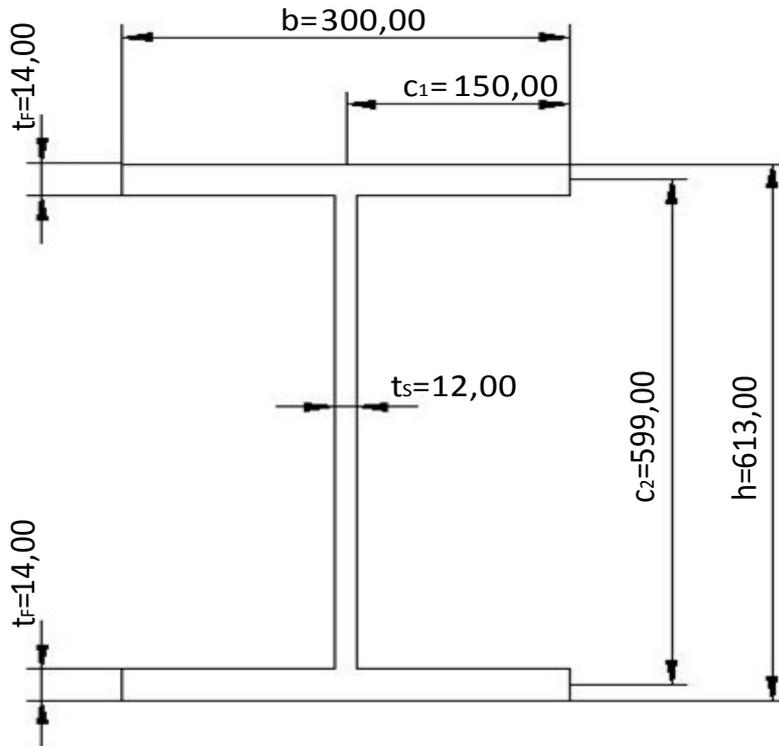
$$W_{verw} = W_{y,c,eff,ver.} = 4320,60 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$A_{c,eff} = 213,22 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.:} \quad \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1791,19 \text{ [kN]}$$

$$\text{F starres Fachw.:} \quad \frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,12574 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1561,80 \text{ [kN]}$$

9.6.3 $t_s=12$ [mm] und $t_f=14$ [mm]



F1.EW,Steg=	1555,90 [kN]	FGMNIA=	1134,00 [kN]
F5.EW,Flansch=	1943,10 [kN]	t_f =	14,00 [mm]
t_s =	12,00 [mm]	$a_{FW,Knoten}$ =	2958,00 [mm]
b_{Gurt} =	300,00 [mm]	$b_{FW,Knoten}$ =	6250,00 [mm]
h =	613,00 [mm]	M_{Faktor} =	0,13267 [-]
f_y =	355,00 [[N/mm ²]]	ϵ =	0,81 [-]
		A =	154,20 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch:	c_1 =	150,00 [mm]	
	t =	14,00 [mm]	
	$(c/t)^*$ =	$10,71 \leq 14 * \epsilon$	= 11,39 Klasse 3
Steg:	c_2 =	599,00 [mm]	
	t =	12,00 [mm]	
	$(c/t)^*$ =	$49,92 \geq 42 * \epsilon$	= 34,17 Klasse 4

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 70,34 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,71$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 30,50 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 1,08$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,74$$

$$b_{eff} = 431,68 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 154,20 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,eff} = 135,80 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.: } \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1140,83 \text{ [kN]}$$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

$$\text{Flansch: } \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 70,34 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,71$$

$$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 182,25 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,44$$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive Breite $b_{eff,ver.} = 292,50 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 117,00 \text{ [mm]}$
 veränderlicher Verlauf: $b_c = 292,50 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 175,50 \text{ [mm]}$
 $b_t = 292,50 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	1,40	15,00	-29,95	21,00	-628,95	18837,05	3,43
2	1,40	15,00	-29,95	21,00	-628,95	18837,05	3,43
3	11,70	1,20	-23,40	14,04	-328,54	7687,74	160,16
4	46,80	1,20	5,85	56,16	328,54	1921,94	10250,32
5	1,40	30,00	29,95	42,00	1257,90	37674,11	6,86
$\Sigma =$				154,20	0,00	84957,89	10424,20

$M_{pl} = 1257,58 \text{ [kNm]}$ $z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $W_{pl} = 3542,48 \text{ [cm}^3\text{]}$ $I_{y,eff,ver.} = 95382,09 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $I_y = 95382,09 \text{ [cm}^4\text{]}$ $W_{y,eff,ver.} = 3111,98 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $W_{el} = 3111,98 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,14$

maßgebende Klasse= Klasse 4 $W_{verw} = W_{y,c,eff,ver.} = 3111,98 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 135,80 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,13267 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1003,33 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

$N_{EW,Steg,UG} = 6574,97 \text{ [kN]}$ $N_{EW,Flansch,UG} = 8211,21 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 53,25 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,82$$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p} \right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748$$

$\rightarrow \chi_p = 0,94$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 141,41 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 42,64 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,91$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,83$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 486,55 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 243,27 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 243,27 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	1,40	14,14	-29,95	19,80	-592,94	17758,58	3,23
2	1,40	14,14	-29,95	19,80	-592,94	17758,58	3,23
3	24,33	1,20	-17,09	29,19	-498,80	8522,62	1439,75
4	24,33	1,20	17,09	29,19	498,80	8522,62	1439,75
5	1,40	14,14	29,95	19,80	592,94	17758,58	3,23
6	1,40	14,14	29,95	19,80	592,94	17758,58	3,23
$\Sigma =$				137,58	0,00	88079,54	2892,44

$M_{pl} = 1257,58 \text{ [kNm]}$
 $W_{pl} = 3542,48 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $I_y = 95382,09 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{el} = 3111,98 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,14$

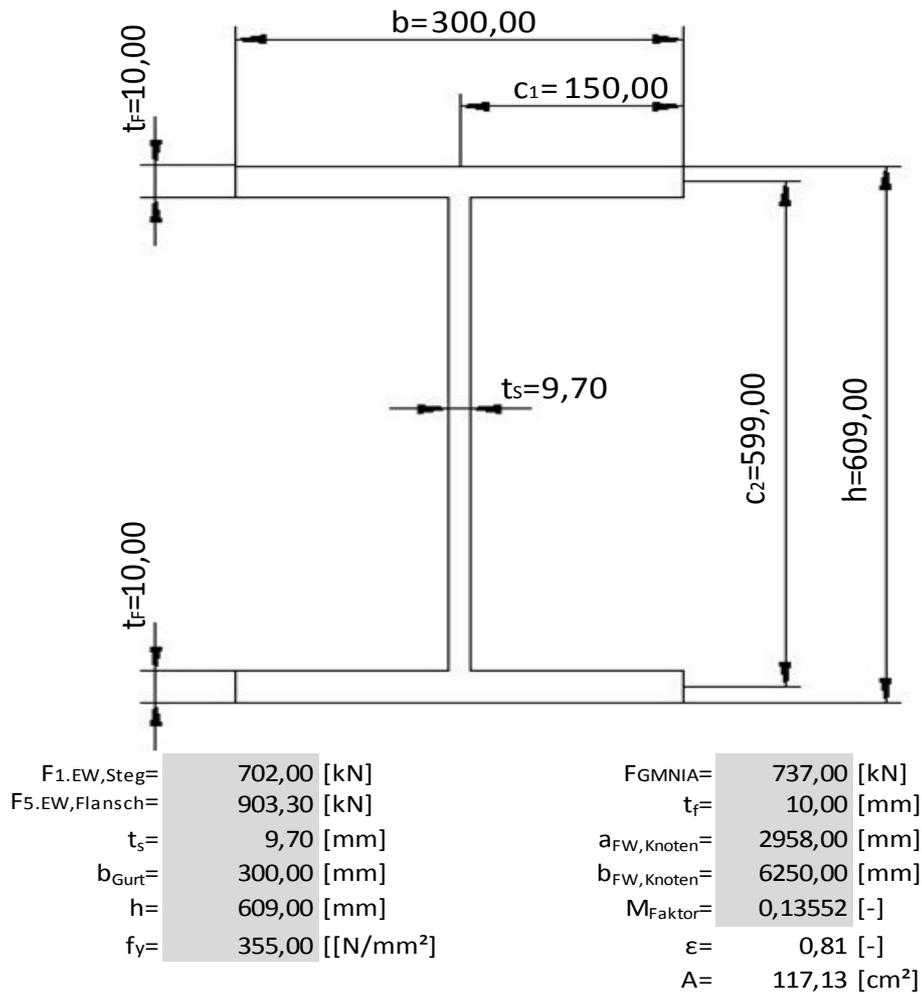
$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 $I_{y,eff,konst.} = 90971,98 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $W_{y,eff,konst.} = 2968,09 \text{ [cm}^3\text{]}$

maßgebende Klasse= Klasse 4

$W_{verw} = W_{y,c,eff,ver.} = 2968,09 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 137,58 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1155,74 \text{ [kN]}$

F starres Fachw.: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,13267 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1008,89 \text{ [kN]}$

9.6.4 $t_s=9,7$ [mm] und $t_f=10$ [mm]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch: $c_1= 150,00$ [mm]
 $t= 10,00$ [mm]
 $(c/t)^*= 15,00 \geq 14 \cdot \epsilon = 11,39$ Klasse 4

Steg: $c_2= 599,00$ [mm]
 $t= 9,70$ [mm]
 $(c/t)^*= 61,75 \geq 42 \cdot \epsilon = 34,17$ Klasse 4

• **Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):**

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 35,89 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,99$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \rightarrow \chi_p = 0,82$
 $b_{eff} = 122,31 \text{ [mm]}$

Steg ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 19,93 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 1,33$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 0,63$
 $b_{eff} = 368,57 \text{ [mm]}$

$A_{br} = 117,13 \text{ [cm}^2\text{]} \rightarrow A_{c,eff} = 84,68 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 711,34 \text{ [kN]}$

• **Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):**

Flansch: $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 35,89 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 0,425$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,99$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748 \rightarrow \chi_p = 0,82$
 $b_{eff} = 122,31 \text{ [mm]}$

Steg ($\psi = -1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 119,08 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 23,90$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,55$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$

effektive Breite $b_{eff,ver.} = 294,50 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 117,80 \text{ [mm]}$
 veränderlicher Verlauf: $b_c = 294,50 \text{ [mm]}$ $b_{e2} = 176,70 \text{ [mm]}$
 $b_t = 294,50 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	1,00	12,23	-29,95	12,23	-366,32	10971,28	1,02
2	1,00	12,23	-29,95	12,23	-366,32	10971,28	1,02
3	11,78	0,97	-23,56	11,43	-269,21	6342,60	132,14
4	47,12	0,97	5,89	45,71	269,21	1585,65	8456,81
5	1,00	30,00	29,95	30,00	898,50	26910,08	2,50
Σ=				111,60	165,86	56780,88	8593,48

$M_{pl} = 936,59 \text{ [kNm]}$ $z_s = 1,49 \text{ [cm]}$
 $W_{pl} = 2638,28 \text{ [cm}^3\text{]}$ $I_{y,eff,ver.} = 65127,85 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $I_y = 70342,35 \text{ [cm}^4\text{]}$ $W_{y,eff,ver.} = 2039,31 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $W_{el} = 2310,09 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $\alpha_{pl} = 1,14$

maßgebende Klasse= Klasse 4 $W_{verw} = W_{y,c,eff,ver.} = 2039,31 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 84,68 \text{ [cm}^2\text{]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,13552 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 627,72 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

$N_{EW,Steg,UG} = 2966,53 \text{ [kN]}$ $N_{EW,Flansch,UG} = 3817,19 \text{ [kN]}$

Flansch: $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 32,59 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 1,04$

$\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,748 \rightarrow \chi_p = 0,79$

$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,748$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 117,83 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$$\text{Steg } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A} = 25,33 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 1,18$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow$$

$$\chi_p = 0,69$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei $b_{\text{eff,konst.}} = 405,05 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf:

$b_{e1} = 202,52 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 202,52 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e_z [cm]	A [cm ²]	Ae_z [cm ³]	Ae_z^2 [cm ⁴]	I_y^* [cm ⁴]
1	1,00	11,78	-29,95	11,78	-352,90	10569,40	0,98
2	1,00	11,78	-29,95	11,78	-352,90	10569,40	0,98
3	20,25	0,97	-19,32	19,64	-379,61	7335,56	671,46
4	20,25	0,97	19,32	19,64	379,61	7335,56	671,46
5	1,00	11,78	29,95	11,78	352,90	10569,40	0,98
6	1,00	11,78	29,95	11,78	352,90	10569,40	0,98
$\Sigma =$				86,42	0,00	56948,71	1346,84

$$M_{pl} = 936,59 \text{ [kNm]}$$

$$z_s = 0,00 \text{ [cm]}$$

$$W_{pl} = 2638,28 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$I_{y,\text{eff,konst.}} = 58295,56 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$I_y = 70342,35 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$W_{y,\text{eff,konst.}} = 1914,47 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$W_{el} = 2310,09 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\alpha_{pl} = 1,14$$

maßgebende Klasse= Klasse 4

$$W_{\text{verw}} = W_{y,c,\text{eff,ver.}} = 1914,47 \text{ [cm}^3\text{]}$$

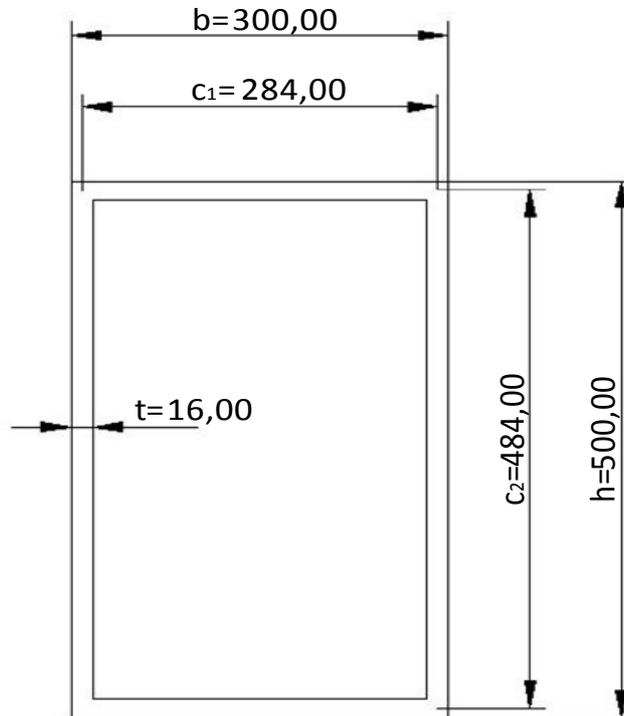
$$A_{c,\text{eff}} = 86,42 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.:} \quad \frac{N_{UG}}{A_{c,\text{eff}} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,\text{eff}} * f_y} \leq 1 \quad F = 726,00 \text{ [kN]}$$

$$\text{F starres Fachw.:} \quad \frac{N}{A_{c,\text{eff}} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,\text{eff}} * f_y} + \frac{0,13552 * F}{W_{\text{verw}} * f_y} \leq 1 \quad F = 634,17 \text{ [kN]}$$

9.7 Waddickenvariation für das Hohlprofil mit $h=500$ [mm]

9.7.1 $t=16$ [mm]



$F_{1,EW,Steg} =$	6550,50 [kN]	$F_{GMNIA} =$	2114,00 [kN]
$F_{9,EW,Flansch} =$	7602,10 [kN]	$a_{FW,Knoten} =$	2958,00 [mm]
$t =$	16,00 [mm]	$b_{FW,Knoten} =$	6250,00 [mm]
$b_{Gurt} =$	300,00 [mm]	$M_{Faktor} =$	0,06739 [-]
$h =$	500,00 [mm]	$\epsilon =$	0,81 [-]
$f_y =$	355,00 [N/mm ²]	$A =$	245,76 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch	$c_1 =$	284,00 [mm]	
	$t =$	16,00 [mm]	
	$(c/t)^* = 284/16 =$	17,75 $\geq 33 \cdot \epsilon =$	26,85 Klasse 1
Steg	$c_2 =$	484,00 [mm]	
	$t =$	16,00 [mm]	
	$(c/t)^* = 484/16 =$	30,25 $\leq 38 \cdot \epsilon =$	30,92 Klasse 2

• **Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):**

$$\text{Flansch } (\psi = +1): \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} =$$

$$\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{16}{284}\right)^2 * 4 = 241,22 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad \text{mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{241,22}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = b * \chi_p = 300 * 1 = 300,00 \text{ [mm]}$$

$$\text{Steg } (\psi = +1): \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} =$$

$$83,05 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad \text{mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{16}{484}\right)^2 * 4 =$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{83,05}} = 0,65$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = h_{steg} * \chi_p = 468 * 1 = 468,00 \text{ [mm]}$$

$$A_{br} = 245,76 \text{ [cm}^2\text{]} \quad \rightarrow \quad A_{c,eff} = 245,76 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\text{F gelenkiges Fachw.: } \frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{0,42258 * F}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{0,42258 * F}{245,76 * 35,50} \leq 1 \quad F = 2064,56 \text{ [kN]}$$

• **Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):**

$$\text{Flansch } (\psi = +1): \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} =$$

$$\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{16}{284}\right)^2 * 4 = 241,22 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad \text{mit } k_{\sigma} = 4,00$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{241,22}} = 0,38$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$b_{eff} = b * \chi_p = 300 * 1 = 300,00 \text{ [mm]} \quad b_{e1} = b_{eff,ver.} * 0,5 = 300 * 0,5 = 150,00 \text{ [mm]}$$

$$b_{e2} = b_{eff,ver.} * 0,5 = 300 * 0,5 = 150,00 \text{ [mm]}$$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

$$N_{EW,Steg,UG} = 4,2258 \cdot F_{1,EW,Steg} = 0,42258 \cdot 6550,50 = 27681,29 \text{ [kN]}$$

$$N_{EW,Flansch,UG} = 4,2258 \cdot F_{9,EW,Flansch} = 0,42258 \cdot 7602,10 = 32125,17 \text{ [kN]}$$

Flansch ($\psi = +1$):

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} =$$

$$\sigma_{cr} = \frac{32125,17}{245,76} = 130,72 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{130,72}} = 0,52$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

-> $\chi_p = 1,00$

effektive Breite bei konst. Verlauf:

$$b_{eff,konst.} = b \cdot \chi_p = 300 \cdot 1 = 300,00 \text{ [mm]}$$

$$b_{e1} = b_{eff,konst.} \cdot 0,5 = 300 \cdot 0,5 = 150,00 \text{ [mm]}$$

$$b_{e2} = b_{eff,konst.} \cdot 0,5 = 300 \cdot 0,5 = 150,00 \text{ [mm]}$$

Steg ($\psi = +1$):

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A_{QS}} =$$

$$\sigma_{cr} = \frac{27681,29}{245,76} = 112,64 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{35,50}{112,64}} = 0,56$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

-> $\chi_p = 1,00$

effektive Breite bei konst. Verlauf:

$$b_{eff,konst.} = h_{Steg} \cdot \chi_p = 468 \cdot 1 = 468,00 \text{ [mm]}$$

$$b_{e1} = b_{eff,konst.} \cdot 0,5 = 468 \cdot 0,5 = 234,00 \text{ [mm]}$$

$$b_{e2} = b_{eff,konst.} \cdot 0,5 = 468 \cdot 0,5 = 234,00 \text{ [mm]}$$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	1,60	15,00	-24,20	24,00	-580,80	14055,36	5,12
2	1,60	15,00	-24,20	24,00	-580,80	14055,36	5,12
3	23,40	1,60	-11,70	37,44	-438,05	5125,16	1708,39
4	23,40	1,60	-11,70	37,44	-438,05	5125,16	1708,39
5	23,40	1,60	11,70	37,44	438,05	5125,16	1708,39
6	23,40	1,60	11,70	37,44	438,05	5125,16	1708,39
7	1,60	15,00	24,20	24,00	580,80	14055,36	5,12
8	1,60	15,00	24,20	24,00	580,80	14055,36	5,12
Σ=				245,76	0,00	76722,09	6854,03

M_{pl}= 1446,76 [kNm]

z_s= 0,00 [cm]

W_{pl}= 4075,39 [cm³]

I_y= 83576,12 [cm⁴]

$$I_{y,eff,konst.} = I_y^* + A * e_z^2 - A * z_s^2 =$$

W_{el}= 3343,04 [cm³]

I_{y,eff,konst.}= 6854,03+76722,09-211,72*0,00²=

α_{pl}= 1,22

I_{y,eff,konst.}= 83576,12 [cm⁴]

$$W_{y,eff,konst.} = \frac{I_{y,eff,konst.}}{z_{max}} = \frac{83576,12}{250} =$$

W_{y,eff,konst.}= 3343,04 [cm³]

maßgebende Klasse= Klasse 2

W_{verw}=

w_{pl}= 4075,39 [cm³]

A_{c,eff}= 245,76 [cm²]

F gelenkiges Fachw.:

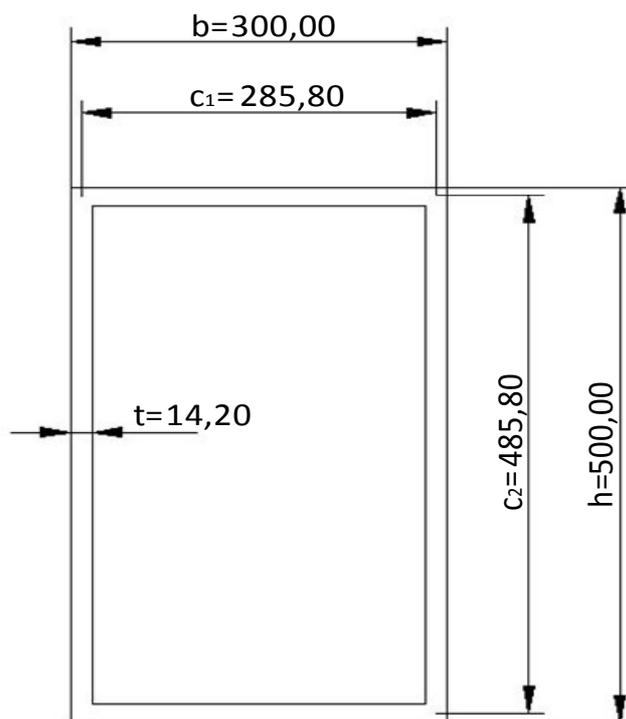
$$\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1$$

F= 2064,56 [kN]

F starres Fachw:

$$\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,06739 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1$$

F= 1883,44 [kN]

9.7.2 $t=14,2$ [mm]

$F_{1,EW,Steg} =$	4566,80 [kN]	$F_{GMNIA} =$	1847,00 [kN]
$F_{9,EW,Flansch} =$	5311,90 [kN]	$a_{FW,Knoten} =$	2958,00 [mm]
$t =$	14,20 [mm]	$b_{FW,Knoten} =$	6250,00 [mm]
$b_{Gurt} =$	300,00 [mm]	$M_{Faktor} =$	0,06984 [-]
$h =$	500,00 [mm]	$\epsilon =$	0,81 [-]
$f_y =$	355,00 [N/mm ²]	$A =$	219,13 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch	$c_1 =$	285,80 [mm]	
	$t =$	14,20 [mm]	
	$(c/t)^* =$	$20,13 \geq 33 \cdot \epsilon =$	26,85 Klasse 1
Steg	$c_2 =$	485,80 [mm]	
	$t =$	14,20 [mm]	
	$(c/t)^* =$	$34,21 \geq 42 \cdot \epsilon =$	34,17 Klasse 4

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

Flansch ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 187,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,43$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$
 $b_{eff} = 300,00 \text{ [mm]}$

Steg ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 64,93 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,74$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 0,95$
 $b_{eff} = 448,04 \text{ [mm]}$

$A_{br} = 219,13 \text{ [cm}^2\text{]} \rightarrow A_{c,eff} = 212,44 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{0,42258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1784,68 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

Flansch ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 187,61 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,43$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$
 $b_{eff} = 300,00 \text{ [mm]} \quad b_{e1} = 150,00 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 150,00 \text{ [mm]}$

$$\text{Steg } (\psi = -1): \quad \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 387,98 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad \text{mit } k_{\sigma} = 23,90$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,30$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite	b _{eff,ver.} = 235,80 [mm]	b _{e1} = 94,32 [mm]
veränderlicher Verlauf:	b _c = 235,80 [mm]	b _{e2} = 141,48 [mm]
	b _t = 235,80 [mm]	

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	1,42	15,00	-24,29	21,30	-517,38	12567,09	3,58
2	1,42	15,00	-24,29	21,30	-517,38	12567,09	3,58
3	9,43	1,42	-18,86	13,39	-252,65	4766,06	99,29
4	9,43	1,42	-18,86	13,39	-252,65	4766,06	99,29
5	37,73	1,42	4,72	53,57	252,65	1191,52	6354,75
6	37,73	1,42	4,72	53,57	252,65	1191,52	6354,75
7	1,42	30,00	24,29	42,60	1034,75	25134,17	7,16
Σ=				219,13	0,00	62183,50	12922,40

M _{pl} = 1295,25 [kNm]	z _s = 0,00 [cm]
W _{pl} = 3648,59 [cm ³]	I _{y,eff,ver.} = 75105,91 [cm ⁴]
I _y = 75105,91 [cm ⁴]	W _{y,eff,ver.} = 3004,24 [cm ³]
W _{el} = 3004,24 [cm ³]	
α _{pl} = 1,21	

maßgebende Klasse = Klasse 4	W _{verw} =	W _{y,eff} = 3004,24 [cm ³]
		A _{c,eff} = 212,44 [cm ²]

$$F \text{ starres Fachw: } \frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,06984 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1597,93 \text{ [kN]}$$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

$$N_{EW,Steg,UG} = 19298,51 \text{ [kN]} \quad N_{EW,Flansch,UG} = 22447,18 \text{ [kN]}$$

$$\text{Flansch } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 102,44 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,59$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei konst. Verlauf:	b _{eff,konst.} = 300,00 [mm]	b _{e1} = 150,00 [mm]
		b _{e2} = 150,00 [mm]

Steg ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A_{QS}} = 88,07 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,63$$

$\chi_p = 1$ für $\bar{\lambda}_p \leq 0,673$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 471,60 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 235,80 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf: $b_{e2} = 235,80 \text{ [mm]}$

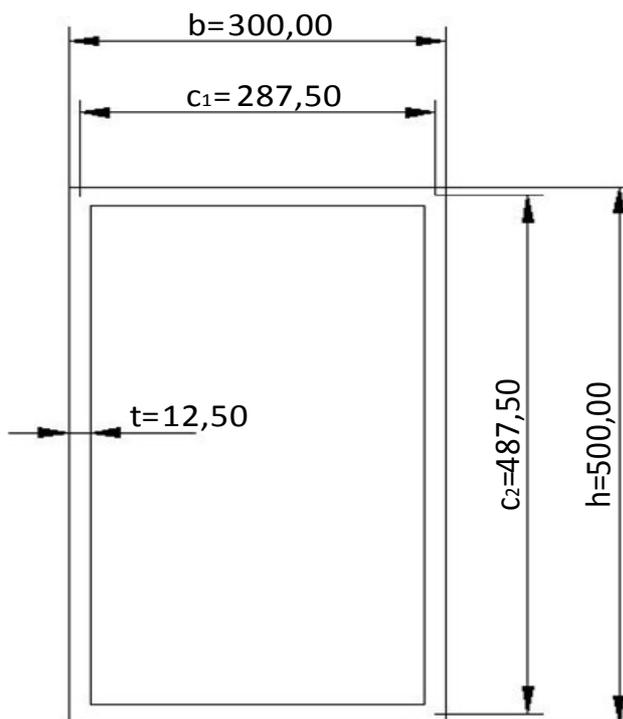
	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	1,42	15,00	-24,29	21,30	-517,38	12567,09	3,58
2	1,42	15,00	-24,29	21,30	-517,38	12567,09	3,58
3	23,58	1,42	-11,79	33,48	-394,77	4654,36	1551,45
4	23,58	1,42	-11,79	33,48	-394,77	4654,36	1551,45
5	23,58	1,42	11,79	33,48	394,77	4654,36	1551,45
6	23,58	1,42	11,79	33,48	394,77	4654,36	1551,45
7	1,42	15,00	24,29	21,30	517,38	12567,09	3,58
8	1,42	15,00	24,29	21,30	517,38	12567,09	3,58
Σ=				219,13	0,00	68885,78	6220,13

M_{pl}= 1295,25 [kNm] $z_s = 0,00 \text{ [cm]}$
 W_{pl}= 3648,59 [cm³] $I_{y,eff,konst.} = 75105,91 \text{ [cm}^4\text{]}$
 $I_y = 75105,91 \text{ [cm}^4\text{]}$ $W_{y,eff,konst.} = 3004,24 \text{ [cm}^3\text{]}$
 W_{eI}= 3004,24 [cm³]
 $\alpha_{pl} = 1,21$

maßgebende Klasse= Klasse 4 $W_{verw} = W_{y,eff} = 3004,24 \text{ [cm}^3\text{]}$
 $A_{c,eff} = 219,13 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1$ $F = 1840,89 \text{ [kN]}$

F starres Fachw: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,06984 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1$ $F = 1642,84 \text{ [kN]}$

9.7.3 $t=12,5$ [mm]

F1.EW,Steg=	3106,20 [kN]	FGMNIA=	1582,00 [kN]
F9.EW,Flansch=	3621,00 [kN]	$a_{FW,Knoten}$ =	2958,00 [mm]
t=	12,50 [mm]	$b_{FW,Knoten}$ =	6250,00 [mm]
b_{Gurt} =	300,00 [mm]	M_{Faktor} =	0,07116 [-]
h=	500,00 [mm]	ϵ =	0,81 [-]
f_y =	355,00 [N/mm ²]	A=	193,75 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch	$c_1 = 287,50$ [mm]	
	$t = 12,50$ [mm]	
	$(c/t)^* = 23,00 \geq 33 \cdot \epsilon = 26,85$	Klasse 1

Steg	$c_2 = 487,50$ [mm]	
	$t = 12,50$ [mm]	
	$(c/t)^* = 39,00 \geq 42 \cdot \epsilon = 34,17$	Klasse 4

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

Flansch ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 143,67 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,50$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$
 $b_{eff} = 300,00 \text{ [mm]}$

Steg ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 49,97 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,84$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 0,88$
 $b_{eff} = 416,45 \text{ [mm]}$

$A_{br} = 193,75 \text{ [cm}^2\text{]} \rightarrow A_{c,eff} = 179,11 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{0,42258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1504,67 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

Flansch ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 143,67 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,50$
 $\chi_p = 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$
 $b_{eff} = 300,00 \text{ [mm]} \quad b_{e1} = 150,00 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 150,00 \text{ [mm]}$

$$\text{Steg } (\psi = -1): \quad \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 298,55 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad \text{mit } k_{\sigma} = 23,90$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,34$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive Breite	b _{eff,ver.} = 237,50 [mm]	b _{e1} = 95,00 [mm]
veränderlicher Verlauf:	b _c = 237,50 [mm]	b _{e2} = 142,50 [mm]
	b _t = 237,50 [mm]	

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	1,25	15,00	-24,38	18,75	-457,03	11140,14	2,44
2	1,25	15,00	-24,38	18,75	-457,03	11140,14	2,44
3	9,50	1,25	-19,00	11,88	-225,63	4286,88	89,31
4	9,50	1,25	-19,00	11,88	-225,63	4286,88	89,31
5	38,00	1,25	4,75	47,50	225,63	1071,72	5715,83
6	38,00	1,25	4,75	47,50	225,63	1071,72	5715,83
7	1,25	30,00	24,38	37,50	914,06	22280,27	4,88
Σ=				193,75	0,00	55277,73	11620,05

M _{pl} = 1149,59 [kNm]	z _s = 0,00 [cm]
W _{pl} = 3238,28 [cm ³]	I _{y,eff,ver.} = 66897,79 [cm ⁴]
I _y = 66897,79 [cm ⁴]	W _{y,eff,ver.} = 2675,91 [cm ³]
W _{el} = 2675,91 [cm ³]	
α _{pl} = 1,21	

maßgebende Klasse = Klasse 4	W _{verw} = W _{y,eff} = 2675,91 [cm ³]
	A _{c,eff,konst.} = 179,11 [cm ²]

$$F \text{ starres Fachw: } \frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,07116 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1352,26 \text{ [kN]}$$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

$$N_{EW,Steg,UG} = 13126,27 \text{ [kN]} \quad N_{EW,Flansch,UG} = 15301,72 \text{ [kN]}$$

$$\text{Flansch } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 78,98 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,67$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

effektive Breite bei konst. Verlauf:	b _{eff,konst.} = 300,00 [mm]	b _{e1} = 150,00 [mm]
		b _{e2} = 150,00 [mm]

Steg ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A_{QS}} = 67,75 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,72$$

$\chi_p = 1$ für $\bar{\lambda}_p \leq 0,673$ \rightarrow $\chi_p = 0,96$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 456,76 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 228,38 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf: $b_{e2} = 228,38 \text{ [mm]}$

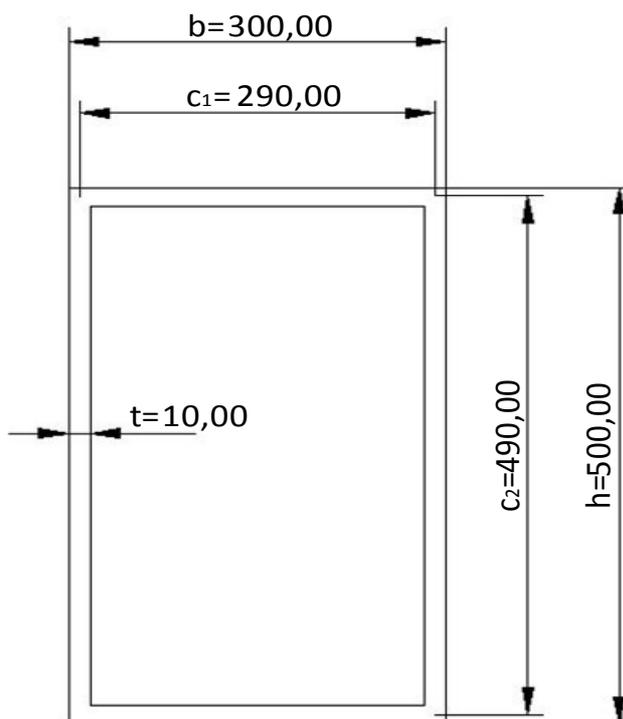
	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	1,25	15,00	-24,38	18,75	-457,03	11140,14	2,44
2	1,25	15,00	-24,38	18,75	-457,03	11140,14	2,44
3	22,84	1,25	-12,33	28,55	-352,02	4340,74	1240,81
4	22,84	1,25	-12,33	28,55	-352,02	4340,74	1240,81
5	22,84	1,25	12,33	28,55	352,02	4340,74	1240,81
6	22,84	1,25	12,33	28,55	352,02	4340,74	1240,81
7	1,25	15,00	24,38	18,75	457,03	11140,14	2,44
8	1,25	15,00	24,38	18,75	457,03	11140,14	2,44
Σ=				189,19	0,00	61923,52	4973,00

M_{pl}= 1149,59 [kNm] z_s= 0,00 [cm]
 W_{pl}= 3238,28 [cm³] I_{y,eff,konst.}= 66896,52 [cm⁴]
 I_y= 66897,79 [cm⁴] W_{y,eff,konst.}= 2675,86 [cm³]
 W_{el}= 2675,91 [cm³]
 α_{pl}= 1,21

maßgebende Klasse= Klasse 4 W_{verw}= W_{y,eff}= 2675,86 [cm³]
A_{c,eff,konst.}= 189,19 [cm²]

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1$ F= 1589,33 [kN]

F starres Fachw.: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,07116 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1$ F= 1420,24 [kN]

9.7.4 $t=10$ [mm]

F1.EW,Steg=	1582,90 [kN]	FGMNIA=	1178,00 [kN]
F9.EW,Flansch=	1851,40 [kN]	a _{FW,Knoten} =	2958,00 [mm]
t=	10,00 [mm]	b _{FW,Knoten} =	6250,00 [mm]
b _{Gurt} =	300,00 [mm]	M _{Faktor} =	0,07425 [-]
h=	500,00 [mm]	ε=	0,81 [-]
f _y =	355,00 [N/mm ²]	A=	156,00 [cm ²]

• Klassifizierung (N alleine):

Flansch	c ₁ =	290,00 [mm]	
	t=	10,00 [mm]	
	(c/t)*=	29,00 ≥ 38*ε	= 30,92 Klasse 2
Steg	c ₂ =	490,00 [mm]	
	t=	10,00 [mm]	
	(c/t)*=	49,00 ≥ 42*ε	= 34,17 Klasse 4

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (N alleine):

Flansch ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 90,37 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,63$
 $\chi_p = 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$
 $b_{eff} = 300,00 \text{ [mm]}$

Steg ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 31,65 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 1,06$
 $\chi_p = 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 0,75$
 $b_{eff} = 359,09 \text{ [mm]}$

$A_{br} = 156,00 \text{ [cm}^2\text{]} \rightarrow A_{c,eff} = 131,82 \text{ [cm}^2\text{]}$

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{0,42258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1 \quad F = 1107,37 \text{ [kN]}$

• Effektiver Querschnitt nach Eurocode (M_y alleine):

Flansch ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 90,37 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \text{ mit } k_{\sigma} = 4,00$
 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,63$
 $\chi_p = 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p \leq 0,673$
 $\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi)\right) \leq 1 \text{ f\u00fcr } \bar{\lambda}_p > 0,673 \rightarrow \chi_p = 1,00$
 $b_{eff} = 300,00 \text{ [mm]} \quad b_{e1} = 150,00 \text{ [mm]}$
 $b_{e2} = 150,00 \text{ [mm]}$

$$\text{Steg } (\psi = -1): \quad \sigma_{cr} = 190000 * \left(\frac{t}{c}\right)^2 * k_{\sigma} = 189,13 \text{ [kN/cm}^2\text{]} \quad \text{mit } k_{\sigma} = 23,90$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,43$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 1,00$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite	b _{eff,ver.} = 240,00 [mm]	b _{e1} = 96,00 [mm]
veränderlicher Verlauf:	b _c = 240,00 [mm]	b _{e2} = 144,00 [mm]
	b _t = 240,00 [mm]	

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	1,00	15,00	-24,50	15,00	-367,50	9003,75	1,25
2	1,00	15,00	-24,50	15,00	-367,50	9003,75	1,25
3	9,60	1,00	-19,20	9,60	-184,32	3538,94	73,73
4	9,60	1,00	-19,20	9,60	-184,32	3538,94	73,73
5	38,40	1,00	4,80	38,40	184,32	884,74	4718,59
6	38,40	1,00	4,80	38,40	184,32	884,74	4718,59
7	1,00	30,00	24,50	30,00	735,00	18007,50	2,50
Σ=				156,00	0,00	44862,36	9589,64

M _{pl} = 930,81 [kNm]	z _s = 0,00 [cm]
W _{pl} = 2622,00 [cm ³]	I _{y,eff,ver.} = 54452,00 [cm ⁴]
I _y = 54452,00 [cm ⁴]	W _{y,eff,ver.} = 2178,08 [cm ³]
W _{el} = 2178,08 [cm ³]	
α _{pl} = 1,20	

maßgebende Klasse = Klasse 4	W _{verw} = W _{y,eff} = 2178,08 [cm ³]
	A _{c,eff,konst.} = 131,82 [cm ²]

$$F \text{ starres Fachw: } \frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,07425 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1 \quad F = 1000,93 \text{ [kN]}$$

• Effektiver Querschnitt auf Basis der LBA Analyse des Gesamtsystems:

N _{EW,Steg,UG} = 6689,06 [kN]	N _{EW,Flansch,UG} = 7823,70 [kN]
--	---

$$\text{Flansch } (\psi = +1): \quad \sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Flansch,UG}}{A} = 50,15 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,84$$

$$\chi_p = 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,88$$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

effektive Breite bei konst. Verlauf:	b _{eff,konst.} = 263,33 [mm]	b _{e1} = 131,67 [mm]
		b _{e2} = 131,67 [mm]

Steg ($\psi = +1$): $\sigma_{cr} = \frac{N_{EW,Steg,UG}}{A_{QS}} = 42,88 \text{ [kN/cm}^2\text{]}$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 0,91$$

$\chi_p = 1$ für $\bar{\lambda}_p \leq 0,673$

$$\chi_p = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left(1 - \frac{0,055}{\bar{\lambda}_p} (3 + \psi) \right) \leq 1 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rightarrow \quad \chi_p = 0,83$$

effektive Breite bei $b_{eff,konst.} = 399,98 \text{ [mm]}$ $b_{e1} = 199,99 \text{ [mm]}$
 konst. Verlauf: $b_{e2} = 199,99 \text{ [mm]}$

	h [cm]	b [cm]	e _z [cm]	A [cm ²]	Ae _z [cm ³]	Ae _z ² [cm ⁴]	I _y * [cm ⁴]
1	1,00	13,17	-24,50	13,17	-322,59	7903,33	1,10
2	1,00	13,17	-24,50	13,17	-322,59	7903,33	1,10
3	20,00	1,00	-14,00	20,00	-280,00	3920,08	666,57
4	20,00	1,00	-14,00	20,00	-280,00	3920,08	666,57
5	20,00	1,00	14,00	20,00	280,00	3920,08	666,57
6	20,00	1,00	14,00	20,00	280,00	3920,08	666,57
7	1,00	13,17	24,50	13,17	322,59	7903,33	1,10
8	1,00	13,17	24,50	13,17	322,59	7903,33	1,10
Σ=				132,66	0,00	47293,65	2670,69

M_{pl}= 930,81 [kNm] z_s= 0,00 [cm]

W_{pl}= 2622,00 [cm³] I_{y,eff,konst.}= 49964,34 [cm⁴]

I_y= 54452,00 [cm⁴] W_{y,eff,konst.}= 1998,57 [cm³]

W_{el}= 2178,08 [cm³]

α_{pl}= 1,20

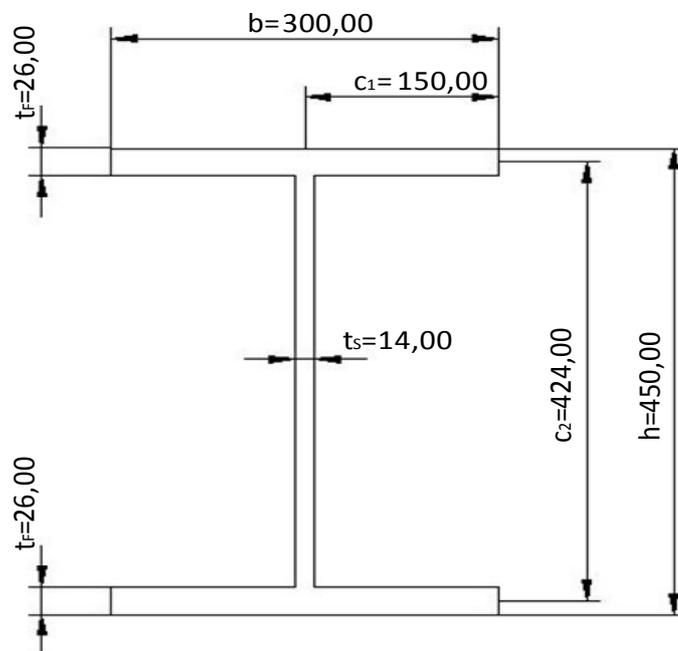
maßgebende Klasse= Klasse 4 W_{verw}= W_{y,eff}= 1998,57 [cm³]
A_{c,eff,konst.}= 132,66 [cm²]

F gelenkiges Fachw.: $\frac{N_{UG}}{A_{c,eff} * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} \leq 1$ F= 1114,47 [kN]

F starres Fachw.: $\frac{N}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{M}{W * f_y} = \frac{4,2258 * F}{A_{c,eff} * f_y} + \frac{0,07425 * F}{W_{verw} * f_y} \leq 1$ F= 998,06 [kN]

9.8 Schlankheit und Abminderungsfaktor des I-Profiles

9.8.1 $t_s=14$ [mm], $t_f=26$ [mm] und $h=450$ [mm]



t_s	14,00 [mm]
t_f	26,00 [mm]
h	450,00 [mm]
b_{Breite}	300,00 [mm]
A	211,72 [cm ²]

f_y	355,00 [N/mm ²]
$L_{cr,y}$	3125,00 [mm]
$L_{cr,z}$	3125,00 [mm]
I_y	77555,75 [cm ⁴]
I_z	11709,10 [cm ⁴]

Druckkraft:

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 19,14 \quad [\text{cm}]$$

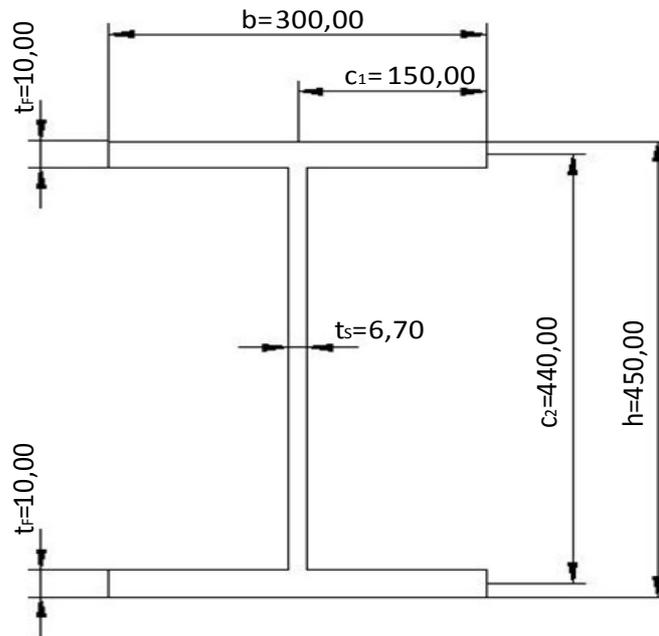
$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,81$$

$$\lambda_1 = 93,9 * \varepsilon = 76,40$$

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y * \lambda_1} = 0,21$$

$$\phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 0,53$$

Abminderungsfaktor -> $\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 + \lambda^2}} \leq 1 \rightarrow \chi = 0,9951$

9.8.2 $t_s=14$ [mm], $t_f=26$ [mm] und $h=450$ [mm]

$t_s = 6,70$ [mm]
 $t_f = 10,00$ [mm]
 $h = 450,00$ [mm]
 $b_{\text{Breite}} = 300,00$ [mm]

$f_y = 355,00$ [N/mm²]
 $L_{cr,y} = 3125,00$ [mm]

$A = 88,81$ [cm²]

gewählte Knicklinie= b -> $\alpha = 0,34$
 $I_y = 33484,14$ [cm⁴]

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{33484,14}{88,81}} = 19,42 \quad [\text{cm}]$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

$$\lambda_1 = 93,9 * \varepsilon = 93,9 * 0,81 = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y * \lambda_1} = \frac{3125}{1942,00 * 76,40} = 0,21$$

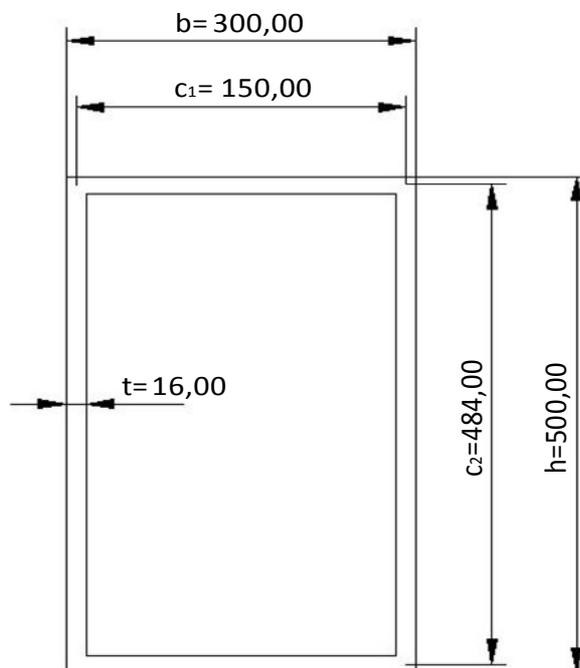
$$\phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] =$$

$$\phi = 0,5 * [1 + 0,34 * (0,21 - 0,2) + 0,21^2] = 0,52$$

Abminderungsfaktor -> $\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 + \bar{\lambda}^2}} \leq 1 \rightarrow$

9.9 Schlankheit und Abminderungsfaktor des Hohlprofiles

9.9.1 $t=16$ [mm] und $h=500$ [mm]



$t = 16,00$ [mm]
 $h = 500,00$ [mm]
 $b_{\text{Breite}} = 300,00$ [mm]

$f_y = 355,00$ [N/mm²]
 $L_{cr,y} = 3125,00$ [mm]
 $L_{cr,z} = 3125,00$ [mm]

$A = 245,76$ [cm²]

$I_y = 83576,12$ [cm⁴]
 $I_z = 59617,08$ [cm⁴]

Druckkraft:

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 18,44 \quad [\text{cm}]$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,81$$

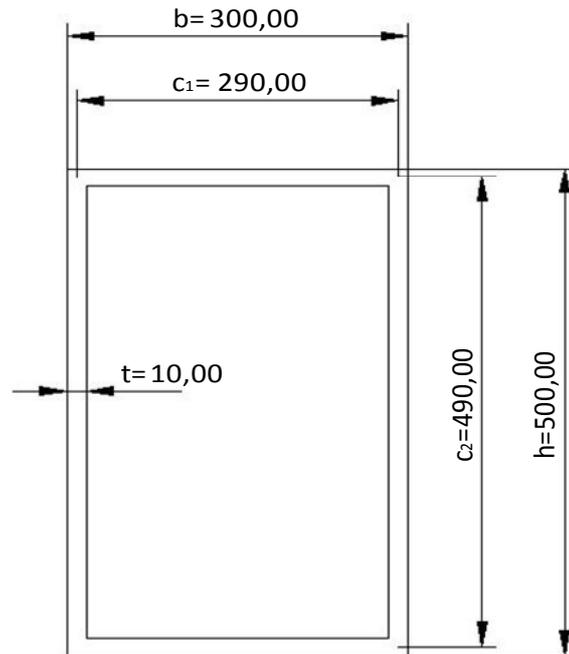
$$\lambda_1 = 93,9 * \varepsilon = 76,40$$

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y * \lambda_1} = 0,22$$

$$\phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 0,53$$

Abminderungsfaktor -> $\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 + \lambda^2}} \leq 1 \rightarrow \chi = 0,9923$

9.9.2 t=10 [mm] h=500 [mm]



t=	10,00 [mm]	$f_y =$	355,00 [N/mm ²]
h=	500,00 [mm]	$L_{cr,y} =$	3125,00 [mm]
$b_{Breite} =$	300,00 [mm]	gewählte Knicklinie=	c -> $\alpha = 0,49$
A=	108,00 [cm ²]	$I_y =$	54452,00 [cm ⁴]

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{54452,00}{108,00}} = 22,45 \quad [\text{cm}]$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

$$\lambda_1 = 93,9 * \varepsilon = 93,9 * 0,81 = 76,40$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y * \lambda_1} = \frac{3125}{2245,00 * 76,40} = 0,18$$

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

$$\phi = 0,5 * [1 + 0,49 * (0,18 - 0,2) + 0,18^2] = 0,51$$

Abminderungsfaktor ->
$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 + \bar{\lambda}^2}} \leq 1 \rightarrow$$